Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.

Forschungsbericht Nr. 44

Sicherheit an Bahnübergängen

Sebastian Hantschel
Christoph Hoefert
Bernhard Kollmus
Maria Pohle
Eric Schöne
Jean Emmanuel Bakaba
Jörg Ortlepp

Unfallforschung der Versicherer
GDV

Sicherheit an Bahnübergängen

Dipl.-Ing. Sebastian Hantschel
Dipl.-Ing. Christoph Hoefert
Dipl.-Ing. Bernhard Kollmus
Dipl.-Ing. Maria Pohle
Dr.-Ing. Eric Schöne
Dr.-Ing. Jean Emmanuel Bakaba
Dipl.-Ing. Jörg Ortlepp

Unfallforschung der Versicherer
GDV

Impressum

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.
Unfallforschung der Versicherer

Wilhelmstraße 43/43G, 10117 Berlin
Postfach 08 02 64, 10002 Berlin
E-Mail: unfallforschung@gdv.de
Internet: www.udv.de
Facebook: www.facebook.com/unfallforschung
Twitter: @unfallforschung
YouTube: www.youtube.com/unfallforschung

ISBN-Nr.: 978-3-939163-72-5
Redaktion: Dr.-Ing. Jean Emmanuel Bakaba
Erschienen: 12/2016

Im Auftrag der Unfallforschung der Versicherer (UDV)

Sicherheit an Bahnübergängen

Abschlussbericht

Bearbeitet durch

CERSS
KOMPETENZ ZENTRUM BAHNSICHERUNGS TECHNIK

unter Beteiligung von

GWT forschung+innovation

Autoren

Sebastian Hantschel
Christoph Hoefert
Bernhard Kollmus
Maria Pohle
Dr. Eric Schöne

Bei der UDV betreut von

Dr. Jean Emmanuel Bakaba
Jörg Ortlepp

Stand: 21.07.2016

Inhalt

Inhalt ..... **I**
1. Einleitung **1**
1.1 Ausgangssituation 1
1.2 Zielstellung 2
1.3 Vorgehen 2
2. Forschungsstand **3**
2.1 Einleitung 3
2.2 Deutschland 3
2.3 Europäisches Ausland 7
2.4 Nordamerika 11
2.5 Asien und Australien 14
2.6 Schlussfolgerungen 17
3. Methodik **21**
3.1 Quantitatives Modell 21
3.2 Qualitatives Modell 24
4. Daten **27**
4.1 Erfassung der Daten für das quantitative Modell 27
4.1.1. Infrastrukturdaten Bahn 27
4.1.2. Infrastrukturdaten Straße 27
4.1.3. Unfalldaten 28
4.2 Umfang der Daten für das quantitative Modell 30
4.2.1. Infrastrukturdaten 30
4.2.2. Unfalldaten 33
4.3 Auswertung der Daten für das quantitative Modell 36
4.3.1. Datengrundlage 36
4.3.2. Infrastruktur- und Unfalldaten Bahn 37
4.3.3. Infrastrukturdaten Straße 49
4.3.4. Unfalldaten der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes 56
4.4 GDV-Unfalldaten 62
5. Modell zur Abschätzung des Unfallgeschehens **65**
5.1 Quantitatives Modell 65
5.1.1. Datengrundlage 65
5.1.2. Innere Abhängigkeiten zwischen infrastrukturseitigen Einflussgrößen 67
5.1.3. Ergebnisse 71
5.2 Qualitatives Modell 80
5.2.1. Einflussfaktoren im Entscheidungsbereich 80

5.2.2. Einflussfaktoren im Räumungsbereich ... 84
5.2.3. Schadensausmaß (Schöne, 2013, S. 103ff und S. 118) ... 87
5.2.4. Sensitivitätsanalyse und Schlussfolgerungen (Schöne, 2013, S. 143ff) ... 87
5.2.5. Modellaufbau ... 88
5.2.6. Punktwerte ... 90
5.2.7. Berechnungen von Beispiel-Szenarien ... 98
6. Maßnahmen zur Risikoreduktion ... 101
6.1 Allgemeines ... 101
6.2 Entscheidungsbereich ... 101
6.2.1. Sicherungsarten ... 102
6.2.2. Maßnahmen zur Erhöhung der Wahrnehmbarkeit ... 102
6.2.3. Maßnahmen zur Sanktionierung & baulichen Trennung der Richtungsfahrstreifen ... 105
6.3 Räumungsbereich ... 105
6.4 Empfehlungen ... 105
7. Bewertungsverfahren ... 108
7.1 Ablauf ... 108
7.2 Anwendungsbeispiel ... 111
8. Empfehlungen für Regelwerke und Rechtsnormen ... 114
8.1 Eisenbahn ... 114
8.1.1. Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) ... 114
8.1.2. Richtlinie „Bahnübergänge planen und instand halten“ (DB-Richtlinie 815) ... 115
8.2 Straße ... 117
8.2.1. Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) ... 117
8.2.2. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO) ... 117
8.2.3. Technische Regelwerke Straße ... 118
9. Zusammenfassung und Ausblick ... 119
9.1 Zusammenfassung ... 119
9.2 Ausblick ... 121
9.2.1. Eigene Forschung ... 121
9.2.2. Sonstiges ... 122
10. Summary ... 123
Literaturverzeichnis ... 125
Abbildungsverzeichnis ... 135
Tabellenverzeichnis ... 137
Anlagen ... 139

1. Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Bahnübergänge bilden besondere Kreuzungssituationen, an denen sich zwei Verkehrssysteme mit unterschiedlichen Eigenschaften und Sicherheitsphilosophien begegnen. Während im Straßenverkehr das menschliche Verhalten als wesentlicher Sicherheitsfaktor zu betrachten ist, wird die Sicherheit im Eisenbahnverkehr überwiegend durch technische Systeme gewährleistet. Diese Herangehensweisen treffen am Bahnübergang aufeinander, wodurch Konflikte entstehen können: So gilt die für die Straßenverkehrssicherheit elementare Verhaltensregel der gegenseitigen Rücksichtnahme am Bahnübergang nur sehr eingeschränkt, da eine Abwendung drohender Unfälle durch beteiligte Personen seitens des Eisenbahnverkehrs nahezu ausgeschlossen ist.

Im Unfallgeschehen des Straßenverkehrs stellen Bahnübergangsunfälle mit weniger als 0,03 % zahlenmäßig zwar nur einen sehr geringen Anteil dar, weisen jedoch mit über 1 % Anteil der im Straßenverkehr Getöteten eine überproportionale Unfallschwere auf (Statistisches Bundesamt, 2012a). Die Personenschäden bei solchen Unfällen treten zum deutlich überwiegenden Teil bei den Straßenverkehrsteilnehmern auf.

Bezogen auf den Eisenbahnverkehr bilden Bahnübergänge einen Schwerpunkt im Unfallgeschehen: Zwischen 30 % und 40 % aller Unfälle mit Personenschäden im Eisenbahnverkehr ereignen sich an Bahnübergängen (Statistisches Bundesamt, 2012b).

In Verbindung mit der noch immer großen Anzahl Bahnübergänge - allein rund 20 000 bei der Deutschen Bahn (DB Netz, 2011) - führt dies zu einer hohen Relevanz des Themenbereichs der Bahnübergangssicherheit sowohl für den Straßen- als auch für den Schienenverkehr.

In Deutschland sind Ursachen und Einflussfaktoren von Bahnübergangsunfällen bisher kaum untersucht. Seitens der Bahnbetreiber endet die Ursachenanalyse meist mit der Feststellung „Fehlverhalten der Straßenverkehrsteilnehmer“, die bei rund 95 % der Unfälle identifiziert wird (DB Netz, 2011). Diese ausschließlich juristische Sichtweise leistet jedoch keinen Beitrag zur Sicherheitsarbeit.

Deutsche wissenschaftliche Arbeiten zum Thema sind größtenteils mehr als 20 Jahre alt. Im Ausland wurden hingegen in jüngerer Zeit umfangreiche Studien zur Bahnübergangssicherheit durchgeführt (vgl. Internationaler Eisenbahnverband, 2005 und Australian Transport Safety Bureau, 2001). So sind Risikomodelle unter anderem bekannt aus:

- USA mit zahlreichen Risikoformeln und -modellen seit den 1940-er Jahren,
- Israel mit einem statistikbasierten Gefährdungsindex (1997),
- Australien mit einem semi-quantitativen Risikomodell (2002),
- Ungarn mit einem Punktesystem für Risiken (2004),
- Südkorea mit einem statistikbasierten Risikomodell (2006),
- Portugal mit einem semi-quantitativen Risikomodell (2010),
- Österreich mit einem statistikbasierten Risikomodell (2012).

Eine unmittelbare Übertragung ausländischer Risikomodelle auf Deutschland ist kaum möglich, allerdings können grundlegende methodische Erkenntnisse genutzt werden.

Schließlich sind die Rechtsnormen und Regelwerke zur Gestaltung von Bahnübergängen in Deutschland bisher nur in geringem Maße risikoorientiert. Die betreffenden Vorgaben der

Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung sind seit 1967 bis heute nahezu unverändert geblieben (vgl. EBO 1967 und 2008), obwohl sich die Verhältnisse im Schienen- und Straßenverkehr seither deutlich gewandelt haben. Außerdem unterscheiden sich die nachgeordneten Regelwerke je nach Eigentumsverhältnissen der Eisenbahninfrastruktur, was der Verkehrssicherheit nicht förderlich ist (vgl. Schöne, 2011a).

1.2 Zielstellung

Ausgehend von der geschilderten Situation sollen im Rahmen der vorliegenden wissenschaftlichen Aufgabenstellung die folgenden Fragen beantwortet werden:

Welche Faktoren beeinflussen das Risiko an Bahnübergängen in welchem Maße?
Unfälle an Bahnübergängen sind nicht zufällig verteilt, sondern von verschiedenen Parametern abhängig (Beard und Melo, 2010). Diese sind zu identifizieren und in ein Risikomodell zu integrieren, wobei Eigenschaften des Schienenverkehrs, des Straßenverkehrs und des Bahnübergangs berücksichtigt werden müssen (SELCAT-Arbeitsgruppe, 2008a).

Mit welchen Maßnahmen kann dieses Risiko wie stark beeinflusst werden?
Neben den bestehenden Sicherungsmaßnahmen wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche neuartige Ansätze entwickelt (vgl. Rösiger, 2006 und Federal Railroad Administration, 2001b). Unter Berücksichtigung der Einsatzbedingungen sind die erwarteten Wirkungen auf das Risiko abzuschätzen.

Die wesentliche Aufgabe des Projektes besteht somit in der Erarbeitung eines praktisch handhabbaren Verfahrens zur Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenauswahl an Bahnübergängen.

1.3 Vorgehen

Die prinzipielle Vorgehensweise wird aus Abbildung 1 ersichtlich. Nach Ermittlung der Grundlagen (u. a. Festlegung des Untersuchungsbereichs, Prüfung der Datenquellen) und Recherchen zur Bahnübergangssicherheit in deutsch- und englischsprachiger Literatur erfolgt die Beschaffung der notwendigen Daten. Die nächsten Schritte bestehen in der Entwicklung eines quantitativen und eines qualitativen Risikomodells. Zu den so ermittelten Risiken wird anschließend ein Katalog geeigneter Sicherheitsmaßnahmen erarbeitet, welcher auch die Basis für eine spätere Nutzen-Kosten-Bewertung darstellt. Im letzten Schritt der Untersuchung wird ein Bewertungsverfahren abgeleitet, das eine Entscheidungsfindung für Einzelfälle unterstützt.

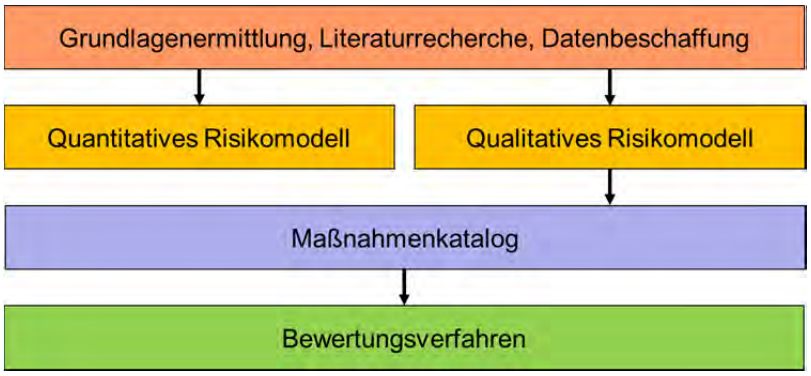


Abbildung 1: Vorgehen

2. Forschungsstand

2.1 Einleitung

In den folgenden Unterabschnitten erfolgt eine Auswertung der deutsch- und englisch-sprachigen Literatur zu Modellen und Grundsätzen der risikoorientierten Gestaltung von Bahnübergängen. Die Auswertung, die aus Schöne (2013) übernommen wurde, ist wie folgt nach Regionen gegliedert:

- Deutschland,
- europäisches Ausland,
- Nordamerika,
- Asien und Australien.

Umfassende Untersuchungen zum Einfluss der Gestaltung von Bahnübergängen auf das Risiko und damit auf die Sicherheit wurden in Deutschland bisher nur selten durchgeführt. Die Quellenlage im Ausland zeigt hingegen eine Vielzahl umfangreicher wissenschaftlicher Untersuchungen zur Sicherheit an Bahnübergängen, auch zu einzelnen Wirkungszusammenhängen und Maßnahmen. Nachfolgend werden die Untersuchungen vorgestellt, die sich mit der Sicherheitsbeurteilung des Bahnübergangs als Gesamtsystem und insbesondere mit Risikomodellen im engeren Sinne befassen.

2.2 Deutschland

Heilmann (1984) untersuchte umfassend die Wirksamkeit der Sicherung von Bahnübergängen und entwickelte dabei ein Berechnungsverfahren zur Abschätzung der zu erwartenden Unfallzahlen. Der Schwerpunkt lag auf dem Verhalten der Straßenverkehrsteilnehmer bei den verschiedenen etablierten Sicherungsarten. Es wurden jedoch auch Erkenntnisse erzielt, die den Bahnübergang als Gesamtsystem betreffen:

- Beobachtete Verstöße wurden in fast allen Fällen als bewusstes Fehlverhalten identifiziert und traten trotz ausreichender Erkennbarkeit der Bahnübergänge auf.
- Bei bewusstem Fehlverhalten hielten die Straßenverkehrsteilnehmer vor dem Überqueren der Gleise meist Ausschau nach Zügen.
- Fußgänger und Radfahrer verhielten sich deutlich häufiger falsch als Kraftfahrer. In der Nähe von Haltepunkten war das Fehlverhalten von Fußgängern besonders ausgeprägt.
- Bei der Sicherung durch Übersicht auf die Bahnstrecke sollten Bahnübergänge rechtwinklig sein, weil dadurch sich nähernde Schienenfahrzeuge aus beiden Seiten im Gesichtsfeld des Straßenverkehrsteilnehmers wahrgenommen werden können.
- Eine Sicherung von Bahnübergängen mit Kraftfahrzeugverkehr allein durch hörbare Signale der Schienenfahrzeuge wurde als bedenklich eingestuft. Messungen ergaben, dass die Pfeifsignale im fahrenden Fahrzeug je nach Schallpegel des Pfeifsignals bei geschlossenen Fenstern nicht oder nur zufällig wahrgenommen werden konnten.
- Auch wenn die Übersicht auf die Bahnstrecke nicht vollständig vorhanden ist, ermöglicht eine Restübersicht das Abwenden von Unfällen. Bei noch stärker eingeschränkter Sicht sollte der Einsatz von Stoppschildern erwogen werden.

Der mathematische Ansatz weist Parallelen zu heutigen Risikoanalyseverfahren auf. Allerdings wurde das straßenverkehrliche Umfeld der Bahnübergänge nicht näher betrachtet, sodass beispielsweise die quantitativen Angaben zum Fehlverhalten der Straßenverkehrsteilnehmer nicht ohne weiteres auf einen konkreten Bahnübergang angewendet werden können.

Im Auftrag der Deutschen Bundesbahn wurde durch Basler und Partner (1986) eine umfangreiche Studie zu Sicherheitsanforderungen an Bahnübergängen erarbeitet. Ziel war die Schaffung einer Entscheidungsgrundlage für die sicherheitsorientierte Sanierung von Übergängen. Verschiedene Maßnahmen wurden hinsichtlich Risikoreduktion und Kosten betrachtet. Als Datenbasis dienten allgemeine statistische Angaben zu rund 1 000 Unfällen der Jahre 1982 bis 1984 sowie eine nicht näher spezifizierte Anzahl ausführlicherer Unfallberichte aus dem Jahr 1983. Auf der gewählten Abstraktionsebene fand allerdings keine Unterscheidung nach Art der Straßenverkehrsteilnahme statt (Fußgänger, Kraftfahrer usw.); ebenso wenig wurden über die Sicherungsart hinausgehende Gestaltungsmerkmale betrachtet. Wesentliche Erkenntnisse waren:

- Für die Definition von Sicherheitsanforderungen an Bahnübergängen wird in der Regel das kollektive Risiko maßgebend. Nur in wenigen Einzelfällen, wenn Personen mehrmals am Tag einen Bahnübergang queren, wird das individuelle Risiko relevant.
- Unter Berücksichtigung von Aversionsfaktoren gegenüber Groß- und Mehrfachunfällen ist das empfundene Risiko rund dreimal so groß wie das tatsächliche kollektive Risiko.
- Durch eine bloße Umlagerung der jährlichen für Bahnübergangsmaßnahmen anfallenden Kosten kann eine Risikoreduktion um 90 % erreicht werden.
- Die optimale Maßnahmenkombination setzt sich aus einer Vielzahl einzelner Maßnahmen zusammen, die von der jeweiligen Ausgangssituation abhängen.

Von wenigen Ausnahmen abgesehen beziehen sich nahezu alle untersuchten Maßnahmen auf die Sicherungsarten unmittelbar am Bahnübergang. Aspekte wie Straßenführung und Erkennbarkeit wurden nicht betrachtet. Bei dieser Studie ist kritisch zu bemerken, dass bestimmte grundsätzliche Vorstellungen des Auftraggebers eingeflossen sind und beispielsweise Maßnahmen mit der Begründung *„widerspricht Stoßrichtung DB“* nicht näher untersucht wurden, obwohl diese möglicherweise gerechtfertigt gewesen wären.

Ausgehend von der Feststellung, dass in Deutschland bislang kein umfassendes quantitatives Verfahren zur Beurteilung der Sicherheit von Bahnübergängen existierte, entwickelte Schöne (2013) einen Vorschlag für ein solches Verfahren. Das zugrunde liegende Risikomodell ermöglicht es, aus den Parametern eines einzelnen Bahnübergangs die individuellen Risiken unterschiedlicher Gruppen von Straßenverkehrsteilnehmern sowie das kollektive Risiko des Bahnübergangs abzuschätzen. Zur Bewertung dieser Risiken wurden Vorschläge für Akzeptanzkriterien hergeleitet. Ein weiterer Teil der Untersuchung beschäftigte sich mit der Ermittlung und Bewertung risikoreduzierender Maßnahmen.

Da in Deutschland keine für den vorliegenden Zweck hinreichend detaillierten Statistiken geführt werden und ausländische Risikomodelle nicht ohne weiteres übertragbar sind, entstand das Verfahren vor allem auf Basis umfangreicher Literaturstudien, qualifizierter Schätzungen und ergänzender empirischer Untersuchungen. Anhand einer Plausibilitätsprüfung wurde bestätigt, dass das entwickelte Modell Ergebnisse liefert, die annähernd mit der Realität übereinstimmen. Da eine umfassende Validierung des Modells allerdings noch aussteht, versteht es sich zunächst als Grundgerüst, das mit Hilfe weiterführender Untersuchungen zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen ist. (Schöne, 2013)

Der Neuigkeitswert des Modells – auch vor dem Hintergrund der aus dem Ausland bekannten Ansätze – besteht in der differenzierten Betrachtung nicht nur des einzelnen Bahnübergangs, sondern auch der einzelnen Verkehrsarten und insbesondere der einzelnen zum Bahnübergang hin- und vom Bahnübergang wegführenden Verkehrsströme. Dadurch wird der Erkenntnis Rechnung getragen, dass sich die spezifischen Eigenschaften der Straßenverkehrsteilnehmer sowie der von ihnen genutzten Zu- und Abflusswege auf die Sicherheit auswirken können.

Das entwickelte Verfahren zur Sicherheitsbeurteilung von Bahnübergängen setzt sich konkret aus drei aufeinander aufbauenden Hauptteilen zusammen:

- Analyse der Risiken durch Ermittlung und Berechnung der Einflussfaktoren,
- Bewertung der Risiken durch Vergleich mit festgelegten Akzeptanzkriterien,
- Beherrschung der Risiken durch Auswahl und Implementierung von Maßnahmen.

Den aufwändigsten Teil stellt die Risikoanalyse dar, da sie eine differenzierte Erhebung oder Schätzung zahlreicher Daten des Bahnübergangs erfordert. Sie enthält im Kern die aus der Sicherheitswissenschaft bekannte Risikoformel, nach der sich das Risiko als Produkt aus der Häufigkeit eines unerwünschten Ereignisses und dem dabei zu erwartenden Schadensausmaß ergibt.
Als unerwünschtes Ereignis gilt hier der Zusammenprall, also eine Kollision zwischen einem Schienenfahrzeug und einem Straßenverkehrsteilnehmer auf einem Bahnübergang. Das Schadensausmaß wird in Form gewichteter Personenschäden ausgedrückt.

Die Häufigkeit eines Zusammenpralls zerfällt wiederum in mehrere Faktoren:

- Häufigkeit, mit der sich Schienenfahrzeuge und Straßenverkehrsteilnehmer innerhalb eines bestimmten Betrachtungszeitraums gleichzeitig dem Bahnübergang nähern und somit potenziell einer gefährlichen Situation ausgesetzt sind (Aussetzung),
- Wahrscheinlichkeit, mit der bei bestehender Aussetzung die vorgesehenen sicherheitsrelevanten Handlungen durch die Straßenverkehrsteilnehmer absichtlich oder unbeabsichtigt unterlassen werden dadurch ein Zusammenprall droht (Gefährdung),
- Wahrscheinlichkeit, mit der bei bestehender Gefährdung eine Abwendung des unmittelbar bevorstehenden Zusammenpralls durch eine Notreaktion der Beteiligten nicht mehr möglich ist (Unabwendbarkeit).

Neben der Unterscheidung in absichtliche und unbeabsichtigte Handlungen der Straßenverkehrsteilnehmer sind auch die Entstehungsbereiche der Risiken (Entscheidungsbereich vor dem Bahnübergang, Räumungsbereich hinter dem Bahnübergang) zu trennen, da jeweils spezifische Wirkungszusammenhänge und Einflussfaktoren gelten. Das resultierende Risikomodell ist in Abbildung 2 überblicksartig dargestellt.

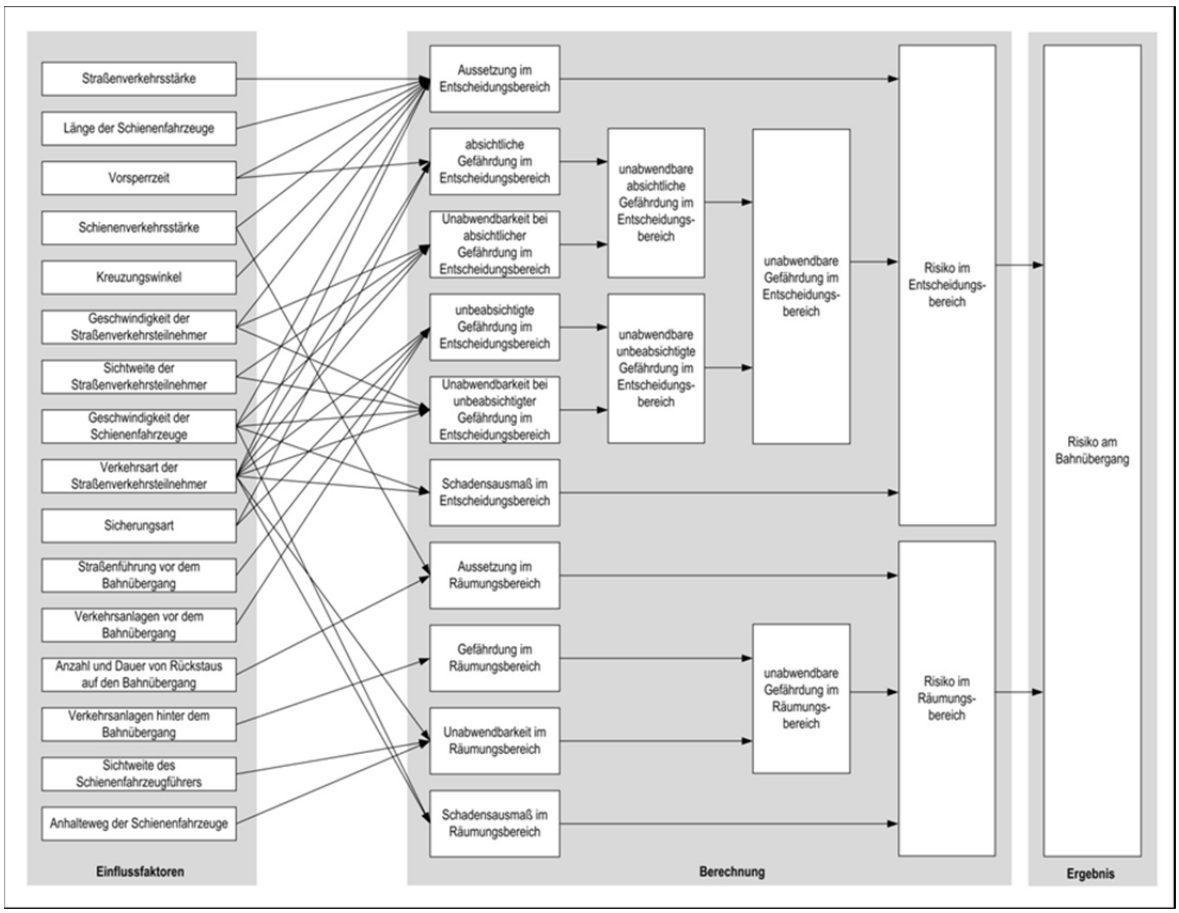


Abbildung 2: Aufbau des Modells für die Risikoanalyse (Quelle: Schöne, 2013)

Als stärkste Einflussfaktoren auf das Risiko ergaben sich aus einer Sensitivitätsanalyse:

- Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge,
- Verkehrsart der Straßenverkehrsteilnehmer,
- Straßenverkehrsstärke,
- Sicherungsart,
- Sichtverhältnisse vor dem und unmittelbar am Bahnübergang,
- Anzahl und Dauer von Rückstaus hinter dem Bahnübergang,
- Erkennbarkeit der Verkehrssituation hinter dem Bahnübergang.

Um die Sicherheit bewerten zu können, müssen die ermittelten Risiken mit Akzeptanzkriterien verglichen werden. Da in Deutschland bisher keine allgemein anerkannten Grenzwerte existieren, wurden von Schöne (2013) aus Statistiken und ausländischen Ansätzen erste Vorschläge für solche Werte abgeleitet. Sie untergliedern sich in zwingend einzuhaltende Zulässigkeitsgrenzwerte und langfristig anzustrebende Zielgrenzwerte.

Abhängig vom Ergebnis der Risikobewertung sind Maßnahmen zu Risikobeherrschung zu treffen. Diese sollten vorzugsweise in der direkten Veränderung der bei der Risikoanalyse ermittelten Einflussfaktoren – insbesondere Anpassung der Sicherungsart oder Beseitigung problematischer Verkehrsanlagen – bestehen. Die Risikobeherrschung kann jedoch abhängig von den örtlichen Verhältnissen auch zusätzliche bauliche oder technische Maßnahmen umfassen.

Beispiele für Maßnahmen mit einer besonders starken Risikoreduzierung sind:

- bauliche Trennung der Richtungsfahrstreifen durch Fahrbahnteiler oder Separatoren zur Reduzierung des Umfahrens von Halbschranken,

- Einsatz von Rotlichtkameras zur Reduzierung absichtlicher Missachtungen von Lichtsignalen oder Halbschranken,
- Einsatz technischer Gefahrenraumfreimeldeanlagen zum Ausschluss gefährlicher Auswirkungen von Rückstaus hinter dem Bahnübergang.

Aus den erzielten Erkenntnissen wurden Empfehlungen zur Weiterentwicklung der Regelwerke abgeleitet. Hierzu gehört die Forderung nach einer stärkeren Risikoorientierung der Gestaltungsregeln, die insbesondere die aufgezeigten Einflussfaktoren berücksichtigen müssen.

2.3 Europäisches Ausland

Eine umfassende Studie zur Sicherheit der Bahnübergänge in Schweden legte Shahriari (1993) vor. Er untersuchte und entwickelte verschiedene Methoden zur Beurteilung der Sicherheit. Verhaltensbeobachtungen an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen bewertete er insbesondere wegen des geringen Verkehrsaufkommens und der Unsicherheiten bei der Interpretation des beobachteten Verhaltens als wenig praktikabel. Eine geeignete Alternative wurde in Simulationsprogrammen gesehen, mit denen verschiedene Formen von Bahnübergängen untersucht werden können. Risikoanalysen auf Basis von Unfalldaten mit Anwendung von Fehlerbäumen wurden ebenfalls als effektiv bezeichnet, sofern ausreichend Parameter verfügbar sind und die Analyse auf einer sehr detaillierten Ebene erfolgt. Bei der beispielhaften Anwendung einiger der Methoden auf schwedische Bahnübergänge ergaben sich folgende Erkenntnisse:

- Die Unfallhäufigkeit hängt stark von der Lage vorhandener Sichthindernisse und der Geschwindigkeit der Straßenfahrzeuge ab.
- Bei starker Sichteinschränkung sollten Kraftfahrzeuge unmittelbar vor dem Bahnübergang anhalten. Für lange Straßenfahrzeuge mit geringer Anfahrbeschleunigung kann ein Halt in größerem Abstand sinnvoll sein, um einen „fliegenden Start“ zu erreichen.
- Eine höhere Bremsverzögerung der Schienenfahrzeuge in Verbindung mit einer weiten Sicht des Schienenfahrzeugführers auf den Bahnübergang kann Zusammenpralle vermeiden oder ihre Konsequenzen vermindern.
- Sonnenblendung von vorn oder von hinten ist bei Bahnübergängen mit Blinklichtern in Schweden eine der Hauptunfallursachen (tiefstehende Sonne).
- Die Straßengeometrie kann sich gefährlich auswirken, wobei sowohl vor als auch hinter dem Bahnübergang liegende Kurven oder Längsneigungen relevant sind.
- Eine unzureichende Straßenbreite ist ebenfalls gefährlich, weil Straßenverkehrsteilnehmer dann gleichzeitig auf andere Straßenfahrzeuge, auf den Bahnübergang, auf sich nähernde Züge und auf die Straßengeometrie achten müssen.

Darüber hinaus betrachtete Shahriari auch die eisenbahnseitigen Möglichkeiten zur Unfallfolgenminderung, wobei der ungünstigste Fall eines Zusammenpralls zwischen einem leichten Triebwagen und einem stehenden schweren Lkw herangezogen wurde. Sofern der Triebwagen mit Deformationszonen von 1,5 m an jedem Ende ausgerüstet ist und die Aufprallgeschwindigkeit unter 70 km/h liegt, sind zufriedenstellende Überlebenschancen für die Insassen zu erreichen. Dies ist zum Beispiel dann der Fall, wenn für den Schienenfahrzeugführer bei 130 bis 140 km/h eine Sicht von über 200 m auf den Bahnübergang besteht und der Triebwagen eine Schnellbremsverzögerung von 3,5 m/s² erreicht.

Mit dem Ziel einer volkswirtschaftlichen Bewertung von Unfallkosten an Bahnübergängen entwickelte Lindberg (2002) ein Risikomodell für Schweden auf Basis von Statistiken. Aus einer Reihe verfügbarer Merkmale (darunter auch Geschwindigkeiten der Schienen- und

Straßenfahrzeuge sowie Straßenbreite) wurden letztlich nur folgende Eigenschaften von Bahnübergängen als signifikant identifiziert:

- Schienenverkehrsstärke,
- Straßenverkehrsstärke,
- Lage in Stadtgebieten,
- Sicherungsart.

Marx, Skoric und Lösch (2000 und 2003) untersuchten österreichische Unfallhäufungsstellen mit mehr als zwei Zusammenprallen. Ziel war eine Reihung nach Dringlichkeit der Sanierung, in der Regel durch Bau einer technischen Sicherung. Hierzu wurden die 54 betreffenden Bahnübergänge nach der auf die Straßenverkehrsstärke normierten Unfallzahl sortiert, die gleichzeitig als einziges Kriterium diente. Weitere Parameter der einzelnen Bahnübergänge wie Kreuzungswinkel, zulässige Geschwindigkeiten usw. wurden zwar erfasst, jedoch nicht ausgewertet.

Aufgrund der anhaltend hohen Zahl von Unfällen an österreichischen Bahnübergängen nahm Zodtl (2005) weitergehende Untersuchungen vor und zog dazu unter anderem die vorangegangenen Studien von Marx, Skoric und Lösch (2000 und 2003) heran. Sie analysierte Unfälle aus dem Zeitraum von 1993 bis 2002 und zog daraus Schlussfolgerungen für die Gestaltung der Bahnübergänge. Dabei wurden auch Aspekte des straßenverkehrlichen Umfeldes betrachtet. Als potenziell gefährliche Einflussfaktoren wurden ermittelt:

- Nähe des Bahnübergangs zu Bahnhöfen,
- Nähe des Bahnübergangs zu Straßenkreuzungen,
- Einmündende Straße neben dem Bahnübergang,
- spitzer Kreuzungswinkel,
- Lage des Bahnübergangs in einer S-Kurve,
- fehlende Ankündigung durch Verkehrszeichen,
- hohes Straßenverkehrsaufkommen.

Allerdings basierte die Zusammenstellung dieser Merkmale nur auf einer groben quantitativen Einschätzung von Eigenschaften der zwanzig Übergänge mit den höchsten Unfallzahlen, ohne dabei den jeweiligen örtlichen Unfallhergang zu berücksichtigen.

Feßl, Robatsch und Stefan (2005) stellten eine weitere österreichische Studie vor. Dabei ermittelten sie das Unfallrisiko der einzelnen Sicherungsarten unter Normierung auf Straßenverkehrsstärke und Zugzahl, die als wesentliche Faktoren bei der Risikobewertung betrachtet wurden. Allerdings flossen nur Unfälle mit Personenschäden in die Untersuchung ein. Überraschend ist dabei die etwa gleich große relative Unfallhäufigkeit bei Bahnübergängen mit Lichtzeichen und bei Bahnübergängen mit Halbschranken, für die keine Erklärung geliefert wurde, die aber möglicherweise mit dem unterschiedlichen Fußgängerverkehrsanteil zusammenhängt. Weiterhin wurde das Schadensausmaß bei den einzelnen Beteiligungsarten analysiert. Eine über die Sicherungsarten hinausgehende Betrachtung erfolgt nicht. Dies zeigt sich auch in den empfohlenen Maßnahmen, die im Wesentlichen die nur Nachrüstung mit einer technischen Sicherung umfassen.

Griffioen (2004) analysierte Risikofaktoren an niederländischen Bahnübergängen. Er ermittelte jeweils 27 „sichere“ Bahnübergänge (kein Zusammenprall in 14 Jahren) sowie „unsichere“ Bahnübergänge (mindestens zwei Zusammenpralle in 14 Jahren) und untersuchte deren Eigenschaften mittels umfangreicher örtlicher Erhebungen. Dabei konnten nur drei Merkmale als signifikant identifiziert werden:

- Straßenverkehrsstärke,
- Geschwindigkeit der Straßenfahrzeuge,
- Transparenz der straßenverkehrlichen Situation.

Zahlreiche weitere Merkmale wurden als kaum oder nicht signifikant eingestuft. Die Erkenntnisse sind spezifisch für die zugrunde gelegte Stichprobe und nicht direkt auf andere Grundgesamtheiten übertragbar. Die geringe Anzahl signifikanter Merkmale kann aus der Vielzahl verschiedener Ausprägungen der Eigenschaften gegenüber dem vergleichsweise geringen Stichprobenumfang resultieren.

Für Ungarn stellte Mocsári (2004) eine Methode zur Sicherheitsbewertung vor, die nach einem drastischen Anstieg der Unfallzahlen Anfang der 1990er Jahre entwickelt wurde. Auf Basis einer Datenbank mit Bestands- und Unfalldaten und eines Punktesystems entstand eine Rangliste der Bahnübergänge nach ihrem Risiko. Das Punktesystem berücksichtigte folgende Aspekte, geordnet nach Ihrem Wichtungsfaktor:

- Unfallzahlen,
- Hindernisse für den Straßenverkehr,
- Sicherungsart,
- Straßengeometrie,
- Wahrnehmbarkeit des Bahnübergangs,
- Geschwindigkeit auf der Straße,
- Straßensignale (nicht näher spezifiziert).

An den Bahnübergängen mit den höchsten Risiken wurden Verbesserungsmaßnahmen vorgenommen und wiederum evaluiert. Im Ergebnis führte vor allem die Ergänzung der Blinklichtanlagen durch Halbschranken zu einem deutlichen Sicherheitsgewinn, während geänderte Verkehrsvorschriften mit grundsätzlichen Geschwindigkeitsbeschränkungen an Bahnübergängen mangels Beachtung keine signifikante Wirkung zeigten.

Die britische Eisenbahnbehörde Rail Safety & Standards Board (2007) ließ im Rahmen eines Forschungsprogramms die Nutzung von Risikomodellen und Risikobewertungsverfahren bei zwölf ausländischen Eisenbahnen untersuchen, um Erkenntnisse für die Weiterentwicklung der eigenen Modelle zu gewinnen. Die recherchierten Ansätze wurden in vier Gruppen eingeteilt:

- einfache Wenn-Dann-Entscheidungen zur Auswahl von Maßnahmen auf Basis von Tabellen oder Entscheidungsbäumen (keine Modelle im Sinne der Studie),
- Modelle mit einfacher Wichtung der Eingangsparameter,
- Modelle mit komplexer Wichtung der Eingangsparameter,
- Modelle mit Wichtung der Parameter auf Basis statistischer Verfahren.

Es wurde festgestellt, dass die Art des Modells für Bahnübergänge oft den generellen Ansatz des Sicherheitsmanagements im betreffenden Land widerspiegelt. Modelle auf statistischer Basis benötigen umfangreiche Datengrundlagen und werden dementsprechend meist von Ländern mit einer großen Bahnübergangs- und Unfallzahl eingesetzt. Modelle mit komplexer Wichtung sind sehr kompliziert für den Endanwender, da sie viele Eingangsparameter benötigen. Einige Modelle betrachten auch das Schadensausmaß, die übrigen nur das Eintreten eines Zusammenpralls.
Hinsichtlich der berücksichtigten Eigenschaften der Bahnübergänge wurden in der Studie folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Alle untersuchten Modelle beziehen die Straßen- und Schienenverkehrsstärke ein, straßenseitig jedoch meist nur den Kraftfahrzeugverkehr.
- Zuggeschwindigkeit, Sicherungsart, Gleisanzahl und Straßencharakteristika werden von den meisten Modellen betrachtet.
- Weitere Eigenschaften wie die Dauer der Sperrungen, Unfallgeschehen oder die Art der in den Zügen transportierten Güter finden sich nur bei wenigen Modellen.

Im Rahmen des Projektes SELCAT (Safer European Level Crossing Appraisal and Technology) der Europäischen Kommission wurden durch die SELCAT-Arbeitsgruppe (2008a) verschiedene Ansätze zur Risikomodellierung und -bewertung untersucht. Dabei fanden Erfahrungen aus den Mitgliedsstaaten und weiteren Ländern Eingang. Ein wesentliches Ziel bestand in der Entwicklung international vergleichbarer Parameter für die Sicherheit an Bahnübergängen. Als mögliche und geeignete Detaillierungsgrade von Modellen wurden definiert:

- Stufe 0: Unfallzahl und Schadensausmaß in einem Mitgliedsstaat (netzweite Risiken).
- Stufe 1: Risiken nach Sicherungsart (netzweite Risiken),
- Stufe 2: Risiken nach Sicherungsart und Ursachenkategorie (netzweite Risiken),
- Stufe 3: Risiken nach Sicherungsart und detaillierter Ursache (netzweite Risiken),
- Stufe 4: Risiken nach Eigenschaften des einzelnen Bahnübergangs (örtliche Risiken).

Ein prototypisches Modell über alle Stufen zeigte die Umsetzungsmöglichkeiten, offenbarte jedoch auch den erheblichen Datenbedarf, insbesondere in Stufe 4. Verfahren auf statistischer Basis wurden in der Studie die größte Objektivität und Genauigkeit und damit Eignung für ein europäisches Modell zugeschrieben. Grundsätzlich sollten nach den Erkenntnissen der SELCAT-Arbeitsgruppe (2008a) folgende Faktoren berücksichtigt werden:

- Sicherungsart,
- Straßenverkehrsstärke,
- Schienenverkehrsstärke,
- Länge und Breite des Kreuzungsbereichs,
- Himmelsrichtung der Straße (Nord-Süd oder Ost-West),
- Geschwindigkeiten auf Straße und Bahnstrecke,
- Sichtverhältnisse,
- Art der Straßenbefestigung,
- Fehlverhalten der Straßenverkehrsteilnehmer in der Vergangenheit,
- technische Fehler in der Vergangenheit.

Beard und Melo (2010) stellten ein Risikomodell für Portugal vor. Anlass für die Entwicklung war eine im europäischen Vergleich sehr hohe Unfallrate an Bahnübergängen. Dabei flossen die Eigenschaften der rund 1 200 portugiesischen Bahnübergänge sowie Expertenschätzungen in ein komplexes Berechnungsverfahren ein. Mittels eines Softwareprogramms können aus den eingegebenen Eigenschaften die individuellen und kollektiven Risiken sowie die erwartete Unfallzahl berechnet werden. Dabei erfolgt eine Unterscheidung nach Insassen der Schienenfahrzeuge sowie den unterschiedlichen Straßenverkehrsteilnehmern. Folgende Faktoren werden dabei berücksichtigt:

- aufgrund statistischer Signifikanz:
    - Straßenverkehrsstärke,
    - Schienenverkehrsstärke
    - Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge,
    - Kreuzungswinkel,

- aufgrund von Expertenmeinungen:
  - Anzahl der Gleise,
  - Sichtzeit bei Bahnübergängen ohne technische Sicherung,
  - Annäherungszeit bei Bahnübergängen mit technischer Sicherung,
  - Abstand zu benachbarten Straßenkreuzungen oder Einmündungen,
  - Kuppen-/Wannenausrundung,
  - Erkennbarkeit des Bahnübergangs bei der Annäherung,
  - niedriger Sonnenstand bei Annäherung an den Bahnübergang,
  - niedriger Sonnenstand bei Überblicken der Bahnstrecke,
  - Geschwindigkeit der Straßenfahrzeuge,
  - vorübergehende Sichtbeeinträchtigungen (zum Beispiel Nebel).

Innerhalb der Untersuchung wurde angemerkt, dass die Eigenschaften der Bahnübergänge und das Verhalten ihrer Benutzer durchaus länderspezifisch sind. Daher können zwar einzelne Erkenntnisse und Tendenzen, jedoch nicht das Modell als solches auf andere Länder übertragen werden.

Ein statistikbasiertes Risikomodell für die Österreichischen Bundesbahnen legten Stefan, Stütz und Machata (2012) vor. Mit dem Modell lässt sich die erwartete Unfallzahl für einen Bahnübergang mit bestimmten Eigenschaften berechnen. Außerdem kann ein Risikoscore unter Einbeziehung des Schadensausmaßes ermittelt werden, um damit eine volkswirtschaftliche Bewertung von Maßnahmen vornehmen zu können. Das Modell setzt sich aus einem multivariaten Teil zur Berechnung des typischen Unfallgeschehens und aus einem Teil zur Berechnung des realen Unfallgeschehens bei bestimmten örtlichen Risikofaktoren zusammen.

Für das multivariate Modell wurden Bestands- und Unfalldaten einer Stichprobe von 350 Bahnübergängen der Jahre 2000 bis 2009 zugrunde gelegt und durch zusätzliche örtliche Erhebungen von nicht in den Datenbanken enthaltenen Parametern ergänzt. Im letztlich gewählten Modell sind folgende als signifikant identifizierte Parameter enthalten:

- Sicherungsart,
- Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge,
- Schienenverkehrsstärke,
- Geschwindigkeit der Straßenfahrzeuge,
- Straßenverkehrsstärke,
- Straßenbreite,
- Entfernung zur nächsten Straßenkreuzung/-einmündung.

Zusätzlich zu den Parametern des multivariaten Modells wird das örtliche Unfallgeschehen über einen Wichtungsfaktor einbezogen. Grundlage sind örtliche Risikofaktoren, die allerdings in der Veröffentlichung nicht dokumentiert wurden.

2.4 Nordamerika

In einer Forschungsarbeit von Berg und Oppenlander (1969) entstand ein mathematisches Modell zur Beurteilung der Sicherheit US-amerikanischer Bahnübergänge in städtischen Gebieten, um auf dessen Basis Verbesserungsmaßnahmen zu priorisieren. Mittels einer Diskriminanzanalyse auf der Basis von jeweils rund 300 Bahnübergängen im Bundesstaat Indiana mit Unfällen und ohne Unfälle im Zeitraum 1963 bis 1964 wurden Merkmale für unfallträchtige und nicht unfallträchtige Übergänge abgeleitet. Durch eine Vorgabe der maximalen zulässigen Wahrscheinlichkeit einer

Einordnung in die unfallträchtige Gruppe konnten dabei auch eine Mindestsicherung von Bahnübergängen abgeleitet werden. Das ermittelte Modell berücksichtigte folgende Faktoren:

- Sichtverhältnisse (ermittelt aus einer Formel mit Geschwindigkeiten auf Bahn und Straße, Kreuzungswinkel und Sichtwinkel),
- Straßenverkehrsstärke,
- Schienenverkehrsstärke,
- Vorhandensein verschiedener Sicherungseinrichtungen,
- Anzahl ablenkender Elemente neben der Straße (Werbetafeln, Hinweisschilder usw.) im Bereich von 150 m vor bis 60 m hinter dem Bahnübergang.

Der Test des Modells an der zugrunde liegenden Stichprobe ergab in 74 % der Fälle eine korrekte Einordnung der Bahnübergänge. Damit ist zwar belegt, dass dieses Modell für die betreffenden Bahnübergänge geeignet ist, allerdings wurde weder die Vollständigkeit der ermittelten Faktoren noch ihre Kausalität zur Unfallentstehung nachgewiesen.

Zalinger, Rogers und Johri (1977) ermittelten Formeln zur Berechnung eines Gefährdungsindex für Kanada auf Basis der Bestands- und Unfalldaten von rund 20 000 Bahnübergängen aus den Jahren 1970 bis 1974. Sie unterschieden dabei nach Bahnübergängen in städtischen und ländlichen Gebieten und erkannten folgende Faktoren als signifikant:

- Straßenverkehrsstärke,
- Schienenverkehrsstärke,
- Höchstgeschwindigkeit für Straßenfahrzeuge (nur in ländlichen Gebieten),
- Höchstgeschwindigkeit für Züge (nur in ländlichen Gebieten),
- Breite der Straßenfahrbahn,
- Art der Straßenbefestigung (nur in ländlichen Gebieten),
- Status der Bahnstrecke als Haupt- oder Nebenbahn,
- Sichtweite ab etwa 90 m vor dem Bahnübergang (nur in ländlichen Gebieten),
- Vorhandensein verschiedener Sicherungseinrichtungen,
- Zulässigkeit der Abgabe von Pfeifsignalen der Züge (nur in städtischen Gebieten).

Das Modell wurde anhand von Stichproben, die nicht aus den zugrunde liegenden Daten stammten, validiert und als gültig erkannt. Aufgrund der ausschließlich induktiven Ableitung der Formeln aus dem vorhandenen pauschalisierten Datenmaterial mittels multipler Regressionsrechnung und der Beschränkung auf verfügbare Parameter ist allerdings auch hier weder der kausale Zusammenhang zwischen den Einflussfaktoren und den Unfallzahlen noch die Vollständigkeit der Einflussfaktoren nachgewiesen. Dies wird beispielsweise am Einfluss der Höchstgeschwindigkeit auf der Straße deutlich, deren Erhöhung sich entgegen landläufiger Erwartungen im Modell senkend auf die Unfallzahlen auswirkt. Die Verfasser der Studie vermuten hierfür einen indirekten Einfluss anderer gefährlicher Verhältnisse an Bahnübergängen, die Fahrer zu einer Geschwindigkeitsverringerung veranlassen. Damit stellt die Geschwindigkeit lediglich einen Indikator für andere, nicht betrachtete Faktoren dar, möglicherweise auch für eine Kombination aus mehreren Faktoren, die ihrerseits erhöhend oder senkend auf die Geschwindigkeit wirken können.

Als Alternative zu bestehenden US-amerikanischen Unfallvorhersagemodellen veröffentlichten Austin und Carson (2002) ein eigenes Verfahren und berücksichtigten dabei eine deutlich größere Zahl von Einflussfaktoren. Mittels negativer binomialer Regressionsrechnung wurden aus rund 81 000 Bahnübergängen mit rund 1 500 Unfällen der Jahre 1997 und 1998 folgende Parameter als entscheidend für die Unfallgefahr abgeleitet:

- Straßenverkehrsstärke,
- Schienenverkehrsstärke während der Nachtstunden,
- Höchstgeschwindigkeit der Schienenfahrzeuge,
- Anzahl der Gleise,
- Anzahl der Straßenfahrstreifen,
- Art der Straßenbefestigung,
- Art des Bahnübergangsbelags,
- Vorhandensein von Fahrbahnmarkierungen,
- Art der Sicherung.

Eine umfangreiche Dokumentation und Handlungsanleitung für Bahnübergänge gab die Abteilung Federal Highway Administration (2007) des US-Verkehrsministeriums in Form der zweiten Auflage des „Railroad-Highway Grade Crossing Handbook“ heraus. Darin werden unter anderem Verfahren zur quantitativen Risikobeurteilung erläutert. Weit verbreitet ist dabei das vom US-Verkehrsministerium entwickelte dreistufige Unfallvorhersagemodell. Die erste Formel ermittelt dabei einen Gefährdungsindex auf Basis der Eigenschaften der Bahnübergänge. In einer zweiten Stufe wird aus dem Unfallgeschehen der Vergangenheit (Statistik) die zu erwartende Unfallzahl berechnet. Die dritte Stufe ergänzt die ermittelten Daten um aktuelle Tendenzen. Insgesamt werden folgende Einflussfaktoren berücksichtigt:

- Straßenverkehrsstärke,
- Schienenverkehrsstärke,
- Anzahl der Gleise,
- Art der Straßenbefestigung,
- Höchstgeschwindigkeit der Schienenfahrzeuge,
- Art der Straße,
- Anzahl der Straßenfahrstreifen,
- Lage des Bahnübergangs in städtischem oder ländlichem Umfeld,
- Unfallzahlen.

Ein weiteres, bereits seit vielen Jahren in den USA etabliertes und durch die Abteilung Federal Highway Administration (2007) des US-Verkehrsministeriums dokumentiertes Modell ist der New-Hampshire-Gefährdungsindex. Zu einer Grundformel, in der Straßen- und Schienenverkehrsstärke sowie ein Faktor für die Sicherungsart enthalten sind, haben verschiedene US-Bundesstaaten Anpassungen und Erweiterungen vorgenommen, sodass mehrere regionale Varianten des Modells existieren. Von Interesse sind die betrachteten Einflussfaktoren:

- Straßenverkehrsstärke,
- Schienenverkehrsstärke,
- Sicherungsart,
- Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge,
- Geschwindigkeit der Straßenfahrzeuge,
- Sichtverhältnisse,
- Kreuzungswinkel,
- Länge des Kreuzungsbereichs,
- Art der Bahnstrecke,
- Art der Straßenbefestigung,
- Anzahl der Busse, Schulbusse, Lkw und Gefahrguttransporte,
- Nähe zur Straßenkreuzungen,
- Art der Straße,

- Längsneigung der Straße,
- Anzahl der Reisenden in den Schienenfahrzeugen,
- Unfallzahlen.

Als Verfahren auf statistischer Basis nennt die Abteilung Federal Highway Administration (2007) des US-Verkehrsministeriums außerdem die NCHRP-50- und die Peabody-Dimmick-Unfallvorhersageformel sowie eine Formel der staatlichen Universität Florida. Letztere bezieht als besondere Eigenschaft unter anderem das Verhältnis zwischen tatsächlich vorhandener und zum Räumen des Bahnübergangs benötigter Sicht ein. Im Übrigen ähneln Herleitung und Anwendung dieser Modelle den bereits vorgestellten statistikbasierten Verfahren.

2.5 Asien und Australien

Gitelman und Hakkert (1997) stellten ein Berechnungsverfahren für einen Gefährdungsindex israelischer Bahnübergänge vor. Die besondere Schwierigkeit bestand dabei in dem geringen Umfang verfügbarer Daten, resultierend aus einer Zahl von nur rund 210 Bahnübergängen mit Kraftfahrzeugverkehr und durchschnittlich 13 Unfällen jährlich. Deshalb wurden die Bestandsdaten auf einen Zeitraum von sechs Jahren (1988 bis 1993) ausgeweitet und dabei Veränderungen am Bestand berücksichtigt, womit 78 Unfälle bei einem fiktiven Bestand von 1268 Bahnübergängen untersucht werden konnten. Zusätzlich erfolgte eine Zusammenfassung in Gruppen mit ähnlichen Charakteristika. Folgende Faktoren wurden als relevant eingestuft und flossen in das Modell ein:

- Art der Sicherung,
- Straßenverkehrsstärke,
- Schienenverkehrsstärke,
- Sichtverhältnisse.

Getestet wurde das Modell an den Unfalldaten des Jahres 1993, wobei sich eine gute Übereinstimmung ergab. Eine Übertragung des Modells auf andere Länder ist insbesondere durch die vergleichsweise grobe Einstufung der Bahnübergänge in Verbindung mit weiteren Vereinfachungen wiederum kaum möglich und auch nicht sinnvoll.

Für japanische Bahnübergänge berechneten Anandarao und Martland (1998) aus Bestands- und Unfalldaten der Jahre 1987 bis 1993 den Einfluss verschiedener Einflussfaktoren auf das Risiko und leiteten daraus Empfehlungen für konkrete Gestaltungsmaßnahmen ab. Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen wurden auch die Unfallhergänge in Form von neun Kategorien in die Betrachtung einbezogen. Folgende Einflussfaktoren auf das Risiko wurden als signifikant ermittelt, ohne die genaue Vorgehensweise offenzulegen:

- Straßenverkehrsstärke,
- Schienenverkehrsstärke,
- Zusammensetzung des Straßenverkehrs,
- Erkennbarkeit des Bahnübergangs von der Straße aus,
- Straßenlängsneigung,
- Abstand des Bahnübergangs von der nächsten Straßenkreuzung,
- Anzahl der Gleise,
- Art der Sicherung.

Bemerkenswert hinsichtlich des Einflusses der Verkehrsstärke ist die Feststellung, dass Bahnübergänge mit einer geringen Zugzahl und Straßenverkehrsstärke ein höheres Risiko aufweisen als Bahnübergänge mit einer hohen Zugzahl und Straßenverkehrsstärke. Dies wird mit

der steigenden Wahrscheinlichkeit bereits vor dem Bahnübergang wartender Fahrzeuge bei einer steigenden Straßenverkehrsstärke begründet. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist allerding zu beachten, dass die Risikowerte in der Untersuchung stets auf die Zahl der Züge bezogen und damit von ihr abhängig sind.

Ein Risikomodell mit statistischem Ansatz, jedoch stärkerer Betonung kausaler Zusammenhänge stellten Saccomanno und Lai (2004) für Australien vor. In einem ersten Schritt wurden zahlreiche Merkmale der Bahnübergänge erfasst. Die Daten wurden dann mit einer Faktorenanalyse bei gleichzeitiger Prüfung des kausalen Zusammenhangs so reduziert, dass vier charakteristische Gruppen verblieben, bei denen die genannten Merkmale möglichst ähnlich waren. Diese Gruppen wiesen folgende Eigenschaften auf:

- hohe Straßenverkehrsstärke, aktive Sicherung, Lage meist in städtischen Gebieten;
- hohe Schienenverkehrsstärke, hohe Geschwindigkeiten der Schienenfahrzeuge, geringes Straßenverkehrsaufkommen, Lage meist auf Nebenbahnen in ländlichen Gebieten;
- geringe Straßenverkehrsstärke, geringe Schienenverkehrsstärke, passive Sicherung, spitzer Kreuzungswinkel, Verbot der Abgabe von Pfeifsignalen;
- geringe Straßenverkehrsstärke, geringe Schienenverkehrsstärke, geringe Geschwindigkeiten, spitze Kreuzungswinkel, Lage meist in ländlichen Gebieten.

Für die Gruppen wurden mittels weiterer statistischer Analysen individuelle Unfallvorhersagemodelle entwickelt. Letztlich wurden folgende Merkmale für signifikant befunden, wobei nicht alle Merkmale bei allen Gruppen zur Anwendung kamen:

- Straßenverkehrsstärke,
- Schienenverkehrsstärke,
- Sicherungsart,
- Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge,
- Geschwindigkeit der Straßenfahrzeuge,
- Kreuzungswinkel,
- Zulässigkeit der Abgabe von Pfeifsignalen.

Die Clusterbildung ist allerdings spezifisch für die zugrunde liegende Stichprobe australischer Bahnübergänge und ihre Eigenschaften, sodass auch bei diesem Verfahren eine Übertragung konkreter Werte oder Formeln auf ein anderes Land ausgeschlossen ist.

Oh, Washington und Nam (2006) veröffentlichten ein empirisches Unfallvorhersagemodell für Südkorea. Sie analysierten Bestands- und Unfalldaten aus dem Zeitraum 1998 bis 2002 von 162 zufällig ausgewählten Bahnübergängen (10 % des Gesamtbestandes) unter Verwendung eines Gamma-Wahrscheinlichkeitsmodells. Als signifikant wurden dabei folgende Eigenschaften erkannt:

- Straßenverkehrsstärke,
- Schienenverkehrsstärke,
- Nähe zu Gewerbegebieten,
- Abstand des Einschaltkontaktes vom Bahnübergang,
- Zeitdauer zwischen Aufleuchten der Blinklichter und Schließen der Schranken,
- Vorhandensein geschwindigkeitsdämpfender Maßnahmen („speed humps“).

In der Studie wurde auch diskutiert, weshalb das Modell bestimmte erwartete Einflussfaktoren als nicht signifikant einstufte, beispielsweise die Fahrbahnbreite oder die Gleisanzahl. Es wurde vermutet, dass diese Merkmale stark mit anderen, bereits im Modell enthaltenen Faktoren

korrelieren und dadurch zwar an sich praktisch relevant, für das Modell jedoch nicht signifikant sind. Da diese Korrelationen spezifisch für südkoreanische Bahnübergänge sein können, ist eine Übertragung von Erkenntnissen aus der Studie auf andere Länder nur bedingt möglich.

Eine australische Arbeitsgruppe ALCAM-Working Group (2010) entwickelte das semi-quantitative Risikobewertungsmodell ALCAM (Australian Level Crossing Assessment Model), mit dem ein Index zum Vergleich der Sicherheit verschiedener Bahnübergänge berechnet werden kann. In die Grundformel fließen Aussetzung, Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß ein. Die Wichtungsfaktoren, mit denen die Eingangsparameter bewertet werden, beruhen im Wesentlichen auf Expertenschätzungen. Folgende Merkmale, unterschieden nach Straßen und Fußwegen, finden dabei Berücksichtigung:

- für die Aussetzung:
  - Straßenverkehrsstärke (Fahrzeuge bzw. Fußgänger),
  - Schienenverkehrsstärke,
- für die Eintrittswahrscheinlichkeit:
  - Eigenschaften des Bahnübergangs (29 Faktoren für Straßen, 28 für Fußwege),
  - Sicherungsart und weitere Sicherheitsmaßnahmen (jeweils 40 Faktoren)
  - Unfallhergänge (21 Faktoren für Straßen, 19 für Fußwege),
- für das Schadensausmaß:
  - Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge,
  - Nähe zu Brücken, Weichen, Tunneln, Gleisbögen auf der Bahnstrecke,
  - Verkehr von Schulbussen oder schweren Lkw.

Das Ergebnis der Berechnung, die über ein hierfür entwickeltes Softwareprogramm läuft, wird nach der Notwendigkeit von Verbesserungsmaßnahmen kategorisiert. Somit impliziert dieses Modell auch ein Risikoakzeptanzkriterium. Zwar sind umfangreiche Eingangsdaten erforderlich, dafür ist im Unterschied zu den meisten anderen Verfahren durch den hohen Detaillierungsgrad eine individuelle Bewertung jedes Bahnübergangs möglich.

Nach zunächst stark sinkenden, dann jedoch stagnierenden Bahnübergangsunfallzahlen entwickelten Omori, Abe und Kubota (2010) für den ostjapanischen Bahnbetreiber JR East einen risikoorientierten Ansatz zur Priorisierung von Maßnahmen. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Identifikation von Bahnübergängen mit hohem Risiko, an denen Maßnahmen wie technische Gefahrenraumfreimeldeanlagen und Entgleisungsschutz vorgenommen werden sollten. Im Ergebnis der auf Statistiken und Expertenmeinungen beruhenden Studie wurden folgende Merkmale als risikosteigernd ermittelt:

- hohe Schienenverkehrsstärke,
- hohe Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge,
- geringe Straßenbreite,
- hohe Straßenverkehrsstärke,
- Unfälle in der Vergangenheit,
- örtliche Faktoren, die das Potenzial bahnseitiger Sekundärschäden erhöhen, beispielsweise Nähe zu Brücken oder Tunneln.

Die meisten dieser Einflussfaktoren wirken entweder auf die Aussetzungshäufigkeit oder auf das Schadensausmaß, während verhaltensrelevante Merkmale nicht enthalten sind. Interessant bei diesem Ansatz ist jedoch die Einbeziehung von Folgeschäden in Abhängigkeit von örtlichen Merkmalen, die bei anderen Studien kaum betrachtet werden; allerdings erfolgte diese nur qualitativ.

2.6 Schlussfolgerungen

Der Forschungsstand in Deutschland zeigt nur wenige Untersuchungen, die eine über die Sicherungsart des Bahnübergangs (z. B. Lichtzeichen, Halbschranken, Vollabschluss) hinausgehende Differenzierung aufweisen. Sofern dies überhaupt der Fall ist, handelt es sich um ausschließlich qualitative Analysen zur Formulierung grundsätzlicher Anforderungen an die Bahnübergangsgestaltung.

Im Ausland wurden hingegen teils umfangreiche Modelle entwickelt, mit denen der Einfluss von Gestaltungsmerkmalen auf die Sicherheit quantitativ ermittelt werden kann. Die ausgewerteten ausländischen Studien und die dabei berücksichtigten Risikofaktoren sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Der Zweck der Verfahren und Modelle besteht dabei meist in der Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen innerhalb eines Landes. Die Zielstellungen der Verfahren mit quantitativer Bewertung lassen sich dabei in zwei Kategorien einteilen:

- Berechnung eines Gefährdungsindex im Sinne einer Rangfolge von Bahnübergängen nach ihrem Risiko, ohne dieses Risiko absolut zu quantifizieren,
- Berechnung des Risikos im Sinne zu erwartender Unfälle oder Personenschäden pro Zeiteinheit.

Die Modelle zur Ermittlung eines Gefährdungsindex beruhen vorwiegend auf Expertenschätzungen und beziehen nur teilweise statistische Daten ein. Dagegen beruhen die Unfallvorhersagemodelle nahezu ausschließlich auf Unfallstatistiken. Auffällig ist, dass die Anzahl der als signifikant eingestuften Einflussfaktoren bei den auf Expertenmeinungen basierenden Verfahren regelmäßig deutlich größer ist als bei den statistikbasierten Verfahren.

Während Expertenschätzungen stets subjektiven Einflüssen der Beteiligten unterworfen sind, haben statistische Verfahren einen anderen Nachteil: Eigenschaften, die innerhalb der zugrunde liegenden Stichprobe stark miteinander korrelieren, werden einzeln nicht mehr als signifikant angesehen, obwohl sie für die Sicherheit bedeutsam sein könnten. Die Verfahren liefern demzufolge nur dann korrekte Ergebnisse, sofern der einzelne Bahnübergang diese Merkmalskombination ebenfalls aufweist. Abweichungen in Einzelfällen können von den statistikbasierten Modellen nicht abgebildet werden. Zudem können nur Eigenschaften berücksichtigt werden, die in den Datenbanken enthalten sind. Die Fragestellung des kausalen Zusammenhangs bestimmter Eigenschaften mit der Unfallentstehung sowie der Vollständigkeit wurde nur in wenigen Modellen betrachtet.

Sowohl in Deutschland als auch im Ausland wird die Bahnübergangssicherheit bislang überwiegend auf makroskopischer Ebene betrachtet. Im Mittelpunkt steht das kollektive Risiko. Nur sehr wenige Modelle bewegen sich auf einer mikroskopischen Ebene und betrachten den einzelnen Bahnübergang, den einzelnen Unfallhergang und das individuelle Risiko des einzelnen Benutzers. Sofern das individuelle Risiko zugrunde gelegt wird (beispielsweise bei Basler und Partner (1986) und SELCAT-Arbeitsgruppe (2008a), dann meist im Sinne eines aus dem kollektiven Risiko abgeleiteten Durchschnittswertes. Dies impliziert die Annahme, dass jeder Nutzer den gleichen Bedingungen ausgesetzt ist, was allerdings angesichts der zahlreichen Merkmale und damit möglichen Merkmalskombinationen jedes Bahnübergangs bezweifelt werden kann: Bereits für zwei entgegen gerichtete Hauptzufahrtsrichtungen besitzen Bahnübergänge in der Regel unterschiedliche Erscheinungsbilder und somit unterschiedliche Einflussfaktoren auf das Risiko.

Vom überwiegenden Teil der Verfahren wird ausschließlich der Kraftfahrzeugverkehr berücksichtigt. Sofern in Untersuchungen der Fußgängerverkehr betrachtet wurde, ergaben sich stets erhebliche Unterschiede zum Kraftfahrzeugverkehr, insbesondere hinsichtlich des vorsätzlichen Fehlverhaltens. Der Radverkehr wurde von keiner der Studien explizit betrachtet.

Für die vorliegende Untersuchung und ein auf deutsche Verhältnisse zuzuschneidendes Verfahren ergeben sich folgende inhaltliche und methodische Konsequenzen:

- Zur Reduzierung der Unfallzahlen ist eine konsequente Orientierung der Sicherheitsmaßnahmen am Risiko notwendig, so wie es bei den meisten etablierten Verfahren aus dem Ausland der Fall ist.
- Die Betrachtung soll das individuelle Risiko, mögliche Unfallabläufe und die örtlichen Verhältnisse berücksichtigen. Im Mittelpunkt muss der einzelne Bahnübergang stehen.
- Fußgänger und Radfahrer sollen aufgrund ihrer Besonderheiten getrennt vom Kraftfahrzeugverkehr betrachtet werden.
- Statistische Daten sollen unter Beachtung ihrer Möglichkeiten und Grenzen einbezogen und durch Expertenmeinungen ergänzt werden.
- Das Verfahren soll sowohl die Risiken an bestehenden Bahnübergängen bewerten als auch Maßnahmen zur Beeinflussung der Sicherheit vorschlagen können.

Die vorgenannten Anforderungen griff bereits Schöne (2013) auf. Seine Untersuchungen bilden die Basis für das hier später entwickelte qualitative Modell (siehe Abschnitte 3.2 und 5.2).

Tabelle 1: Zusammenfassung der ausländischen Studien

Verfasser	Land (ISO-Abkürzung)	Zielstellung	Berücksichtigte Risikofaktoren																					
			Straße											Eisenbahn					Bahnübergang					
			Straßenverkehrsstärke	Zusammensetzung des Straßenverkehrs	Geschwindigkeit der Straßenfahrzeuge	Art der Straße	Straßenführung/Kreuzungswinkel	Straßenbreite/Fahrstreifenanzahl	Straßenlängsneigung	Straßenbefestigung/Bahnübergangsbelag	Himmelsrichtung/Sonnenblendungsgefahr	Nähe zu Straßenkreuzungen/-einmündungen	Nähe zu Gewerbegebiet/Schule/Stadtgebiet	Schienenverkehrsstärke	Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge	Art der Strecke (z. B. Haupt- oder Nebenbahn)	Gleisanzahl/Gefahrenbereichslänge	Nähe zu Bahnhöfen/Haltepunkten	Sicherungsart/-einrichtungen	Erkennbarkeit/Ablenkungsfaktoren	Sicht von der Straße auf die Bahnstrecke	Zeitabläufe der Sicherungseinrichtungen	Unfallzahlen in der Vergangenheit	sonstige Eigenschaften
Berg, Oppenlander	US	G	x											x					x	x	x			
Zalinger, Rogers, Johri	CA	G	x		(x)			x		(x)				x	(x)	x			x		x			
Shahriari	SE	Q			x		x	x			x										x			x
Gitelman, Hakkert	IL	G	x											x					x		x			
Anandarao, Martland	JP	Q	x	x					x			x		x			x		x	x				
Austin, Carson	US	U	x					x		x				(x)	x		x							x
Lindberg	SE	U	x										x	x					x					
Marx, Skoric, Lösch	AT	G	x																				x	
Zodtl	AT	U	x				x					x						x						x
Feßl, Robatsch, Stefan	AT	Q	x											x					x				x	
Griffioen	NL	Q	x		x															x				
Mocsári	HU	G			x		x												x	x			x	x
Saccomanno, Lai	AU	U	x		x		x							x	x				x					
Oh, Washington, Nam	KR	U	x		x								x	x								x		
US-Verkehrsminist.	US	U	x			x		x		x			x	x	x		x						x	
New-Hampshire-Index	US	G	x	x	x	x	x		x	x		x		x	x	x	x		x		x		x	x
SELCAT-Arbeitsgruppe	-	Q	x					x		x	x			x			x		x		x		(x)	
ALCAM-Arbeitsgruppe	A	G	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
Beard, Melo	P	U	x		x		x				x	x		x	x		x			x	x	x		x
Omori, Abe, Kubota	JP	G	x		x			x						x									x	x
Stefan, Stütz, Machata	AT	U	x		x		x	x				x		x	x				x					
Anzahl Nennungen			19	3	11	2	8	8	3	6	4	6	4	16	8	2	7	2	12	6	8	3	8	-

Zeichenerklärung	
Zielstellungen:	G = Gefährdungsindex, U = Unfall- bzw. Risikovorhersage, Q = Qualitative Bewertung
Risikofaktoren:	x = Merkmal berücksichtigt, (x) = Merkmal unter bestimmten Bedingungen berücksichtigt

3. Methodik

3.1 Quantitatives Modell

In Deutschland wurden bei bisherigen Forschungen zur Thematik von Straßenverkehrsunfällen je nach Aggregierung der Daten Einflüsse von Merkmalen auf das Unfallgeschehen meist monokausal beschrieben. Derartige Methoden gestatten vor allem tendenzielle Vergleiche. Die isolierte Quantifizierung der Sicherheitswirkung unterschiedlicher Merkmale ist aus folgenden Gründen dabei nicht möglich:

- Eine Kombination von Merkmalen ist nur eingeschränkt durchführbar. Beispielsweise können bei einem Vergleich der Unfallkostenraten unterschiedlicher typischer Entwurfssituationen nach FGSV (2006) zwar verschiedene Merkmale (z. B. Verkehrsaufkommen, Art der Radverkehrsführung, Vorhandensein eines Mittelstreifens, etc.) berücksichtigt werden, jedoch kann die Sicherheitswirkung der Einzelmerkmale nicht quantifiziert werden, was zu Fehlern in der Interpretation führen kann. Da bei einer derartigen Analyse lediglich die gemeinsame Wirkung aller Merkmale beschrieben wird, kann es zudem zu einer Verschleierung von Effekten (z. B. gegenseitige Beeinflussung der Merkmale) kommen
- Die stochastische Natur von Unfällen (poissonverteiltes Auftreten im zeitlichen Verlauf) wird nur unzureichend berücksichtigt.
- Die Verkehrsstärke wird bei Sicherheitsanalysen häufig in Form des DTV mittels Raten eingezogen. Damit wird der Verkehrsstärke des motorisierten Verkehrs a priori ein positiver linearer Einfluss auf die Unfallzahl unterstellt.
- Gegenseitige innere Abhängigkeiten verschiedener Einflussgrößen können nicht berücksichtigt werden.

Außerdem wird die stochastische Natur von Unfällen (poissonverteiltes Auftreten im zeitlichen Verlauf) nur unzureichend berücksichtigt.

Da das Unfallgeschehen von einer Vielzahl an Merkmalen beeinflusst wird, kann eine Analyse von einem oder mehreren Einflussfaktoren innerhalb von Infrastrukturelementen mit unterschiedlicher Charakteristik nur unter der Verwendung komplexer Verfahren realisiert werden. In den letzten Jahren wurden vor allem international multivariate Verfahren entwickelt, die das Unfallgeschehen auf Basis des Zusammenwirkens unterschiedlicher baulicher und betrieblicher Merkmale beschreiben und dabei die stochastische Natur von Unfällen berücksichtigen. Diese werden meist unter dem Begriff „Accident Prediction Models“ (APM) zusammengefasst und basieren auf Verallgemeinerten Linearen Modellen (Generalized Linear Models, GLM). Nach Reurings et al. (2005) gelten sie als die State-of-the-Art-Methodik für Sicherheitsanalysen. Die Modelle besitzen folgende Grundform:

$$U = k \cdot q^{\beta} \cdot e^{\sum_{i=1}^{n} x_i \cdot \gamma_i}$$

mit

U Anzahl der Unfälle je Infrastrukturelement (abhängige Variable)

k Konstante zur Beschreibung der Gesamtvarianz des Unfallgeschehens

q Verkehrsstärke (Expositionsgröße), mit $\beta = 1$ als Abbildung eines linearen, $\beta < 1$ eines degressiven und $\beta > 1$ eines progressiven Einflusses der Verkehrsstärke auf das Unfallgeschehen

xi weitere erklärende Variablen, welche mit den Koeffizienten γ_i multipliziert werden (Berücksichtigung als Exponentialterm)

Der dargestellte funktionelle Zusammenhang zeigt, dass der Verkehrsstärke q auch ein nicht-linearer Einfluss auf das Unfallgeschehen unterstellt werden kann. Im Exponentialterm stehen die Faktoren x und die zugehörigen Koeffizienten γ, welche ebenso geschätzt werden wie der Parameter β und die Konstante k. Durch die Form des Exponentialterms können kategoriale und dichotome Einflussvariablen in das Modell aufgenommen werden.

Durch die Poisson-Verteilung werden die Abweichungen des Auftretens von Unfällen an einer Stelle im Betrachtungszeitraum als zufälliges Ereignis abgebildet. Abweichungen zwischen mehreren Stellen im Untersuchungskollektiv können nach Maher und Summersgill (1996) adäquat durch die Gamma-Verteilung beschrieben werden. Die mathematische Beschreibung der Überlagerung aus Poisson- und Gamma-Verteilung (und somit der räumlichen und zeitlichen Verteilung) ergibt die Negativ-Binomialverteilung (Maher und Summersgill, 1996).

Nach Reurings et al. (2005) ist es zweckmäßig, Unfallprognosemodelle schrittweise aufzubauen. Die Basis bildet ein Grundmodell (sogenanntes Score-Modell), welches mindestens die Expositionsgröße „DTV“ enthält. Weitere Einflussgrößen (z. B. im vorliegenden Projekt Kreuzungswinkel, Längsneigung, etc.) werden schrittweise in das Modell aufgenommen, wobei nach jeder aufgenommenen Variable die

- Varianzerklärung (Log-Likelihood-Funktion; das zu beurteilende Modell wird mit dem „maximalen Modell“ verglichen, wobei auf Basis des Maximum-Likelihood-Schätzers die „Wahrscheinlichkeit“ der beobachteten Daten der Stichprobe in Abhängigkeit der zugrundeliegenden Verteilung maximiert wird),
- Signifikanz des Koeffizienten (Wald-Test; Prüfung der Koeffizienten auf die Verschiedenheit von Null) sowie
- Signifikanz der Modelleffekte (Likelihood-Ratio-Test; Prüfung der Verbesserung des Modells aufgrund der Berücksichtigung einer Variable gegenüber einem Modell ohne Einbeziehung dieser Variable)

geprüft wird. Dies geschieht durch die Überprüfung und Quantifizierung der Veränderung der Reststreuung im Vergleich zum Null-Fall (Modell ohne Einflussvariablen). Ist der Einfluss der Variable nicht signifikant (und trägt die Variable somit nicht zur Verbesserung der Modellgüte mittels einer Verringerung der Reststreuung bei), wird sie wieder aus dem Modell entfernt. Voraussetzung ist ferner, dass die einzelnen Einflussvariablen nicht miteinander korrelieren. Die Variablenauswahl basiert grundsätzlich auf einem Signifikanzniveau von $p<0,05$. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass diese Grenze historisch entstanden ist (Field, 2009) und daher nicht immer praktisch sinnvoll sein muss. Die Aufnahme der Variablen in das Modell erfolgt ohnehin vor sachlogischem Hintergrund. In inhaltlich bergründeten Fällen sowie bei gleichzeitig plausibler Ausprägung der Wirkungszusammenhänge werden daher auch Variablen auf Basis eines Signifikanzniveaus von $p<0,1$ ausgewählt. Darüber hinaus wird das Informationskriterium von Akaike als weiteres Gütemaß zur Beurteilung der Modellanpassung innerhalb des stufenweisen Aufbaus des Modells berücksichtigt. Das AIC bezieht einen, über die ausschließliche Bewertung der Likelihood hinaus, zusätzlichen Term zur „Bestrafung“ der Komplexität des Modells ein. Das heißt, je mehr Parameter in einem Modell berücksichtigt wurden, desto höher fällt diese „Bestrafung“ aus. Damit bietet sich die Möglichkeit einer Abwägung zwischen Anpassung und Einfachheit des Modells.

Die Quantifizierung der Varianz bzw. der Anpassungsgüte erfolgt anhand der Pearson-χ^2-Teststatistik des Poisson-Modells. Ergibt der Quotient aus der χ^2-Abweichung und der Anzahl der Freiheitsgrade (χ^2/df) einen Wert von 1, ist die gesamte systematische Varianz erklärt. Bei $\chi^2/df > 1$ liegt Überdispersion (die Varianz einer Variable überschreitet die Nominalvarianz der angenommenen Poisson Verteilung) und bei $\chi^2/df < 1$ liegt Unterdispersion (die Varianz einer Variable unterschreitet die Nominalvarianz der angenommenen Poisson-Verteilung) im Modell vor. Demzufolge kann die nicht erklärte Varianz im Modell durch die Differenz des Quotienten χ^2/df des Poisson-Modells und dem Wert 1 beschrieben werden. Der Quotient dieser Differenzen für ein Modell mit Einflussvariablen und dem Nullmodell (Modell ohne Einflussvariablen) entspricht damit dem erklärten Anteil der systematischen Varianz.

Ferner wird die Größe des Betrachtungszeitraums als „Offset-Variable“ in das Modell implementiert. Dies bedeutet, dass die entsprechende Variable nicht in die Modellschätzung eingeht, sondern als normierende Größe (z. B. im Ergebnis Normierung der abhängigen Variablen auf den Zeitraum eines Jahres) berücksichtigt wird.

Eine Fehleranalyse (Residuenanalyse) wird auf Basis erster Analysemodelle durchgeführt. Durch die Residuen werden Einflüsse der abhängigen Variablen beschrieben, welche nicht durch das Modell erklärt werden können. Zur Analyse der Residuen werden Distanzmaße verwendet, die Aussagen über die Fehlerausprägung und deren Einflüsse machen:

- Die **Hebelwirkung** (leverage) beschreibt den Einfluss eines Falles auf den Erwartungswert an der entsprechenden Stelle. Je größer die räumliche Entfernung eines Falles vom Zentrum der restlichen Verteilung (dem Durchschnitt), desto größer ist die entsprechende Hebelwirkung. Die Hebelwirkung wird mit Hilfe des sog. Hebelwerts bzw. der Mahalanobis-Distanz (Hebelwert = Mahalanobis-Distanz/(N-1)) beschrieben. Der Hebelwert leitet sich aus der Hat-Matrix[1] ab. Hebelwerte größer als 3(k+1)/N (k: Anzahl der Variablen; N: Stichprobenumfang) sollten näher untersucht werden (Stevens, 2002).
- Die Cook-Distanz beschreibt die Wirkung eines Ausschlusses eines Falles auf die Residuen und damit auf die Ermittlung der Regressionsfunktion bzw. –koeffizienten. Dabei gelten Werte über 0,5 als auffällig; Cook-Distanzen > 1 sollten näher untersucht werden (Cohen et al., 2003; Fahrmeir et al., 2009). Neben dieser gängigen Grenzwertfestlegung empfehlen Hutchinson & Sofroniou 1999 einen Grenzwert in Abhängigkeit von der Stichprobe und der Anzahl der Modellparameter von 4/(n-k).

Diverse Quellen, insbesondere aus dem internationalen Bereich, beschreiben die Schätzung und Anwendung Verallgemeinerter Linearer Modelle in Zusammenhang mit Unfallprognosen. So finden sich z.B. Modelle für Landstraßen (Reurings et al., 2005), zum Geschwindigkeitsverhalten (Taylor et al., 2000), für verschiedene Knotenpunktformen (Summersgill et al., 2001), zu Motorradunfällen (Harnen et al., 2006), Bahnübergängen (Zalinger et al., 1977) etc.

Aus der Literaturrecherche in Kapitel 2 hat sich gezeigt, dass für eine Modellierung des Unfallgeschehens an Bahnübergängen folgende Parameter relevant sein können:

- Straßenverkehrsstärke
- Straßenführung/Kreuzungswinkel
- Fahrbahnbreite/Fahrstreifenanzahl
- Schienenverkehrsstärke
- Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge

---

[1] Bezug der tatsächlichen y-Werte auf die vorhergesagten Erwartungswerte

- Sicherungsart/Sicherungseinrichtungen
- benachbarte Knotenpunkte
- Sichtverhältnisse

Erfassung, Ausprägung und Umfang der Parameter für die vorliegende Untersuchung werden in Kapitel 4 dargestellt. Final wird als Ergebnis der quantitativen Modellierung die zu erwartende Unfallanzahl je Bahnübergang während eines Jahres in Abhängigkeit der Ausprägung der modellierten Merkmale am Bahnübergang dargestellt.

3.2 Qualitatives Modell

Das **qualitative Modell** dient der Abschätzung des kollektiven Risikos eines einzelnen Bahnübergangs unter Verwendung verschiedener Parameter. Dabei wird nach motorisierten und nichtmotorisierten Verkehrsarten unterschieden. Weiterhin werden bei den motorisierten Straßenverkehrsteilnehmern die Entstehungsbereiche der Risiken in Entscheidungs- und Räumungsbereich aufgeteilt. Hierzu wird im Wesentlichen auf die Erkenntnisse aus Schöne (2013) zurückgegriffen. Dem Verfahren liegen vor allem umfangreiche Literaturstudien, qualifizierte Schätzungen und ergänzende empirische Untersuchungen zugrunde.

Das qualitative Modell basiert auf der aus der Sicherheitswissenschaft bekannten Risikoformel, nach der sich das Risiko als Produkt aus der Häufigkeit eines unerwünschten Ereignisses und dem dabei zu erwartenden Schadensausmaß ergibt. Als unerwünschtes Ereignis gilt hier der Zusammenprall, also eine Kollision zwischen einem Schienenfahrzeug und einem Straßenverkehrsteilnehmer auf einem Bahnübergang. Als Schadensausmaß werden ausschließlich Personenschäden betrachtet. Die Häufigkeit eines Zusammenpralls zerfällt wiederum in mehrere Faktoren:

- Häufigkeit, mit der sich Schienenfahrzeuge und Straßenverkehrsteilnehmer innerhalb eines bestimmten Betrachtungszeitraums gleichzeitig dem Bahnübergang nähern und somit potenziell einer gefährlichen Situation ausgesetzt sind („Aussetzung“),
- Wahrscheinlichkeit, mit der bei bestehender Aussetzung die vorgesehenen sicherheitsrelevanten Handlungen durch die Straßenverkehrsteilnehmer absichtlich oder unbeabsichtigt unterlassen werden dadurch ein Zusammenprall droht („Gefährdung“),
- Wahrscheinlichkeit, mit der bei bestehender Gefährdung eine Abwendung des unmittelbar bevorstehenden Zusammenpralls durch eine Notreaktion der Beteiligten nicht mehr möglich ist („Unabwendbarkeit“).

Weiterhin sind die Entstehungsbereiche der Risiken zu trennen, da jeweils spezifische Wirkungszusammenhänge und Einflussfaktoren gelten. Dabei ist der:

- Entscheidungsbereich der Bereich einer Straße oder eines Weges, den Straßenverkehrsteilnehmer vor der Überquerung eines Bahnübergangs benutzen,
- Räumungsbereich der Bereich einer Straße oder eines Weges, den Straßenverkehrsteilnehmer nach der Überquerung eines Bahnübergangs benutzen.

Eine Prinzipskizze visualisiert in Abbildung 3 die Entstehungsbereiche der Risiken. Räumungsprobleme können bereits auf dem Bahnübergang auftreten, beispielsweise wenn dort ein Straßenfahrzeug stecken bleibt.

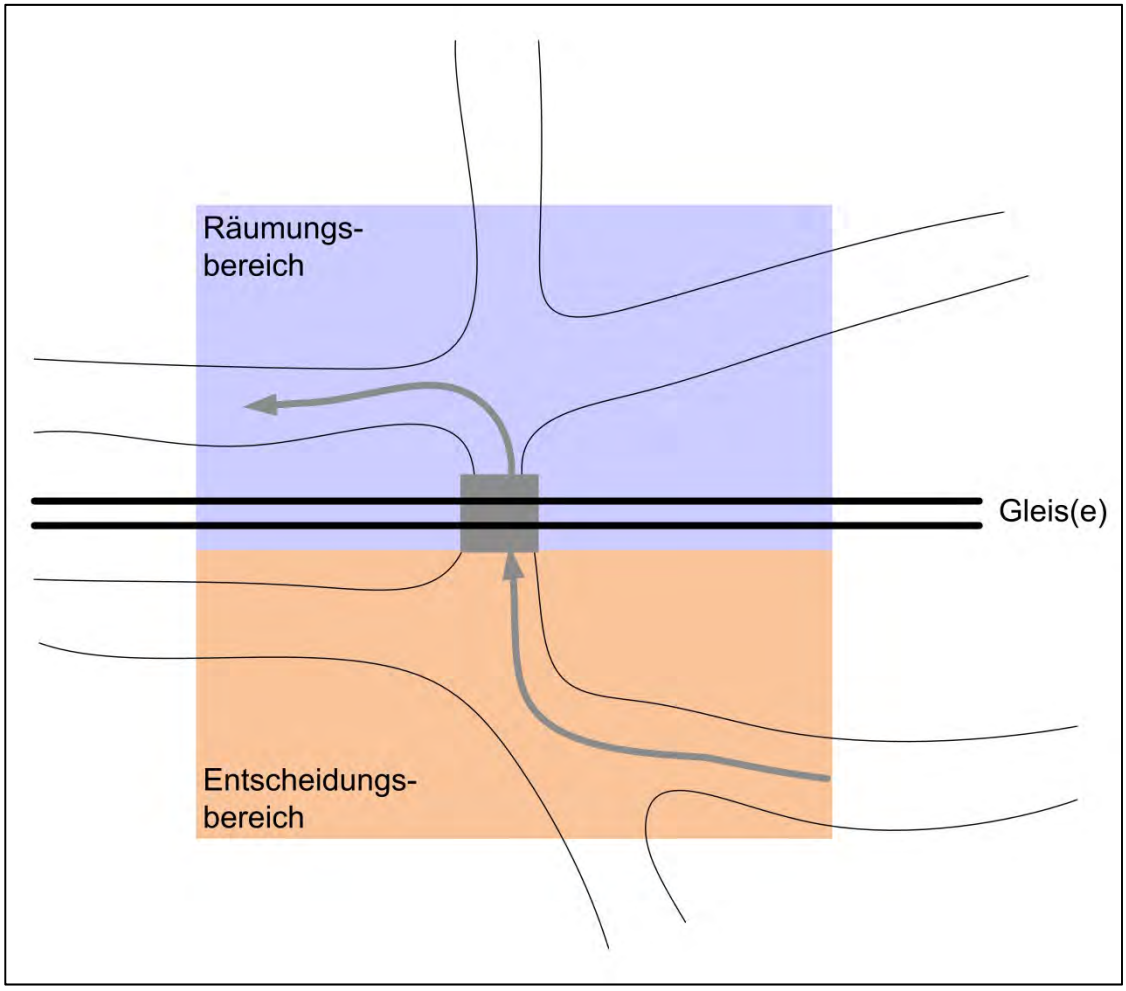


Abbildung 3: Prinzipskizze zu den Entstehungsbereichen der Risiken

Den grundsätzlichen Aufbau des von Schöne (2013) ursprünglich entwickelten Modells zeigt Abbildung 4. Dieses Modell bildet die Grundlage zum Aufbau des qualitativen Modells, wobei auf Basis der von Schöne (2013) erzielten Ergebnisse, speziell aus der Sensitivitätsanalyse (Kap. 7.3) hergeleitet, Vereinfachungen vorgenommen werden.

Das Ziel des qualitativen Modells ist die Klassifizierung des Risikos (von risikoarm bis risikoreich) und des Wirkungsgrades der Maßnahmen, welche zur Reduzierung der Unfallzahlen durchgeführt werden (z. B. Umstellung der Sicherungsart von nichttechnisch gesichert auf Vollabschluss); eine Schätzung der Unfallzahl erfolgt hier also nicht.

Das qualitative Modell arbeitet nach einem Punkteschema, wie beispielsweise auch im Australischen Modell „Australian Level Crossing Assessment Model“(ALCAM). Die Punktwerte werden qualitativ bestimmt und verrechnet. Das ermittelte Ergebnis kann der Anwender dann mittels einer Tabelle mit den dortigen Risikowerten vergleichen.

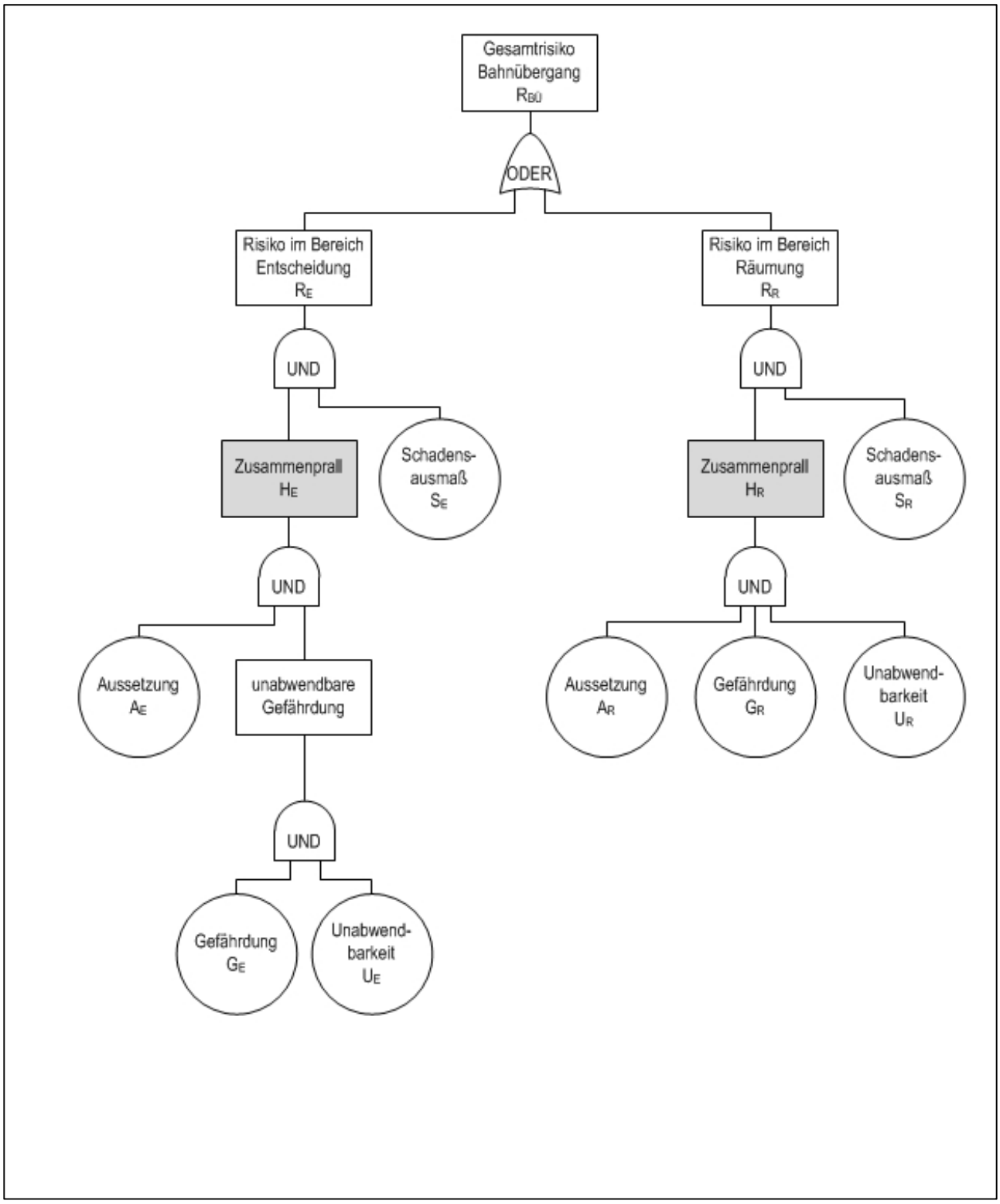


Abbildung 4: Fehlerbaumdarstellung als Grundlage zum Aufbau qualitatives Modell (Quelle: Schöne, 2013, bearbeitet)

4. Daten

4.1 Erfassung der Daten für das quantitative Modell

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Bundesländer Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Sachsen. Für diese Länder wurden Unfall- und Infrastrukturdaten aus verschiedenen Datenquellen – wie nachstehend erläutert – erfasst. Wie vereinbart, wurden folgende Arten von Bahnen nicht betrachtet:

- Eisenbahnen des nichtöffentlichen Verkehrs, wie Anschluss- und Werksbahnen
- Eisenbahnen, deren Infrastruktur nicht von der Deutschen Bahn betrieben wird
- Straßen- bzw. Stadtbahnen
- Strecken mit Charakter einer Anschlussbahn

Das ist durch deren andere Systemeigenschaften und die fehlende Verfügbarkeit entsprechender Infrastrukturdaten begründet.

Im Folgenden werden die für die quantitative Modellierung relevanten Merkmale mit ihren Ausprägungen vorgestellt. Neben den aus der Literaturrecherche zusammengestellten potentiellen Einflussfaktoren auf das Unfallgeschehen (vgl. Abschnitt 3.1), wurden zusätzlich weitere Merkmale berücksichtigt, welche aus den Straßendatenbanken ohnehin verfügbar waren oder aus den bereitgestellten Daten automatisiert erhoben werden konnten und denen zugleich eine Sicherheitsrelevanz unterstellt wurde.

4.1.1. Infrastrukturdaten Bahn

Von der DB Netz AG wurde eine Datenbank übermittelt, welche sämtliche Bahnübergänge enthält, die sich im Zuständigkeitsbereich der DB Netz AG als Infrastrukturbetreiber befinden. Sicherungsart und Straßenklasse konnten unmittelbar aus dieser Datenbank abgeleitet werden. Die Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge und die Streckenklassifizierung wurden für jeden Bahnübergang manuell aus der Streckendatenbank (DB Netz, 2014) erfasst. Dies wurde gleichermaßen für die Stärke des Schienenverkehrs mit Hilfe von Daten des Statistischen Bundesamtes (2010) und für die Nähe zu einem Bahnhof bzw. Haltepunkt mit dem Eisenbahnatlas (Schweers und Wall, 2011) vorgenommen. Die Anzahl der Gleise sowie der Kreuzungswinkel wurden nach Georeferenzierung der Bahnübergänge aus Luftbildern mit Hilfe einer Geoinformationssystems-Software ermittelt.

4.1.2. Infrastrukturdaten Straße

Verkehrsstärke (DTV), Längsneigung, Kurvigkeit, Anzahl der Fahrstreifen im Querschnitt, benachbarte Knotenpunkte und Straßenklasse je Bahnübergang wurden von den zuständigen Dienststellen der Bundesländer für das Netz der Bundes-, Landes- und Kreisstraßen in Form georeferenzierter grafischer Knoten- und Kantenrelationen mit zugehörigen Attributtabellen übermittelt. Für die genannten Straßenklassen konnten daher die entsprechenden Parameter für jeden Bahnübergang unmittelbar festgestellt werden. Für die übrigen Bahnübergänge wurden die Daten wiederum manuell aus Luftbildern mit Hilfe einer Geoinformationssystems-Software ermittelt.

Die Infrastruktur-Parameter der an die Bahnübergänge angrenzenden Straßenabschnitte wurden innerhalb eines Radius von 250 m um den Bahnübergang erfasst. Dieser pragmatische Ansatz wurde unter Berücksichtigung des üblichen Abstands zwischen Z 153 StVO (dreistreifige Bake)

und dem Bahnübergang gewählt, da es nach derzeitigem Erkenntnisstand nicht möglich ist, einen Einflussbereich des jeweiligen Bahnübergangs in Abhängigkeit von Schließzeit, DTV und sonstigen Parametern ausreichend genau zu bestimmen. Bei Bahnübergängen, deren kreuzende Straße nach weniger als 250 m an das übergeordnete Straßennetz anschließt, wurden die Parameter lediglich bis zu diesem Anschluss erhoben.

Der Anteil der Bahnübergänge, deren Parameter manuell nacherhoben werden mussten, ist aus Abbildung 5 ersichtlich.

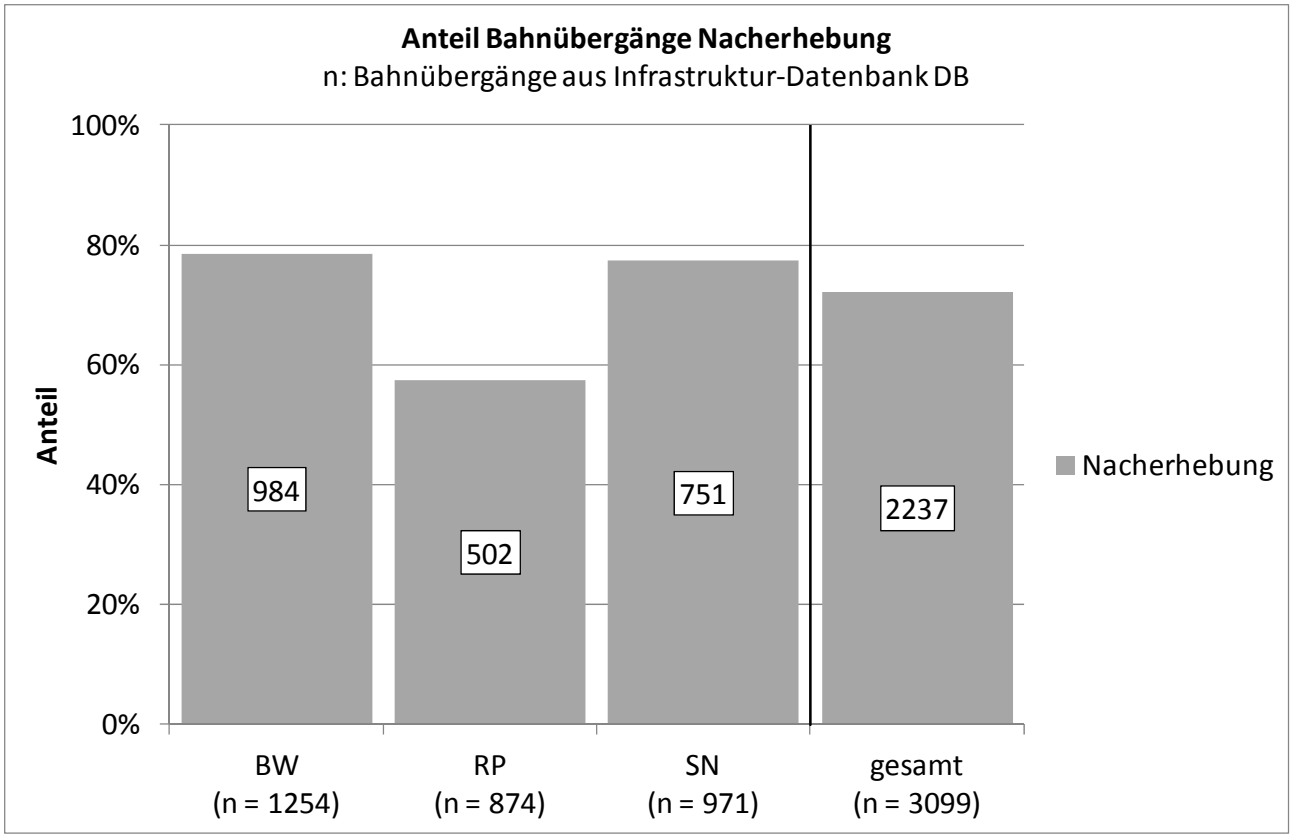


Abbildung 5: Bahnübergänge mit manuell zu erhebenden Parametern

Sichthindernisse im Umfeld der Bahnübergänge sind in den Straßendatenbanken nicht erfasst und können auch aus Luftbildern nicht abgeleitet werden. Eine Überprüfung anhand des Bundeslandes Rheinland-Pfalz, ob die entsprechenden Erkenntnisse aus den Protokollen durchgeführter Bahnübergangs-Schauen gewonnen werden können, lieferte ein negatives Ergebnis, weshalb Sichthindernisse im quantitativen Modell nicht berücksichtigt werden konnten. Der Einfluss der Sichtverhältnisse wurde jedoch ins qualitative Modell einbezogen (siehe Abschnitt 5.2).

4.1.3. Unfalldaten

Für die Generierung der Unfallzahlen je Bahnübergang wurde auf folgende Datenquellen zurückgegriffen:

- Für Baden-Württemberg und Sachsen wurden alle polizeilich registrierten Straßenverkehrsunfälle mit Beteiligung von Eisenbahn- und Straßenbahnfahrzeugen aus den entsprechenden EUSKa-Datenbanken exportiert. Bahnübergänge von Straßen- bzw. Stadtbahnen sind nicht Gegenstand des Projektes, es wurde dennoch eine Überprüfung mittels Überlagerung mit der Infrastrukturdatenbank der Deutschen Bahn (siehe Abschnitt 4.1.1) vorgenommen, um eventuelle fehlerhafte Zuweisungen der Art des am Unfall beteiligten

Schienenfahrzeugs in EUSKa zu berücksichtigen. In Baden-Württemberg umfassen die Daten den Zeitraum der Jahre 2008 bis 2010, in Sachsen den Zeitraum der Jahre 2007 bis 2011.

- Für Rheinland-Pfalz wurden die Unfalldaten seitens der zuständigen Dienststelle aus der Unfalldatenbank des Bundeslandes exportiert, überprüft und dem Auftragnehmer zur Verfügung gestellt. Die Daten umfassen den Zeitraum der Jahre 2007 bis 2011.
- Durch die Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes (EUB) werden die Daten zu „*gefährlichen Ereignissen im Eisenbahnbetrieb*“ insgesamt erfasst. Für jedes zu erfassende Ereignis wird ein „*Eisenbahn-Untersuchungsbericht*“ angelegt. Neben anderen sicherheitsrelevanten Ereignissen wie z. B. Störungsmeldungen oder technische Defekte zählen auch sämtliche Unfälle zwischen Schienenfahrzeugen und übrigen Verkehrsteilnehmern an Bahnübergängen zu den „*gefährlichen Ereignissen*“ (Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle, 1999). Seitens dieser Dienststelle wurden sämtliche in der dortigen Unfalldatenbank registrierten Zusammenpralle zwischen Schienenfahrzeugen und sonstigen Verkehrsteilnehmern extrahiert und dem Auftragnehmer zur Verfügung gestellt. Die Daten umfassen den Zeitraum der Jahre 2005 bis 2011.

4.2 Umfang der Daten für das quantitative Modell

4.2.1. Infrastrukturdaten

Seitens des Statistischen Bundesamtes werden im Abstand von fünf Jahren Daten zum Schienenverkehr in Deutschland veröffentlicht. Dies betrifft sowohl Strecken, bei denen die Deutsche Bahn als bundeseigenes Eisenbahninfrastrukturunternehmen auftritt, als auch Strecken der nichtbundeseigenen Eisenbahninfrastrukturunternehmen (NE-Bahnen). Der aktuell vorliegende statistische Bericht bezieht sich auf die Daten des Jahres 2010 (Statistisches Bundesamt, 2010).

Die Berichte stellen unter anderem die Anzahl aller Bahnübergänge, welche nach der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung betrieben werden, dar. In Verbindung mit der Infrastrukturdatenbank der Deutschen Bahn kann somit unmittelbar der Anteil der Bahnübergänge der Deutschen Bahn an allen Bahnübergängen nach Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung bundesweit ermittelt werden (Abbildung 6).

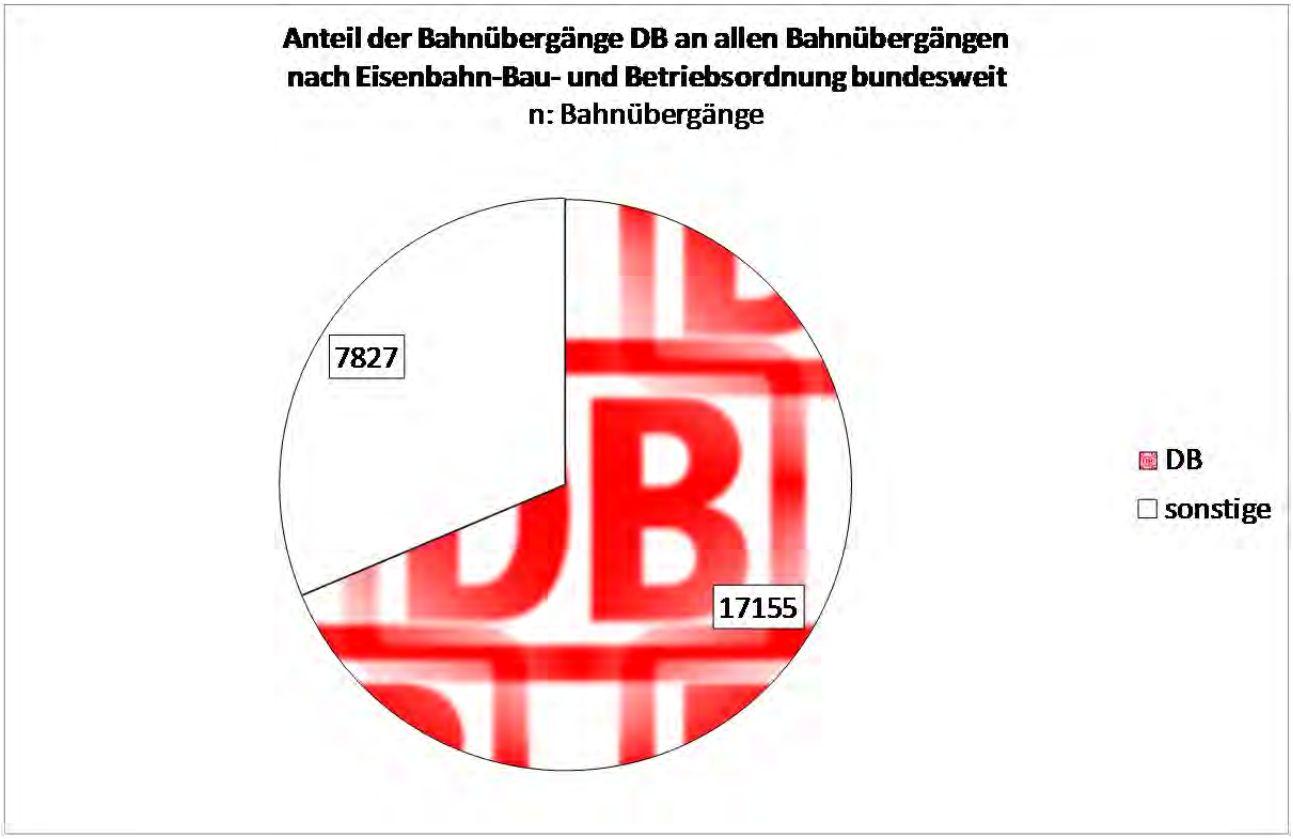


Abbildung 6: **Anteil der Bahnübergänge der Deutschen Bahn an allen Bahnübergängen nach EBO bundesweit (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2010; Infrastrukturdatenbank DB)**

Der Anteil der Bahnübergänge im Untersuchungsgebiet an allen Bahnübergängen nach Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung bundesweit ist aus Abbildung 7 ersichtlich.

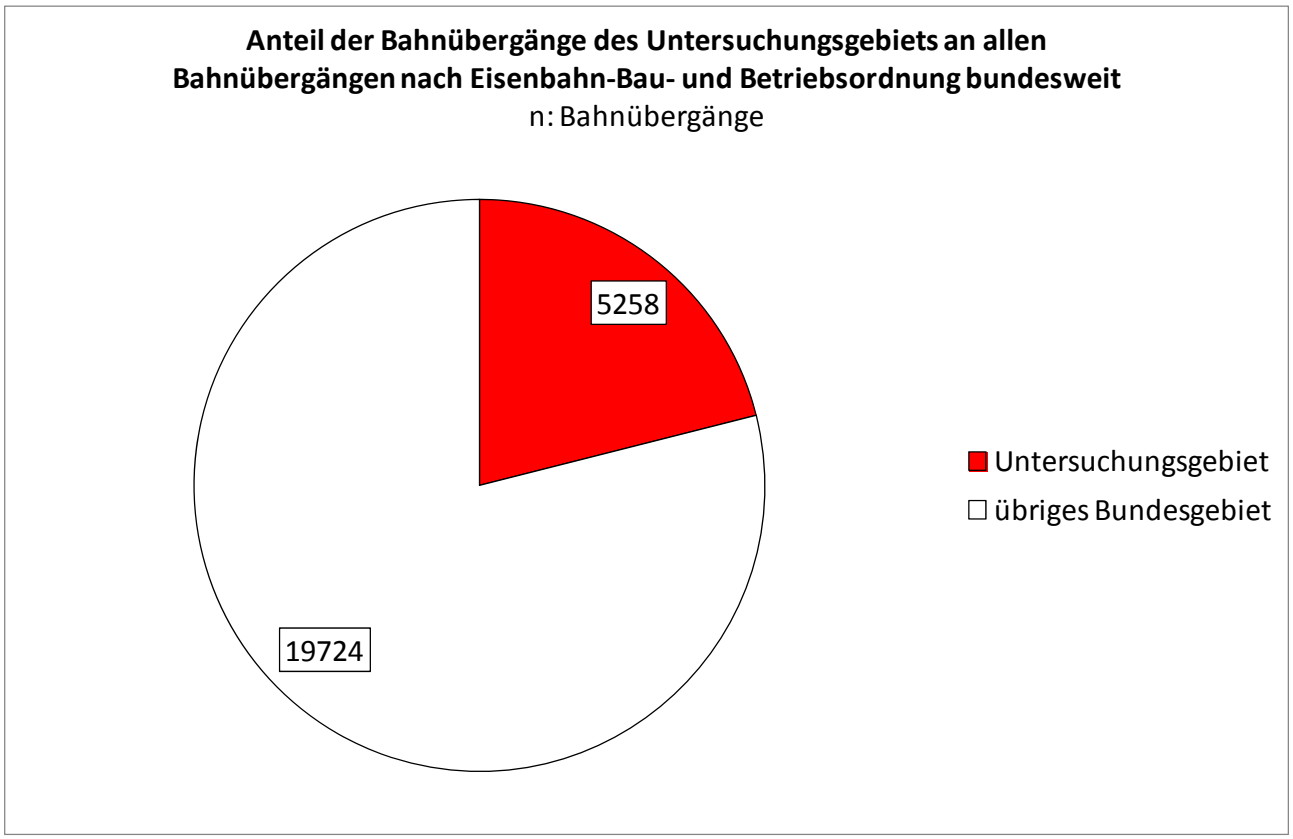


Abbildung 7: **Anteil der Bahnübergänge des Untersuchungsgebiets an allen Bahnübergängen nach EBO bundesweit (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2010)**

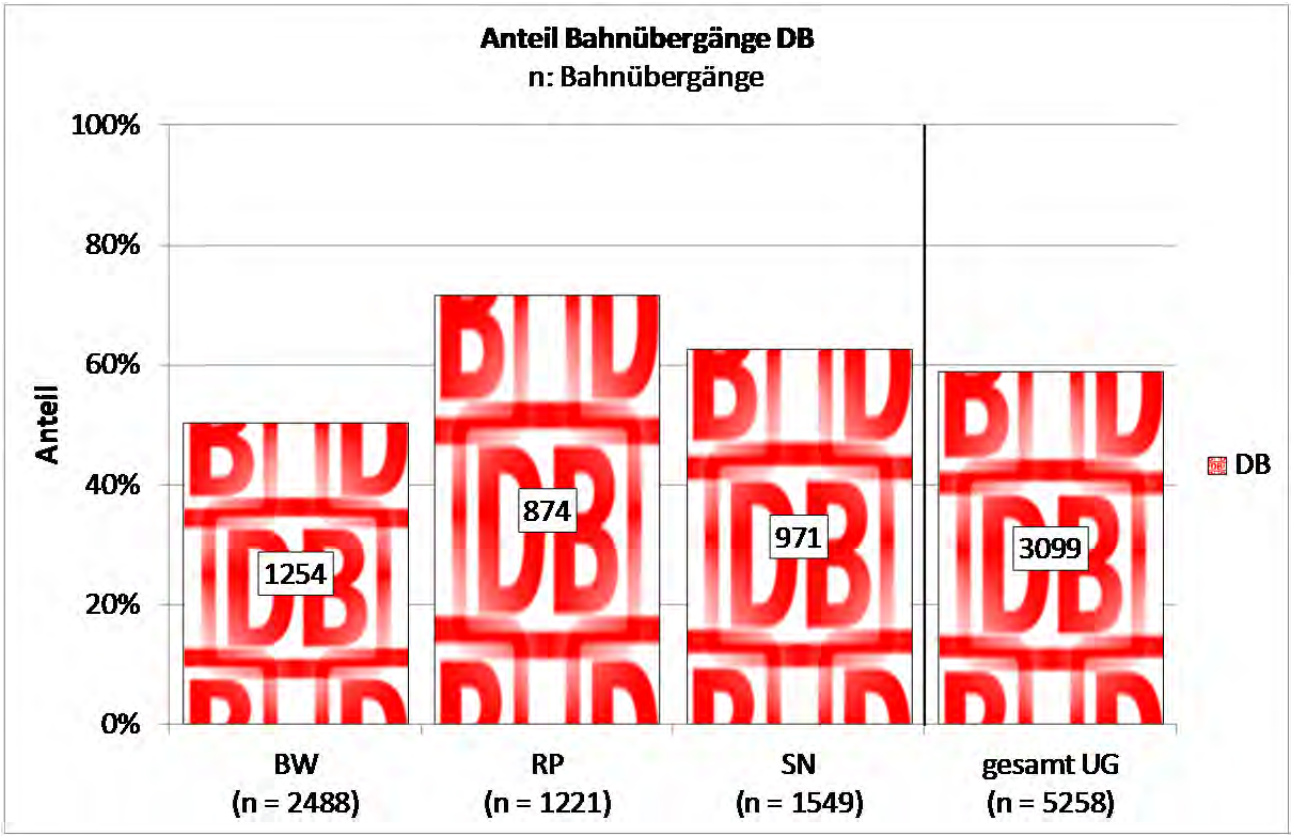


Abbildung 8: **Anteil der Bahnübergänge der Deutschen Bahn an allen Bahnübergängen nach EBO im Untersuchungsgebiet (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2010; Infrastrukturdatenbank DB)**

Innerhalb des Untersuchungsgebietes verteilt sich der Anteil der Bahnübergänge der Deutschen Bahn an allen Bahnübergängen nach Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung wie in Abbildung 8 dargestellt. Deutlich wird: In Baden-Württemberg ist der Anteil der sonstigen Infrastruktur-Betreiber nahezu identisch mit dem Anteil der DB, während in den übrigen Bundesländern des Untersuchungsgebietes der Anteil der DB deutlich höher ist.

Teilweise abweichende Stichprobenumfänge der Bahnübergänge in den Auswertungen resultieren aus einer nur fünfjährlichen Berichtspflicht der nichtbundeseigenen Eisenbahnen an das Statistische Bundesamt (zuletzt 2010), während die Datenbank der Deutschen Bahn nur mit Stand Januar 2014 vorliegt. Erfahrungsgemäß verändert sich der Bahnübergangsbestand jedoch nur langsam, sodass diese Abweichung für den hier vorliegenden Zweck (Vergleich DB/Sonstige) als unproblematisch anzusehen ist.

Die Infrastrukturdaten der Deutschen Bahn beinhalten ferner Angaben zu Lagekoordinaten, Sicherungsart des Bahnübergangs, Art des Weges bzw. Straßenklassifizierung und Zustand der Strecke. Letztere Angabe besitzt die Ausprägungen „in Betrieb“, „stillgelegt“ und „abgebaut“. Dies ermöglichte eine entsprechende Filterung der Daten, um nur Bahnübergänge an in Betrieb befindlichen Strecken in das Untersuchungskollektiv aufzunehmen. Um sicherzustellen, dass zwischenzeitlich keine Strecke stillgelegt wurde, an welcher sich innerhalb des Untersuchungszeitraumes noch Unfälle ereigneten, wurde dieser Sachverhalt anhand einer Datenbank des Eisenbahn-Bundesamtes mit Darstellung der Streckenstilllegungen der vergangenen Jahre überprüft.

Bei der ersten Auswertung der Luftbilder zeigte sich, dass einige Bahnübergänge nicht mehr vorhanden sind oder an den zugrundeliegenden Koordinaten nicht auffindbar sind, obwohl sie in der Infrastrukturdatenbank der Deutschen Bahn noch enthalten sind. Die Gründe für den Entfall der Bahnübergänge waren nach der ersten Luftbildauswertung zumeist:

- Entfall eines oder mehrerer Bahnübergänge bei Neutrassierungen von Straßen- oder Bahn-Abschnitten
- Ersatz eines Bahnübergangs durch planfreie Lösungen
- Ersatzlose Aufhebung des Bahnübergangs (häufig bei Feld- bzw. Waldwegen).

In einem zweiten Schritt wurden 533 Bahnübergänge von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, da sie sich auf die folgenden Kategorien verteilen:
- besondere Sicherungsart (Anrufschranken, feste Abschlüsse, …)
- Charakter einer Anschlussbahn
- identischer Standort / doppelter Datensatz
- keine Straßenparameter erhebbar
- Löschvormerkung / stillgelegt
- Nebengleis
- nicht DB (Streckennummer > 9000)
- nicht vorhanden
- nur interner Verkehr
- Privatweg (ohne öffentlichen Verkehr)
- Reisendenübergang / Zuwegung Bf.

Daraus resultiert schließlich ein Gesamtkollektiv von 2.566 Bahnübergängen.

4.2.2. Unfalldaten

Unfalldaten lagen grundsätzlich von zwei verschiedenen Datenquellen vor – die der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes (EUB) sowie polizeilich erhobene Daten zu Straßenverkehrsunfällen (EUSKa-Daten, vgl. Kapitel 4.1.3). Daher wurde zunächst überprüft, ob Unterschiede hinsichtlich der erfassten Unfälle bestehen. Da es sich lediglich um einen Vergleich der Datenquellen handelt, wird hier vom Gesamtkollektiv der 2.566 Bahnübergänge abgewichen und die folgenden Auswertungen werden auf Basis aller 3.099 Bahnübergänge der DB, bei denen die zugehörige Bahnstrecke nicht den Status „stillgelegt“ oder „abgebaut“ aufwies, durchgeführt.

Sowohl in EUSKa als auch bei der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes wird ein Unfall als „Unfall mit Getöteten“ geführt, wenn eine der am Unfall beteiligten Personen spätestens 30 Tage nach dem Unfall verstorben ist. Die Definition „Unfall mit Schwerverletzten“ weicht jedoch ab: Während in den EUSKa-Datenbanken ein Unfall als „Unfall mit Schwerverletzten“ gilt, sobald einer der Unfallbeteiligten stationär in ein Klinikum aufgenommen wird, gilt dies bei der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes erst ab einer stationären Aufnahme von mindestens 15 Tagen.

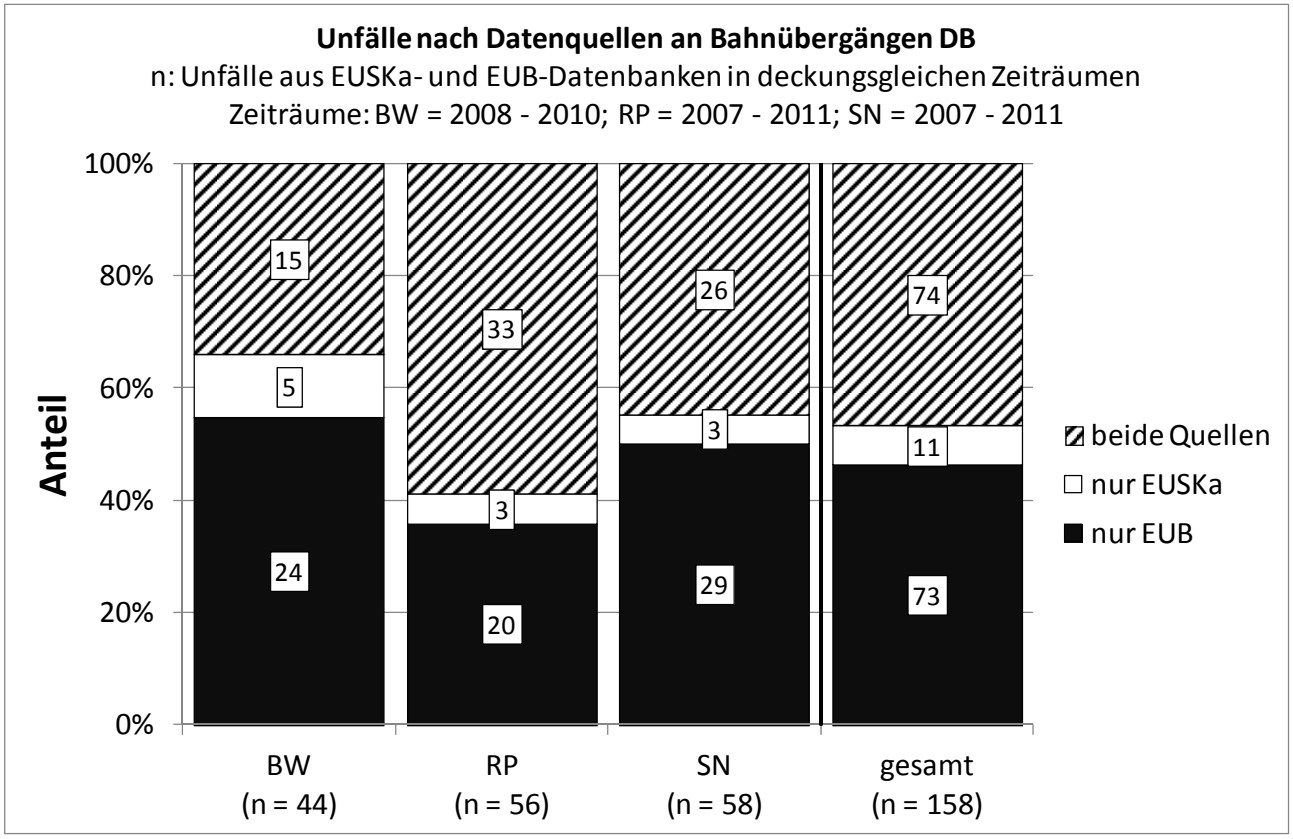


Abbildung 9: Vergleich der Inhalte der Datenquellen EUSKa und EUB

Ein Vergleich der deckungsgleichen Zeiträume der Datenbanken zeigte darüber hinaus erhebliche Differenzen hinsichtlich der Anzahl registrierter Unfälle insgesamt. Dies ist aus Abbildung 9 ersichtlich.

Deutlich wird: Eine erhebliche Anzahl von Unfällen ist nur in der Datenbank der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes, nicht aber in den EUSKa-Daten enthalten. Der umgekehrte Fall existiert ebenfalls, ist jedoch weitaus seltener. Für die Abweichungen konnten folgende Gründe ermittelt werden:

- Aufgrund entsprechender Regelungen im Bundespolizeigesetz (§ 58 BPolG, Zuständigkeit der Bundespolizei für Bahnanlagen gemäß § 64 Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung) kommt es häufiger vor, dass die gesamte Unfallaufnahme an die Bundespolizei abgegeben wird und daher der Unfall in EUSKa nicht erfasst ist. Dies wurde auf eine Anfrage hin seitens der Polizeidirektion Dresden mitgeteilt. Folglich gehen die entsprechenden Unfälle nicht in die EUSKa-Daten ein.
- Eine Anfrage an die Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes im März 2014 zur Ermittlung der Gründe des umgekehrten Falles (Unfälle nur in EUSKa erfasst) ergab, dass „*die Ereignisse vermutlich nicht gemeldet worden sind*“ und „*kein Anspruch auf Vollständigkeit der Datenbankauswertungen erhoben werde*“.

Die erläuterten Unterschiede in der Definition der Unfallschwere (und daraus resultierend in einer unterschiedlichen Einordnung der Verunglückten in den Grad der Verletzungsschwere) führen in unmittelbarer Konsequenz zu entsprechenden Abweichungen bei der Betrachtung der Verunglücktenstruktur der Unfälle, die in beiden Erfassungssystemen registriert sind (Abbildung 10).

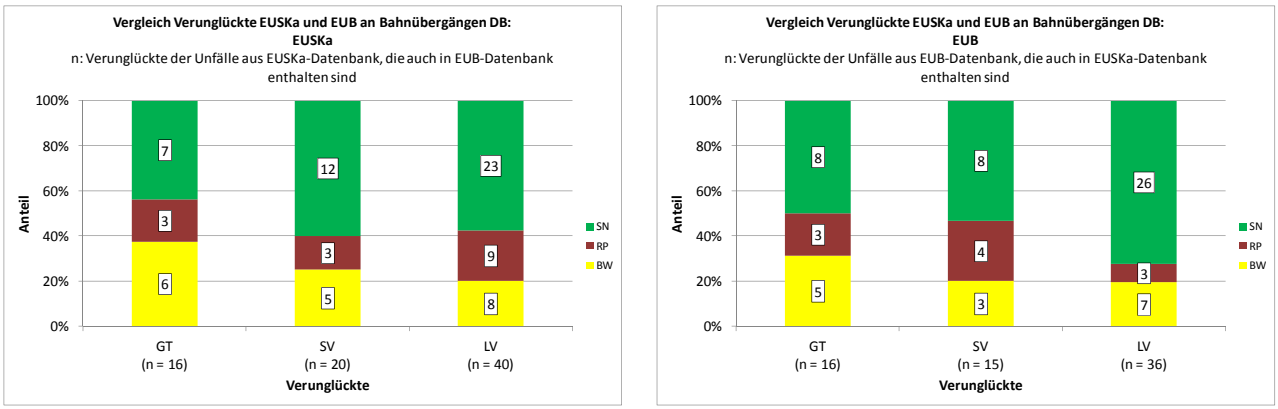


Abbildung 10: Vergleich der Verunglücktenstruktur der Datenquellen EUSKa (links) und EUB (rechts)

Es zeigt sich ein höherer Anteil Schwerverletzter bei der Erfassung nach EUSKa. Ferner ist eine generelle Differenz der Anzahl der Verunglückten zu erkennen. Daher wurde in den Anfragen an die Polizeidirektion Dresden und die Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes auch die Erfassung Verunglückter generell erfragt.

Nach Expertenangaben der Polizeidirektion Dresden erfolgt eine vollständige Erfassung der Verunglückten auch innerhalb des Schienenfahrzeugs (einschließlich des Triebfahrzeugführers).

Für die folgenden Auswertungen sowie die Modellierung wird auf Basis der vorgestellten Erkenntnisse

- die Schnittmenge aus Unfällen in EUSKa und durch die Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes erfassten Unfällen, ergänzt um
- die nur von der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes erfassten Unfälle

verwendet. Nur in EUSKa enthaltene Unfälle können nicht in das quantitative Unfallmodell aufgenommen werden, da aufgrund abweichender Zeiträume der vorliegenden EUB- und EUSKa-Daten Verzerrungen im quantitativen Unfallmodell entstehen würden. Das heißt, es wird sich im Folgenden nur noch auf die EUB-Datensätze bezogen.

Von den ursprünglich 241 Unfällen der EUB-Datenbank wurden 15 Unfälle von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, da sie zumeist beim Rangieren an diesen Orten auftraten:

- Hafengebiet
- Anschlussgleis
- Bahnhofsgleis
- Baugleis
- Firmengelände.

Daraus resultieren schließlich für das Gesamtkollektiv nach EUB 226 Unfälle.

4.3 Auswertung der Daten für das quantitative Modell

4.3.1. Datengrundlage

In den folgenden Abschnitten sind die Verteilungen der Infrastrukturparameter und Unfälle dargestellt. Diese Daten bilden die Ausgangsbasis für das quantitative Unfallmodell, indem für jeden Bahnübergang die Unfallzahl (je nach Modellierbarkeit unterteilt nach Unfallkategorie, Art der Verkehrsbeteiligung etc.) als abhängige Variable und die konkrete Ausprägung der Infrastrukturparameter als unabhängige Variablen in einem Datensatz zusammengefasst werden. Die nachfolgenden Darstellungen erlauben einen ersten Überblick über Ausprägung und Verteilung der jeweiligen Parameter.

Wie in Kapitel 4.2.1 bereits erwähnt liegen der Untersuchung 2.566 Bahnübergänge zugrunde, innerhalb derer 226 Unfälle mit Personen- und Sachschaden in den Jahren 2005-2011 von der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes registriert wurden. Allerdings liegen für 1.902 Bahnübergänge keine DTV-Werte (Kfz) sowie für 11 Bahnübergänge keine Daten für die Belastungsklasse (Bahn) vor. Die Verkehrsstärke im Generellen stellt aber als Expositionsgröße eine elementare Eingangsgröße für die Erstellung des Unfallmodells dar. Daher musste das Untersuchungskollektiv entsprechend angepasst werden. Zunächst werden nur diejenigen Bahnübergänge in die Untersuchung einbezogen, für die sowohl Daten zum DTV (Kfz) also als auch zu den Belastungsklassen (Bahn) vorliegen. Darüber hinaus ist es möglich den DTV (Kfz) für nicht technisch gesicherte Bahnübergänge abzuschätzen, da die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (§ 11 Abs. 7) eine feste DTV-Obergrenze vorsieht. Eine ausführliche Erläuterung zur Abschätzung der DTV-Werte für die 514 nicht technisch gesicherten Bahnübergänge erfolgt in Kapitel 5.1.1. Eine sinnvolle Abschätzung der DTV-Werte (Kfz) für technisch gesicherte Bahnübergänge sowie der Belastungsklassen (Bahn) unabhängig von der Sicherungsart ist nicht möglich.

Damit stehen für die Untersuchung 1.169 Bahnübergänge (Untersuchungskollektiv) zur Verfügung, innerhalb derer 110 Unfälle mit Personen- und Sachschaden in den Jahren 2005-2011 von der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes registriert wurden. Wie sich die Bahnübergänge und Unfälle innerhalb des Untersuchungskollektives auf die Bundesländer verteilen, zeigt Abbildung 11. Eine analoge Darstellung für das Gesamtkollektiv zeigt Anlage 1. Zum Vergleich werden auch die folgenden Auswertungen für das Gesamtkollektiv der 2.566 Bahnübergänge als Anlage dokumentiert.

Chronologische Zusammenfassung

Tabelle 2: Datenumfang quantitatives Modell

Anzahl nach Datenumfang	*BÜ*	*Unfall-BÜ*	*Unfälle*	*Verunglückte*
1.a) DB-Infrastrukturdatenbank	3.099			
1.b) EUB-Unfalldatenbank			241	
2.) Gesamtkollektiv	2.566	188	226	260
3.) Untersuchungskollektiv	1.169	95	110	153

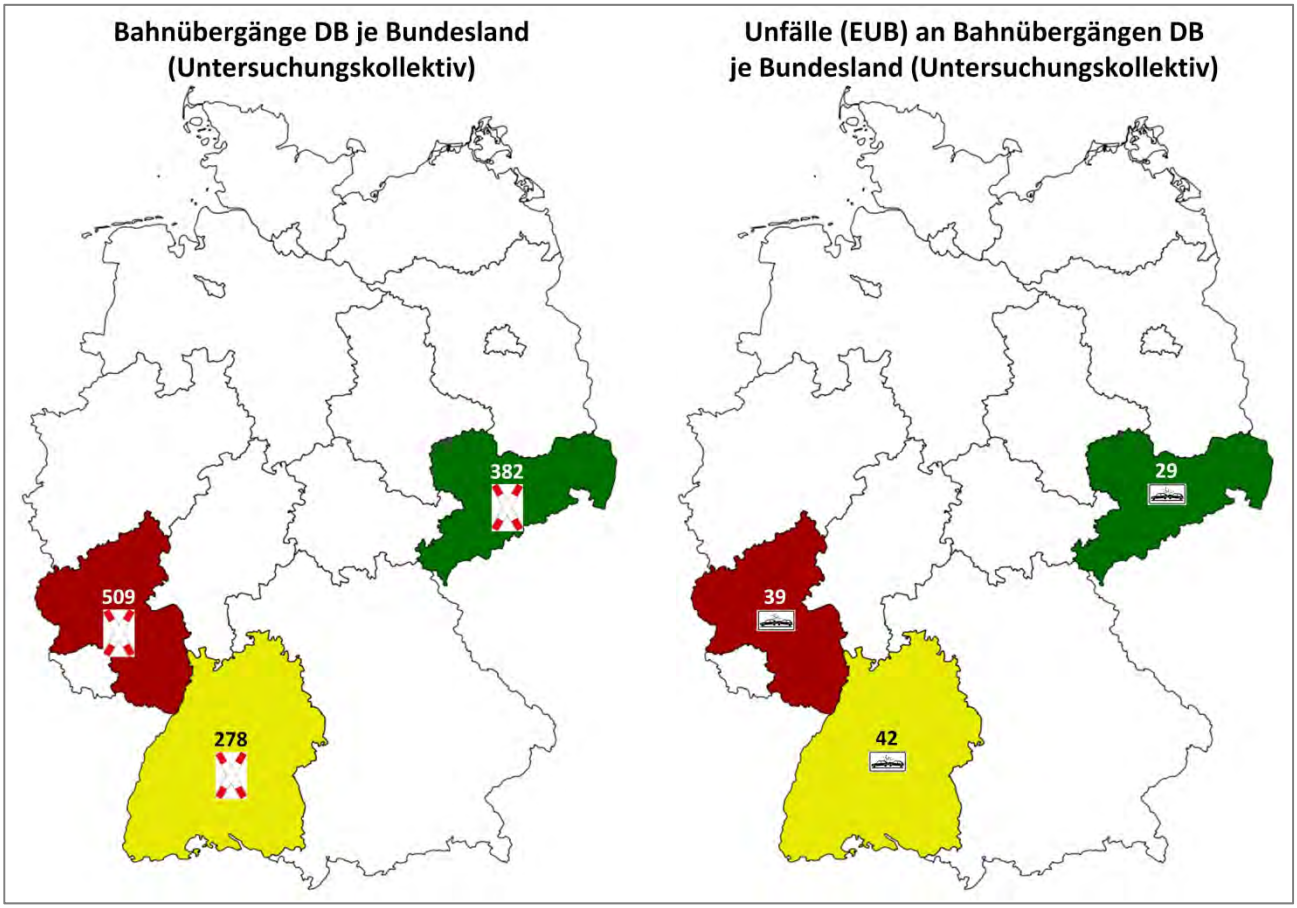


Abbildung 11: Verteilung der Bahnübergänge DB und Unfälle (EUB) des Untersuchungskollektives auf die Bundesländer

4.3.2. Infrastruktur- und Unfalldaten Bahn

Sicherungsarten

Die Sicherung von Bahnübergängen wird nach Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung unterschieden in:

- nichttechnische Sicherung (durch Sichtflächen und/oder Pfeifsignale),
- Blinklicht bzw. Lichtzeichen allein (Abbildung 12),
- Blinklicht bzw. Lichtzeichen mit Halbschranken (Abbildung 13),
- Blinklicht bzw. Lichtzeichen mit Vollschranken (analog Abbildung 13),
- Vollschranken allein,
- Postensicherung durch Bahnmitarbeiter (Abbildung 14).

Dabei sind Blinklichter (auch in den genannten Kombinationen) neu nicht mehr zugelassen, sondern nur im Bestand vorzufinden.

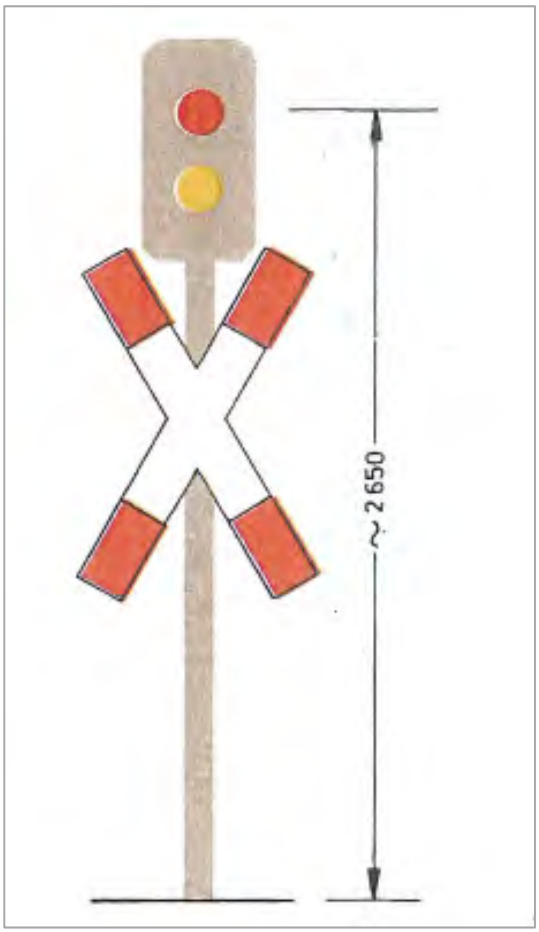


Abbildung 12: **Lichtzeichen (Quelle: Anlage 5 zur Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung)**

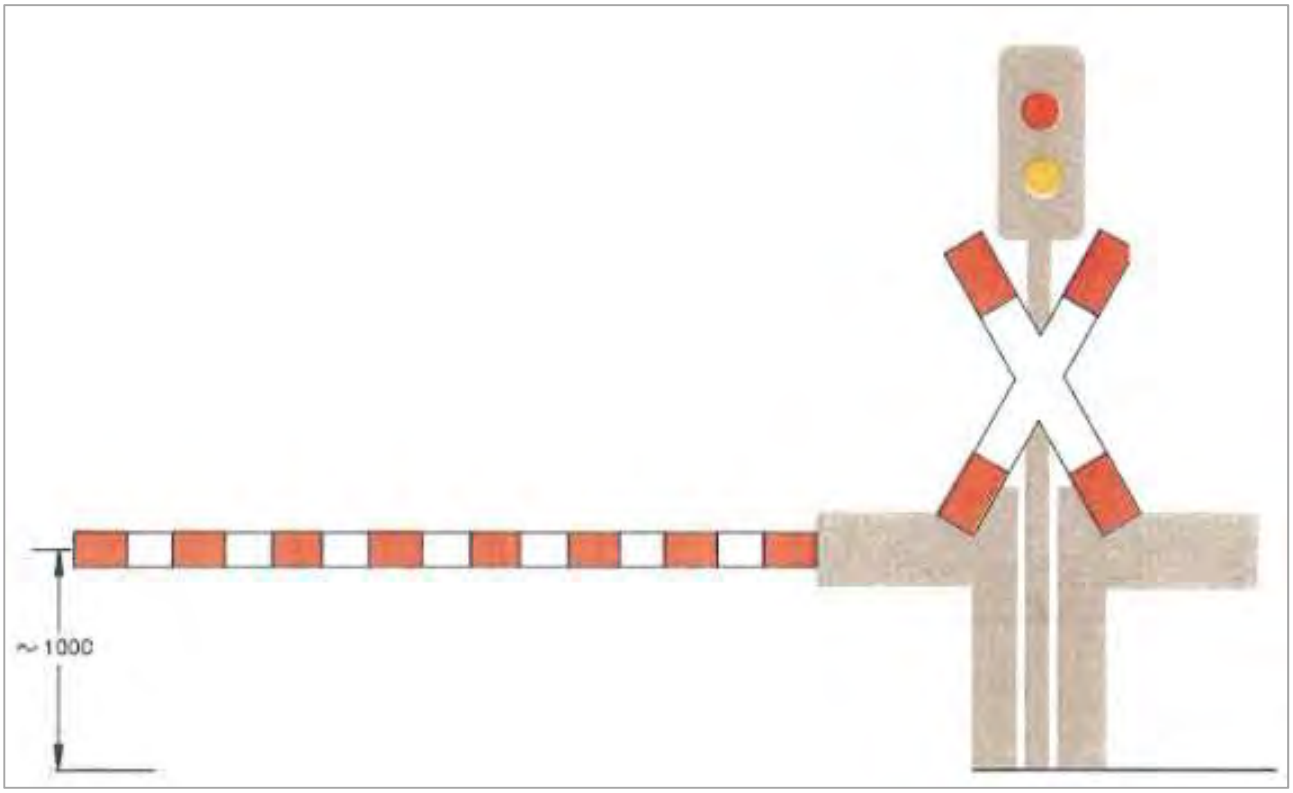


Abbildung 13: **Lichtzeichen mit Halbschranke (Quelle: Anlage 5 zur Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung)**

Abbildung 14: Postensicherung

Die beschriebenen Sicherungsarten verteilen sich an den Bahnübergängen im Untersuchungskollektiv entsprechend Abbildung 15.

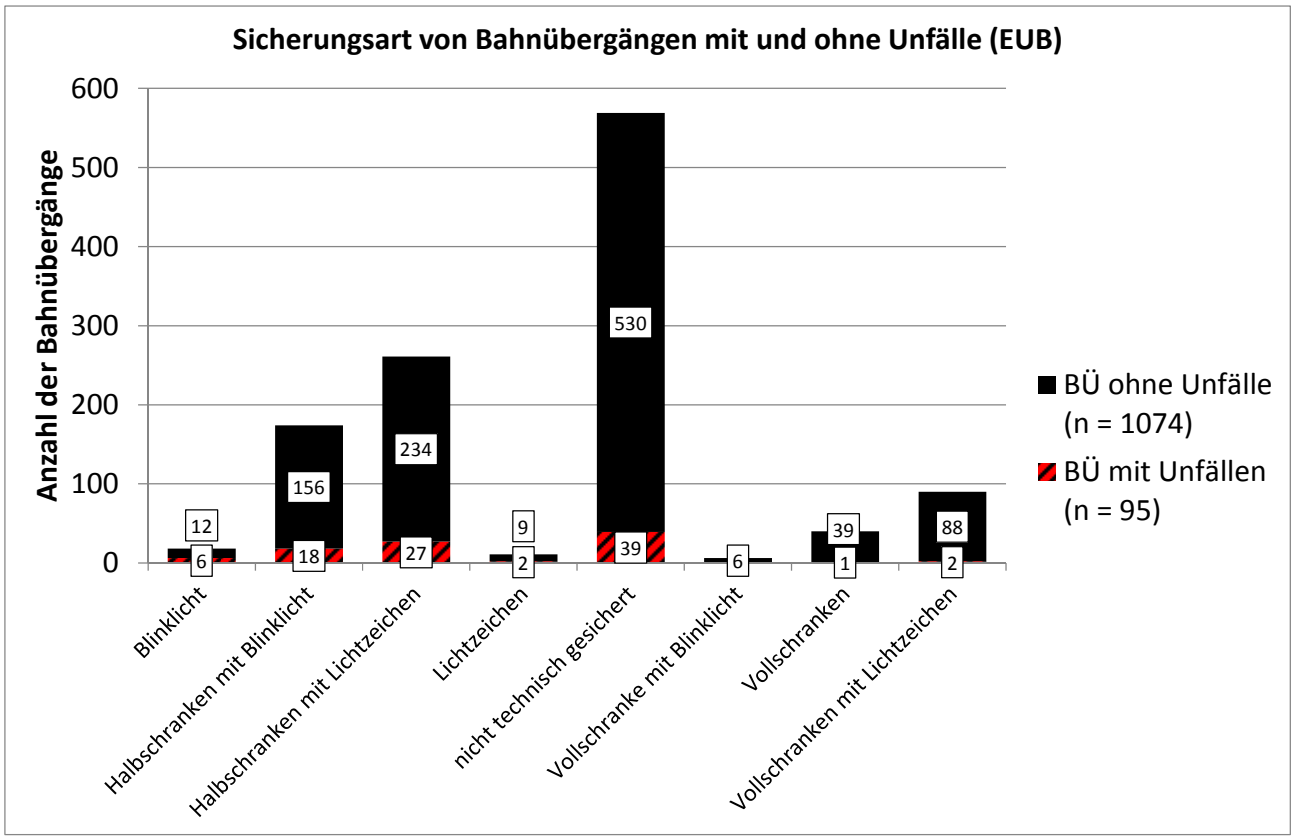


Abbildung 15: Sicherungsarten im Untersuchungskollektiv (Quelle: Datenbank DB 01/2014; Luftbild-Auswertungen)

Deutlich wird, dass etwa die Hälfte (49 %) der Bahnübergänge keine technische Sicherung aufweisen. Die am häufigsten verwendete technische Sicherung besteht aus Lichtzeichenanlagen mit Halbschranken.

Aussagen über die Wirksamkeit der einzelnen Sicherungsarten können hieraus nicht abgeleitet werden, da die Einsatzkriterien gemäß den Regelwerken (EBO, 2008 und DB Netz, 2008b) ihrerseits von weiteren Faktoren abhängen. Die nichttechnische Sicherung wird demnach unter anderen Rahmenbedingungen (u. a. geringere Verkehrsstärken, Zuggeschwindigkeiten und Anzahl der Gleise) eingesetzt, so dass diese Kriterien in den Vergleich einbezogen werden müssen. Dies ist erst mit Hilfe der zu entwickelnden Risikomodelle möglich.

Vergleicht man die Verteilung mit der des Gesamtkollektives (vgl. Anlage 1) ist festzustellen, dass die häufigste Sicherungsart die technisch gesicherte Lösung „Halbschranken mit Lichtzeichen“ ist. Nicht technisch gesicherte Bahnübergänge kommen in 22 % der Fälle zur Anwendung. Die Unterschiede im Vergleich zum Untersuchungskollektiv sind drauf zurückzuführen, dass technisch gesicherte Bahnübergänge ohne DTV-Daten (Kfz) aus dem Untersuchungskollektiv ausgeschlossen wurden. Für nicht technisch gesicherte Bahnübergänge kann eine Abschätzung der fehlenden Daten vorgenommen werden (vgl. Kapitel 5.1.1). Deshalb bleiben diese im Untersuchungskollektiv erhalten.

Schienenverkehrsstärke

Die Stärke des Schienenverkehrs wird nach (Statistisches Bundesamt, 2010) in sieben Klassen entsprechend Tabelle 3 eingeteilt. Danach ergibt sich die in Abbildung 16 gezeigte Aufteilung an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs.

Tabelle 3: Belastungsklassen der Bahnstrecken (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2010)

Klasse	Züge/ Jahr
1	1 – 10.000
2	10.001 – 20 000
3	20.001 – 35 000
4	35.001 – 50.000
5	50.001 – 75.000
6	75.001 – 100.000
7	mehr als 100.000

Tendenziell nimmt die Bahnübergangszahl mit zunehmender Schienenverkehrsstärke ab, was sich aus der grundsätzlichen Vermeidung von Bahnübergängen vorrangig auf hoch belasteten Eisenbahnstrecken erklären lässt. Es ist zu berücksichtigen, dass die Klassenbreiten unterschiedlich groß sind, was auf die Kategorisierung der zugrunde liegenden Datenquelle zurückzuführen ist.

Auch diese Darstellung erlaubt für sich noch keine Aussage zur Sicherheitswirkung, da Bahnübergänge an Strecken mit größeren Zugzahlen mit stärkeren Sicherungsarten versehen sind als an Strecken mit kleineren Zugzahlen. Hinzu kommt eine Abhängigkeit zu den Zuggeschwindigkeiten und Gleiszahlen, die sich zwischen Nebenbahnen mit kleineren Zugzahlen und Hauptbahnen mit größeren Zugzahlen unterscheiden.

Prinzipiell können die Erkenntnisse auf Basis des Gesamtkollektives (siehe Anlage 3) bestätigt werden. Allerdings ist auch festzustellen, dass mehr Bahnübergänge der Belastungsklassen 2 und

3 aufgrund fehlender DTV-Daten (Kfz) ausgeschlossen werden mussten, im Vergleich zu denjenigen anderer Klassen.

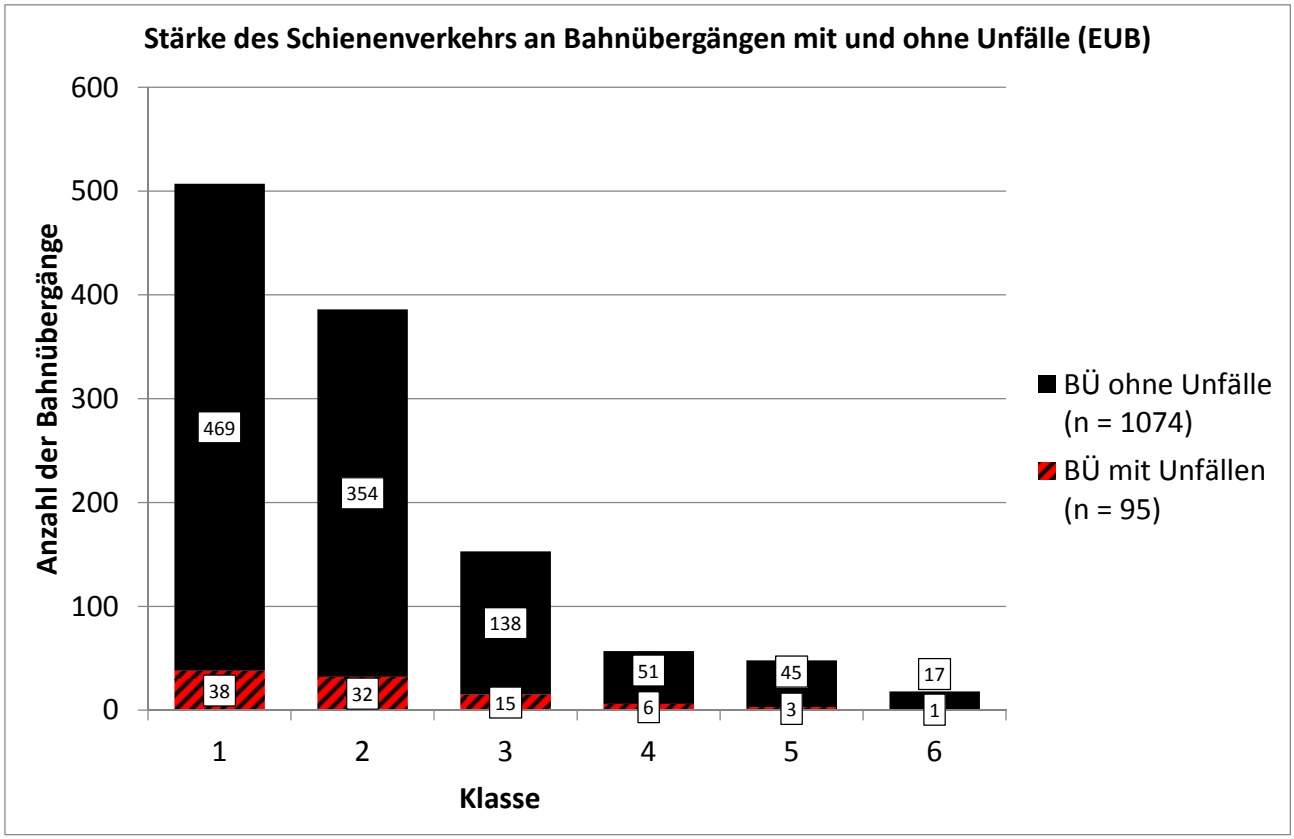


Abbildung 16: **Stärke des Schienenverkehrs an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2010)**

Straßenklassen

Die Straßenklassen sind an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs wie in Abbildung 17 dargestellt verteilt.

Es ist erkennbar, dass die Mehrzahl der Bahnübergänge im Untersuchungskollektiv an untergeordneten Straßen und Wegen liegt. Landes- und Kreisstraßen sowie Fuß- und Radwege sind in ähnlichen Größenordnungen im Untersuchungskollektiv vertreten; die geringste Zahl an Bahnübergängen ist im Zuge von Bundesstraßen zu verzeichnen. Aussagen zur Sicherheit lassen sich auch hier wegen der oben beschriebenen Abhängigkeiten (hier insbesondere zur Kfz-Verkehrsstärke der Straße) an dieser Stelle nicht treffen.

Vergleicht man diese Verteilung mit der des Gesamtkollektives (siehe Anlage 4) sind Unterschiede erkennbar: Im Gesamtkollektiv wird noch deutlicher, dass die Mehrzahl der Bahnübergänge im Untersuchungskollektiv an untergeordneten Straßen und Wegen liegt. Auffällig ist, dass Bahnübergänge im Zuge von übrigen Straßen mit Fahrverkehr ausschließlich technisch gesichert sind. Das führte dazu, dass etwa 80 % der übrigen Straßen mit Fahrverkehr aus dem Untersuchungskollektiv ausgeschlossen werden mussten. Darüber hinaus mussten mehr als die Hälfte der Bahnübergänge im Zuge von sonstigen Straßen mit allgemeinem Kfz-Verkehr (57 %) ausgeschlossen werden. Die geringsten Ausschluss-Anteile sind im Zuge von Fuß- und Radwegen (12 %) zu verzeichnen.

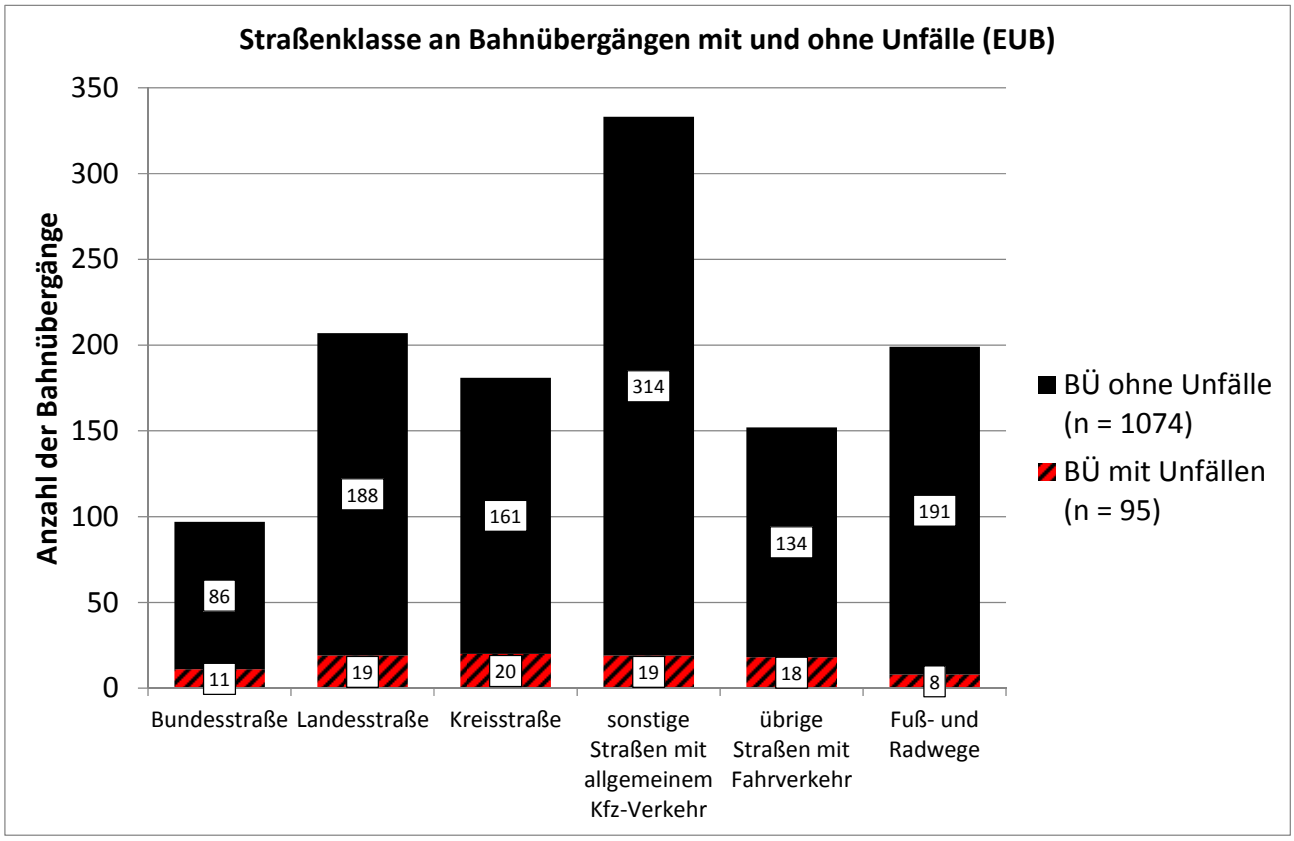


Abbildung 17: Straßenklassen an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Datenbank DB 01/2014)

Maximale Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge

Abbildung 18 zeigt die Verteilung der maximalen (zulässigen) Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge an den Bahnübergängen.

Der überwiegende Teil der Bahnübergänge befindet sich im Geschwindigkeitsbereich zwischen 60 und 100 km/h. Es ist zu beachten, dass die Klassenbreiten unterschiedlich groß sind, was aus der Kategorisierung der zugrunde liegenden Datenquelle resultiert.

Bei der Interpretation ist weiterhin zu berücksichtigen, dass Bahnübergänge in den unteren Geschwindigkeitsbereichen vorrangig auf Nebenbahnen mit geringen Zugzahlen liegen und mit anderen Sicherungsarten ausgestattet sind als Bahnübergänge in höheren Geschwindigkeitsbereichen. Daher müssen diese Faktoren im Rahmen der späteren Modellbildung gleichzeitig betrachtet werden.

Tendenziell werden die Ergebnisse durch das Gesamtkollektiv bestätigt (siehe Anlage 5). Es ist aber auch festzustellen, dass mit zunehmender Geschwindigkeit auch mehr Bahnübergänge wegen fehlender Daten zur Verkehrsstärke aus dem Untersuchungskollektiv ausgeschlossen werden mussten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in hohen Geschwindigkeitsbereichen in der Mehrzahl der Fälle eine technische Sicherung zur Anwendung kommt. Im Gegensatz liegen 90 % der nichttechnisch gesicherten Bahnübergänge an Strecken mit einer maximalen Geschwindigkeit des Schienenverkehrs von 50 und 100 km/h.

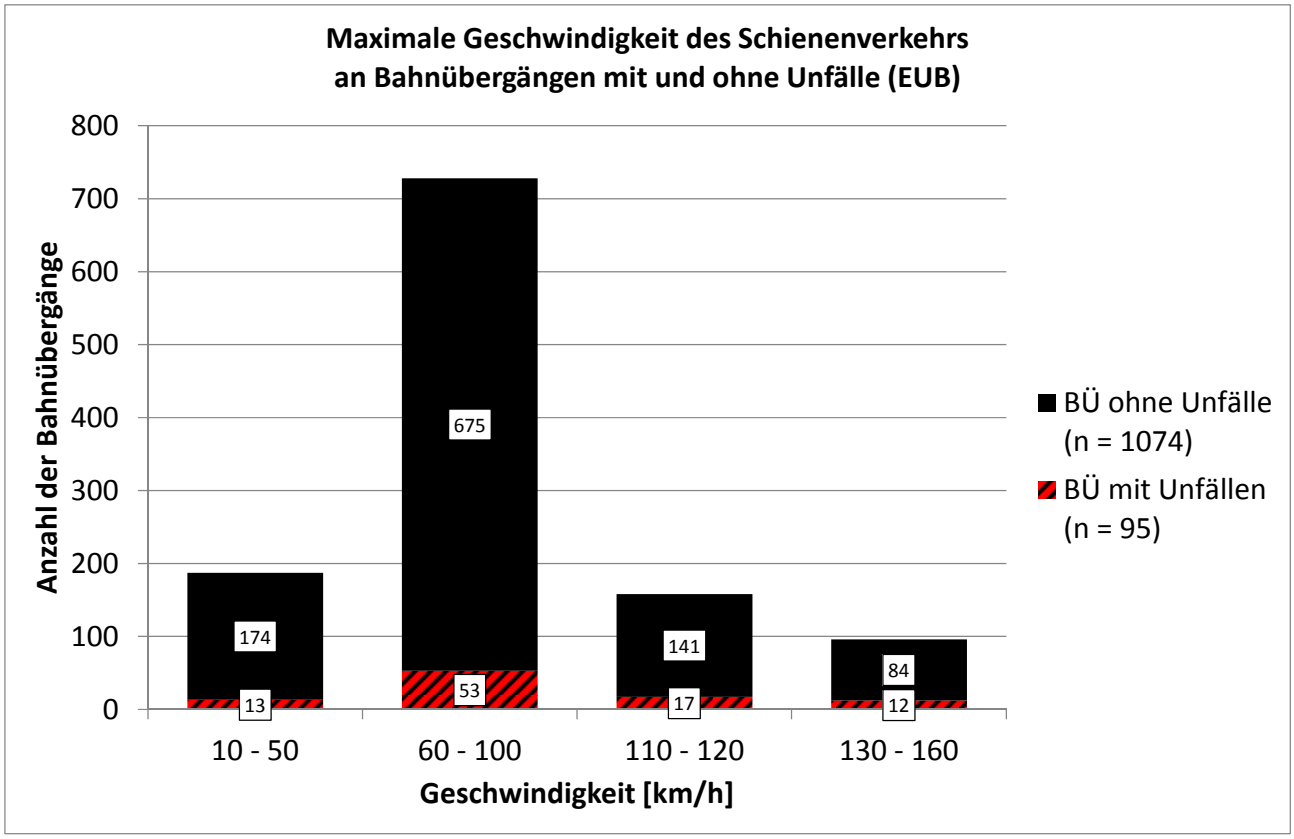


Abbildung 18: **Maximale Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: DB Netz, 2014)**

Anzahl der Gleise

Die Anzahl der Gleise an den Bahnübergängen verteilt sich entsprechend Abbildung 19.

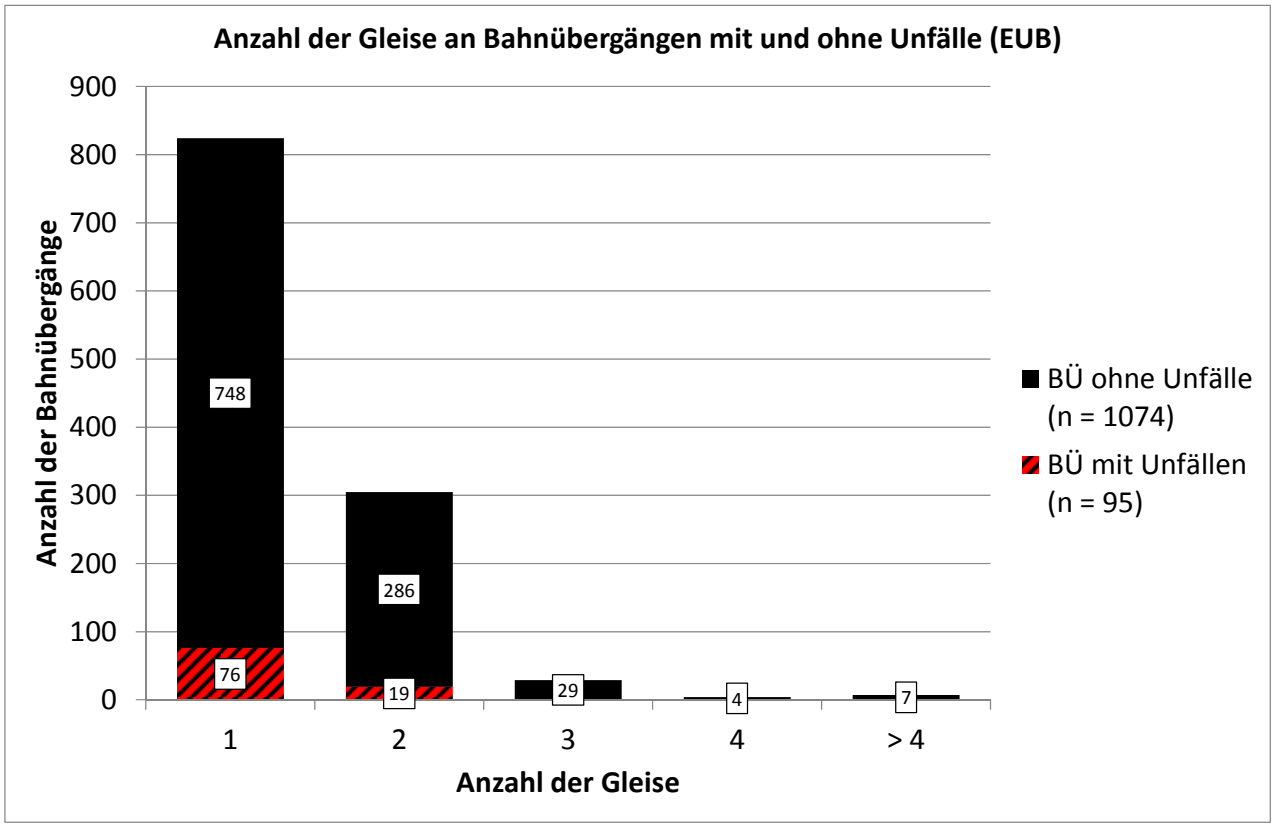


Abbildung 19: **Anzahl der Gleise an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Luftbild-Auswertungen)**

Etwas mehr als Zwei Drittel der Bahnübergänge sind eingleisig (70 %) und etwa ein Viertel ist zweigleisig (26 %). Bahnübergänge mit mehr als zwei Gleisen weisen weder im Bestand noch hinsichtlich des Unfallgeschehens eine relevante Größenordnung auf. Die Tendenzen werden durch das Gesamtkollektiv (vgl. Anlage 6) in etwa bestätigt, allerdings liegen dort etwa ein Drittel der Bahnübergänge im Zuge von zweigleisigen Strecken.

Streckenklasse

Die sogenannte Streckenklasse setzt sich laut DIN EN 15528 (2013) aus der eigentlichen Streckenklasse in Verbindung mit der zugehörigen Radsatz- und Meterlast nach Tabelle 4 zusammen.

Tabelle 4: Streckenklassen (Quelle: DIN EN 15528)

Streckenklasse	Radsatzlast	Meterlast
A	16,0 t	5,0 t/m
B1	18,0 t	5,0 t/m
B2	18,0 t	6,4 t/m
C2	20,0 t	6,4 t/m
C3	20,0 t	7,2 t/m
C4	20,0 t	8,0 t/m
CE	20,0 t	8,0 t/m
CM2	21,0 t	6,4 t/m
CM3	21,0 t	7,2 t/m
CM4	21,0 t	8,0 t/m
D2	22,5 t	6,4 t/m
D3	22,5 t	7,2 t/m
D4	22,5 t	8,0 t/m
E4	25,0 t	8,0 t/m
E5	25,0 t	8,8 t/m
F	27,5 t	
G	30,0 t	

Die Radsatzlast [t] gibt dabei an, welcher Anteil der Gesamtmasse auf eine Achse des Fahrzeugs entfällt, während die Meterlast [t/m] die Gesamtmasse des Schienenfahrzeugs auf dessen Gesamtlänge normiert. Es ergibt sich die in Abbildung 20 dargestellte Verteilung.

Der weitaus größte Teil der Bahnübergänge befindet sich auf Strecken der Klasse D4, was aus der großen Verbreitung dieser Strecken im Netz der DB resultiert. Die für einen Bahnübergang in den Infrastrukturdaten angegebene Streckenklasse „P/C 400 (P/C 70)“ entspricht nicht der oben beschriebenen Kategorisierung; hierbei handelt es sich offenkundig um einen Eingabefehler, da „P/C 400“ auch die Bezeichnung eines speziellen Lichtraumprofils für Containerverkehr darstellt.

Für die Interpretation der Diagramme zur Gleisanzahl und Streckenklasse gelten die gleichen Einschränkungen wie für die zuvor gezeigten Parameter. Hier ist insbesondere zu beachten, dass eingleisige Strecken und untere Streckenklassen vorrangig gleichzeitig Nebenbahnen darstellen, die mit geringeren Geschwindigkeiten von kleineren Zugzahlen befahren werden und für die andere Sicherungsarten zulässig sind.

Die Verteilung im Untersuchungskollektiv entspricht in etwa der Verteilung im Gesamtkollektiv (vgl. Anlage 7).

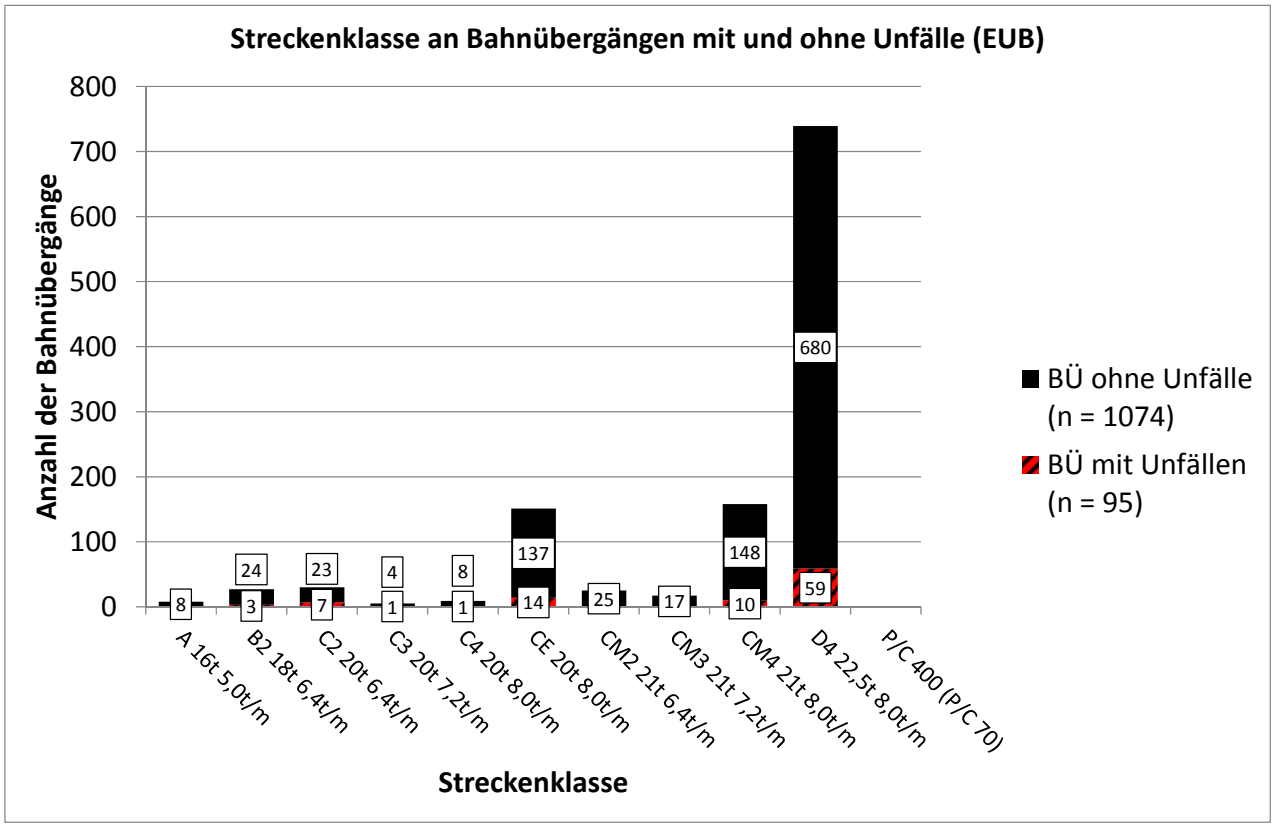


Abbildung 20: **Streckenklassen an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: DB Netz, 2014)**

Nähe zu Bahnhöfen und Haltepunkten

Die Nähe zu einem Bahnhof bzw. Haltepunkt verteilt sich entsprechend Abbildung 21.

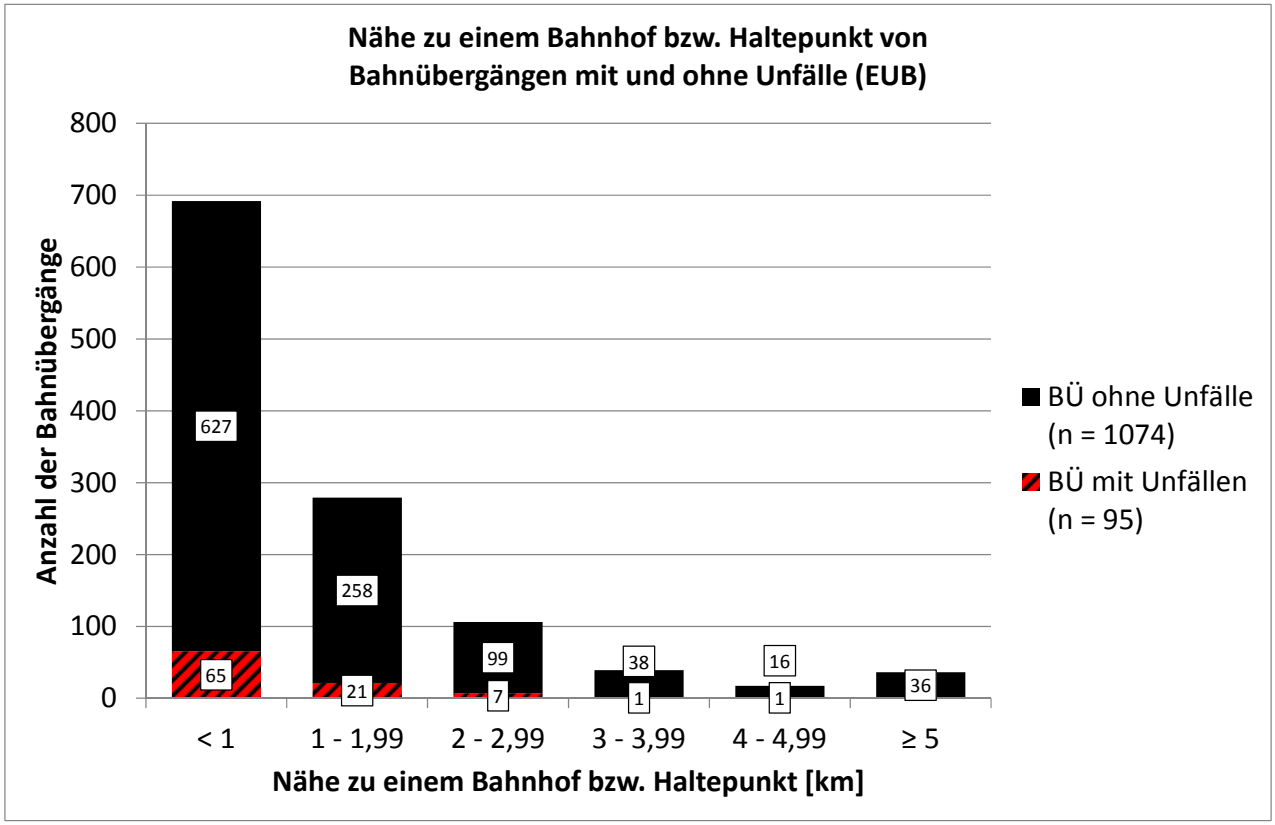


Abbildung 21: **Nähe zu einem Bahnhof bzw. Haltepunkt der Bahnübergänge des Untersuchungskollektivs (Quelle: Schweers und Wall, 2011)**

Der Großteil der Bahnübergänge befindet sich in einer Entfernung von kleiner 1 km zu einem Bahnhof oder Haltepunkt. Dies zeigt sich auch anhand des Gesamtkollektives (siehe Anlage 8). Da die Entfernung wiederum von anderen Faktoren abhängt (Nebenbahnen weisen eine größere Bahnübergangsdichte auf als Hauptbahnen, wodurch erstere auch eine höhere Wahrscheinlichkeit für die Lage in Bahnhofs- bzw. Haltepunktsnähe besitzen), ist eine isolierte Aussage zu diesem Merkmal nicht sinnvoll.

Kreuzungswinkel

Aus Abbildung 22 ergibt sich die Verteilung des Kreuzungswinkels zwischen Schiene und Straße am jeweiligen Bahnübergang.

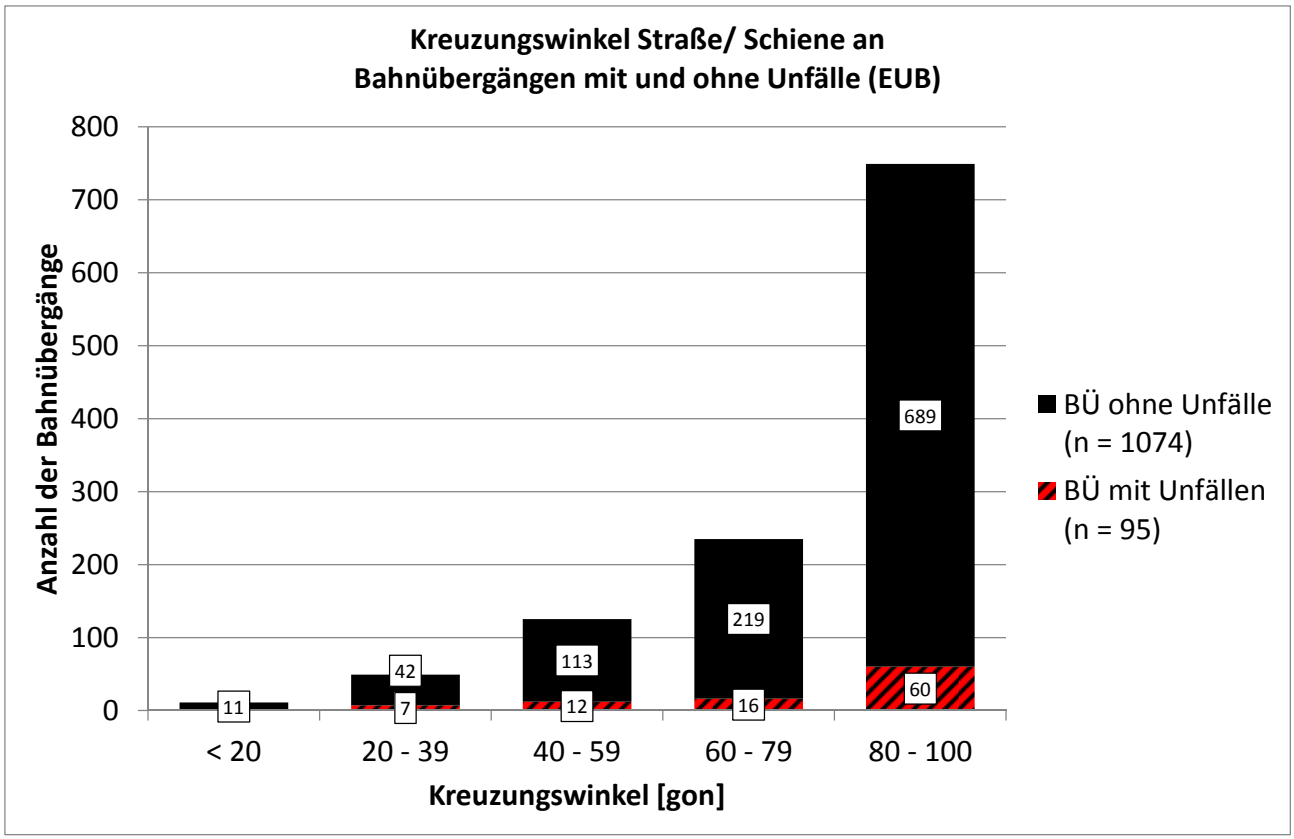


Abbildung 22: Kreuzungswinkel Schiene/ Straße an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Luftbild-Auswertungen)

Der deutlich größte Anteil der Bahnübergänge weist einen Kreuzungswinkel zwischen 80 und 100 gon auf, was vor allem aus der Vorgabe im Regelwerk resultieren dürfte, dass Bahnübergänge möglichst rechtwinklig auszuführen sind (DB Netz, 2008b). Der Anteil der Kreuzungswinkel kleiner 20 gon lässt sich mit der häufig auftretenden sehr spitz- bzw. stumpfwinkligen Kreuzung von Nebengleisen in Bahnhofsbereichen (z. B. zur Anbindung von Ladestellen) erklären.

Im Unfallgeschehen weisen die annähernd rechtwinkligen Bahnübergänge im Verhältnis zu ihrer Anzahl eine geringere relative Unfallhäufigkeit auf. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass Bahnübergänge im klassifizierten Straßennetz, die wiederum hohe Verkehrsstärken aufweisen, tendenziell eher gemäß Regelwerk rechtwinklig angelegt sein dürften als solche an untergeordneten Straßen. Daher bleibt eine sinnvolle Aussage zur Auswirkung des Kreuzungswinkels den Risikomodellen vorbehalten.

Die Erkenntnisse sind auf das Gesamtkollektiv übertragbar (vgl. Anlage 9).

4.3.3. Infrastrukturdaten Straße

Längsneigung

Die Längsneigung der Straßenabschnitte wurde unter Nutzung der Inhalte der Straßendatenbanken bzw. eines digitalen Geländemodells bestimmt. Dies ergibt eine Verteilung nach Abbildung 23.

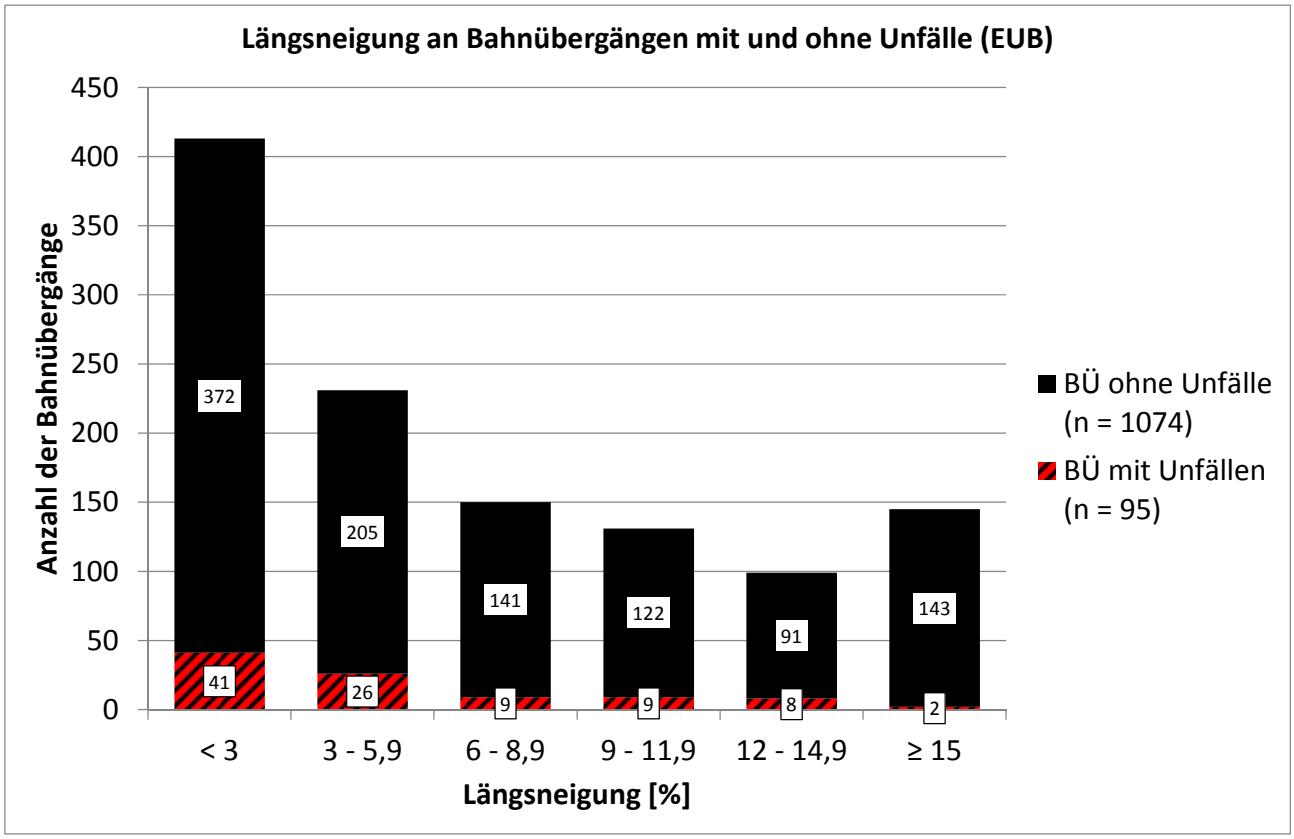


Abbildung 23: Längsneigung an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Straßendatenbanken/ Digitales Geländemodell)

Die meisten Bahnübergänge weisen eine geringe Straßenlängsneigung auf. Der vergleichsweise große Anteil sehr starker Längsneigungen ist vor allem durch Bahnübergänge von Fußwegen zu erklären, bei denen der Bahndamm über Treppen oder ähnlich steile Zuwegungen erreichbar ist.

Das Unfallgeschehen verteilt sich annähernd proportional zu den Bestandszahlen. Unter der Annahme, dass keine wesentlichen Abhängigkeiten zwischen der Längsneigung und anderen Parametern bestehen, lässt sich hieraus tendenziell ein nur geringer bis kein Einfluss der Längsneigung auf das Unfallgeschehen ableiten.

Die Verteilung im Untersuchungskollektiv entspricht etwa der im Gesamtkollektiv (vgl. Anlage 10). Allerdings ist offensichtlich ein höherer Anteil der Anlagen im Bereich höherer Längsneigung beim Untersuchungskollektiv verblieben.

Kurvigkeit

Die Kurvigkeit (Summe der längenbezogenen absoluten Richtungsänderungen) wurde unter Nutzung der Inhalte der Straßendatenbanken und von Luftbildern bestimmt. In Abbildung 24 sind die Ergebnisse dargestellt.

An den meisten Bahnübergängen liegt eine sehr geringe Kurvigkeit vor. Vor allem an Bahnübergängen, deren kreuzende Straßen in kurzer Entfernung an das übergeordnete Netz anschließen und die gleichzeitig eine hohe Richtungsänderung aufweisen, ist die Kurvigkeit höher.

Das Unfallgeschehen verteilt sich nahezu proportional. Allerdings muss beachtet werden, dass das klassifizierte Straßennetz tendenziell eher mit geringer Kurvigkeit trassiert ist als untergeordnete Straßen. Daher lässt sich eine gesicherte Aussage erst unter Berücksichtigung weiterer Parameter im Risikomodell treffen.

Die Verteilung im Untersuchungskollektiv ist mit der im Gesamtkollektiv in etwa vergleichbar (vgl. Anlage 11). Allerdings ist offensichtlich ein höherer Anteil der Anlagen im Bereich höherer Kurvigkeit beim Untersuchungskollektiv zu erkennen.

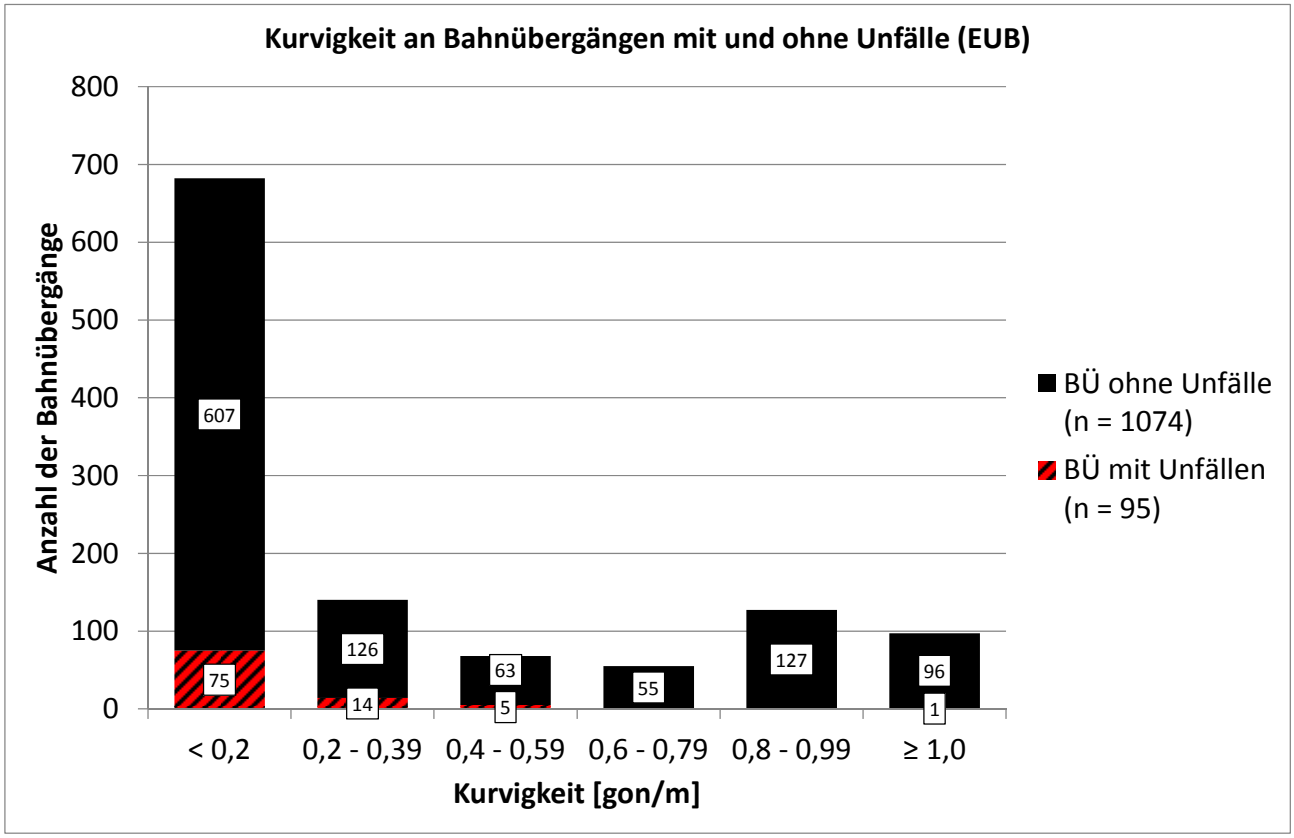


Abbildung 24: **Kurvigkeit an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Straßendatenbanken/ Luftbild-Auswertungen)**

Fahrstreifenanzahl

Abbildung 25 zeigt die Verteilung der Fahrstreifenanzahl. Der überwiegende Teil der Straßen an Bahnübergängen ist zweistreifig befahrbar, ein weiterer Teil nur einstreifig. Dagegen sind Bahnübergänge mit mehr als zwei Fahrstreifen weder im Bestand noch für das Unfallgeschehen relevant.

Hinsichtlich des Unfallgeschehens weisen die zweistreifig befahrbaren Bahnübergänge eine etwas höhere relative Unfallhäufigkeit auf, dort liegen jedoch auch deutlich andere Verhältnisse vor als an einstreifig befahrbaren Bahnübergängen (insbesondere hinsichtlich Verkehrsstärke und Sicherungsart). Eine Schlussfolgerung zur Sicherheit ist somit an dieser Stelle noch nicht möglich.

Die Erkenntnisse des Untersuchungskollektives sind auf das Gesamtkollektiv (siehe Anlage 12) grundsätzlich übertragbar. Allerdings ist der Anteil der Bahnübergänge im Zuge von einstreifigen Straßen im Gesamtkollektiv erkennbar deutlich geringer. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zweistreifige Straßen im Vergleich zu einstreifigen tendenziell eher technisch gesichert werden. Technisch gesicherte Bahnübergänge ohne DTV-Daten (Kfz) wurden aber aus dem Untersuchungskollektiv ausgeschlossen. Damit wurden aus dem Untersuchungskollektiv mehr Bahnübergänge im Zuge von zweistreifigen im Vergleich zu einstreifigen Straßen ausgeschlossen.

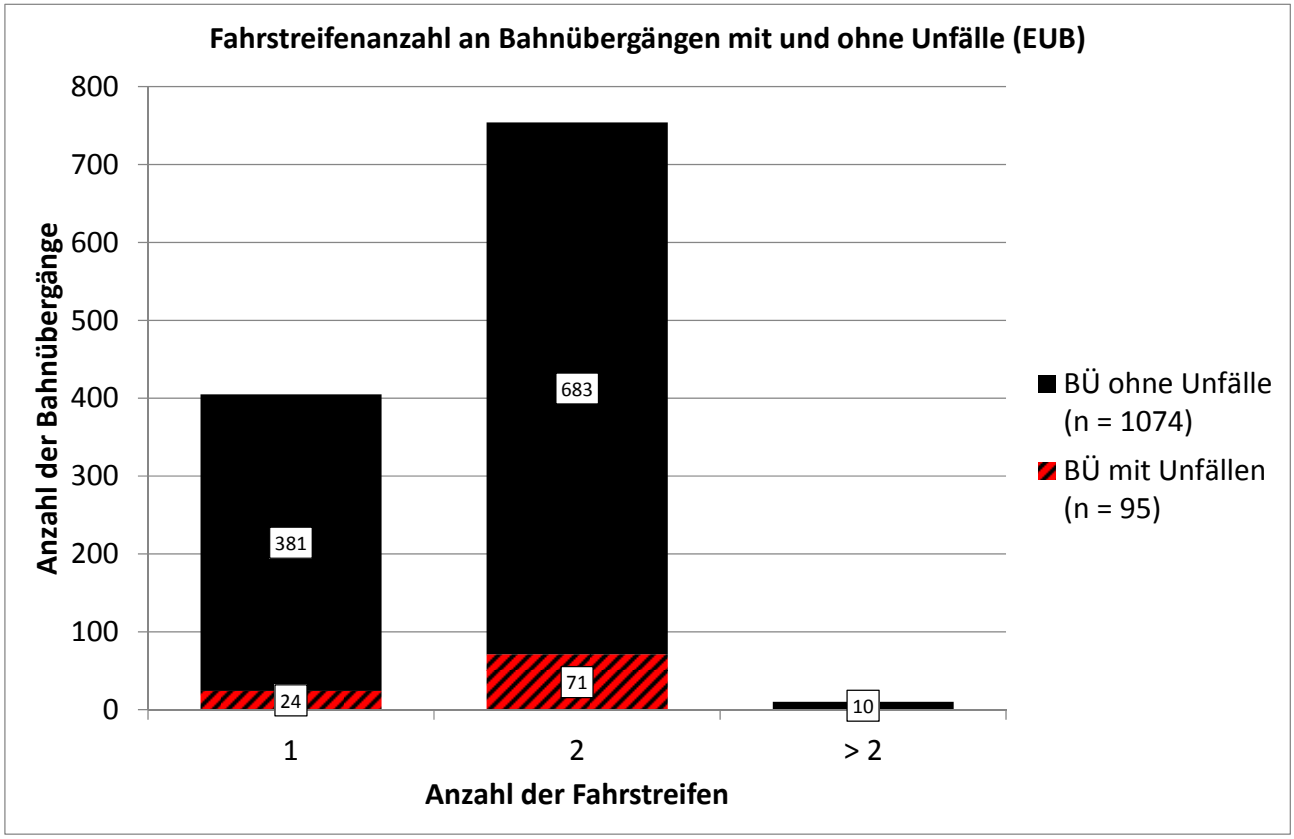


Abbildung 25: Fahrstreifenanzahl an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Straßendatenbanken/Luftbild-Auswertungen)

Fußgängerführung

Die Verteilung der Fußgängerführung an Bahnübergängen wird in Abbildung 26 gezeigt.

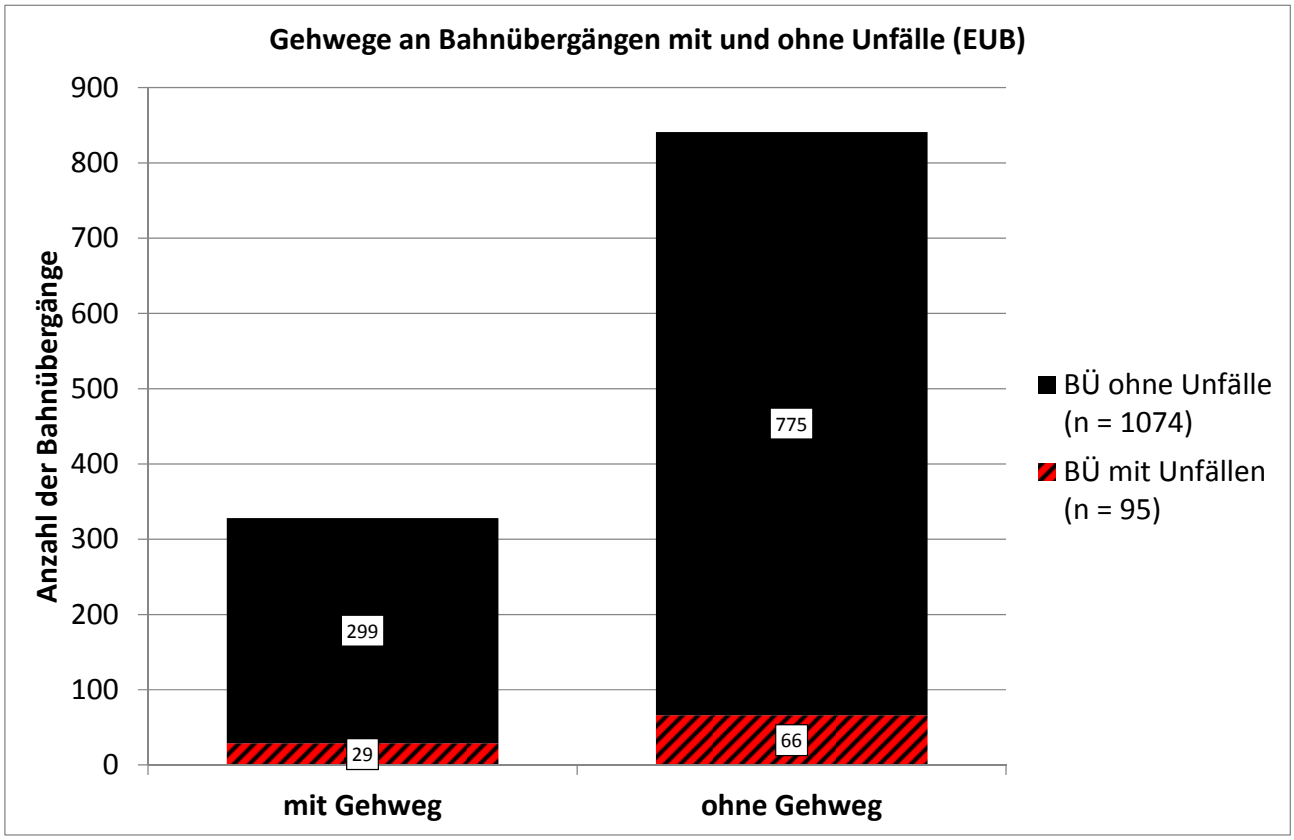


Abbildung 26: Gehwege an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Straßendatenbanken/Luftbild-Auswertungen)

Etwas zwei Drittel der Bahnübergänge im Untersuchungskollektiv verfügt nicht über Gehwege. Das Unfallgeschehen verteilt sich proportional auf beide Fälle, allerdings ist für eine zielführende Aussage im Risikomodell die Art der Unfallbeteiligung (Fußgänger oder Kraftfahrzeuge) einzubeziehen, da das Vorhandensein von Gehwegen naturgemäß vor allem für Fußgänger von Bedeutung ist.

Die Verteilung im Untersuchungskollektiv entspricht der im Gesamtkollektiv (vgl. Anlage 13).

Radverkehrsführung

Die Verteilung der Radverkehrsführung im Untersuchungskollektiv ergibt sich aus Abbildung 27. Eine entsprechende Übersicht für das Gesamtkollektiv ist in Anlage 14 dokumentiert.

Es zeigt sich sowohl im Untersuchungs- als auch im Gesamtkollektiv, dass nur ein sehr geringer Anteil der Bahnübergänge eine separate Radverkehrsführung aufweist. Hinsichtlich der Unfälle weisen diese Übergänge eine etwas höhere relative Unfallhäufigkeit (11%) auf als Bahnübergänge ohne separate Radverkehrsführung (8%), allerdings gelten für die Interpretation dieser Aussage die gleichen Einschränkungen wie zur Fußgängerführung (Radverkehrsführung ist auch stellvertretend für Radverkehrsbedeutung und-belastung).

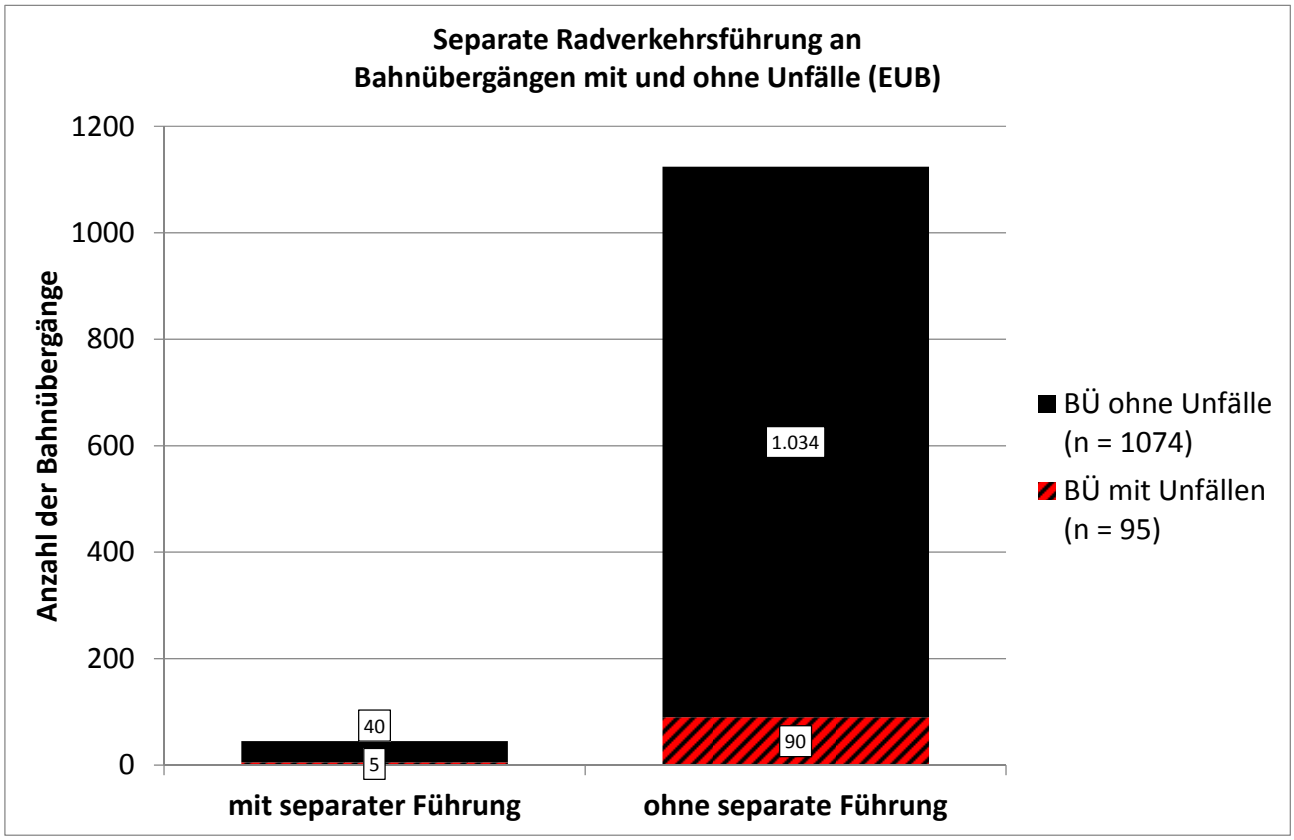


Abbildung 27: **Separate Radverkehrsführung an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Straßendatenbanken/Luftbild-Auswertungen)**

Knotenpunkte im Umfeld der Bahnübergänge

Knotenpunkte im Umfeld der Bahnübergänge wurden differenziert nach Anschlüssen an das übergeordnete, gleichrangige und untergeordnete Netz erfasst.

Die jeweilige Straßenklasse wurde Straßenkarten entnommen, der Abstand der Knotenpunkte vom Bahnübergang aus Luftbildern. In jeder der genannten Gruppen wurden alle Bahnübergänge aufgenommen, an denen in einer oder beiden Richtungen in einem Abstand von bis zu 250 m mindestens einer der genannten Knotenpunkte liegt. Dies ergibt die in Abbildung 28 bis Abbildung 30 dargestellten Aufteilungen. Entsprechende Verteilungen für das Gesamtkollektiv enthält Anlage 15.

Die unterschiedlichen Stichprobenumfänge resultieren aus der Zuordnung von Bahnübergängen zu mehreren der vorgenannten Gruppen. So kann ein Bahnübergang beispielsweise gleichzeitig zu einem Knotenpunkt mit untergeordneten Straßen und in der anderen Richtung zu einem Knotenpunkt mit übergeordneten oder gleichrangigen Straßen benachbart sein.

Sowohl im Untersuchungs- als auch im Gesamtkollektiv ist folgendes festzustellen: Ist ein Knotenpunkt in der Nähe, so liegt er beim überwiegenden Teil der Bahnübergänge in einem Abstand von kleiner 50 m. Größere Abstände treten weitaus seltener auf. Im Unfallgeschehen treten bestimmte Fälle überproportional häufig auf (beispielsweise Bahnübergänge mit benachbartem Anschluss an das gleichrangige Straßennetz in 50 bis 99 m Entfernung und Bahnübergänge mit Anschluss an das untergeordnete Netz in 100 bis 149 m Entfernung), allerdings lassen sich auch hieraus wegen der zahlreichen weiteren Abhängigkeiten von anderen Parametern keine isolierten Aussagen zur Sicherheit der einzelnen Fälle treffen.

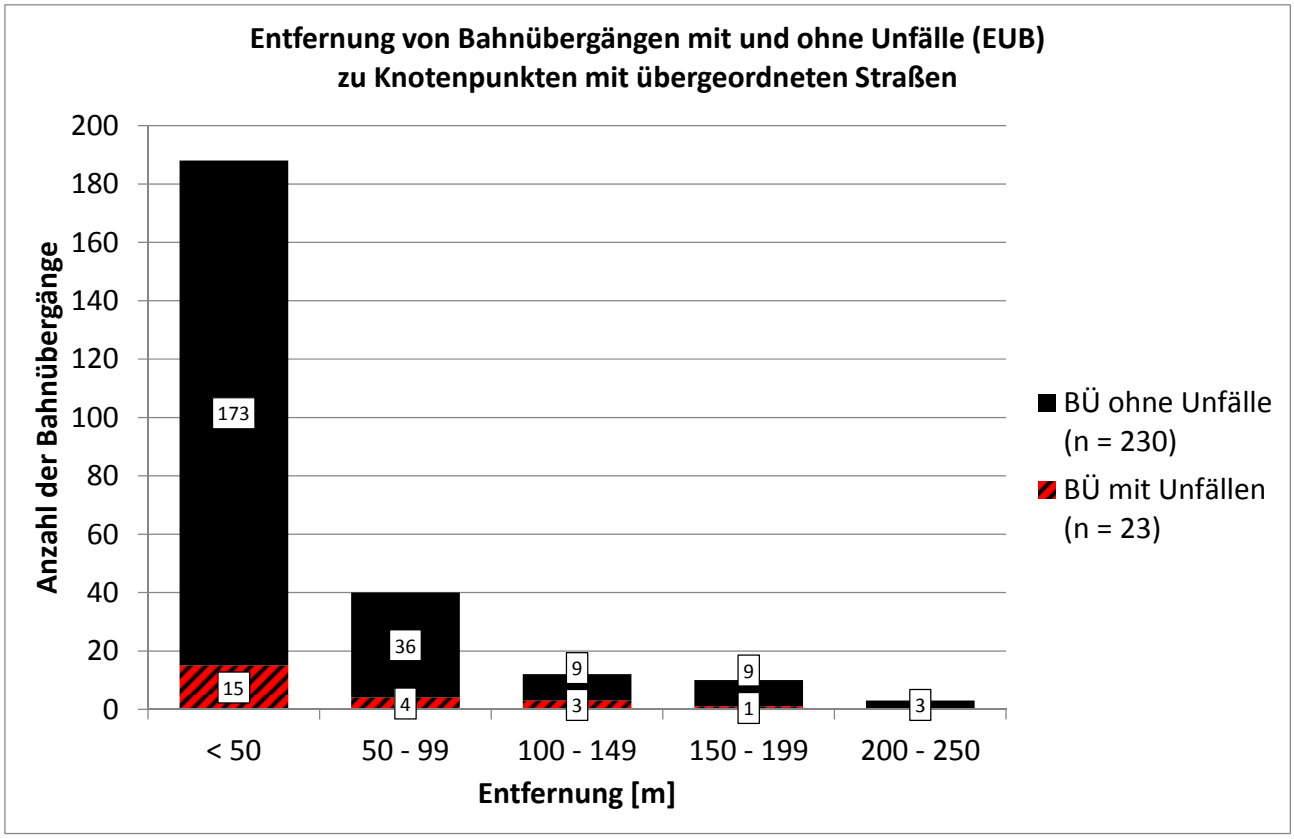


Abbildung 28: **Entfernung der Bahnübergänge des Untersuchungskollektivs zu Anschlüssen an das übergeordnete Straßennetz (Quelle: Straßenkarten/ Luftbild-Auswertungen)**

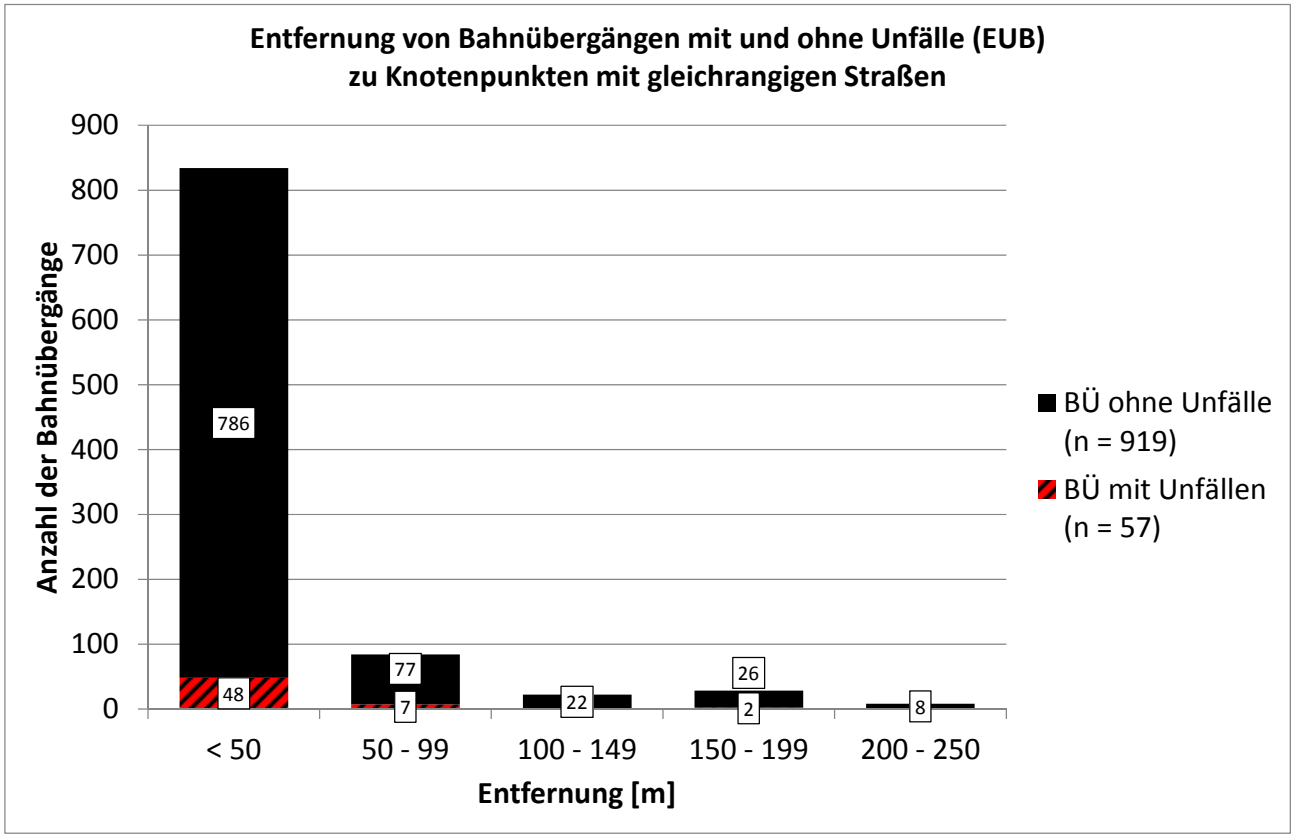


Abbildung 29: **Entfernung der Bahnübergänge des Untersuchungskollektivs zu Knotenpunkten mit gleichrangigen Straßen (Quelle: Straßenkarten/Luftbild-Auswertungen)**

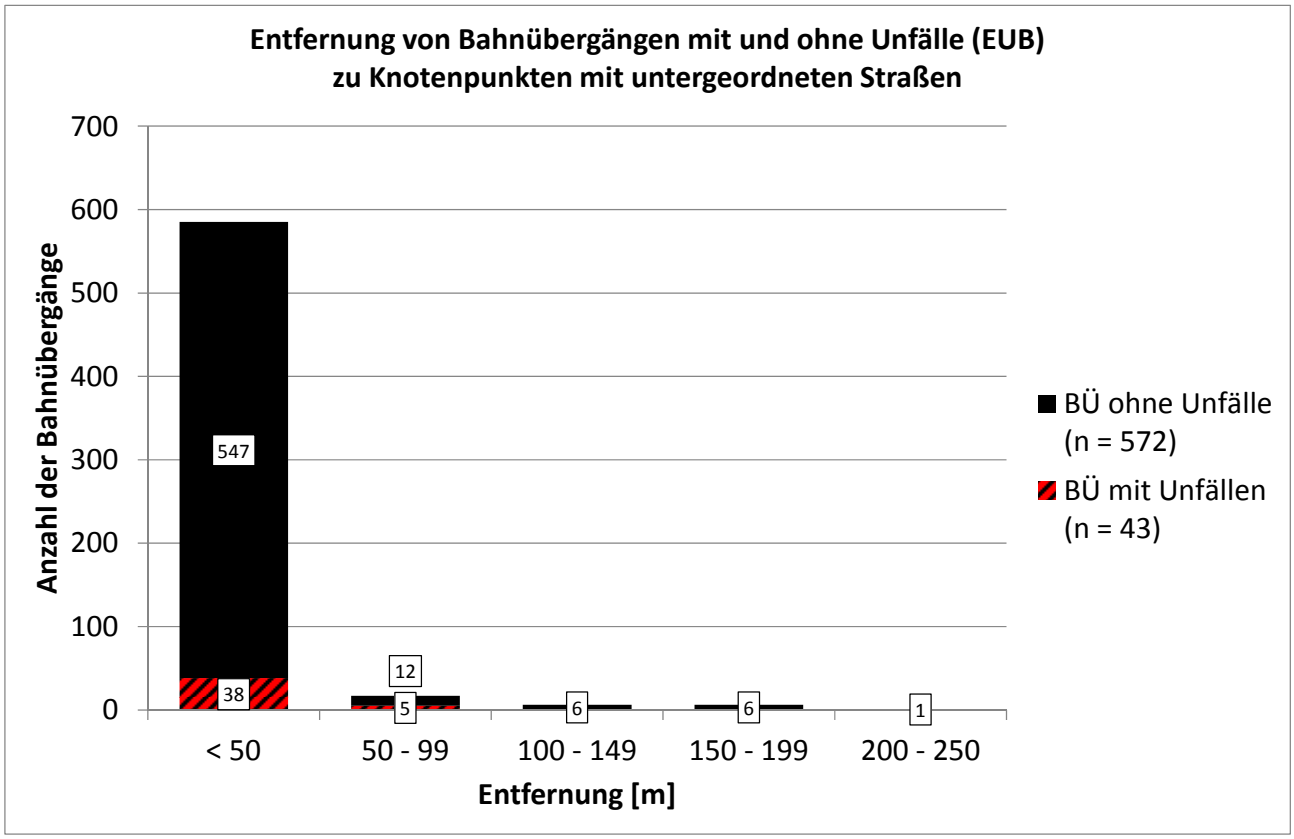


Abbildung 30: **Entfernung der Bahnübergänge des Untersuchungskollektivs zu Knotenpunkten mit untergeordneten Straßen (Quelle: Straßenkarten/Luftbild-Auswertungen)**

4.3.4. Unfalldaten der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes

Die Unfälle wurden über die Merkmale der Streckennummer und Kilometrierung des Bahnüberganges, die sowohl in der Infrastrukturdatenbank der Deutschen Bahn als auch in der Unfalldatenbank der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes enthalten sind, dem jeweiligen Bahnübergang zugewiesen. Dies ermöglichte die Kombination der Unfallmerkmale mit den entsprechenden Infrastrukturparametern.

Unfallkategorien und Verunglücktenstruktur

Wie in Abschnitt 4.2.2 bereits erwähnt, weicht die Definition der Unfallkategorien (und damit auch die Anzahl der Verunglückten einer Kategorie) bei der Aufnahme in die Datenbank der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes von der entsprechenden Definition in EUSKa ab. Daher wird in den folgenden Grafiken eine andere Bezeichnung für die Kategorien der Unfälle bzw. Verunglückten gewählt, um eine Unterscheidung kenntlich zu machen. Dies ist in Tabelle 5 dargestellt:

Tabelle 5: Definition der Unfall- und Verunglücktenkategorien in EUSKa und EUB

Abkürzung EUSKa	Abkürzung EUB	Bedeutung
U(GT)	EUB(GT)	Unfall mit Getöteten
U(SV)	EUB(SV)	Unfall mit Schwerverletzten
U(LV)	EUB(LV)	Unfall mit Leichtverletzten
U(SS)	EUB(S)[1]	Unfall mit schwerem Sachschaden
U(LS)		Unfall mit leichtem Sachschaden
GT	GT(EUB)	Getötete
SV	SV(EUB)	Schwerverletzte
LV	LV(EUB)	Leichtverletzte

1: In der Datenbank der Unfalluntersuchungsstelle des Bundes wird nicht nach schwerem und leichtem Sachschaden unterschieden.

Abbildung 31 zeigt die Verteilung der Unfallkategorien innerhalb des Untersuchungskollektives. Eine entsprechende Übersicht zur Verunglücktenstruktur zeigt Abbildung 32. Die Verteilungen der Kategorien und Verunglückten im Gesamtkollektiv sind in Anlage 16 dargestellt.

Es ist festzustellen, dass sowohl im Untersuchungs- als auch im Gesamtkollektiv

- bei 62 % der Unfälle Personenschaden und
- bei etwa jedem dritten Unfall mit Personenschaden Getötete oder Schwerverletze

zu beklagen sind.

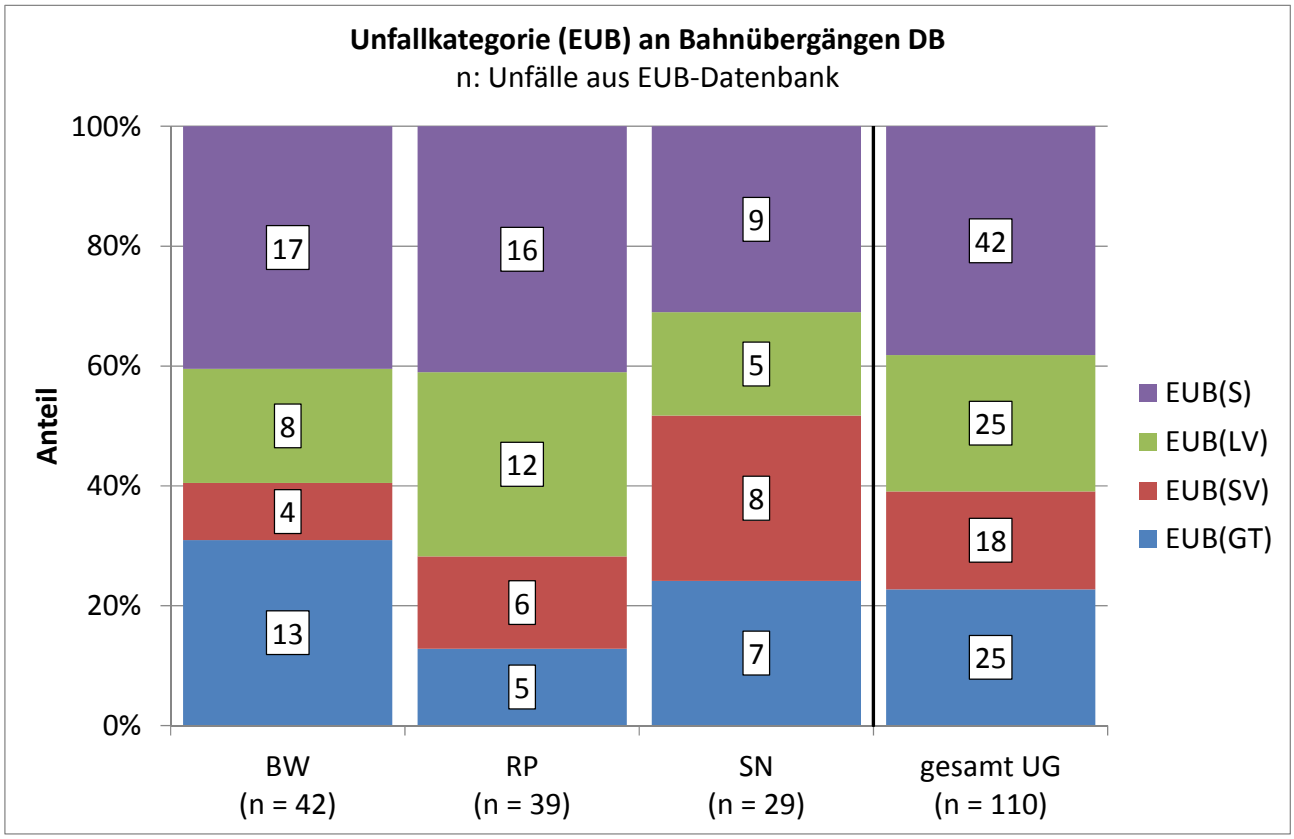


Abbildung 31: **Unfallkategorie (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Untersuchungskollektives**

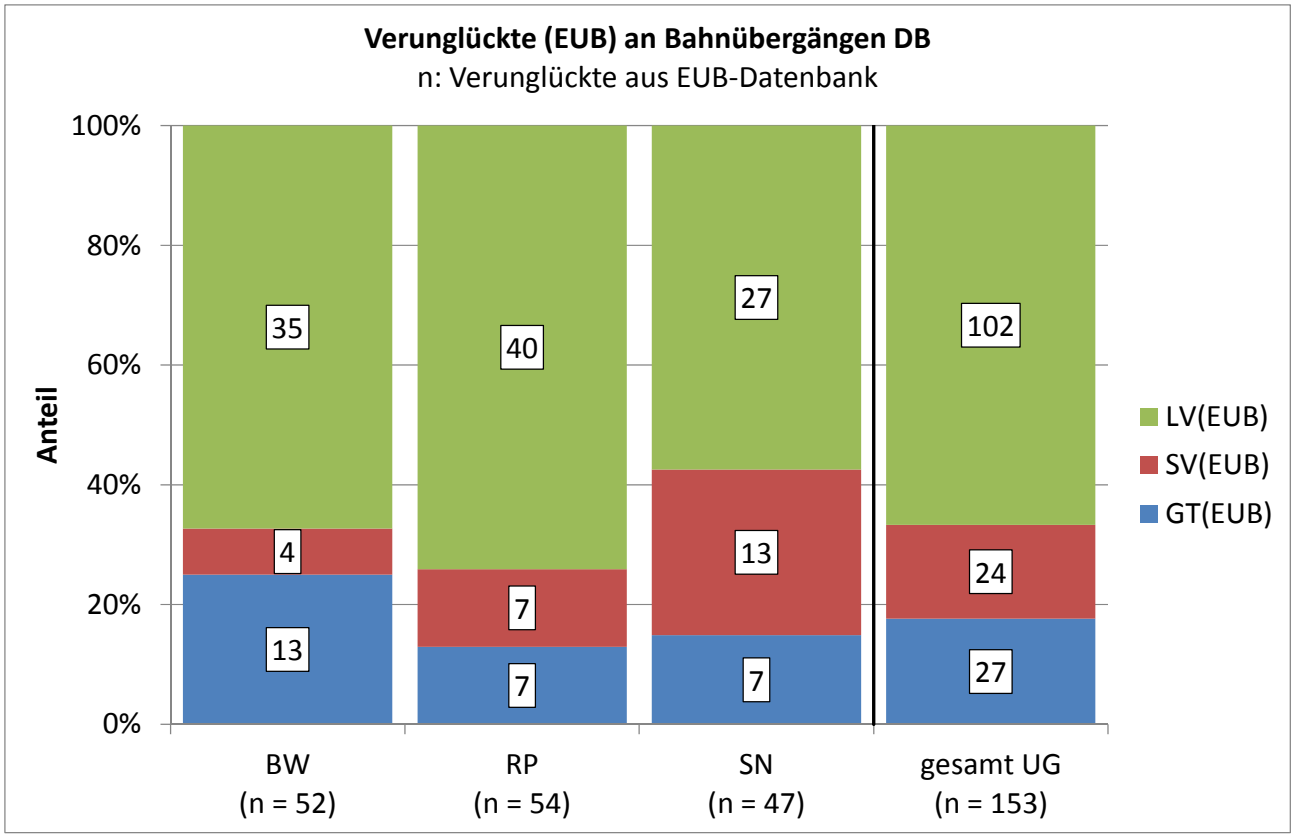


Abbildung 32: **Verunglückte (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Untersuchungskollektives nach Verletzungsschwere**

Art der Verkehrsbeteiligung

Die Verunglückten werden bei der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes in Reisende innerhalb des betroffenen Schienenfahrzeugs, Triebfahrzeugführer des betroffenen Schienenfahrzeugs und Straßenverkehrsteilnehmer außerhalb des Schienenfahrzeugs eingeteilt. Eine Differenzierung nach Art der Verkehrsbeteiligung (Abbildung 33) zeigt, dass die Getöteten ausschließlich und die Schwerverletzten zu etwa zwei Drittel der Gruppe der Straßenverkehrsteilnehmer zuzuordnen sind. Insgesamt sind bei jedem zweiten Unfall Straßenverkehrsteilnehmer außerhalb des Schienenfahrzeugs als Beteiligte registriert worden.

Die Betrachtung des Gesamtkollektives zeigt hierzu geringfügige Unterschiede (siehe Anlage 17): So sind nahezu 80 % der Schwerverletzten der Gruppe der Straßenverkehrsteilnehmer zuzuordnen. Insgesamt sind bei 56 % der Unfälle Straßenverkehrsteilnehmer außerhalb des Schienenfahrzeugs beteiligt.

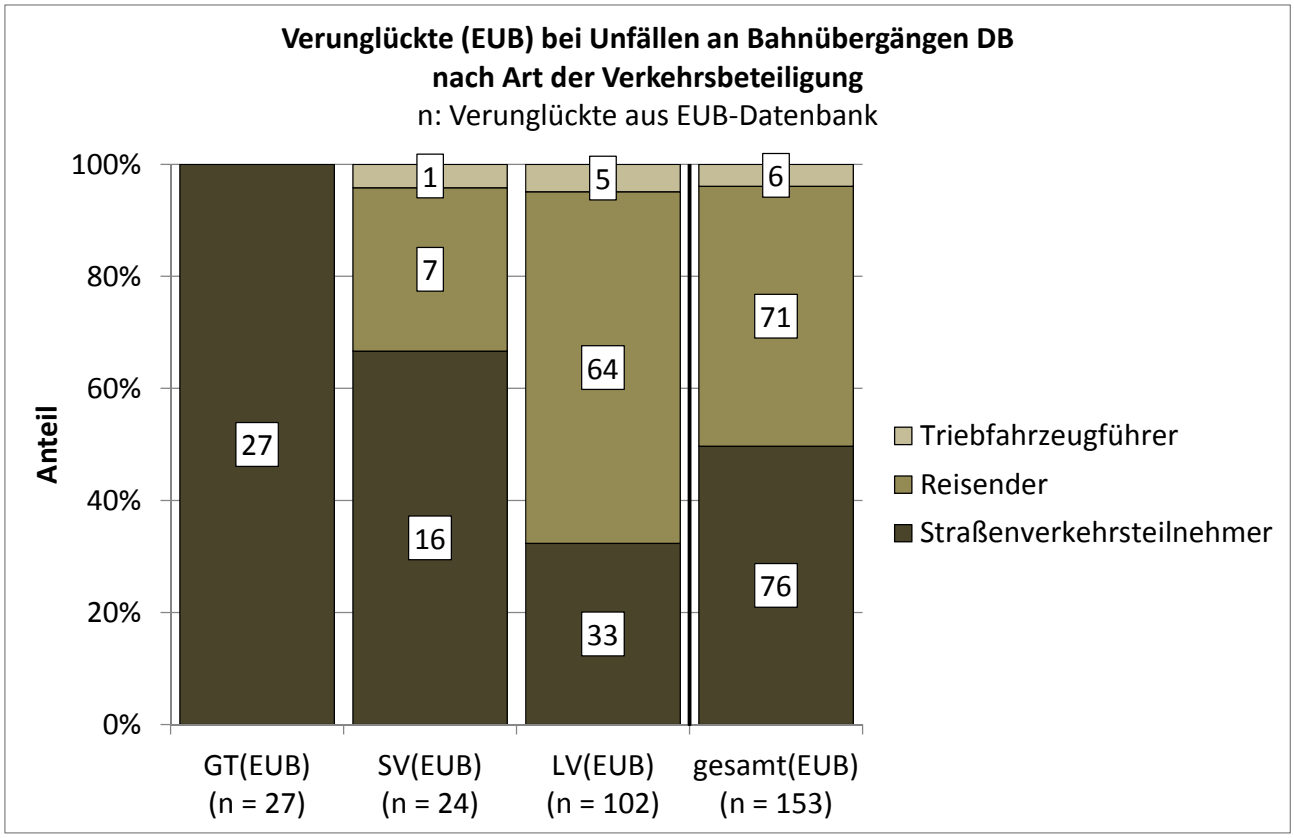


Abbildung 33: Art der Verkehrsbeteiligung (EUB) bei Unfällen an Bahnübergängen DB des Untersuchungskollektives

Unfallursachen

Im Gegensatz zur Unfallauswertung im Straßenverkehr liegen der Einteilung der Unfallursachen im Schienenverkehr keine vordefinierten Kategorien zugrunde, was auch aus der vergleichsweise geringen Unfallzahl resultiert. Die in Abbildung 34 dargestellten Kategorien ergeben sich aus der praktischen Verwendung in der Datenbank der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes.

Deutlich wird, dass

- bei etwas mehr als jedem zweiten Unfall (53 %) die Missachtung technischer Sicherungseinrichtungen und
- bei etwas mehr als jedem dritten Unfall (38 %) die Missachtung des Vorrangs der Schienenfahrzeugen an Bahnübergängen ohne technische Sicherungseinrichtungen

registriert. Im Gesamtkollektiv (siehe Anlage 18) sind 69 % der Unfälle auf die Missachtung technischer Sicherungseinrichtungen und 21 % der Unfälle auf die Missachtung des Vorrangs der Schienenfahrzeuge an Bahnübergängen ohne technische Sicherungseinrichtungen zurückzuführen. Dies kann damit erklärt werden, dass deutlich mehr Bahnübergänge mit technischer Sicherung im Vergleich zur nicht technischen Sicherung aus dem Untersuchungskollektiv wegen fehlender Daten zur Verkehrsstärke ausgeschlossen werden mussten.

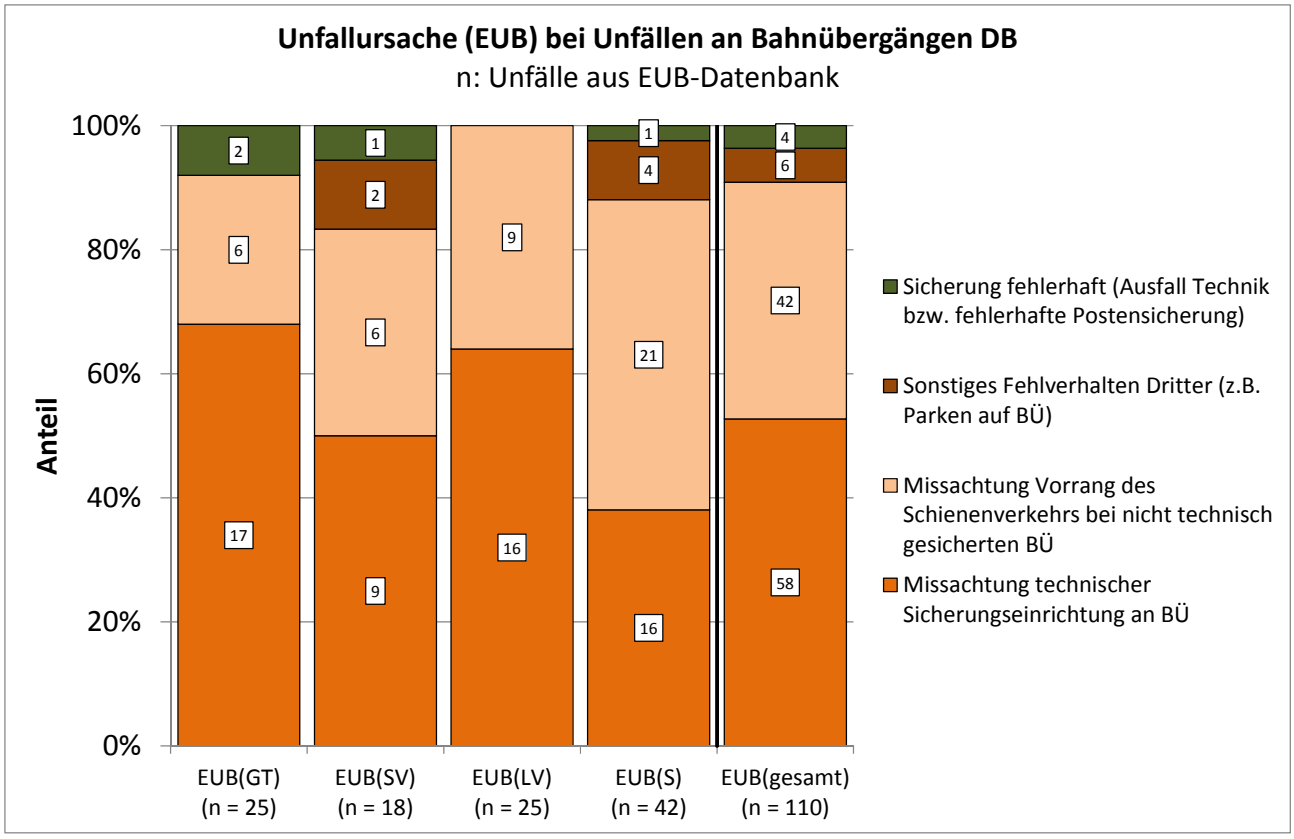


Abbildung 34: Unfallursache (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Untersuchungskollektives

Lage auf Haupt- und Nebenbahnen

Das Streckennetz der Eisenbahnen wird in Haupt- und Nebenbahnen unterteilt. Nach § 1 Abs. 2 EBO geschieht diese Unterscheidung „*entsprechend der Bedeutung der Strecken*“. Hauptbahnen stellen generell das Grundnetz dar, während Nebenbahnen der Netzergänzung und Verbesserung der Erschließung dienen. Verschiedene Paragraphen innerhalb der EBO beinhalten Aussagen zu betrieblichen Unterscheidungsmerkmalen. So sind z.B. nach § 40 EBO auf Nebenbahnen maximale Fahrgeschwindigkeiten von 80 km/h (unter technischen Bedingungen wie auf Hauptbahnen: 100 km/h) und nach § 11 EBO nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge nur auf Nebenbahnen zugelassen.

Die Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes unterscheidet ferner noch nach dem jeweiligen Geschwindigkeitsspektrum der betroffenen Strecke, womit sich die Aufteilung der Verunglückten nach Abbildung 35 ergibt („sonstige“ Strecken stellen dabei Gleise dar, welche betrieblich nicht als Streckengleise gelten, z. B. Anschlussgleise, Nebengleise, etc.).

Deutlich wird: Unfälle mit schwerem Personenschaden treten überwiegend an Bahnübergängen von Hauptbahnen auf. Allerdings weisen Hauptbahnen auch höhere Zuggeschwindigkeiten und Zugzahlen auf als Nebenbahnen. Dieses Ergebnis zeigt sich auch bei der Betrachtung des Gesamtkollektivs (siehe Anlage 19). Betrachtet man allerdings die Gesamtzahl der Unfälle, ist festzustellen, dass 39 % der Unfälle mit Personen- und Sachschaden auf den Strecken der Hauptbahn registriert wurden, während dieser Anteil im Gesamtkollektiv 54 % beträgt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge nur auf Nebenbahnen zugelassen sind und damit ausschließlich Bahnübergänge im Zuge von Hauptbahnen wegen fehlender DTV-Daten aus dem Untersuchungskollektiv ausgeschlossen wurden.

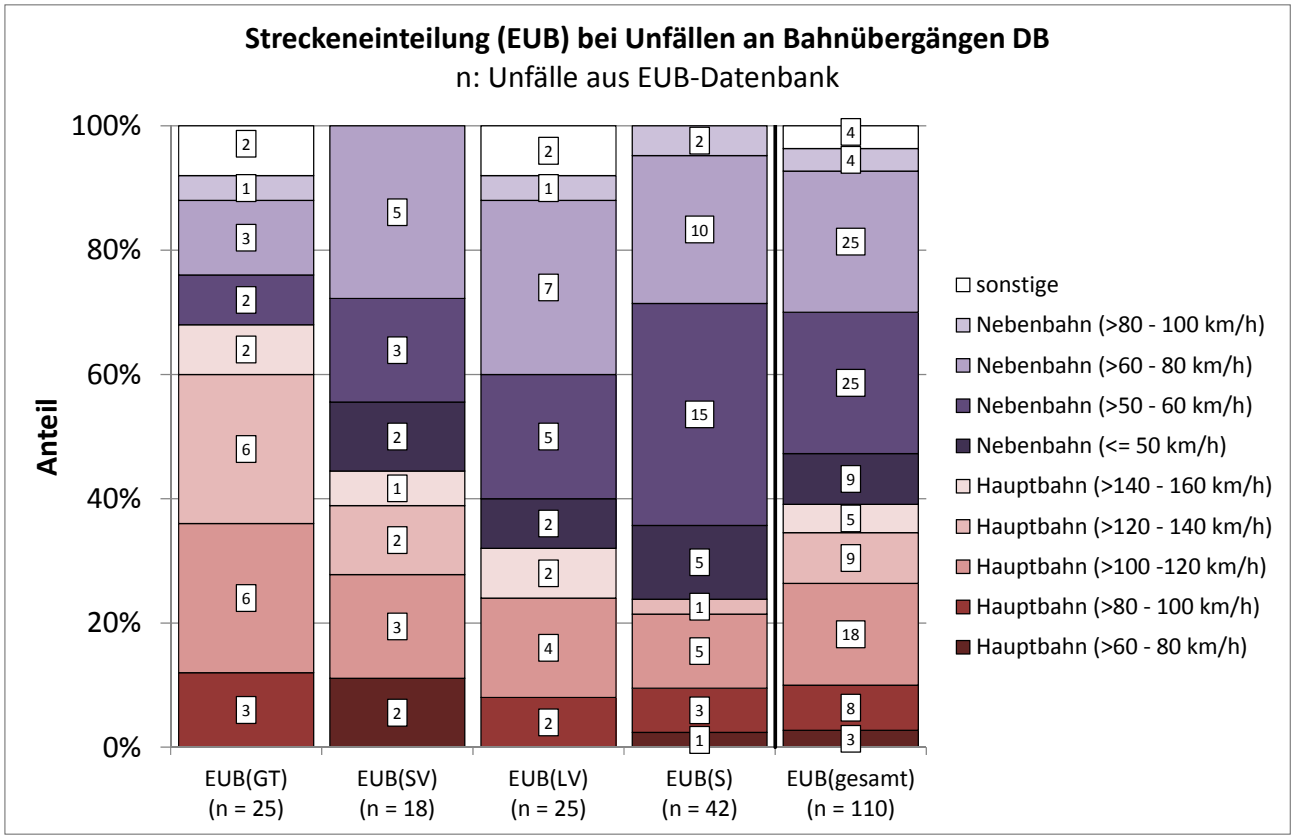


Abbildung 35: Strecken (Schienenwege-Kategorie) (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Untersuchungskollektives

Sicherungsart

Hinsichtlich der Sicherungsart sind bei insgesamt 58 % der Unfälle technische Sicherungseinrichtungen an den Bahnübergängen vorhanden, dabei handelt es sich in der Mehrzahl der Fälle um Halbschranken, wie Abbildung 36 zeigt. Die Betrachtung des Gesamtkollektives zeigt hingegen (siehe Anlage 20), dass 78 % der Unfälle an technisch gesicherten Bahnübergängen registriert wurden.

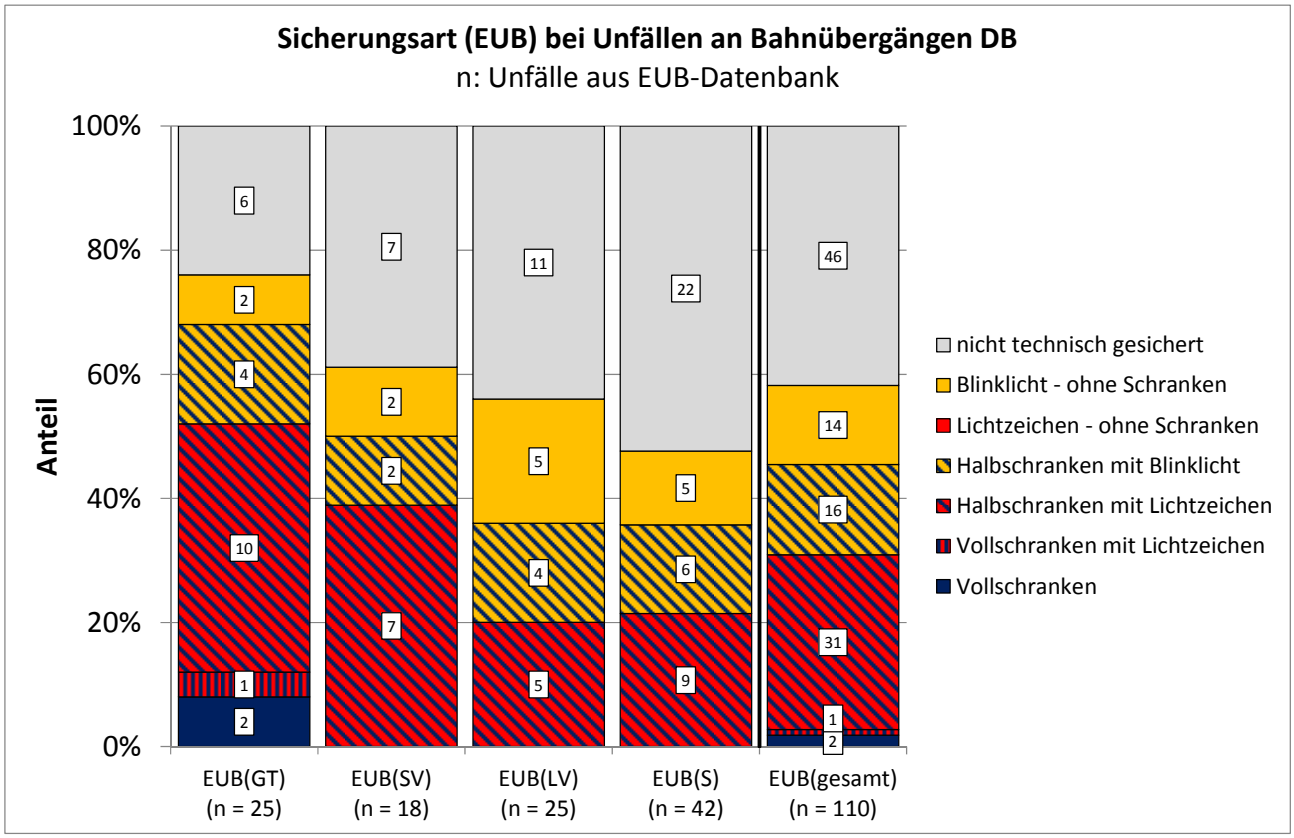


Abbildung 36: Sicherungsart (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Untersuchungskollektives

Straßenklasse

Die Straßenklassen an den betrachteten Bahnübergängen werden in der Datenbank nach Bundes-, Landes-, Kreis-, sonstigen Straßen mit allgemeinem Kfz-Verkehr, übrigen Straßen mit Fahrverkehr sowie Fuß- und Radwegen unterschieden. Die Auswertung nach Straßenklassen in Abbildung 37 zeigt, dass Bahnübergänge an Bundes-, Landes- und Kreisstraßen insgesamt bei etwas mehr als einem Drittel (35 %) aller registrierten Unfälle betroffen sind; im Gesamtkollektiv beträgt dieser Anteil 25 % (vgl. Anlage 21). Diese Unterschiede sind darauf zurückzuführen, dass 80 % der Bahnübergänge im Zuge von übrigen Straßen mit Fahrverkehr und mehr als die Hälfte der Bahnübergänge im Zuge von sonstigen Straßen mit allgemeinem Kfz-Verkehr wegen fehlender DTV-Daten aus dem Untersuchungskollektiv ausgeschlossen werden mussten (vgl. Kapitel 4.3.2). Bei den Landes-, Bundes und Kreisstraßen beträgt der Anteil der ausgeschlossenen Bahnübergänge 38 %.

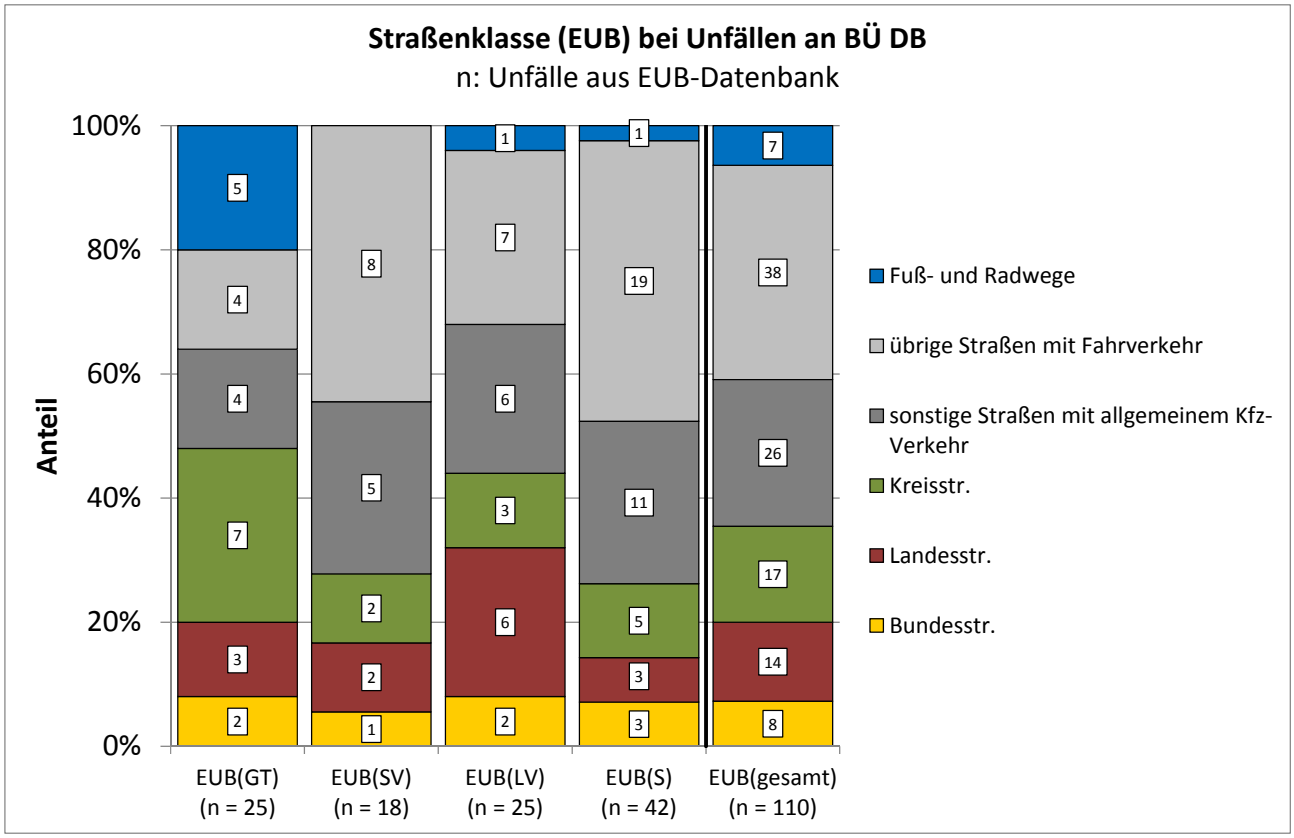


Abbildung 37: **Straßenklasse (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Untersuchungskollektives**

4.4 GDV-Unfalldaten

Datengrundlage

Als Datengrundlage dienten die Schadenakten für Unfälle an Bahnübergängen ausgewählter Versicherungsunternehmen. Die Erfassung der für das Modell erforderlichen Informationen ist anhand eines digitalen Formblattes erfolgt. Leider konnten nicht alle für die Erstellung des Modells notwendige Daten in den Akten gefunden werden oder diese lagen nicht in der erforderlichen Detailliertheit vor.

Die gewonnenen Daten lassen sich wie folgt beschreiben.

Es lagen zunächst 110 GDV-Unfalldaten von ausschließlich motorisierten Verkehrsteilnehmern zur Auswertung vor. Es wurden folgende Unfälle nicht weiter betrachtet:

- bei Rangierfahrten
- auf Werks- und Anschlussbahnen
- auf Museums- und Schmalspurbahnen
- auf Straßenbahnen
- ausschließliche Kollisionen mit Elementen der Bahnanlage (z. B. Schrankenbaum)
- Gefährdungen
- Suizide (inklusive Verdachtsfälle)
- keine Beteiligung eines Straßenfahrzeugs
- keine Beteiligung eines Schienenfahrzeugs
- keine ausreichenden Angaben.

Daraus resultiert schließlich ein grundsätzlich auswertbares Kollektiv von 87 Unfällen.

Da bei bestimmten Parametern nicht zu allen 87 Unfällen Dateneintragungen vorliegen, kann teilweise bei der Auswertung nur auf eine geringere Unfallanzahl Bezug genommen werden.

Verteilung auf Sicherungsarten

Die 87 Unfälle verteilen sich auf die Sicherungsarten gemäß Abbildung 38.

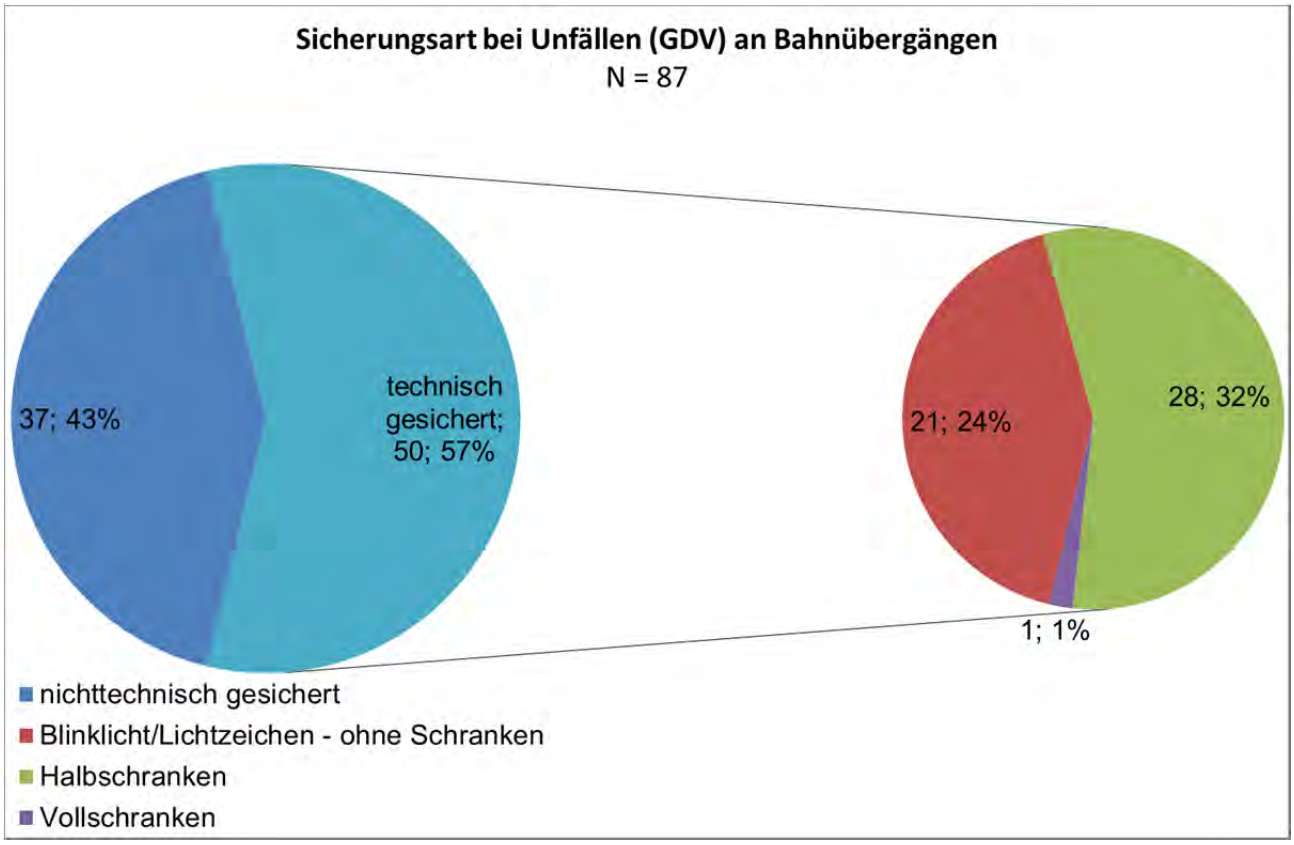


Abbildung 38: Sicherungsart bei Unfällen (GDV) an Bahnübergängen

Querschnitt möglicher Unfallhergänge und Unfallursachen

Neben der Unfallbeschreibung des GDV wurden auch Luftbilder und in Einzelfällen Unfallbeschreibungen der EUB berücksichtigt.
Im Folgenden werden teilweise zwei verschiedene Unfallzahlen angegeben. Die Angabe „bis zu“ schließt auch die Unfälle ein, welche in der Unfallbeschreibung eine Angabe wie „evt.“ enthielten.

<u>Sonnenblendung</u>
Bei sechs (bis zu neun) Unfällen (entspricht 7 % - 10 %) kam es zu einer Sonnenblendung. Dabei überwog die Sicherungsart durch Blinklichter (ohne Schranken) vor der Sicherungsart mit Halbschranken.

<u>Glätte</u>
Bei drei (bis zu neun) Unfällen (entspricht 3 % - 10 %) herrschte Glätte.

<u>1. Halt vor BÜ -> 2. Fahrt auf BÜ</u>
Bei fünf Unfällen (entspricht 6 %) hielt das Straßenfahrzeug zunächst an, fuhr dann jedoch trotz Schienenfahrzeug auf den Bahnübergang.

Zwei Unfälle bzw. ein Unfall mit zwei Unfallteilen

Bei vier (bis zu sechs) Unfällen (entspricht 5 % - 7 %) gab es zwei Unfallteile bzw. es ereigneten sich zwei Unfälle hintereinander. Zunächst kam das Straßenfahrzeug von der Fahrbahn ab (oder Ähnliches), dann kam es erst zum Zusammenprall mit dem Schienenfahrzeug. Gleichzeitig lagen folgende weitere Parameter vor:

- bei zwei (bis zu drei) dieser Unfälle standen die Straßenfahrzeugführer unter Alkoholeinfluss
- bei zwei dieser Unfälle herrschte Glätte
- bei einem dieser Unfälle löste sich der PKW-Anhänger, was ggf. eine unzureichende Ladungssicherung vermuten lässt.

Abbiegen

Bei fünf (bis zu sechs) Unfällen (entspricht 6 % - 7 %) fand ein Abbiegevorgang statt.

Fazit

Die GDV-Unfalldaten gehen aufgrund ihres Umfangs und ihrer Zusammensetzung nicht in die Modellierung ein. Sie geben jedoch einen Einblick in die Vielfalt der Unfallhergänge.

5. Modell zur Abschätzung des Unfallgeschehens

5.1 Quantitatives Modell

5.1.1. Datengrundlage

Aufgrund von Korrekturen innerhalb der Datengrundlage, welche nach den Ergebnissen erster Analyseschritten notwendig waren, hat sich das in Kapitel 4.3 vorgestellte Untersuchungskollektiv geringfügig verringert. Für die Erstellung des Modelles zur Abschätzung des Unfallgeschehens an Bahnübergängen liegen nun Infrastruktur- und Unfalldaten sowie Daten zum Verkehrsaufkommen (straßen- und bahnseitig) für 1.040 Bahnübergänge vor, innerhalb derer 103 Unfälle mit Personen- und Sachschaden in den Jahren 2005-2011 von der Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes registriert wurden.

Die in den Kapiteln 4.3.2 und 4.3.3 vorgestellten Infrastruktureigenschaften wurden in Vorbereitung der Modellierung zunächst aufbereitet, wobei grundsätzlich zwischen stetigen, dichotomen und kategorialen Variablen unterschieden wird. Tabelle 6 zeigt die potentiell sicherheitsrelevanten Eigenschaften als Eingangsvariablen für die Modellierung mit den entsprechenden Ausprägungen.

Wie in Kapitel 4.3.1 bereits erläutert, liegen nur für Bahnübergänge innerhalb von Teilen des klassifizierten Straßennetzes (Bundes-, Landes- und Kreisstraßen) Angaben zur Verkehrsstärke des Kfz-Verkehrs (DTV_Kfz) vor. Da eine Abschätzung von DTV-Werten für technisch gesicherte Bahnübergänge nicht möglich ist (vgl. Kapitel 4.3.1), wurden die entsprechenden Bahnübergänge ohne DTV-Angaben ausgeschlossen. Für die nichttechnisch gesicherten Bahnübergänge, welche sich nahezu ausnahmslos im nichtklassifizierten Straßennetz befinden, muss auf eine Berücksichtigung des DTV innerhalb der Modellbildung verzichtet werden. Damit können die entsprechende Modelle lediglich innerhalb eines bestimmten DTV-Bereiches zur Anwendung kommen, da die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (§ 11 Abs. 7) eine feste DTV-Obergrenze von 100 Kfz/24 h (schwacher Verkehr) 2500 Kfz/24 h (mäßiger Verkehr) vorsieht.

Zur Beschreibung der Schienenverkehrsstärke lagen Belastungsklassen (Züge/Jahr) vor (vgl. Kapitel 4.3.2). Da die Darstellung der Expositionsgrößen innerhalb des Modells als Potenzfunktion eine stetige Variablenausprägung verlangt, wurde ein pragmatischer Ansatz gewählt, indem die Klassenmitten als Schienenverkehrsstärke definiert und in die Einheit Züge/24 h umgerechnet wurden. Wie ebenfalls in Kapitel 4.3.1 bereits erwähnt wurde, lagen für elf Bahnübergänge keine Belastungsklassen vor. Da eine sinnvolle Ableitung in diesen Fällen nicht möglich ist, werden diese aus dem Untersuchungskollektiv ausgeschlossen.

Tabelle 6: Übersicht Eingangsvariablen Modellbildung

Gruppe	Merkmal	Code	Ausprägung	Beschreibung der Ausprägung
Exposition	durchschnittlich täglicher Verkehr	DTV_Kfz	[Kfz/24h]	-
	Schienenverkehrsstärke	q_Bahn	[Fz/24 h]	-
Allgemeines	Sicherungsart	SiArt	0	nichttechnisch
			1	technisch (Blinklicht/Lichtzeichen, Halbschranke, Vollschranke)
	Streckenklasse Bahn	StrB_KLS	1	A 16t 5,0t/m
			2	B2 18t 6,4t/m
			3	C2 20t 6,4t/m
			4	C3 20t 7,2t/m
			5	C4 20t 8,0t/m
			6	CE 20t 8,0t/m
			7	CM2 21t 6,4t/m
			8	CM3 21t 7,2t/m
			9	CM4 21t 8,0t/m
			10	D4 22,5t 8,0t/m
			11	P/C 400 (P/C 70)
	Straßenklasse	StrK_KLS	1	Bundesstraßen
			2	Landesstraßen
			3	Kreisstraßen
			4	andere Straßen und Wege mit allg. Kfz-Verkehr
			5	sonstige Straßen und Wege mit Fahrverkehr
			6	Fuß- und Radwege
	Straßenoberfläche	StrOb	2	unbefestigt
			1	befestigt
	Kreuzungswinkel Straße/Schiene	KrWi	[gon]	-
Querschnitt	Anzahl Gleise	Gl_Anz	[-]	-
	Anzahl Fahrstreifen	FS_Anz	[-]	-
	Gehweg	Gw	0	Gehweg nicht vorhanden
			1	Gehweg vorhanden
	Radverkehrsführung	Rf	1	separate Radverkehrsführung
			2	Führung im Mischverkehr
Trassierung (Straße)	Kurvigkeit (Straße)	K	[gon/m]	(≤ 250 m zum BÜ oder bis zu benachbarten gleich- oder höherrangigen KP)
	Längsneigung (Straße)	smax	[%]	Maximum beider Richtungen
Netz	benachbarter Knotenpunkt vorhanden	KP	0	nein (≤ 250 m zum BÜ)
			1	ja (≤ 250 m zum BÜ)
	Entfernung zum nächsten Knotenpunkt	Entf_KP	[m]	-
	Entfernung zum nächsten Bahnhof	Entf_Bhf	[km]	-
Betrieb	maximale Geschwindigkeit Bahn	vB	[km/h]	-

5.1.2. Innere Abhängigkeiten zwischen infrastrukturseitigen Einflussgrößen

Eine Grundvoraussetzung für die Verwendung von Verallgemeinerten linearen Modellen ist die Unabhängigkeit zwischen den erklärenden Variablen. Um dies zu gewährleisten, wurde mit Hilfe einer Korrelationsanalyse überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen den einzelnen Variablen besteht. Aussagen über den Einfluss auf die Zielgröße „Unfallzahl“ sind nicht möglich. Diese Einflüsse werden erst im Rahmen der Modellierung quantifiziert. Tabelle 7 zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen den einzelnen Variablen in Form einer Korrelationsmatrix. Nach Cohen (1992) können die Korrelationskoeffizienten anhand der folgenden Wertebereiche eingeordnet werden:

- ± 0,1: schwacher Zusammenhang
- ± 0,3: mittlerer Zusammenhang (vgl. Tabelle 7, gelb markiert)
- ± 0,5: starker Zusammenhang (vgl. Tabelle 7, rot markiert)

Tabelle 7: Korrelationsmatrix

	DTV_ Kfz	q_ Bahn	SiArt	StrB_ KLS	StrK_ KLS	StrOb	KrWi	GlAnz	FSAnz	Gw	Rf	KP	K	smax	Entf_ KP_ KLS	Entf_ Bhf	vB
DTV_Kfz	1	0,25	0,71	0,17	-0,70	-0,28	-0,11	0,24	0,49	0,33	-0,20	0,02	-0,05	-0,26	0,14	-0,19	0,27
q_Bahn	0,25	1	0,39	0,47	-0,07	-0,21	0,16	0,42	0,14	0,14	-0,07	0,03	-0,09	-0,17	0,00	-0,03	0,60
SiArt	0,71	0,39	1	0,27	-0,46	-0,35	-0,01	0,39	0,46	0,21	-0,12	0,06	-0,07	-0,16	0,04	-0,19	0,32
StrB_KLS	0,17	0,47	0,27	1	-0,08	-0,18	0,07	0,28	0,04	0,07	-0,09	0,07	-0,13	-0,19	-0,08	0,04	0,31
StrK_KLS	-0,70	-0,07	-0,46	-0,08	1	0,32	0,13	-0,12	-0,53	-0,28	0,19	0,03	0,03	0,14	-0,12	0,20	-0,08
StrOb	-0,28	-0,21	-0,35	-0,18	0,32	1	-0,01	-0,13	-0,23	-0,10	0,07	-0,08	0,05	0,08	0,04	0,13	-0,17
KrWi	-0,11	0,16	-0,01	0,07	0,13	-0,01	1	0,07	-0,10	0,06	0,02	0,01	-0,01	0,01	-0,08	0,01	0,15
GlAnz	0,24	0,42	0,39	0,28	-0,12	-0,13	0,07	1	0,16	0,07	-0,04	0,01	-0,02	-0,08	0,06	-0,03	0,36
FSAnz	0,49	0,14	0,46	0,04	-0,53	-0,23	-0,10	0,16	1	0,22	-0,16	-0,01	0,00	-0,14	0,12	-0,16	0,16
Gw	0,33	0,14	0,21	0,07	-0,28	-0,10	0,06	0,07	0,22	1	-0,32	0,03	-0,10	-0,09	-0,06	-0,30	0,06
Rf	-0,20	-0,07	-0,12	-0,09	0,19	0,07	0,02	-0,04	-0,16	-0,32	1	-0,04	0,02	0,05	0,00	0,09	0,00
KP	0,02	0,03	0,06	0,07	0,03	-0,08	0,01	0,01	-0,01	0,03	-0,04	1	0,17	0,14	-0,38	-0,09	0,01
K	-0,05	-0,09	-0,07	-0,13	0,03	0,05	-0,01	-0,02	0,00	-0,10	0,02	0,17	1	0,02	0,45	0,06	-0,02
smax	-0,26	-0,17	-0,16	-0,19	0,14	0,08	0,01	-0,08	-0,14	-0,09	0,05	0,14	0,02	1	-0,17	0,06	-0,13
Entf_KP_KLS	0,14	0,00	0,04	-0,08	-0,12	0,04	-0,08	0,06	0,12	-0,06	0,00	-0,38	0,45	-0,17	1	0,08	0,07
Entf_Bhf	-0,19	-0,03	-0,19	0,04	0,20	0,13	0,01	-0,03	-0,16	-0,30	0,09	-0,09	0,06	0,06	0,08	1	0,05
vB	0,27	0,60	0,32	0,31	-0,08	-0,17	0,15	0,36	0,16	0,06	0,00	0,01	-0,02	-0,13	0,07	0,05	1

Es zeigt sich, dass jeweils ein starker Zusammenhang zwischen

- dem durchschnittlich täglichen Verkehr (DTV_Kfz) und den Merkmalen Sicherungsart (SiArt) und Straßenklasse (StrK_KLS)
- der Sicherungsart (SiArt) und dem Merkmale Anzahl Fahrstreifen (FSAnz),
- der Straßenklasse (StrK_KLS) und dem Merkmal Anzahl Fahrstreifen (FSAnz) ,
- der Schienenverkehrsstärke (q_Bahn) und dem Merkmal maximale Geschwindigkeit Bahn (vB)

zu erkennen ist.
Zudem zeigen sich mittlere Zusammenhänge zwischen

- dem durchschnittlich täglichen Verkehr (DTV_Kfz) und den Merkmalen Sicherungsart (SiArt) und Straßenklasse (StrK_KLS),
- der Schienenverkehrsstärke (q_Bahn) und den Merkmalen Sicherungsart (SiArt), Streckenklasse Bahn (StrB_KLS) und Anzahl Gleise (GlAnz),
- der Sicherungsart (SiArt) und den Merkmalen Straßenklasse (StrK_KLS), Straßenoberfläche (StrOb), Anzahl der Gleise (GlAnz), Anzahl Fahrstreifen (FSAnz) und maximale Geschwindigkeit Bahn (vB),
- Streckenklasse Bahn (StrB_KLS) und dem Merkmal maximale Geschwindigkeit Bahn (vB),
- der Straßenklasse (StrK_KLS) den Merkmalen Straßenoberfläche (StrOb),
- Gehweg (Gw) und den Merkmalen Radverkehrsführung (Rf) und Entfernung zum nächsten Bahnhof (Entf_Bhf),
- der Entfernung zum nächsten Knotenpunkt (Entf_KP) und den Merkmalen benachbarter Knotenpunkt (KP) und Kurvigkeit (K) sowie
- der Anzahl der Gleise (GlAnz) und dem Merkmal maximale Geschwindigkeit Bahn (vB)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Sicherungsart (SiArt) und der durchschnittlich tägliche Verkehr (DTV_Kfz) vor allem miteinander aber auch mit weiteren Merkmalen korrelieren. Die Korrelation zwischen der Sicherungsart (SiArt) und dem durchschnittlich täglichem Verkehr (DTV) ist damit zu erklären, dass im Zuge von Straßen mit hohem DTV tendenziell aufwendigere Sicherungsarten (bspw. Vollschranke) und an Straßen mit geringerem DTV eher einfache Lösungen der Sicherung von Bahnübergängen (bspw. Blinklicht) zur Anwendung kommen. Dies verdeutlicht auch Abbildung 39 (Grafische Darstellung der Verteilung des DTV (DTV_{min}, DTV_{15}, DTV_{50}, DTV_{85}, DTV_{max})) am Beispiel der technisch gesicherten Bahnübergänge (für Straßen an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen liegen keine Informationen zur Verkehrsstärke vor).

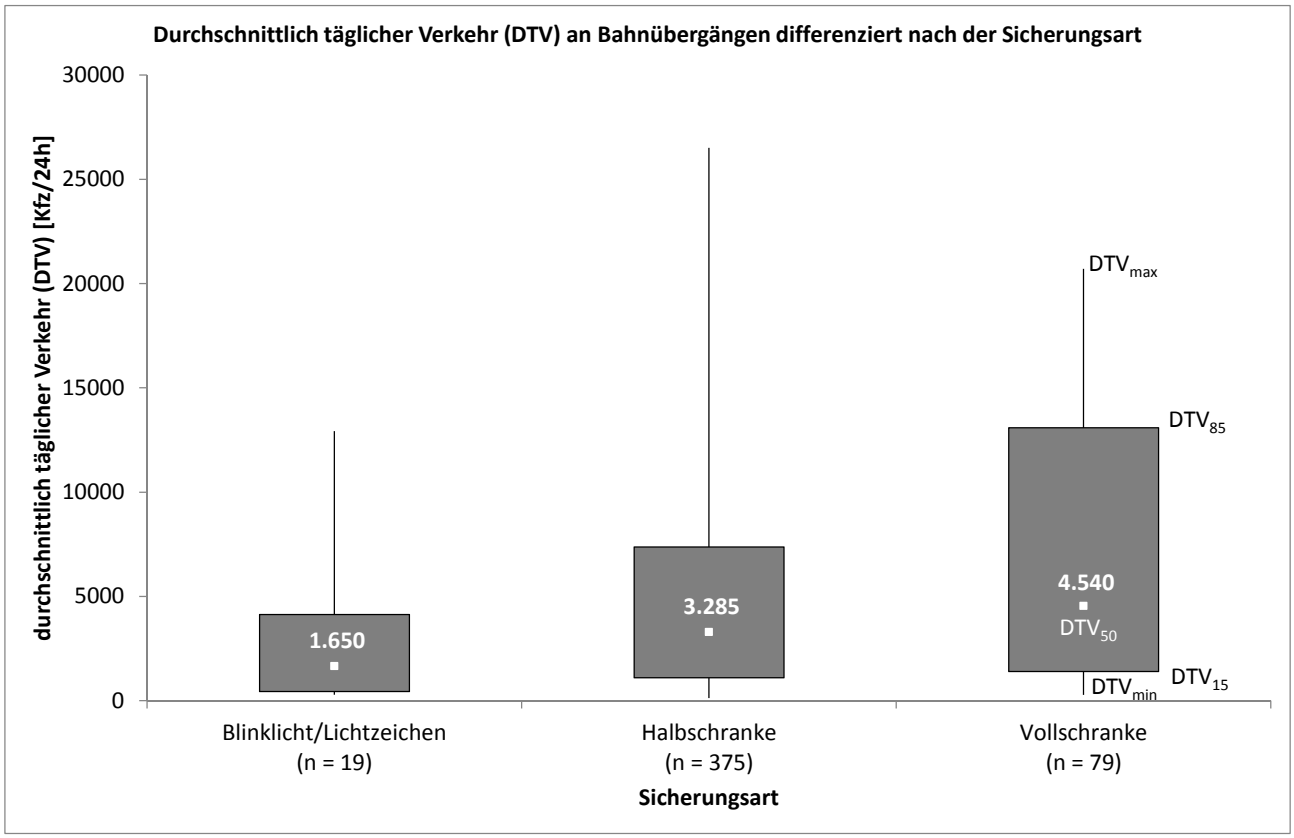


Abbildung 39: Zusammenhang zwischen dem durchschnittlich täglichen Verkehr (DTV) und der Sicherungsart an technisch gesicherten Bahnübergängen

Generell werden separate Modelle nach den Sicherungsarten technisch und nichttechnisch gesichert erstellt. Im Bereich der technisch gesicherten Bahnübergänge müssten Teilmodelle zusätzlich differenziert nach den Sicherungsarten erstellt werden, da der DTV als Expositionsgröße berücksichtigt werden sollte. Dies ist aber auf Basis der vorliegenden Datengrundlage (das Kollektiv der BÜ mit Blinklicht/Lichtzeichen umfasst lediglich 19 Bahnübergänge; das Kollektiv der Bahnübergänge mit Vollschranke umfasst 79 BÜ innerhalb derer lediglich 2 Unfälle/7 Jahre registriert wurden, was einer mittleren Unfallzahl von 0,02 U/BÜ*7a entspricht, vgl. Kapitel 5.1.3) nicht möglich. Um diesen Wirkungszusammenhang dennoch abzubilden und dessen Interpretation zu erleichtern wird für technisch gesicherte Bahnübergänge je ein Teilmodell mit und ohne Berücksichtigung des DTV erstellt.

Des Weiteren wird die Straßenklasse (StrK_KLS) zunächst nicht berücksichtigt, sofern der durchschnittlich tägliche Verkehr (DTV_Kfz) in das Modell aufgenommen wird, da der Straßenklasse (StrK_KLS) kein unmittelbarer Einfluss auf das Unfallgeschehen unterstellt wird.

Die maximale Geschwindigkeit Bahn (vB) kann bei der Modellierung zunächst nicht berücksichtigt werden, da die Expositionsgröße Schienenverkehrsstärke als dominierender Einfluss für das Auftreten von Unfällen erachtet wird.

Die Merkmale Entfernung zum nächsten Knotenpunkt (Entf_KP_KLS) und benachbarter Knotenpunkt (KP) werden ohnehin nicht gemeinsam im Modell berücksichtigt, was sich auch inhaltlich erklären lässt, denn das Merkmal Entfernung zum nächsten Knotenpunkt (Entf_KP_KLS) beinhaltet u.a. die Kategorie „kein benachbarter Knotenpunkt“. Falls sich allerdings die Variable Entfernung zum nächsten Knotenpunkt (Entf_KP_KLS) als nicht signifikant erweisen sollte, wird die Variable benachbarter Knotenpunkt (KP) geprüft.

Hinsichtlich der weiteren Variablen, zwischen denen Zusammenhänge mittlerer Stärke bestehen, werden zunächst keine weiteren Einschränkungen getroffen. Es wird aber bei der schrittweisen Aufnahme der Variablen in das Modell deren Modellsignifikanz, die Signifikanz des ermittelten Koeffizienten sowie der Einfluss auf bereits geschätzte Koeffizienten geprüft.

5.1.3. Ergebnisse

Aufbauend auf den Erkenntnissen zur Datengrundlage (vgl. Kapitel 5.1.1), wobei insbesondere die Verfügbarkeit von Zahlen zum Verkehrsaufkommen als Randbedingung relevant ist, und zu den inneren Abhängigkeiten zwischen den erklärenden Variablen wurden insgesamt acht Teilmodelle erstellt. Tabelle 8 zeigt die Teilmodelle sowie die entsprechend zugrundeliegenden Kollektive hinsichtlich der Anzahl der Bahnübergänge und der Unfallzahl. Wie aus Kapitel 5.1.2 hervorgeht, wurden separate Teilmodelle für technisch und nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge erstellt, wobei nach Teilmodellen für Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)), Unfälle mit Personenschaden (U(P)) sowie Unfälle mit Sachschaden (U(S)) differenziert wurde. Bei den nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen wurden zusätzlich Teilmodelle für Bahnübergänge an Straßen mit allgemeinem Fahrverkehr (mit Kfz; ≤ 2.500 Kfz/24h) und Bahnübergänge an Fuß- und Radwegen (ohne Kfz) unterschieden.

Betrachtet man zunächst Tabelle 8 und hierbei besonders die Mittelwerte der abhängigen Variable Unfallanzahl, zeigt sich eine Problematik, die international als low-mean-value bezeichnet wird (Maher und Summersgill, 1996): Kleine Mittelwerte können bei der Modellerstellung dazu führen, dass sich bereits bei geringer Anzahl von berücksichtigten Variablen eine gute Anpassung (χ^2/df nahe 1; vgl. Kapitel 3) ergibt, da das Kollektiv nur eine geringe Varianz aufweist. Insbesondere bei Mittelwerten kleiner 0,3 können unabhängig von der verwendeten Teststatistik Probleme auftreten (Ye, Zhang und Lord, 2008).

Tabelle 8: Übersicht der Teilmodelle und zugrundeliegender Kollektive

Teilmodell	technisch gesicherte BÜ			nichttechnisch gesicherte BÜ (≤ 2.500 Kfz/24h)				
	Gesamt n = 473			Gesamt n = 567			mit Kfz[1] n = 370	ohne Kfz[2] n = 197
	U(P,S)	U(P)	U(S)	U(P,S)	U(P)	U(S)	U(P,S)	U(P,S)
Anzahl [U/7a]	59	42	17	44	23	21	34	10
Mittelwert [U/(BÜ*7a)]	0,12	0,09	0,04	0,08	0,04	0,04	0,09	0,05

[1]) Bahnübergänge an Straßen mit allgemeinem Fahrverkehr (≤ 2.500 Kfz/24h)
[2]) Bahnübergänge an Fuß- und Radwegen (ohne Kfz-Verkehr)

Das Teilmodell für Unfälle mit Sachschaden (U(S)) an technisch gesicherten BÜ weist bereits allein durch die Schätzung der Konstante Unterdispersion (die Varianz der Variable unterschreitet die Nominalvarianz der angenommenen Poisson-Verteilung; vgl. Kapitel 3) auf. Bei den Teilmodellen für

- Unfälle mit Personenschaden (U(P)) und Unfälle mit Sachschaden (U(S)) an nicht technisch gesicherten BÜ sowie
- Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) an nicht technisch gesicherten BÜ an Straßen mit allgemeinem Fahrverkehr (≤ 2.500 Kfz/24h) bzw. mit ausschließlich Fußgänger- und Radverkehr

zeigten sich neben einer „guten“ Anpassung bei geringer Zahl an erklärenden Variablen (geringer Informationsgewinn), Probleme bei der Schätzung der Koeffizienten für die erklärenden Variablen (aufgrund zu geringer Varianz) sowie deren Modelleffekte (hoher Erklärungsgehalt bei gleichzeitig

hoher Irrtumswahrscheinlichkeit (p>0,1[2])). Da zur Ermittlung der Gesamtunfallzahl immer alle relevanten Teilmodelle (bspw. Unfälle mit Personenschaden U(P) + Unfälle mit Sachschaden U(S) an technisch gesicherten BÜ) berücksichtigt werden müssen, ist die Verwendung einzelner Teilmodelle nicht möglich. Aus diesem Grund werden lediglich die Teilmodelle für Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S) an technisch gesicherten und nichttechnisch Bahnübergängen (≤ 2.500 Kfz/24h) an Fuß- und Radwegen sowie Straßen mit allgemeinem Fahrverkehr für eine Anwendung empfohlen und weiter betrachtet.

Die Interpretation und Anwendung der folgenden Teilmodelle ist demzufolge nicht sinnvoll; die Ergebnisse sind in den entsprechenden Anlagen dokumentiert:

- Technisch gesicherte BÜ: Unfälle mit Personenschaden (U(P); Anlage 22) Unfälle mit Sachschaden (U(S); Anlage 23)
- Nichttechnisch gesicherte BÜ an Wegen mit allgemeinem Fahrverkehr (≤ 2.500 Kfz/24h) sowie an Rad- und Fußwegen: Unfälle mit Personenschaden (U(P); Anlage 24) und Unfälle mit Sachschaden (U(S); Anlage 25)
- Nichttechnisch gesicherte BÜ an Wegen mit allgemeinem Fahrverkehr (≤ 2.500 Kfz/24h): Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S); Anlage 26)
- Nicht technisch gesicherte BÜ an Rad- und Fußwegen: Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S); Anlage 27)

Der Problematik überzähliger unfallfreier Abschnitte oder Stellen hätte mit der Anwendung von ZI („zero-inflated“)-Modelle begegnet werden können (Shankar et al., 1997; Lee und Mannering, 2002). Dabei werden zwei Zustände – ein sicherer (unfallfreie Stellen) und unsicherer Zustand (unfallbelastete Stellen) – unabhängig voneinander betrachtet. Allerdings erfolgt die Schätzung für den unsicheren Zustand wiederum anhand von Poisson- oder auch NegBin-Modellen. Weiterhin entbehrt die Annahme eines sicheren Zustandes (keine Unfälle) jeder theoretischen Grundlage und lehnt den Unfallentstehungsprozess praktisch ab (Lord et al., 2005).

[2] In inhaltlich bergründeten Fällen sowie bei gleichzeitig plausibler Ausprägung der Wirkungszusammenhänge wurden Variablen auf Basis eines Signifikanzniveaus von p<0,1 ausgewählt (vgl. Kapitel 3).

Unfalldichtemodell für technisch gesicherte Bahnübergänge mit DTV_Kfz

Tabelle 9 zeigt das Unfalldichtemodell der Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) für technisch gesicherte Bahnübergänge mit DTV_Kfz. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse zeigt Formel 1 die entsprechende Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der U(P,S)/(BÜ*a).

Tabelle 9: Unfalldichtemodell (Unfälle je BÜ und Jahr) der Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) an technisch gesicherten Bahnübergängen mit DTV_Kfz

technisch gesicherte Bahnübergänge (n = 473; U(P,S) EUB 2005-2011 = 59)

	Parameter	Koeffizient[a]	Standard-fehler	95%-K.-intervall Min	95%-K.-intervall Max	p[b]	Neg.-Bin.-Verteilung Vert.-Param.	Neg.-Bin.-Verteilung Pearson-χ2	Poisson-Verteilung Pearson-χ2	df	χ2/df
Nullmodell	Konstante k	-4,027 ****	0,1474	-4,16	-3,583	< .0001	2,28	472,133	606,407	472	1,285
DTV_Kfz	k	-5,124 ****	1,1958	-7,312	-2,624	< .0001	2,4	472,471	611,846	471	1,299
	ln (DTV_Kfz)	0,136 ^{0,346}	0,1439	-0,146	0,418	0,391					
Endmodell	k	-4,854 **	1,1789	-7,009	-2,387	< .0001	0	460,771	460,771	466	0,989
	ln (DTV_Kfz)	0,346 *	0,1449	0,062	0,63	< .05					
	SiArt Vollschranke	-3,899 ****	0,8359	-5,538	-2,261	< .0001		1,7328889			
	SiArt Halbschranke	-2,25 ****	0,4136	-3,061	-1,44						
	SiArt Blinklicht/Lichtzeichen	0	.	.	.						
	K (Kurvigkeit Straße)	-0,958 ^{0,065}	0,5187	-1,975	0,058	< .05					
	vB 160 km/h	1,171 ****	0,3347	0,515	1,827	< .01					
	vB 120 km/h	0,668 *	0,3289	0,024	1,313						
	vB 100 km/h	0	.	.	.						

[a] Signifikanz der Koeffizienten (Schätzung basierend auf der Neg.-Bin.-Verteilung); Wald-Test: * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; **** p ≤ 0,0001

[b] Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

$$\frac{\mathbf{U(P,S)_{techn_ges_B\ddot{U}}}}{\mathbf{B\ddot{U}\cdot a}} = \mathbf{0,008\cdot DTV_Kfz^{0,346}\cdot e^{-3,899\cdot SiArt-0,958\cdot K+1,171\cdot vB}}$$

Formel 1

mit	DTV_Kfz	durchschnittlich täglicher Verkehr	[Kfz/24h]
	SiArt	Sicherungsart (Vollschranke=1; Halbschranke=0,577; Blinklicht/Lichtzeichen=0)	[-]
	K	Kurvigkeit (Straße; ≤ 250 m zum BÜ oder bis zu benachbarten gleich- oder höherrangigen KP)	[gon/m]
	vB	maximale Geschwindigkeit Bahn (über 120 bis 160 km/h = 1; über 100 bis 120 km/h = 0,57; bis 100 km/h = 0)	[-]

Aus den Ergebnissen der Modellierung lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Durch das Endmodell werden 100% (1-((1-0,989)/(1-1,285))=1,04) der im Nullmodell enthaltenen Varianz erklärt.
- Im Endmodell weist die Expositionsgröße durchschnittlich-täglicher Verkehr (DTV_Kfz) einen degressiv positiven Einfluss auf das Unfallgeschehen an technisch gesicherten Bahnübergängen auf. Begründung: Gemäß Schöne (2013) wirkt sich hier der „Stott-Effekt“ und das Fehlen geringer Verkehrsstärken (da hierfür keine Daten vorhanden sind) aus. Bei der Betrachtung über alle Verkehrsstärken müsste das Risiko erst steigen und dann wieder sinken, vgl. S. 148/149 in Schöne (2013).
- Die Expositionsgröße Schienenverkehrsstärke (q_Bahn) hat keinen Einfluss auf die Anpassungsgüte und erwies sich darüber hinaus als nicht signifikant (p>5%).
- Technisch gesicherte Bahnübergänge mit Blinklicht oder Lichtzeichen weisen im Vergleich zu Bahnübergängen mit Halbschranke ein um den Faktor 9,5 (= 1/e(-3,899•0,577)) und im

Vergleich zu Bahnübergängen mit Vollschranke ein um den Faktor 49,4 (= 1/e(-3,899•1)) höheres Unfallrisiko auf (SiArt). Die hier errechneten Faktoren passen zu den Erkenntnissen von Schöne (2013) auf S. 80, wobei an Bahnübergängen mit Vollschranke vorrangig Fußgänger an Unfällen beteiligt sind.

- Mit zunehmender Kurvigkeit der Straße sinkt das Unfallrisiko an technisch gesicherten Bahnübergängen. Nach Taylor, Baruya und Kennedy (2002) ist auf kurvigen und hügeligen Streckenabschnitten ein geringeres Geschwindigkeitsniveau zu erwarten als wenn dies nicht der Fall ist. Dies könnte die Aufmerksamkeit für punktuelle „Gefahrenstellen“ erhöhen bzw. den Anhalteweg zur Abwendung eines Unfalls durch eine Notreaktion verringern, auch wenn Untersuchungen (Taylor, Baruya und Kennedy, 2002; Maier et al., 2013) zeigen, dass das Unfallrisiko auf Streckenabschnitten gleichen Ausbaustandards mit zunehmender Kurvigkeit und Hügeligkeit erhöht ist. Nach Schöne (2013) ergibt sich ein anderer Einfluss der Straßenführung. Allerdings wurde hier die durchschnittliche Kurvigkeit über 250 m untersucht und nicht die konkrete Straßenführung am betreffenden BÜ – daher ist hier nicht zwangsläufig ein Widerspruch zu sehen.
- Bahnstrecken mit einer maximalen Geschwindigkeit[3] von 160 km/h weisen im Vergleich zu Strecken mit einer maximalen Geschwindigkeit der Bahn von 100 km/h ein um den Faktor 3,2 (= e(1,171•1)) höheres Unfallrisiko auf; Bahnstrecken mit einer maximalen Geschwindigkeit[4] von 120 km/h weisen im Vergleich zu Strecken mit einer maximalen Geschwindigkeit der Bahn von 100 km/h ein um den Faktor 2 (= e(1,171•0,57)) höheres Unfallrisiko auf (vB).

Zur Analyse der Residuen wurde die Hebelwirkung (Einfluss eines Falles auf den Erwartungswert) sowie die Cook-Distanz (Wirkung des Ausschlusses eines Falles auf die Ermittlung der Regressionskoeffizienten) der Fälle geprüft (vgl. Kapitel 3.1). Dabei hat sich gezeigt, dass hinsichtlich der Cook-Distanz keine Auffälligkeiten festgestellt werden konnten. Hingegen wurde für 36 Fälle ein überdurchschnittlicher Einfluss auf den Erwartungswert (Hebelwirkung) ermittelt. Hierbei ist auffällig, dass alle (19) Bahnübergänge mit der Sicherungsart Blinklicht/Lichtzeichen den Grenzwert überschreiten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass innerhalb dieser 19 Bahnübergänge insgesamt 14 der 59 Unfälle im gesamten Kollektiv der 473 technisch gesicherten Bahnübergänge registriert wurden. Ein Ausschluss dieser Fälle wird daher nicht als zielführend erachtet. Bei den weiteren 17 Fällen kann der überdurchschnittliche Einfluss auf den Erwartungswert damit erklärt werden, dass diese mit Halb- und Vollschranken gesicherten Bahnübergänge einerseits an Straßen mit hoher Verkehrsstärke (im Mittel ca. 14.000 Kfz/24h; vgl. hierzu Abbildung 39) liegen und andererseits geringe Unfallzahlen (vier Unfälle an drei von 17 Bahnübergängen) vorzuweisen haben. Auch in diesem Bereich kann von einem Ausschluss dieser Fälle abgesehen werden.

Die Ergebnisse weiterer Modellanalysen (Gegenüberstellung der empirischen und berechneten Unfallzahlen, Darstellung der kumulierten Response-Residuen über den DTV (CURE-Plot)) ist in Anlage 28 zu finden.

---

[3] Da die Schienenverkehrsstärke (q_Bahn) nicht im Modell enthalten ist, konnte die maximale Geschwindigkeit der Bahn berücksichtigt werden.

Unfalldichtemodell für technisch gesicherte Bahnübergänge ohne DTV_Kfz

Tabelle 10 zeigt das Unfalldichtemodell der Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) für technisch gesicherte Bahnübergänge ohne DTV_Kfz. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse zeigt Formel 2 die entsprechende Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der U(P,S)/(BÜ*a).

Tabelle 10: Unfalldichtemodell (Unfälle je BÜ und Jahr) der Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) an technisch gesicherten Bahnübergängen ohne DTV_Kfz

technisch gesicherte Bahnübergänge (n = 473)

technisch gesicherte Bahnübergänge mit Kfz-Verkehr von 150 bis 25.000 Kfz/24h (beob.Wertebereich) (n = 473; U(P,S) EUB 2005-2011 = 59)

	Parameter	Koeffizient[a]	Standard-fehler	95%-K.-intervall Min	95%-K.-intervall Max	p[b]	Neg.-Bin.-Verteilung Vert.-Param.	Neg.-Bin.-Verteilung Pearson-χ2	Poisson-Verteilung Pearson-χ2	df	χ2/df
Nullmodell	Konstante k	-4,027 ****	0,1474	-4,16	-3,583	< .0001	2,28	472,133	606,407	472	1,285
Endmodell	k	-2,257 ****	1,1789	-7,009	-2,387	< .0001	0	455,058	455,058	467	0,974
	SiArt Vollschranke	-3,574 ****	0,8359	-5,538	-2,261	< .0001					
	SiArt Halbschranke	-2,062 ****	0,4136	-3,061	-1,44						
	SiArt Blinklicht/Lichtzeichen	0	.	.	.						
	K (Kurvigkeit Straße)	-0,837 0,11	0,5187	-1,975	0,058	0,058					
	vB 160 km/h	1,164 **	0,3347	0,515	1,827	< .01					
	vB 120 km/h	0,687 *	0,3289	0,024	1,313						
	vB 100 km/h	0	.	.	.						

[a] Signifikanz der Koeffizienten (Schätzung basierend auf der Neg.-Bin.-Verteilung); Wald-Test: * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; **** p ≤ 0,0001

[b] Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

$$\frac{\mathbf{U(P,S)_{techn_ges_B\ddot{U}}}}{\mathbf{B\ddot{U}\cdot a}} = \mathbf{0,105\cdot e^{-3,574\cdot SiArt-0,837\cdot K+1,164\cdot vB}}$$ **Formel 2**

mit	SiArt	Sicherungsart (Vollschranke=1; Halbschranke=0,577; Blinklicht/Lichtzeichen=0)	[-]
	K	Kurvigkeit (Straße; ≤ 250 m zum BÜ oder bis zu benachbarten gleich- oder höherrangigen KP)	[gon/m]
	vB	maximale Geschwindigkeit Bahn (über 120 bis 160 km/h = 1; über 100 bis 120 km/h = 0,59; bis 100 km/h = 0)	[-]

Aus den Ergebnissen der Modellierung lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Durch das Endmodell werden 100% (1-((1-0,974)/(1-1,285))=1,09) der im Nullmodell enthaltenen Varianz erklärt.
- Die Expositionsgröße durchschnittlich-täglicher Verkehr (DTV_Kfz) lässt sich bei alleiniger Berücksichtigung kein signifikanter Einfluss auf das Unfallgeschehen nachweisen.
- Die Expositionsgröße Schienenverkehrsstärke (q_Bahn) hat keinen Einfluss auf die Anpassungsgüte und erwies sich darüber hinaus als nicht signifikant (p>5%).
- Technisch gesicherte Bahnübergänge mit Blinklicht oder Lichtzeichen weisen im Vergleich zu Bahnübergängen mit Halbschranke ein um den Faktor 7,9 (= 1/e(-3,574•0,577)) und im Vergleich zu Bahnübergängen mit Vollschranke ein um den Faktor 35,7 (= 1/e(-3,574•1)) höheres Unfallrisiko auf (SiArt).
- Mit zunehmender Kurvigkeit der Straße sinkt das Unfallrisiko an technisch gesicherten Bahnübergängen. Nach Taylor, Baruya und Kennedy (2002) ist auf kurvigen und hügeligen Streckenabschnitten ein geringeres Geschwindigkeitsniveau zu erwarten als wenn dies nicht der Fall ist. Dies könnte die Aufmerksamkeit für punktuelle „Gefahrenstellen“ erhöhen bzw. den Anhalteweg zur Abwendung eines Unfalls durch eine Notreaktion verringern, auch wenn Untersuchungen (Taylor, Baruya und Kennedy, 2002; Maier et al., 2013) zeigen, dass das

Unfallrisiko auf Streckenabschnitten gleichen Ausbaustandards mit zunehmender Kurvigkeit und Hügeligkeit erhöht ist. Nach Schöne (2013) ergibt sich ein anderer Einfluss der Straßenführung. Allerdings wurde hier die durchschnittliche Kurvigkeit über 250 m untersucht und nicht die konkrete Straßenführung am betreffenden BÜ – daher ist hier nicht zwangsläufig ein Widerspruch zu sehen.

- Bahnstrecken mit einer maximalen Geschwindigkeit[5] von 160 km/h weisen im Vergleich zu Strecken mit einer maximalen Geschwindigkeit der Bahn von 100 km/h ein um den Faktor 3,2 (= e(1,164•1)) höheres Unfallrisiko auf; Bahnstrecken mit einer maximalen Geschwindigkeit von 120 km/h weisen im Vergleich zu Strecken mit einer maximalen Geschwindigkeit der Bahn von 100 km/h ein um den Faktor 2 (= e(1,164•0,59)) höheres Unfallrisiko auf (vB).

Die Analyse der Residuen zeigt, dass hinsichtlich der Cook-Distanz wie auch im Teilmodell mit Berücksichtigung des DTV keine Auffälligkeiten festgestellt werden konnten. Im Bereich der Hebelwirkung konnten 23 Fälle mit entsprechend auffälligen Hebelwerten ermittelt werden. Wiederum entfallen 19 dieser 23 Fälle auf Bahnübergänge mit Blinklicht/Lichtzeichen (vgl. Abschnitt „Unfalldichtemodell für technisch gesicherte Bahnübergänge mit DTV_Kfz“). Hinsichtlich der übrigen vier Fälle konnten innerhalb der Daten keine systematischen Auffälligkeiten festgestellt werden. Daher werden diese Fälle, wie auch im Teilmodell mit Berücksichtigung des DTV, nicht ausgeschlossen.

Die Ergebnisse der Gegenüberstellung der empirischen und berechneten Unfallzahlen ist in Anlage 29 zu finden.

Da der DTV in diesem Modell keine Berücksichtigung fand, wurde das Modell zur Überprüfung der Ergebnisse auf Basis aller technisch gesicherten Bahnübergänge im Kollektiv (n=1986) erstellt. Darüber hinaus wurden beide Modelle durch die Gegenüberstellung der empirischen und berechneten Unfallzahlen miteinander verglichen. Eine ausführliche Beschreibung dieser Schritte ist in Anlage 30 dokumentiert. Zusammenfassend hat sich Folgendes gezeigt:

- Der Schienenverkehrsstärke als Expositionsgröße konnte (im Gegensatz zu dem in diesem Kapitel vorgestellten Modell) ein signifikanter Einfluss auf das Unfallgeschehen nachgewiesen werden, sofern auch die Sicherungsart im Modell enthalten ist (analog zur Problematik hinsichtlich des DTV_Kfz; vgl. Anlage 30 und Kapitel 5.1.2).
- Die Kurvigkeit im Verlauf der Straße (K) sowie die maximale Geschwindigkeit Bahn (vB; starke Korrelation mit der Schienenverkehrsstärke (q_Bahn)), erwies sich auf Basis aller technisch gesicherten Bahnübergänge als nicht signifikant.
- Zusätzlich erwies sich die Variable Anzahl Fahrstreifen („Anz_FS“) als signifikant. Dass die Anzahl der Fahrstreifen (FS_Anz) einen Teil des durchschnittlich täglichen Verkehr (DTV_Kfz) erklärt, ist wahrscheinlich (vgl. Kapitel 5.1.2, Tabelle 7). Dass der Anzahl Fahrstreifen („Anz_FS“) zunächst kein Einfluss auf das Unfallgeschehen nachgewiesen werden konnte, ist damit zu erklären, dass in der zugrundeliegenden Stichprobe lediglich 7 von 473 Bahnübergängen im Zuge von Straßen liegen, die nur einen Fahrstreifen aufweisen. Im gesamten Kollektiv der technisch gesicherten Bahnübergänge (n=1986) liegen 216 Bahnübergänge im Zuge von Straßen mit nur einem Fahrstreifen.
- Die Gesamtunfallzahl wird mit dem hier vorgestellten Modell (siehe Tabelle 10) stark überschätzt. Dies ist aber plausibel, da die mittlere Unfallzahl innerhalb der Stichprobe, welche dem entsprechenden Modell zugrunde liegt, höher ist (0,12 U/BÜ*7a; vgl. Kapitel 5.1.3) als im gesamten Kollektiv der technisch gesicherten Bahnübergänge (0,09 U/BÜ*7a).

---

[5] Da die Schienenverkehrsstärke (q_Bahn) nicht im Modell enthalten ist, konnte die maximale Geschwindigkeit der Bahn berücksichtigt werden.

- Mit Ausnahme der Bahnübergänge, die keine Unfälle aufweisen, wird die Unfallzahl durch beide Modelle deutlich unterschätzt; die Unterschätzung ist mit dem auf Basis aller Bahnübergänge erstellten Modell deutlich höher. Im Gegensatz dazu prognostizieren beide Modelle Unfälle an Bahnübergängen, für die im Untersuchungszeitraum keine Unfälle registriert wurden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für Bahnübergänge, die „unfallbegünstigende" Infrastrukturmerkmale aufweisen, auch ein Auftreten von Unfällen ermittelt wird. Denn es ist davon auszugehen, dass das Ereignis „kein Unfall" nicht realistisch ist, sondern nur zufällig bei geringen Wahrscheinlichkeiten auftritt. Diese Überschätzung ist bei Anwendung des Modells, welches auf Basis aller technisch gesicherten Bahnübergänge erstellt wurde, geringer.

Unfalldichtemodell für nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge

Tabelle 11 zeigt das entsprechende Unfalldichtemodell der Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) für nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge. Formel 3 zeigt die entsprechende Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der U(P,S)/(BÜ*a).

Tabelle 11: Unfalldichtemodell (Unfälle je BÜ und Jahr) der Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen mit Kfz- (≤ 2.500 Kfz/24h), Rad- und Fußgängerverkehr

nicht technisch gesicherte Bahnübergänge mit Kfz-Verkehr ≤ 2.500 Kfz/24h (n = 567; U(P,S) EUB 2005-2011 = 44)

	Parameter	Koeffizient[a]	Standard-fehler	95%-K.-intervall Min	Max	p[b]	Neg.-Bin.-Verteilung Vert.-Param.	Pearson-χ2	Poisson-Verteilung Pearson-χ2	df	χ2/df
Nullmodell	k	-4,502 ****	0,1616	-4,663	-4,029	< .0001	1,9	568,101	652	566	1,152
Endmodell	k	-3,93 ****	0,1862	-4,139	-3,409	< .0001	0,4	566,512	585,556	563	1,04
	StrK_KLS Fuß- und Radweg	-0,483 ^{0,239}	0,4101	-1,286	0,321	0,173					
	StrK_KLS allg. Fahrverkehr	0	.	.	.						
	StrOb unbefestigt	-1,203 *	0,5308	-2,243	-0,162	< .01					
	StrOb befestigt	0	.	.	.						
	Entf_KP	-0,006 *	0,0028	-0,012	-0,001	< .05					

[a] Signifikanz der Koeffizienten (Schätzung basierend auf der Neg.-Bin.-Verteilung); Wald-Test: * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; **** p ≤ 0,0001

[b] Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

$$\frac{\mathbf{U(P,S)_{nicht_techn_ges_BÜ}}}{\mathbf{BÜ \cdot a}} = \mathbf{0,019 \cdot e^{-0,483 \cdot StrK_KLS - 1,203 \cdot StrOb - 0,006 \cdot Entf_KP}}$$ **Formel 3**

mit	StrK_KLS	Straßenklasse (Fuß- und Radwege (Straßenklasse 6) =1; allgemeiner Fahrverkehr (Straßenklassen 1-5)=0)	[-]
	StrOb	Straßenoberfläche (unbefestigt=1; befestigt=0)	[-]
	Entf_KP	Entfernung zum nächsten Knotenpunkt (bis maximal 300 m, das heißt für Knotenpunkte, die > 300 m vom BÜ entfernt sind, ist ein Wert von 300 m anzunehmen)	[m]

Anhand der Ergebnisse ist folgendes festzustellen:

- Durch das Endmodell werden 74% (1-((1-1,04)/(1-1,152))=0,74) der im Nullmodell enthaltenen Varianz erklärt.
- Die Schienenverkehrsstärke hat keinen signifikanten Einfluss auf das Unfallgeschehen an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen.
- Das Unfallrisiko an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen im Zuge von Straßen mit allgemeinem Fahrverkehr ist im Vergleich zu nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen an Fuß- und Radwegen um den Faktor 1,6 (=1/e(-0,483•1)) erhöht (StrK_KLS). Die Variable wurde

trotz eines Signifikanzniveaus von nur etwa 80% berücksichtigt, da sie einerseits einen hohen Erklärungsanteil aufweist (ohne Berücksichtigung dieser Variable werden 67% der im Nullmodell enthaltenen Varianz erklärt) und andererseits eine Unterscheidung zwischen Rad- und Fußwegen sowie Straßen mit allgemeinen Fahrverkehr erlaubt und damit auch stellvertretend einen Teil der Exposition (Verkehrsaufkommen) repräsentiert.

- Das Unfallrisiko an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen im Zuge von Straßen mit befestigter Fahrbahnoberfläche im Vergleich zu unbefestigten Fahrbahnoberflächen um den Faktor 3,3 (=1/e(-1,222•1)) erhöht (StrOb). Auf unbefestigten Wegen ist von einer geringeren Verkehrsstärke sowie einem geringeren Geschwindigkeitsniveau (höhere Aufmerksamkeit für punktuelle „Gefahrenstellen“) auszugehen. Das Merkmal könnte stellvertretend den Ausbaustandard sowie einen Teil der Exposition (Verkehrsaufkommen) repräsentieren. Dass die Straßenoberfläche (StrOb) stellvertretend die Straßenklassen „Fuß- und Radwege“ (Straßenklasse 6; vgl. Tabelle 6) sowie andere Straßen mit Kfz-Verkehr (Straßenklassen 1-5; vgl. Tabelle 6) beschreibt, kann ausgeschlossen werden. Denn sowohl die Fuß- und Radwege (Straßenklasse 6) als auch die weiteren Straßen mit Kfz-Verkehr (Straßenklassen 1-5) weisen eine ähnliche Verteilung hinsichtlich der Straßenoberfläche (StrOb) auf (siehe Abbildung 40).
- Mit zunehmender Entfernung zu einem benachbarten Knotenpunkt sinkt das Unfallrisiko an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen. Das dieser Zusammenhang auch stellvertretend für das Verkehrsaufkommen besteht, ist nicht auszuschließen.

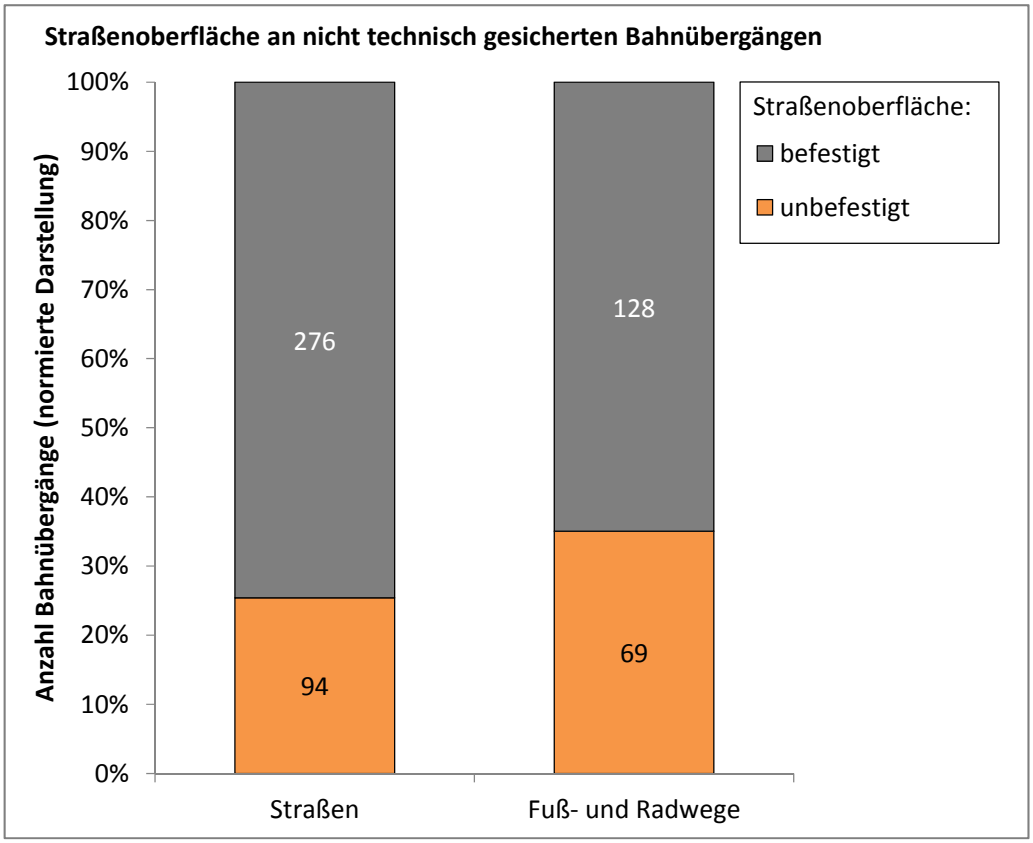


Abbildung 40: Straßenoberfläche an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen

Innerhalb der Residuenanalyse haben sich hinsichtlich der Cook-Distanz keine Auffälligkeiten gezeigt. Der Hebelwert wurde in zehn Fällen überschritten, wobei keine systematischen Auffälligkeiten bei diesen Bahnübergängen zu erkennen sind. Bei Ausschluss dieser Fälle bleiben die Koeffizienten, die Modellgüte sowie die Signifikanz nahezu konstant (vgl. Anlage 30).

Die Ergebnisse der Gegenüberstellung der empirischen und berechneten Unfallzahlen zeigt Anlage 32 zu finden.

Zusammenfassend wurden auf Basis der vorliegende Stichprobe Modelle für technische und nicht technisch gesicherte Bahnübergänge erstellt, mit welchen sich einerseits die Wirkung der enthaltenen verkehrlichen und infrastrukturellen Merkmale auf das Unfallgeschehen quantifizieren lässt, und andererseits Erwartungswerte hinsichtlich der Unfallanzahl an einem Bahnübergang ermittelt werden können. Bei der Anwendung des Modells ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich aufgrund der in der Realität sehr geringen Unfallzahlen an den Bahnübergängen (an 8% der betrachteten Bahnübergänge wurden Unfälle registriert) auch geringe Mittelwerte (Unfälle je Bahnübergang) sowie geringe Varianzen in der Stichprobe ergeben. Dieser Effekt („low-mean-value“) kann innerhalb der Modellierung zu einer guten Anpassung bei geringer Anzahl von berücksichtigten Variablen führen. Darüber hinaus ermittelt das Modell auch nur Erwartungswerte, die in der Realität mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zu beobachten sind, was dazu führt, dass die tatsächliche Unfallzahl an unfallbelasteten Bahnübergängen durch das Modell unterschätzt und an nicht unfallbelasteten Bahnübergängen überschätzt wird.

5.2 Qualitatives Modell

Diesem qualitativen Modell liegt kein statistisch ausgewertetes Gesamtuntersuchungskollektiv zu Grunde, sondern es beruht auf Erkenntnissen zu Einzelparametern und deren Zusammenwirken nach Schöne (2013). Die grundsätzliche Methodik und der Aufbau wurden bereits in Kapitel 3.2 erläutert. Nachfolgend werden die einzelnen Einflussfaktoren erläutert.

5.2.1. Einflussfaktoren im Entscheidungsbereich

5.2.1.1 Aussetzung (Schöne, 2013, S. 60ff)

Erste Voraussetzung für einen Zusammenprall ist das gleichzeitige Eintreffen eines Schienenfahrzeugs und eines Straßenverkehrsteilnehmers am Bahnübergang. Diese wird hier als Aussetzung bezeichnet, da Straßenverkehrsteilnehmer nur dann einer bahnübergangsbedingten Gefährdung ausgesetzt sind. Um die Aussetzung zu bestimmen, wird im vorliegenden Abschnitt untersucht, welche Faktoren die Anzahl der Begegnungen pro Zeiteinheit beeinflussen.

Als allgemein anerkannt kann angesehen werden, dass die **Verkehrsstärke auf Straße und Eisenbahnstrecke** die Unfallhäufigkeit an Bahnübergängen beeinflusst (Amann et al., 1981; Raslear, 1996). In vielen Modellen zur Berechnung von Gefährdungsindizes und zur Vorhersage von Unfallzahlen geht das Produkt aus beiden Verkehrsstärken ein, teilweise verknüpft mit weiteren Koeffizienten oder Konstanten (Berg et al., 1969; Austin et al., 2002; Oh et al., 2006). Auch bei Sicherheits- und Risikoanalysen von Straßen wird als Bezugsgröße die Verkehrsstärke genutzt (Bald, 1991; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., 2003), was auf die Annahme eines wesentlichen Zusammenhangs zwischen der Verkehrsstärke und dem Grundrisiko eines Straßenabschnitts oder einer Gefahrstelle schließen lässt. Allerdings differenzieren die vorgenannten Quellen nicht wie die vorliegende Untersuchung zwischen den einzelnen Risikofaktoren. Dadurch ist der unmittelbare mathematische Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und Aussetzung nicht aus empirisch ermittelten Daten zur Unfallhäufigkeit ableitbar, da anderweitige Wirkungsmechanismen zu erwarten sind. Beispielsweise kann eine steigende Straßenverkehrsstärke die Aufmerksamkeit der Straßenverkehrsteilnehmer beanspruchen, dadurch vom Bahnübergang ablenken und auf diese Weise die Unfallzahl erhöhen. Derartige Aspekte gehören jedoch zum Risikofaktor Gefährdung und fließen dort mit ein.

Häufig wird ein linearer Einfluss der Schienen- und Straßenverkehrsstärke auf die Begegnungswahrscheinlichkeit und damit auf die Aussetzung unterstellt. Während dies für den Schienenverkehr aufgrund der vergleichsweise großen zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen Fahrzeugankünften eine zulässige Annahme darstellt, gilt dies für den Straßenverkehr nur dann, wenn sich die einzelnen Straßenverkehrsteilnehmer hinsichtlich ihres Eintreffens am Bahnübergang nicht gegenseitig beeinflussen. Dies trifft lediglich bei kleinen Straßenverkehrsstärken oder bei nichtmotorisierten Straßenverkehrsteilnehmern zu.

Mit steigender Straßenverkehrsstärke beeinflussen sich die Kraftfahrzeuge gegenseitig: Sobald ein Kraftfahrzeug vor dem Bahnübergang wartet, werden nachfolgende Fahrzeuge an der Überquerung gehindert. Dieses nach seinem Entdecker auch als „**Stott-Effekt**“ bezeichnete Phänomen führt dazu, dass jeweils nur das erste Fahrzeug aus einer Zufahrtsrichtung mit einer möglichen Gefährdung konfrontiert wird; ein mögliches Vorbeifahren an bereits wartenden Fahrzeugen sowie Auffahrunfälle mit anschließendem Zusammenprall werden dabei vernachlässigt (Stott, 1987; Heavisides et al., 2008). Abbildung 41 zeigt die Eintreffenswahrscheinlichkeit unter Einfluss des „Stott-Effekts“. Ebenso werden hier vereinfacht Verkehrsschwankungen vernachlässigt.

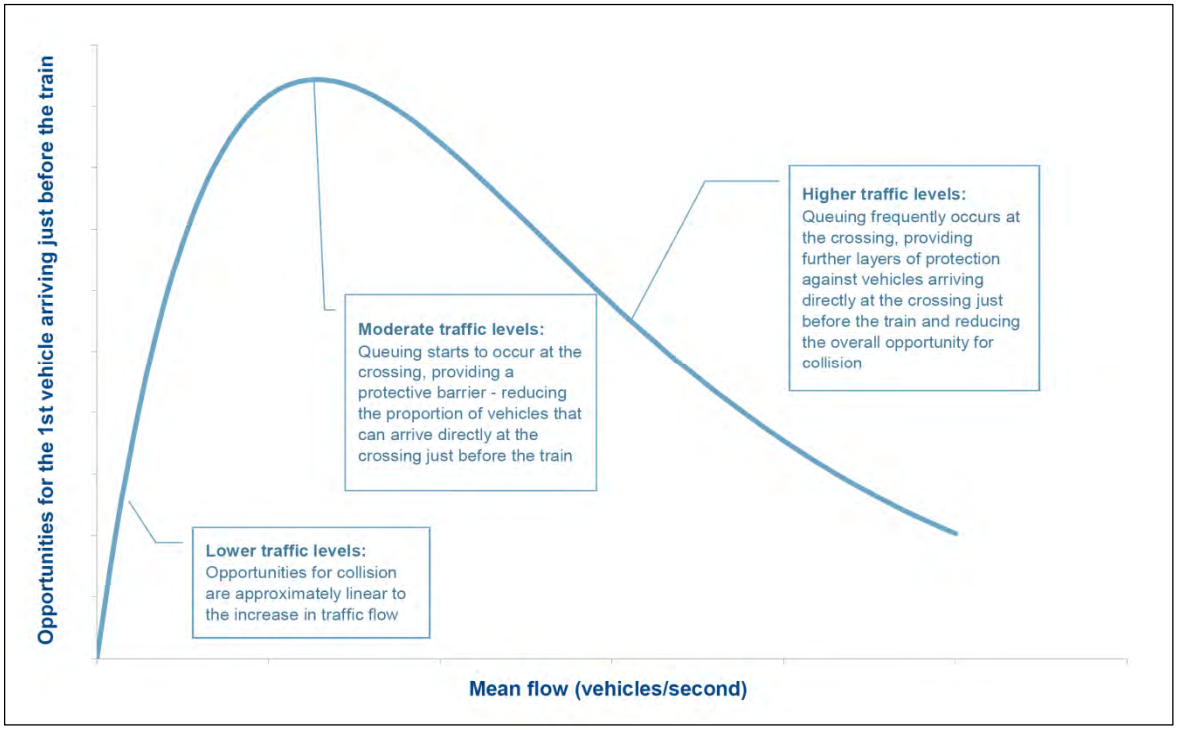


Abbildung 41: Eintreffenswahrscheinlichkeit unter Einfluss des „Stott-Effekts“ (Quelle: Heavisides et al., 2008)

Weitere Faktoren, die sich auf die Belegungswahrscheinlichkeit des Bahnübergangs auswirken können, sind die Geschwindigkeiten und Maße der Schienen- und Straßenfahrzeuge. Gegenüber den oben genannten Parametern ist ihr Einfluss auf die Aussetzung jedoch vernachlässigbar gering.

5.2.1.2 Gefährdung (Schöne, 2013, S. 72ff)

Die Gefährdung beschreibt hier die Wahrscheinlichkeit, mit der bei einer Begegnung zwischen Schienenfahrzeug und Straßenverkehrsteilnehmer eine gefährliche Situation auftritt. Diese Wahrscheinlichkeit wird von unterschiedlichen Einflussfaktoren bestimmt, die nachfolgend beschrieben werden.

Im Wesentlichen hängt die Gefährdungswahrscheinlichkeit von der **Sicherungsart** des Bahnübergangs und weiteren Faktoren ab, die das Verhalten der Straßenverkehrsteilnehmer beeinflussen. Bei der Sicherungsart sind zu unterscheiden:

- Sicherung durch Übersicht auf die Bahnstrecke (nachfolgend als „passive Sicherung“ bezeichnet),
- Sicherung durch Lichtzeichen oder Blinklichter (nachfolgend „Lichtsignale“),
- Sicherung durch Lichtzeichen oder Blinklichter mit Halbschranken (nachfolgend „Halbschranken“),
- Sicherung durch Schranken über die gesamte Straßenbreite (nachfolgend „Vollabschluss“).

Während die passive Sicherung wegen des erforderlichen bewussten Suchverhaltens der Straßenverkehrsteilnehmer als schwächste Form zu betrachten und daher am anfälligsten für ein Fehlverhalten wegen Unaufmerksamkeit bzw. Übersehen des Bahnübergangs ist, tritt dieses Fehlverhaltens bei Lichtsignalen seltener auf. Allerdings sind diese beiden Sicherungsarten praktisch unwirksam gegenüber absichtlichem Fehlverhalten. Halbschranken setzen aufgrund der eindeutigen Sperrwirkung die Häufigkeit des unbeabsichtigten Fehlverhaltens weiter herab und

erschweren beabsichtigtes Fehlverhalten. Ein Vollabschluss schließt sowohl unbeabsichtigtes als auch beabsichtigtes Fehlverhalten weitgehend aus und kann damit als wirksamste Sicherungsart bezeichnet werden.

Die Wirkung der verschiedenen Sicherungsarten auf die Wahrscheinlichkeit eines Fehlverhaltens und somit auf die Gefährdung erstreckt sich über mehrere Zehnerpotenzen. Dabei kann von folgender Abstufung ausgegangen werden (Schöne, 2013):

Tabelle 12: Angenommene Fehlerwahrscheinlichkeiten im Entscheidungsbereich (Quelle: Schöne, 2013)

Verkehrsart	**motorisiert**	**nichtmotorisiert**
passive Sicherung	10^{-1}	10^{-1}
Lichtsignale	10^{-2}	$6 \cdot 10^{-2}$
Halbschranken	10^{-3}	10^{-2}
Vollabschluss	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-3}$

Die Unterschiede zwischen den Wirkungen für motorisierte und nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmern erklären sich aus den verschiedenartigen Verhaltensweisen (Heilmann, 1984) und größeren Möglichkeiten zur Missachtung der Sicherungseinrichtungen durch Fußgänger im Vergleich zu Kraftfahrern.

Die ausführliche Herleitung ist in Anlage 33 zu finden.

Die Wahrscheinlichkeit absichtlichen Fehlverhaltens an technisch gesicherten Bahnübergängen steigt mit der Zeitdauer der Sperrung an, weil die Ungeduld der Straßenverkehrsteilnehmer größer wird (Beard et. al, 2010; Stott, 1987; Heavisides et al., 2008; van de Water et al., 2006). Dieser Faktor ist praktisch nur für Bahnübergänge mit technischer Sicherung relevant, da bei passiven Bahnübergängen insbesondere die Vorsperrzeit sehr kurz ist und nur die Zeit umfasst, in der das Schienenfahrzeug bereits direkt wahrnehmbar ist, also in der Regel nur wenige Sekunden vor der Durchfahrt.

Somit ist bei der Modellierung zu berücksichtigen, dass es bei Überschreiten der Ungeduldsschwelle zu einem Anstieg des Fehlverhaltens kommt. Als Untergrenze sind bei Schöne (2013) folgende Werte ermittelt worden:

- für nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer:
    - 30 s bei Lichtsignalen,
    - 60 s bei Halbschranken,
    - 120 s bei Vollabschluss,
- für motorisierte Verkehrsteilnehmer:
    - 60 s bei Lichtsignalen,
    - 120 s bei Halbschranken,
    - kein Wert für Vollabschluss, da absichtliche Missachtung hier nicht möglich ist.

Weitere potenzielle Einflussfaktoren sind die **soziale Kontrolle** und die Nähe zu Bahnhöfen oder Haltepunkten. Absichtliches Fehlverhalten kann davon beeinflusst werden, ob andere Personen anwesend sind, die es beobachten und missbilligen. Dieses Phänomen wird als soziale Kontrolle bezeichnet (Reinhold, 1997). Es ist allerdings bisher nicht ausreichend erforscht worden und wird deshalb hier nicht berücksichtigt.

Auch eine Lage in der **Nähe von Bahnhöfen und Haltepunkten** kann sich auf verschiedene Weise auf Fehlverhalten auswirken (van de Water et al., 2006; Ubalde et al., 2004). Die

Erkenntnisse reichen für eine sinnvolle Modellierung des Einflusses jedoch nicht aus, daher gelten dieselben Ausführungen wie zur sozialen Kontrolle.

Zwei Einflussfaktoren, die sich auf unbeabsichtigtes Fehlverhalten (Fehler wegen Unaufmerksamkeit oder Übersehen der Gefahrensituation) auswirken, sind die **Straßenführung** sowie die **Nähe zu benachbarten Verkehrsanlagen** wie Kreuzungen oder Einmündungen. Beide wirken als mögliche Ablenkungsfaktoren, indem sie die Aufmerksamkeit der sich nähernden Straßenverkehrsteilnehmer auf sich ziehen und somit vom Bahnübergang ablenken. Nach den Erkenntnissen von Schöne (2013) erhöht sich die Gefährdungswahrscheinlichkeit etwa um den Faktor 2 bei kurvigem Straßenverlauf und um den Faktor 5 bei ablenkenden Verkehrsanlagen vor dem Bahnübergang. Als relevanter Einflussbereich wurde in Anlehnung an die „Orientierungssichtweite“ aus dem Straßenentwurf (Lippold et al., 2007; Hristov, 2011) ein zeitlicher Wert von rund 8 s angesetzt, der über die jeweilige auf der Straße gefahrene Geschwindigkeit in eine Entfernung umgerechnet werden kann (beispielsweise außerorts bei 90 km/h etwa 200 m, entsprechend innerorts bei 30 bis 50 km/h etwa 70 bis 110 m).

Zunächst ist zu vermuten, dass auch **Sichteinschränkungen** an passiven Bahnübergängen die Gefährdung durch unbeabsichtigte Fehlhandlungen erhöhen, da die Schienenfahrzeuge im Vergleich zu uneingeschränkter Sicht objektiv später erkennbar sind und den Straßenverkehrsteilnehmern somit weniger Zeit für die Wahrnehmung und Reaktion verbleibt.

Allerdings kamen Schöne und Buder in zwei Studien zu dem Ergebnis, dass die eingeschränkte Sicht auf die Bahnstrecke zu einem vorsichtigeren Verhalten der motorisierten Straßenverkehrsteilnehmer (geringere Annäherungsgeschwindigkeit, intensiveres Suchen nach Schienenfahrzeugen kurz vor dem Bahnübergang) führt (Schöne et al., 2011b; Schöne et al., 2011c). Umgekehrt stellten Ward und Wilde nach der Beseitigung von Sichteinschränkungen ein weniger vorsichtiges Verhalten in Form höherer Annäherungsgeschwindigkeiten fest (Ward et al., 1996). Ein ähnlicher Zusammenhang gilt für die nichtmotorisierten Verkehrsarten. Nach den Erkenntnissen von Stevens führen kurze Sichtzeiten an Bahnübergängen für Fußgänger nicht zu mehr Unfällen, was durch ein vorsichtigeres Verhalten aufgrund der gefährlichen Situation („Risikokompensation“) erklärt wird (Stevens, 2004). Beard und Melo (2010) konnten an portugiesischen Bahnübergängen für Fußgänger selbst bei Sichtzeiten unter 5 s keine signifikant höhere Unfallzahl feststellen. Somit kann bei bestehenden Sichteinschränkungen von einer Risikokompensation durch die Straßenverkehrsteilnehmer ausgegangen werden, sodass keine systematisch höhere Gefährdung vorliegt. Demzufolge müssen Sichteinschränkungen nicht als eigenständiger Einflussfaktor auf das unbeabsichtigte Fehlverhalten berücksichtigt werden. Für das Gesamtrisiko spielen die Sichtverhältnisse dennoch eine Rolle: für die mögliche Abwendung eines drohenden Zusammenpralls ist die verfügbare Sicht entscheidend; dies wird jedoch im entsprechenden Abschnitt 5.2.1.3 behandelt.

Weitere Faktoren, deren Einflüsse entweder nicht hinreichend untersucht sind oder deren Auftreten lediglich kurze Zeit dauert, sind der Kreuzungswinkel, die Gleisanzahl sowie Witterungseinflüsse wie Sonnenblendung, Eisglätte und Nebel.

5.2.1.3 Unabwendbarkeit (Schöne, 2013, S. 96ff)

Nicht jede Gefährdung am Bahnübergang führt zum Zusammenprall. Vielfach kann dieser durch eine Notreaktion der Beteiligten abgewendet werden, wenn die Gefährdungssituation rechtzeitig erkannt wird. Damit stellt die Abwehrmöglichkeit einen Faktor dar, der das Risiko beeinflusst und deshalb bei Risikoberechnungen zu berücksichtigen ist (vgl. Bepperling, 2008; Braband, 2005).In

der Literatur finden sich nur wenige Ansätze zur Bewertung der Unabwendbarkeit, da sich diese kaum beobachten lässt.

Handlungen anderer Personen, beispielsweise eine Warnung durch zufällig anwesende Unbeteiligte, dürften nur im Einzelfall eine Rolle spielen und werden deshalb vernachlässigt. Damit liegt es nahe, dass für die Möglichkeit der Unfallvermeidung vor allem die folgenden beiden Faktoren relevant sind:

- **Sichtverhältnisse** für Straßenverkehrsteilnehmer und Schienenfahrzeugführer,
- **Geschwindigkeiten** der Straßenverkehrsteilnehmer und Schienenfahrzeuge.

Für die Wahrscheinlichkeit des rechtzeitigen Erkennens existieren sowohl bei absichtlichem als auch bei unbeabsichtigtem Fehlverhalten zwei Grenzfälle:

1. Ein rechtzeitiges Erkennen wird angenommen, wenn die Sichtweite des Straßenverkehrsteilnehmers auf die Bahnstrecke mindestens so groß ist, dass die Annäherungszeit des Schienenfahrzeugs von dieser Stelle bis zum Bahnübergang mindestens so groß ist wie die Räumzeit des Straßenverkehrsteilnehmers ab dem genannten Entscheidungspunkt vor dem Bahnübergang bis zum vollständigen Verlassen des Gefahrenbereichs mit der gesamten Fahrzeuglänge. In diesem Fall hat der Straßenverkehrsteilnehmer stets die Möglichkeit, rechtzeitig auf ein sich näherndes Schienenfahrzeug reagieren.
2. Ein rechtzeitiges Erkennen wird nicht angenommen, wenn die Sichtweite des Straßenverkehrsteilnehmers auf die Bahnstrecke so klein ist, dass die Annäherungszeit des Schienenfahrzeugs von dieser Stelle kleiner ist als die Reaktionszeit des Straßenverkehrsteilnehmers. In diesem Fall kann von keiner wirksamen Reaktion mehr ausgegangen werden.

Zwischen dem ersten und dem zweiten Grenzfall ist mit einer sinkenden Erkennbarkeit zu rechnen, wobei verschiedene Verläufe möglich sind (beispielsweise Abgabe und Wahrnehmung von Pfeifsignalen, stärkere Beschleunigung, Ausweichen). Mangels gesicherter Erkenntnisse über die genauen Abläufe, die aufgrund der dynamischen Situation und der Wechselwirkungen zwischen den Beteiligten eine hohe Komplexität aufweisen dürften, ist keine exakte Abbildung zwischen den beiden Grenzfällen möglich. Unbestritten ist jedoch die Tatsache, dass ein Zusammenprall umso wahrscheinlicher abwendbar ist, je früher das sich nähernde Schienenfahrzeug vom Straßenverkehrsteilnehmer erkannt wird. Somit ist das Verhältnis von benötigter zu vorhandener Sichtweite bei der Modellierung einzubeziehen. Entscheidend ist dabei die Sicht ab einer Stelle vor dem Bahnübergang, die dem für eine Gefahrenbremsung benötigten Weg entspricht. Bei nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmer kann diese Stelle unmittelbar vor Eintritt in den Gefahrenbereich angenommen werden.

5.2.2. Einflussfaktoren im Räumungsbereich

5.2.2.1 Aussetzung (Schöne, 2013, S. 113ff)

Die Aussetzung im Räumungsbereich beschreibt die Anzahl der Begegnungen zwischen Straßen- und Schienenfahrzeugen, die durch einen Aufenthalt der Straßenfahrzeuge im Gefahrenbereich entstehen, der über den normalen Zeitbedarf für die Überquerung hinausgeht. Als Gründe für solch einen zusätzlichen Aufenthalt werden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nur Straßenverkehrsanlagen hinter dem Bahnübergang betrachtet, die das Räumen beeinträchtigen können. Hierzu gehören beispielsweise Einmündungen oder Kreuzungen, bei denen einzelne oder alle vom Bahnübergang wegführende Verkehrsströme wartepflichtig sind.

Weitere externe Einflüsse wie Fahrzeugdefekte oder Witterungsfolgen werden nicht einbezogen, da diese praktisch nicht vorhersehbar sind und zudem nur eine geringe Bedeutung für das Gesamtrisiko haben.

Betrachtet werden nur motorisierte Verkehrsteilnehmer, da bei den nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern davon ausgegangen werden kann, dass diese Straßenverkehrsteilnehmer aufgrund ihres geringen Platzbedarfs und ihrer Wendigkeit stets eine Möglichkeit zum Verlassen des Gefahrenbereichs finden.

Eine Begegnung zwischen Straßen- und Schienenfahrzeug ist potenziell möglich, wenn eine Straßenverkehrsanlage zu einem Rückstau von Straßenfahrzeugen bis auf den Bahnübergang führt und sich gleichzeitig ein Schienenfahrzeug nähert.

Ein gefährlicher Zustand kann dabei nach den Erkenntnissen von Turner et al. (2010) nur eintreten, wenn die Dauer des jeweiligen Rückstaus größer ist als die Vorsperrzeit, da vor Ablauf dieser Zeit kein Schienenfahrzeug eintreffen kann und ab Beginn der Vorsperrzeit in der Regel keine weiteren Straßenfahrzeuge auf den Bahnübergang fahren. Demzufolge sind nur solche Rückstaus zu berücksichtigen, die länger dauern als die Vorsperrzeit.

5.2.2.2 Gefährdung (Schöne, 2013, S. 114ff)

Die Verhaltensvorschriften für Straßenverkehrsteilnehmer bestimmen, dass ein Bahnübergang erst befahren werden darf, wenn er zügig geräumt werden kann (Straßenverkehrs-Ordnung, 2010). Eine Gefährdung tritt auf, wenn der tatsächliche Ablauf hiervon abweicht, sodass ein Straßenfahrzeug in den Gefahrenbereich einfährt, obwohl es diesen nicht unmittelbar wieder verlassen kann. Mögliche Gründe hierfür sind:

- fehlende Erkennbarkeit der Wartepflicht (beispielsweise keine Sicht auf übergeordnete Verkehrsströme) bei gleichzeitig fehlender Aufstellfläche hinter dem Bahnübergang,
- fehlende Erkennbarkeit der Wartepflicht bei vorhandener Aufstellfläche hinter dem Bahnübergang (unerwartetes Entstehen eines Rückstaus),
- Wirken von Umgebungsfaktoren, die ein Erkennen der Wartepflicht erschweren (beispielsweise spitze Winkel zwischen den Straßen hinter dem Bahnübergang),
- Wirken von Umgebungsfaktoren, die vom Beachten der Wartepflicht ablenken (beispielsweise komplexe Verkehrssituationen vor dem Bahnübergang),
- unbeabsichtigtes Fehlverhalten trotz Erkennbarkeit der Wartepflicht (menschliches Fehlverhalten im Sinne des Restrisikos).

Ist die Wartepflicht vor dem Bahnübergang nicht erkennbar und besteht gleichzeitig keine ausreichende Aufstellfläche hinter dem Bahnübergang, muss praktisch jeder Straßenverkehrsteilnehmer zunächst in den Gefahrenbereich einfahren und dort halten, um den übergeordneten Verkehrsströmen die Vorfahrt zu gewähren. Wenn in der gleichen Situation eine ausreichende Aufstellfläche hinter dem Bahnübergang vorhanden ist, können sich Straßenfahrzeuge dort aufstellen. Wegen der fehlenden Erkennbarkeit der Wartepflicht erwarten nachfolgende Straßenverkehrsteilnehmer das Anhalten eines vorausfahrenden Fahrzeugs jedoch nicht in jedem Fall und fahren deshalb möglicherweise in den Gefahrenbereich ein. Dies lässt sich vermeiden, wenn die Straßenverkehrsteilnehmer aufgrund ihrer Beobachtungen und Erfahrungen vorsorglich reagieren und somit vor dem Bahnübergang anhalten. Hierfür soll eine wissensbasierte Handlung angenommen werden.

Auch bei uneingeschränkter Erkennbarkeit der Wartepflicht muss mit einer Restwahrscheinlichkeit menschlicher Fehlhandlungen gerechnet werden. Die Erkennbarkeit der Wartepflicht kann durch

verschiedene Umgebungsbedingungen erschwert sein, ebenso können weitere Aufgaben den Straßenverkehrsteilnehmer beim Wahrnehmen der Wartepflicht überfordern. Dadurch besteht eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass Straßenfahrzeuge in den Gefahrenbereich einfahren und dort halten.

5.2.2.3 Unabwendbarkeit (Schöne, 2013, S. 116ff)

Grundlegende Ausführungen zur Unabwendbarkeit enthält Abschnitt 5.2.1.3 für den Entscheidungsbereich. Bei der Abwendung eines Zusammenpralls, der aus einer Gefährdung im Bereich der Räumung resultieren würde, ist jedoch anzunehmen , dass in erster Linie der Schienenfahrzeugführer reagieren kann, wenn er in seinem Fahrweg ein Hindernis erkennt und daraufhin eine Schnellbremsung einleitet sowie Pfeifsignale abgibt.

Die Aufmerksamkeit und Blickrichtung des Straßenverkehrsteilnehmers wird in den hier vorliegenden Fällen nicht auf die Bahnstrecke gerichtet sein, sofern dieser überhaupt erkennt, dass er sich noch im Gefahrenbereich des Bahnübergangs befindet. Im stehenden Kraftfahrzeug können allerdings Pfeifsignale mit hoher Wahrscheinlichkeit wahrgenommen werden (Heilmann, 1984), woraufhin wiederum eine Reaktion des Straßenverkehrsteilnehmers möglich ist.

Bei aktiven Bahnübergängen geht der Ankunft des Schienenfahrzeugs der Sicherungsvorgang voraus, beispielsweise das Schließen von Halbschranken. Dieser könnte den Straßenverkehrsteilnehmer ebenfalls auf die Gefahr aufmerksam machen und ihn dazu bewegen, den Gefahrenbereich zu verlassen. Allerdings führt der Sicherungsvorgang auch zum Anhalten von Straßenfahrzeugen vor dem Bahnübergang in der entgegengesetzten Fahrtrichtung, was ein Räumen gerade in dieser Situation erschweren kann. Deshalb soll eine Abwendung durch das Wahrnehmen der eingeschalteten Sicherungseinrichtungen nicht berücksichtigt werden.

Demzufolge wird die Abwendbarkeit im Bereich der Räumung vor allem durch die Sichtverhältnisse für den Schienenfahrzeugführer bestimmt, deren Nutzbarkeit wiederum von der Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs und dem Bremsweg abhängt. Die Sichtverhältnisse für den Schienenfahrzeugführer spiegeln tendenziell auch die Sichtmöglichkeiten eines auf dem Bahnübergang befindlichen Straßenverkehrsteilnehmers wider.

Für den Bereich der Räumung lautet die Fragestellung: Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Schienenfahrzeugführer auf dem Bahnübergang befindliche Straßenverkehrsteilnehmer zu einem Zeitpunkt wahrnimmt, um noch vor ihnen anhalten zu können oder um sie durch Pfeifsignale zu einem Verlassen des Gefahrenbereichs zu bewegen? Die Unabwendbarkeit kann daraus unter Einbeziehung der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit des Schienenfahrzeugführers berechnet werden.

Für die Wahrscheinlichkeit des rechtzeitigen Erkennens existieren zwei Grenzfälle:

1. Ein rechtzeitiges Erkennen ist möglich, wenn die Sichtweite des Schienenfahrzeugführers auf den Bahnübergang mindestens so groß ist wie der Anhalteweg des Schienenfahrzeugs.
2. Ein rechtzeitiges Erkennen ist nicht möglich, wenn die Sichtweite des Schienenfahrzeugführers kleiner ist als der Weg, den das Schienenfahrzeug während der Reaktionszeiten des Schienenfahrzeugführers und des Straßenverkehrsteilnehmers zuzüglich eines Zeitwertes zur Abgabe von Pfeifsignalen und zum Verlassen des Bahnübergangs durch das Straßenfahrzeug zurücklegt.

Zwischen den beiden genannten Fällen gestaltet sich eine Quantifizierung schwierig, da über die genauen Abläufe keine Erkenntnisse vorliegen. Es ist jedoch die Annahme gerechtfertigt, dass die

Unabwendbarkeit mit sinkender Sichtweite ansteigt. Somit ist das Verhältnis von benötigter zu vorhandener Sichtweite bei der Modellierung einzubeziehen.

Als Anhalteweg der Schienenfahrzeuge sollte nicht der Regelbremsweg der Strecke herangezogen werden, da dieser den ungünstigsten zulässigen Fall repräsentiert. Stattdessen sind die tatsächlichen Anhaltewege der Schienenfahrzeuge zu verwenden, die meist kleiner sind als der Regelbremsweg der Strecke. Die Sichtweiten sind ebenfalls als Mittelwerte über beide Fahrtrichtungen anzusetzen.

5.2.3. Schadensausmaß (Schöne, 2013, S. 103ff und S. 118)

Als Einflussfaktor auf der Ebene des Bahnübergangs wird in der Literatur nur die Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge genannt. Mit steigender Geschwindigkeit erhöht sich das Schadensausmaß (Beard et. al, 2010; Cooper et. al, 2007; Rail Accident Investigation Branch, 2011). Der kausale Zusammenhang ergibt sich aus dem Einfluss der kinetischen Energie.

Die Geschwindigkeit der Straßenfahrzeuge kann in der Regel vernachlässigt werden, da der Impuls des Straßenfahrzeugs gegenüber dem Impuls des Schienenfahrzeugs gering ist und überwiegend ein seitliches Auftreffen des Schienenfahrzeugs auf das Straßenfahrzeug erfolgt (Füser, 2001).

5.2.4. Sensitivitätsanalyse und Schlussfolgerungen (Schöne, 2013, S. 143ff)

Um die Stärke des Einflusses einzelner Parameter auf das Risiko zu ermitteln, wurde von Schöne (2013) eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei wurden Ausgangsszenarien mit typischen Werten definiert. Anschließend erfolgte die Variation jedes einzelnen Parameters innerhalb seines praktisch auftretenden Wertebereichs, während die übrigen Parameter unverändert blieben. Aufgrund des Charakters der Ausgangswerte, die teilweise auf Schätzungen beruhen, ist eine zahlenmäßig exakte Angabe der Einflussgröße nicht sinnvoll. Stattdessen erfolgen die Aussagen in Größenordnungen mit einer anzunehmenden Genauigkeit innerhalb einer Zehnerpotenz.

Aus der Sensitivitätsanalyse von Schöne (2013) lassen sich folgende Erkenntnisse zur Wirkung der Parameter auf das Risiko ableiten, bezogen jeweils auf die praktisch auftretenden Wertebereiche unter den angenommenen Rahmenbedingungen.

- Die Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge hat einen starken Einfluss von mehreren Zehnerpotenzen. Mit steigender Geschwindigkeit steigen die Risiken, wobei abhängig von anderen Parametern deutliche Sprünge auftreten.
- Die Schienenverkehrsstärke weist einen mittleren Einfluss innerhalb einer Zehnerpotenz auf. Mit steigender Schienenverkehrsstärke steigen die Risiken kontinuierlich an.
- Auch die Vorsperrzeit hat einen mittleren Einfluss von etwa einer Zehnerpotenz. Mit steigender Vorsperrzeit sinken die Risiken zunächst, steigen dann jedoch wieder an. Dabei unterscheiden sich die Grenzwerte zwischen motorisierten und nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern.
- Die Straßenverkehrsstärke besitzt starken Einfluss auf das Risiko. Während sie für nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer kontinuierlich ansteigt, erfolgt bei motorisierten Verkehrsteilnehmern nach Erreichen eines Maximums ein Abfall wegen des Stott-Effekts.
- Die Sicherungsarten haben einen starken Einfluss über mehrere Zehnerpotenzen. Je wirksamer die Sicherungsart, umso geringer das Risiko.
- Die Gefährdungsfaktoren im Entscheidungsbereich (Kurven und Einmündungen oder Kreuzungen) weisen einen mittleren Einfluss von etwa einer Zehnerpotenz auf, sofern beide gleichzeitig auftreten. Sonst werden die Risiken nur schwach beeinflusst.

- Die Sichtverhältnisse zur Abwendung von Gefährdungen durch Straßenverkehrsteilnehmer besitzen einen starken Einfluss von mehreren Zehnerpotenzen. Mit steigenden Sichtmöglichkeiten sinken die Risiken, wobei allerdings durch andere Parameter deutliche Sprünge auftreten.
- Die Anzahl und Dauer von Rückstaus im Räumungsbereich haben einen starken Einfluss von mehreren Zehnerpotenzen auf die Risiken. Zusätzlich steigernd wirken eine sinkende Erkennbarkeit der Wartepflicht und Ablenkungsfaktoren.

Diese Erkenntnisse bilden die Ausgangsbasis für das qualitative Modell.

5.2.5. Modellaufbau

Auf Basis der Modellierung nach Schöne (2013) wurde ein vereinfachtes qualitatives Modell entwickelt, dessen grundsätzlicher Aufbau in Abbildung 42 dargestellt ist.

Es handelt sich gegenüber der Untersuchung von Schöne (2013) um ein vereinfachtes Modell. In der Untersuchung wurden alle einzelnen Einflussfaktoren und Zusammenhänge ausführlich hergeleitet, abschließend erfolgte eine Sensitivitätsanalyse, um den Einfluss der einzelnen Parameter auf das Gesamtergebnis zu ermitteln. Daraus ergaben sich die am stärksten wirkenden Einflussfaktoren auf das Risiko. Da der Einfluss der anderen Parameter vernachlässigbar ist, wurden nur die stärksten Parameter in das vereinfachte qualitative Modell übernommen.

Eine wesentliche Vereinfachung betrifft die Betrachtungsebene. Während sich das Modell aus der Untersuchung von Schöne (2013) auf den einzelnen Verkehrsteilnehmer am einzelnen Bahnübergang bezieht und somit die individuellen Risiken nach Verkehrsarten ermittelt werden können, steht beim vereinfachten Modell der einzelne Bahnübergang mit seinem kollektiven Risiko im Mittelpunkt. Aus systematischen Gründen wird dabei noch nach motorisierten und nichtmotorisierten Verkehrsarten unterschieden, was beim Modellaufbau in zwei Teilbereichen berücksichtigt wird.

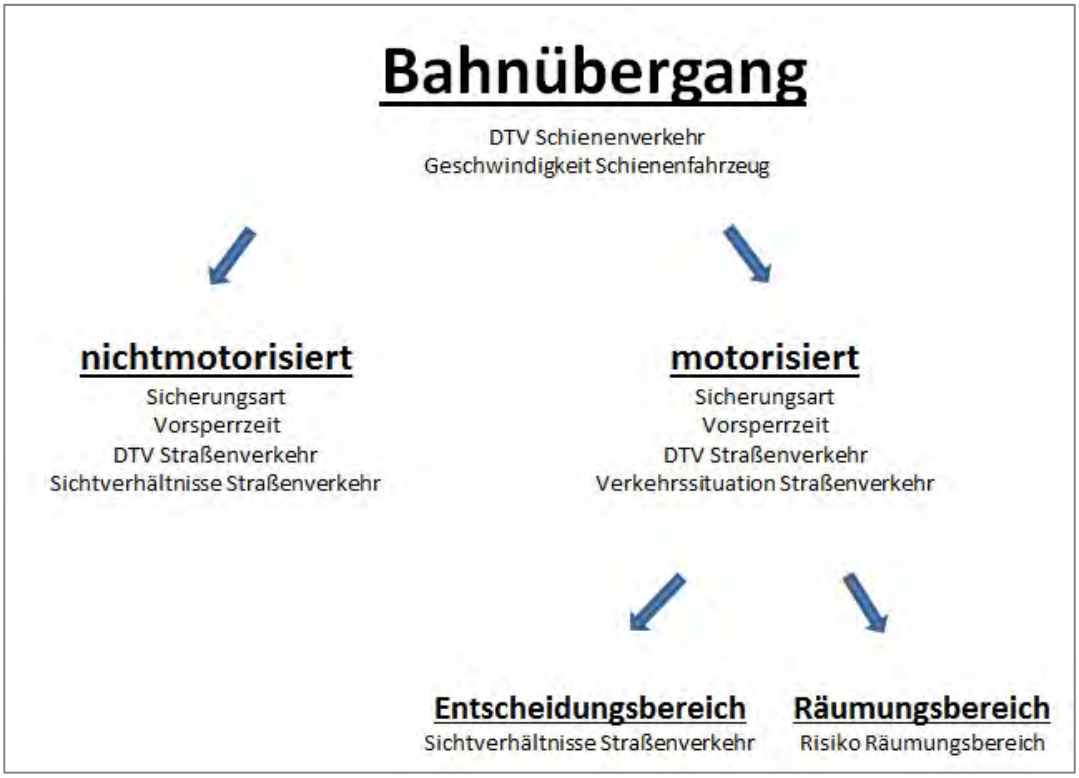


Abbildung 42: Qualitatives Modell

Im Gegensatz zum quantitativen Modell wird beim qualitativen Modell zwischen motorisierten und nichtmotorisierten **Verkehrsteilnehmern** unterschieden, weil wesentliche Unterschiede im Verhalten und den Abläufen an Bahnübergängen bestehen. So finden nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer selbst bei der besten Sicherung Möglichkeiten zur Umgehung, während dies bei motorisierten Verkehrsteilnehmern angesichts der Größe und Masse der Fahrzeuge nicht der Fall ist. Weiterhin haben die nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmer praktisch jederzeit die Möglichkeit, den Bahnübergang wieder zu verlassen, während motorisierte Verkehrsteilnehmer bei Stau möglicherweise auf dem Bahnübergang zum Stehen kommen. Diese Unterschiede müssen bei der Modellierung berücksichtigt werden.

Einzelne Einflussparameter wurden begründet nicht in das Modell aufgenommen:

Da es in der Literatur, auf der das qualitative Modell im Wesentlichen beruht, keine Erkenntnisse zu einem Einfluss der **Längsneigung der Straße (speziell der Steigung)** auf die Sicherheit gibt, wurde dieser Parameter nicht aufgenommen. Hinsichtlich der Ergebnisse der statistischen Modellierung ist zu vermuten, dass der Parameter dort stellvertretend für andere Parameter steht, die für die quantitative Modellierung nicht zur Verfügung standen.

Da die Modellierung nicht auf der Ebene der einzelnen Verkehrsarten erfolgt, sondern nur nach motorisierten und nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern unterschieden wird, kann die **Länge einzelner Verkehrsteilnehmer** nicht unmittelbar berücksichtigt werden. Von Interesse ist vielmehr die Frage, ob für motorisierte Verkehrsteilnehmer grundsätzlich eine Rückstaugefahr besteht und der Bahnübergang somit ein Räumungsproblem aufweist. Ob im konkreten Fall ein Pkw, Lkw oder anderes Fahrzeug davon betroffen ist, unterliegt dem Zufall und ist nicht Gegenstand der Modellierung. Sofern detaillierte Kenntnisse der Verkehrssituation vorliegen (z. B. Lkw-Anteil), kann dies bei der Punktvergabe prinzipiell berücksichtigt werden, indem die Anzahl und Dauer von Rückstaus sowie das Vorhandensein der Aufstellfläche auf Lkw bezogen und die Punktwerte entsprechend erhöht werden.

Situationen, in denen Fahrzeuge aufgrund der **Beschaffenheit des Bahnübergangs** (nicht aber wegen der Verkehrssituation, z. B. Rückstau) nicht räumen können, wurde nicht berücksichtigt. Einerseits stellt dies im Unfallgeschehen nur einen äußerst geringen Anteil dar und ist andererseits hinsichtlich seiner Wirkungszusammenhänge kaum vorhersehbar und somit schwer modellierbar. So kann beispielsweise auch Schnee oder Eis dazu beitragen, die möglicherweise nur ein einigen Tagen des Jahres auftreten. Bei regelkonformer Ausführung – wovon zunächst auszugehen ist – muss jeder Bahnübergang mit mindestens 5 bis 10 km/h räumbar sein.

5.2.6. Punktwerte

Allgemein

Die Punktwerte basieren grundsätzlich auf der Einteilung in 10er-Potenzen. Zwei Punkte entsprechen einer Zehnerpotenz des Risikos. Das heißt, eine Erhöhung um zwei Punkte steht für eine Verzehnfachung des Risikos, eine Senkung um zwei Punkte für eine Zehntelung des Risikos. Ein Punkt steht somit für eine Veränderung des Risikos um einen Wert innerhalb einer Zehnerpotenz, konkret etwa um den Faktor 3,2 (Wurzel aus 10). Beträgt die Differenz zweier zu vergleichender Punktwerte +1, steigt demnach das Risiko um Faktor 3,2 (Wurzel aus 10). Beträgt die Differenz zweier zu vergleichender Punktwerte -1, sinkt das Risiko analog um Faktor 3,2 (Wurzel aus 10). Dabei ist zu beachten, dass die absoluten Punktwerte nicht relevant sind, sondern nur deren Differenz. Ein Beispiel gibt Tabelle 13.

Tabelle 13: Beispiel Punktwerte und Risiko

Punktwert	Risiko
1	10^{-3}
2	$3{,}2 * 10^{-3}$
3	10^{-2}
4	$3{,}2 * 10^{-2}$
5	10^{-1}

Die Risikowerte, auf deren Basis dann die Punkte festgelegt wurden, entstammen den Erkenntnissen von Schöne (2013), speziell der Sensitivitätsanalyse. Aus dieser wird ersichtlich, wie stark die einzelnen Parameter das Gesamtrisiko beeinflussen.

Für die Herleitung der Punktwerte aller Parameter wurden verschiedene Quellen verwendet, welche in Tabelle 14 systematisch dargestellt sind.

Tabelle 14: Quellen zur Herleitung der Punktwerte aller Parameter

Kategorien / Parameter	Verhaltens-studie (Beobachtung)	Unfallaus-wertung	Schätz ung	Befragun g	mathe-matische Herleitung
DTV Schienenverkehr					Schöne (2013)

Kategorien / Parameter	Verhaltens-studie (Beobachtung)	Unfallaus-wertung	Schätz ung	Befragun g	mathe-matische Herleitung
Geschwindigkeit Schienenfahrzeug		Beard und Melo (2010); Cooper und Ragland (2007); DB Netz (2005); DB Netz (2006); DB Netz (2007); DB Netz (2008a); DB Netz (2009); DB Netz (2010); Rail Accident Investigation Branch (2011); Stefan (2012)			
Sicherungsart	Amann et al. (1981); Erke und Wimber (1980); Heilmann (1984); Hoefert (2012); Rösiger (2006); Schöne et al. (2011b); Schöne (2011d) Stevens (2004);	Berg und Oppenlander (1969)	Müller (1965)		Raslear (1996)
Vorsperrzeit	Bowman (1987); Richards, Heath-ington und Fam-bro (1990); Richards und Heathington (1990); Vijendran et al. (2004)	Stott (1987)	Beard und Melo (2010); van de Water et al. (2006)	Schöne (2013)	Heavisides et al. (2008)
DTV Straßenverkehr		Austin und Carson (2002); Berg und Oppenlander (1969); Oh, Washington und Nam (2006) Stott (1987);	Amann et al. (1981)		Heavisides et al. (2008)

Kategorien / Parameter	Verhaltens-studie (Beobachtung)	Unfallaus-wertung	Schätz ung	Befragun g	mathe-matische Herleitung
Verkehrssituation Straßenverkehr		National Transportation Safety Board (1998); für Straßen allgemein: Castro (2009); Cohen (1987); Hristov (2011); Richter (1996); Zierke (2010)			
Sichtverhältnisse Straßenverkehr					Schöne (2013)
Risiko Räumungsbereich					Schöne (2013)

Die Grenzen der einzelnen Parameter wurden jeweils so gewählt, dass die praktisch auftretenden Werte (z. B. hinsichtlich Verkehrsstärke, Geschwindigkeiten usw.) abgedeckt sind. Weiterhin sind die unteren und oberen Werte prinzipiell als offenes Intervall angegeben.

Es ist anzumerken, dass die absoluten Punktwerte grundsätzlich frei gewählt wurden. Der minimale Punktwert, welcher für das kleinste anzunehmende Risiko steht, beträgt stets 1. Relevant ist prinzipiell nur die Abstufung der Punkte zueinander. Zur späteren Bewertung des Risikos in Kapitel 7 wird es notwendig, einen Punktwert festzulegen, der als „akzeptabel“ gilt.

Allgemeine Eigenschaften BÜ

Für alle Berechnungen – unabhängig von der Verkehrsart – sind der bahnseitige DTV und die durchschnittliche Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge erforderlich.

Tabelle 15: Punktwerte für DTV Schienenverkehr

Beschreibung	**Orientierungswerte (Sfz/d)**	PUNKTE
gering	bis 20	1
mittel	über 20 bis 60	2
hoch	über 60	3

Der Einfluss der Schienenverkehrsstärke auf das Risiko ist linear, da sich die Schienenfahrzeuge – im Gegensatz zu den Straßenfahrzeugen – gegenseitig nicht beeinflussen und das Vorhandensein eines Schienenfahrzeugs Voraussetzung für einen Unfall ist. Mit steigender Schienenverkehrsstärke steigt das Risiko. Durch die Umrechnung in Zehnerpotenzen ergibt sich die in der Tabelle dargestellte Skalierung. Insgesamt umfasst der Einfluss innerhalb der praktisch auftretenden Werte (bis etwa 200 Schienenfahrzeuge pro Tag) eine Zehnerpotenz, woraus sich die Spannweite von zwei Punkten (1 bis 3) ergibt. Eine weitere Differenzierung unterhalb der gewählten 20 Schienenfahrzeuge pro Tag ist nicht sinnvoll, da bei sehr geringem Zugverkehr mit gegenteiligen Wirkungen auf das Risiko (Gewöhnungseffekte im Verhalten der Straßenverkehrsteilnehmer) zu rechnen ist, zu denen allerdings keine konkreten Erkenntnisse vorliegen.

Tabelle 16: Punktwerte für Geschwindigkeit Schienenfahrzeug

Beschreibung	**Orientierungswerte (km/h)**	PUNKTE
sehr gering	bis 40	1
gering	über 40 bis 60	2
mittelgering	über 60 bis 80	3
mittel	über 80 bis 100	4
mittelhoch	über 100 bis 120	5
hoch	über 120 bis 140	6
sehr hoch	über 140 bis 160	7

Die durchschnittliche Schienenfahrzeuggeschwindigkeit hat einen mehrfach steigernden Einfluss auf das Risiko, was die Spannweite von drei Zehnerpotenzen und somit sechs Punkten (1 bis 7) erklärt. Einerseits wirkt die Geschwindigkeit auf die Unabwendbarkeit von Unfällen, da mit höherer Geschwindigkeit die Wahrscheinlichkeit sinkt, einen drohenden Unfall noch abwenden zu können, und somit das Risiko steigt. Andererseits wird auch das Schadensausmaß beeinflusst, das mit steigender Geschwindigkeit ebenfalls steigt und somit das Risiko erhöht. Die Skalierung erfolgte hier aus praktischen Erwägungen, da die bahnseitigen Streckengeschwindigkeiten meist in 20-km/h-Schritten festgelegt sind. Bei Geschwindigkeiten von über 160 km/h sind in Deutschland keine Bahnübergänge zugelassen, weshalb die Obergrenze entsprechend festgelegt wurde.

Teilbereich „nichtmotorisiert“

Für die nichtmotorisierten Straßenverkehrsteilnehmer sind die Sicherungsart, die Vorsperrzeit, die Verkehrsstärke und die Sichtweite zu berücksichtigen, da sich diese Parameter von den motorisierten Verkehrsteilnehmern unterscheiden.

Tabelle 17: Punktwerte für Sicherungsart (nichtmotorisiert)

Sicherungsart	PUNKTE
Vollabschluss	1
Halbschranken	2
Lichtsignale	3
passive Sicherung	4

Der Vollabschluss ist die wirksamste Sicherungsart, gefolgt von den Halbschranken und anschließend der Lichtsignale. Der passive BÜ ist die am wenigsten wirksame Sicherungsart. Die Wirkung der Sicherungsarten wurde in Abschnitt 5.2.1.2 erläutert und findet ihren Niederschlag in den hier dargestellten Punktwerten. Sie erstrecken sich für nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer etwa über eine anderthalbe Zehnerpotenz, woraus sich die Spannweite von drei Punkten ergibt (1 bis 4).

Die Bewertung der durchschnittlichen Vorsperrzeiten ist nach den Sicherungsarten differenziert, da unterschiedliche Ungeduldsschwellen angenommen werden müssen. So ist mit steigender Wirksamkeit der Sicherung (siehe oben) auch damit zu rechnen, dass die Verkehrsteilnehmer erst nach längeren Wartezeiten beginnen, die Sicherung zu missachten, womit das Risiko steigt. Bei passiver Sicherung ist stets der niedrigste Punktwert anzusetzen, da hier keine Sperrung im eigentlichen Sinne stattfindet und der Bahnübergang praktisch nur kurz vor sowie während der Durchfahrt eines Schienenfahrzeugs für den Straßenverkehr gesperrt ist. Der Einfluss auf das Risiko erstreckt sich über etwa eine Zehnerpotenz, woraus sich eine Spannweite von zwei Punkten (1 bis 3) ergibt.

Tabelle 18: Punktwerte für Vorsperrzeit (nichtmotorisiert)

Beschreibung	**Orientierungswerte (s)**	PUNKTE
kurz	passive Sicherung: alle Werte, Lichtsignale: bis 30 s, Halbschranken: bis 60 s, Vollabschluss: bis 120 s	1
mittel	Lichtsignale: über 30 bis 60 s, Halbschranken: über 60 bis 120 s, Vollabschluss: über 120 bis 240 s	2
lang	Lichtsignale: über 60 s, Halbschranken: über 120 s, Vollabschluss: über 240 s	3

Tabelle 19: Punktwerte für DTV Straßenverkehr (nichtmotorisiert)

Beschreibung	**Orientierungswerte (Verkehrsteilnehmer/d)**	PUNKTE
sehr gering	bis 100	1
gering	über 100 bis 300	2
mittel	über 300 bis 1000	3
hoch	über 1000 bis 3000	4
sehr hoch	über 3000	5

Der DTV hat bei nichtmotorisierten Straßenverkehrsteilnehmern einen linearen Einfluss auf das Risiko, da das Eintreffen eines Verkehrsteilnehmers eine Voraussetzung für einen Unfall ist und – im Gegensatz zum motorisierten Verkehr – keine Rückstaueffekte angenommen werden müssen. Somit steigt das Risiko kontinuierlich mit steigendem DTV. Der Einfluss erstreckt sich über etwa zwei Zehnerpotenzen und führt zu einer Spannweite von vier Punkten (1 bis 5).
Zum Einfluss der sozialen Kontrolle liegen keine Forschungserkenntnisse vor, sodass dieser Aspekt hier nicht einbezogen wird.[6]

Tabelle 20: Punktwerte für Sichtverhältnisse Straßenverkehr (nichtmotorisiert)

Beschreibung	**Orientierungswerte (Verhältnis Annäherungszeit zu Reaktions-/Räumzeit)**	PUNKTE
sehr gut	Annäherungszeit > Räumzeit	1
gut	0,66 * Räumzeit < Annäherungszeit <= 1,0 * Räumzeit	2
mittel	0,33 * Räumzeit < Annäherungszeit <= 0,66 * Räumzeit	3
schlecht	Reaktionszeit < Annäherungszeit <= 0,33 * Räumzeit	4
sehr schlecht	Annäherungszeit <= Reaktionszeit	5

Die Abwendbarkeit eines drohenden Unfalls hängt – unabhängig von der Sicherungsart – in erster Linie von den vorhandenen Sichtverhältnissen ab. Hat der Straßenverkehrsteilnehmer bei der Annäherung eines Schienenfahrzeugs die Möglichkeit, selbiges noch zu erkennen und anzuhalten oder den Bahnübergang rechtzeitig zu räumen, kann ein Unfall im günstigsten Fall vermieden werden. Vereinfachend wird für die Einschätzung hier das Verhältnis von Reaktions- und Räumzeit des Straßenverkehrsteilnehmers zur Annäherungszeit des Schienenfahrzeugs angesetzt. Die Räumzeit ist dabei die Zeit, die der nichtmotorisierte Straßenverkehrsteilnehmer benötigt, um den Bahnübergangsbereich vollständig zu überqueren und somit den Gefahrenbereich zu räumen. Die Annäherungszeit ist die Zeit, die ein Schienenfahrzeug benötigt, um die Strecke ab Erkennbarkeit

[6] . Die Verkehrsschwankungen innerhalb eines Tages beeinflussen die Wirkung der sozialen Kontrolle. Diese Differenzierung wäre für dieses einfach anzuwendende Modell unverhältnismäßig. Es wird tendenziell ein sehr geringer Einfluss erwartet.

für den Straßenverkehrsteilnehmer bis zum Bahnübergang zu durchfahren. Es sind folgende Grenzfälle zu unterscheiden: Ist die Annäherungszeit größer als die Räumzeit, besteht eine große Wahrscheinlichkeit, einen Unfall durch rechtzeitiges Erkennen der Gefahrensituation zu vermeiden. Ist die Annäherungszeit kleiner als die Reaktionszeit des Straßenverkehrsteilnehmers, kann ein Unfall praktisch nie aufgrund der Sichtverhältnisse vermieden werden. Zwischen diesen beiden Grenzen sind Abstufungen anzunehmen, sodass zumindest ein Teil der Unfälle vermeidbar ist. Da aus der Sensitivitätsanalyse eine Spannweite des Einflusses von etwa zwei Zehnerpotenzen resultiert, erfolgte die Abstufung mit vier Punkten (1 bis 5).

Teilbereich „motorisiert“

Tabelle 21: Punktwerte für Sicherungsart (motorisiert)

Sicherungsart	PUNKTE
Vollabschluss	1
Halbschranken	5
Lichtsignale	7
passive Sicherung	9

Der Vollabschluss ist die wirksamste Sicherungsart, gefolgt von den Halbschranken und anschließend der Lichtsignale. Der passive BÜ ist die am wenigsten wirksame Sicherungsart. Die Wirkung der Sicherungsarten wurde in Abschnitt 5.2.1.2 erläutert und findet ihren Niederschlag in den hier dargestellten Punktwerten. Sie erstrecken sich für motorisierte Verkehrsteilnehmer etwa über vier Zehnerpotenzen, woraus sich die Spannweite von acht Punkten ergibt (1 bis 9). Mit dem deutlich abgesetzten (hier grundsätzlich festgelten minimalen) Wert von 1 Punkt für den Vollabschluss wird der Tatsache Rechnung getragen, dass damit für motorisierte Verkehrsteilnehmer praktisch keine Möglichkeit mehr besteht, die Sicherungseinrichtungen zu missachten.

Tabelle 22: Punktwerte für Vorsperrzeit (motorisiert)

Beschreibung	**Orientierungswerte (s)**	PUNKTE
kurz	passive Sicherung: alle Werte, Lichtsignale: bis 60 s, Halbschranken: bis 120 s, Vollabschluss: alle Werte	1
mittel	Lichtsignale: über 60 bis 120 s, Halbschranken: über 120 bis 240 s	2
lang	Lichtsignale: über 120 s, Halbschranken: über 240 s	3

Zur Erläuterung wird auf die nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmer verwiesen. Der wesentliche Unterschied besteht hier in den größeren Ungeduldsschwellen für motorisierte Verkehrsteilnehmer. Außerdem haben die Vorsperrzeiten bei Vollabschluss keinen Einfluss auf das Risiko, da motorisierte Verkehrsteilnehmer auch bei längeren Wartezeiten keine Möglichkeit haben, die Sicherungseinrichtungen zu umfahren. Daher wird hier der minimale Punktwert 1 vergeben.

Tabelle 23: Punktwerte für DTV Straßenverkehr (motorisiert)

Beschreibung	**Orientierungswerte (Kfz/d)**	PUNKTE
sehr gering	bis 100	1
gering	über 100 bis 300	2
mittel	über 300 bis 1000	3
hoch	über 1000 bis 3000	4
sehr hoch	über 3000	3

Der DTV hat bei motorisiertem Straßenverkehr zunächst eine linear steigernde Wirkung auf das Risiko, bis sich der Einfluss des Stott-Effekts bemerkbar macht (siehe Abschnitt 5.2.1.1). Durch die Rückstaueffekte sinkt das Risiko anschließend trotz steigender Verkehrsstärke wieder.
Zum Einfluss der sozialen Kontrolle liegen nur wenige Forschungserkenntnisse vor, sodass dieser Aspekt hier nicht einbezogen wird.[7]

Tabelle 24: Punktwerte für Verkehrssituation Straßenverkehr (motorisiert)

Beschreibung	**Beispiele**	PUNKTE
einfach	gute Erkennbarkeit, keine Einbiegevorgänge vor BÜ	1
komplex	Straßenführung vor BÜ	2
sehr komplex	Einmündungen/Kreuzungen und Wartepflicht vor BÜ	3

Bestimmte Verkehrssituationen im Umfeld des Bahnübergangs können das Risiko zusätzlich erhöhen. Ausgehend von einer einfachen Verkehrssituation kann diese auch komplex oder sehr komplex sein. Dazu zählen insbesondere die Straßenführung vor dem Bahnübergang sowie Einmündungen und Kreuzungen mit Wartepflicht vor dem Bahnübergang. Diese Verkehrsanlagen ziehen die Aufmerksamkeit der motorisierten Verkehrsteilnehmer auf sich und verringern somit die Wahrnehmbarkeit des Bahnübergangs und seiner Sicherungseinrichtungen. Der minimale Punktwert beträgt auch hier, wie anfangs definiert, 1. In Schöne (2013) wurde für eine komplexe Verkehrssituation mit einem Ablenkungsfaktor ein Einfluss auf das Risiko innerhalb einer Zehnerpotenz ermittelt, was der Steigerung des Punktwertes von 1 auf 2 entspricht. Für eine sehr komplexe Verkehrssituation mit mehreren Ablenkungsfaktoren ergab sich analog die Steigerung des Punktwertes auf 3. Ein Beispiel für eine komplexe Verkehrssituation zeigt Anlage 33.

Tabelle 25: Punktwerte für Sichtverhältnisse Straßenverkehr (motorisiert)

Beschreibung	**Orientierungswerte (Verhältnis Annäherungszeit zu Reaktions-/Räumzeit)**	PUNKTE
sehr gut	Annäherungszeit > Räumzeit	1
gut	0,66 * Räumzeit < Annäherungszeit <= 1,0 * Räumzeit	2
mittel	0,33 * Räumzeit < Annäherungszeit <= 0,66 * Räumzeit	3
schlecht	Reaktionszeit < Annäherungszeit <= 0,33 * Räumzeit	4
sehr schlecht	Annäherungszeit <= Reaktionszeit	5

Zur Erläuterung des Einflusses der Sichtweite wird auf die nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmer verwiesen.

---

[7] Heilmann (1984) stellte fest, dass die Lage innerhalb oder außerhalb geschlossener Ortschaften keine messbare Auswirkung auf das Verhalten hat. Innerhalb geschlossener Ortschaften besteht eine größere Wahrscheinlichkeit der sozialen Kontrolle. Die Erkenntnis deutet darauf hin, dass die soziale Kontrolle für motorisierte Straßenverkehrsteilnehmer keine oder nur eine geringe Rolle spielt. Dies deckt sich auch mit den Thesen von Grewe (1978), wonach soziale Kontrolle im motorisierten Straßenverkehr kaum eine Rolle spielt. Mangels gegenteiliger Erkenntnisse soll daher ein Einfluss der sozialen Kontrolle auf motorisierte Straßenverkehrsteilnehmer nicht angenommen werden.
Die Verkehrsschwankungen innerhalb eines Tages beeinflussen die Wirkung der sozialen Kontrolle. Diese Differenzierung wäre für dieses einfach anzuwendende Modell unverhältnismäßig. Schöne (2013) führte eine Vergleichsrechnung durch - Ergebnis: der Einfluss der Verkehrsschwankungen ist so gering, dass sie vernachlässigbar sind.

Tabelle 26: Punktwerte für Risiko Räumungsbereich (motorisiert)

Beschreibung	**Zusammensetzung**	**Beispiele**	PUNKTE
gering	keine Räumungsprobleme, Räumungsprobleme mit vollständiger Kompensation	Verkehrsanlagen ohne Rückstau alle Risiken kompensiert (durch Gefahrenraumfreimeldung)	1
mittel	Räumungsprobleme mit annähernd vollständiger Kompensation	fast alle Risiken kompensiert (außer Liegenbleiben Straßenfahrzeug), mit z. B. vorgeschalteten Lichtzeichen	2
hoch	wenige Räumungsprobleme ohne Kompensation, viele Räumungsprobleme mit teilweiser Kompensation	gelegentlicher Rückstau ein Teil der Risiken kompensiert, z. B. durch sehr gute Sichtverhältnisse des Schienenfahrzeugführers	3
sehr hoch	viele Räumungsprobleme ohne Kompensation	Warteplicht wegen Kreuzung hinter BÜ und starker Verkehr	4

Bei motorisiertem Straßenverkehr besteht ein zusätzliches Risiko im Räumungsbereich. Dabei kann es zu Räumungsproblemen kommen. So können Verkehrssituationen hinter einem Bahnübergang zum verkehrsbedingten Anhalten eines Straßenfahrzeuges im Gefahrenbereich des Bahnübergangs führen und damit eine Räumung verhindern. Die Häufigkeit dieser Räumungsprobleme hängt im Wesentlichen von der Rückstauwahrscheinlichkeit sowie den örtlichen Verhältnissen (z. B. Erkennbarkeit der Situation, Ablenkungsfaktoren, Aufstellfläche) ab.

Es ist zu beachten, dass nur solche Rückstaus relevant sind, deren Dauer die Vorsperrzeit des Bahnübergangs übersteigt, da kürzere Rückstaus nicht zu einem Unfall führen können – der Bahnübergang ist in diesem Fall zwischen Einschalten der Sicherungseinrichtung und Eintreffen des Schienenfahrzeugs bereits durch den Straßenverkehr geräumt.

Bei der Betrachtung des Risikos im Räumungsbereich ist eine mögliche Abwendbarkeit von Unfällen durch **Kompensation**smaßnahmen zu berücksichtigen. Dazu zählen neben baulichen/technischen Maßnahmen die Sichtverhältnisse des Schienenfahrzeugführers. So ist bei einem verkehrsbedingt auf dem Bahnübergang haltenden Straßenfahrzeug in erster Linie eine unter Umständen mögliche Reaktion des Schienenfahrzeugführers (Einleiten einer Bremsung) anzunehmen. Selbst wenn das Schienenfahrzeug nicht mehr vor dem Bahnübergang anhalten kann, wirkt bereits eine Geschwindigkeitsreduzierung senkend auf das Risiko, da das Schadensausmaß reduziert werden kann (vgl. Einfluss der Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge).

5.2.7. Berechnungen von Beispiel-Szenarien

Es werden grundsätzlich durchschnittliche Ausprägungsformen für die hier betrachteten Bahnübergänge unterstellt, deren Parameterwerte in Anlehnung an die Sensitivitätsanalyse nach Schöne (2013) gewählt wurden (siehe auch Abschnitt 5.2.4). Außerdem finden die in Abschnitt 5.2.6 definierten Punktwerte Verwendung.

Es erfolgt die Berechnung von Beispiel-Szenarien für alle Sicherungsarten. Dazu gehören neben der passiven (nichttechnischen) Sicherung folgende aktive (technische) Sicherungsarten:
Vollabschluss (Vollschranken),
Halbschranken und
Lichtsignale (Blinklicht/Lichtzeichen).

Die maximalen Geschwindigkeiten der Schienenfahrzeuge werden in zwei Szenarien gegenübergestellt: 80 km/h und 160 km/h.

Für den DTV im Straßenverkehr soll für alle Straßenverkehrsteilnehmer (Svt) ein beispielhafter Wert von 2400 gelten. Für die Anzahl der motorisierten Straßenverkehrsteilnehmer wird eine Schätzung vorgenommen: 2000 (entspricht einem Anteil von ca. 83 %). Damit ergibt sich für die nichtmotorisierten Straßenverkehrsteilnehmer eine Anzahl von 400 (entspricht einem Anteil von ca. 17 %).

Tabelle 27: Punktwertberechnung qualitatives Modell Sicherungsart Vollabschluss

technisch gesichert mit DTV	Szenario 1		Szenario 2	
	Vollabschluss		Vollabschluss	
	Werte	Punkte	Werte	Punkte
Teilbereich „motorisiert“				
DTV Schienenverkehr	40 Sfz/d	2	40 Sfz/d	2
Geschwindigkeit Schienenfahrzeug	80 km/h	3	160 km/h	7
Sicherungsart	Vollabschluss	1	Vollabschluss	1
Vorsperrzeit	60 s	1	60 s	1
DTV Straßenverkehr	2000 Svt/d	4	2000 Svt/d	4
Verkehrssituation Straßenverkehr	einfach	1	einfach	1
Sichtverhältnisse Straßenverkehr	mittel	3	mittel	3
Ergebnis „motorisiert“ (Entscheidungsbereich)		**15**		**19**
Risiko Räumungsbereich	kein	1	kein	1
Teilbereich „nichtmotorisiert“				
DTV Schienenverkehr	40 Sfz/d	2	40 Sfz/d	2
Geschwindigkeit Schienenfahrzeug	80 km/h	3	160 km/h	7
Sicherungsart	Vollabschluss	1	Vollabschluss	1
Vorsperrzeit	60 s	1	60 s	1
DTV Straßenverkehr	400 Svt/d	3	400 Svt/d	3
Sichtverhältnisse Straßenverkehr	mittel	3	mittel	3
Ergebnis „nichtmotorisiert“		**13**		**17**

Tabelle 28: Punktwertberechnung qualitatives Modell Sicherungsart Halbschranken

technisch gesichert mit DTV	Szenario 1		Szenario 2	
	Halbschranken		Halbschranken	
	Werte	Punkte	Werte	Punkte
Teilbereich „motorisiert“				
DTV Schienenverkehr	40 Sfz/d	2	40 Sfz/d	2
Geschwindigkeit Schienenfahrzeug	80 km/h	3	160 km/h	7
Sicherungsart	Halbschranken	5	Halbschranken	5
Vorsperrzeit	40 s	1	40 s	1
DTV Straßenverkehr	2000 Svt/d	4	2000 Svt/d	4
Verkehrssituation Straßenverkehr	einfach	1	einfach	1
Sichtverhältnisse Straßenverkehr	mittel	3	mittel	3
Ergebnis „motorisiert“ (Entscheidungsbereich)		**19**		**23**
Risiko Räumungsbereich	kein	1	kein	1
Teilbereich „nichtmotorisiert“				
DTV Schienenverkehr	40 Sfz/d	2	40 Sfz/d	2
Geschwindigkeit Schienenfahrzeug	80 km/h	3	160 km/h	7
Sicherungsart	Halbschranken	2	Halbschranken	2
Vorsperrzeit	40 s	1	40 s	1
DTV Straßenverkehr	400 Svt/d	3	400 Svt/d	3
Sichtverhältnisse Straßenverkehr	mittel	3	mittel	3
Ergebnis „nichtmotorisiert“		**14**		**18**

Tabelle 29: Punktwertberechnung qualitatives Modell Sicherungsart Lichtsignale

technisch gesichert mit DTV	Szenario 1		Szenario 2	
	Lichtsignale		Lichtsignale	
	Werte	Punkte	Werte	Punkte
Teilbereich „motorisiert“				
DTV Schienenverkehr	40 Sfz/d	2	40 Sfz/d	2
Geschwindigkeit Schienenfahrzeug	80 km/h	3	160 km/h	7
Sicherungsart	Lichtsignale	7	Lichtsignale	7
Vorsperrzeit	30 s	1	30 s	1
DTV Straßenverkehr	2000 Svt/d	4	2000 Svt/d	4
Verkehrssituation Straßenverkehr	einfach	1	einfach	1
Sichtverhältnisse Straßenverkehr	mittel	3	mittel	3
Ergebnis „motorisiert“ (Entscheidungsbereich)		**21**		**25**
Risiko Räumungsbereich	kein	1	kein	1
Teilbereich „nichtmotorisiert“				
DTV Schienenverkehr	40 Sfz/d	2	40 Sfz/d	2
Geschwindigkeit Schienenfahrzeug	80 km/h	3	160 km/h	7
Sicherungsart	Lichtsignale	3	Lichtsignale	3
Vorsperrzeit	30 s	1	30 s	1
DTV Straßenverkehr	400 Svt/d	3	400 Svt/d	3
Sichtverhältnisse Straßenverkehr	mittel	3	mittel	3
Ergebnis „nichtmotorisiert“		**15**		**19**

Tabelle 30: Punktwertberechnung qualitatives Modell Sicherungsart passiv

nichttechnisch gesichert mit DTV	Szenario 1		Szenario 2	
	passiv		passiv	
	Werte	Punkte	Werte	Punkte
Teilbereich „motorisiert“				
DTV Schienenverkehr	40 Sfz/d	2	40 Sfz/d	2
Geschwindigkeit Schienenfahrzeug	80 km/h	3	160 km/h	7
Sicherungsart	passiv	9	passiv	9
Vorsperrzeit	10 s	1	10 s	1
DTV Straßenverkehr	2000 Svt/d	4	2000 Svt/d	4
Verkehrssituation Straßenverkehr	einfach	1	einfach	1
Sichtverhältnisse Straßenverkehr	sehr gut	1	sehr gut	1
Ergebnis „motorisiert“ (Entscheidungsbereich)		**21**		**25**
Risiko Räumungsbereich	kein	1	kein	1
Teilbereich „nichtmotorisiert“				
DTV Schienenverkehr	40 Sfz/d	2	40 Sfz/d	2
Geschwindigkeit Schienenfahrzeug	80 km/h	3	160 km/h	7
Sicherungsart	passiv	4	passiv	4
Vorsperrzeit	10 s	1	10 s	1
DTV Straßenverkehr	400 Svt/d	3	400 Svt/d	3
Sichtverhältnisse Straßenverkehr	sehr gut	1	sehr gut	1
Ergebnis „nichtmotorisiert“		**14**		**18**

Fazit

Die Geschwindigkeitserhöhung der Schienenfahrzeuge (Sfz) von 80 km/h auf 160 km/h wirkt sich bei allen Sicherungsarten steigernd auf den Punktwert aus.
Die Änderung der technischen Sicherungsart vom Vollabschluss über Halbschranken bis hin zu Lichtsignalen wirkt sich steigernd auf den Punktwert aus.
In Abschnitt 7.2 werden die hier vorgestellten Beispiel-Szenarien in die Risiko-Einstufung des Bewertungsverfahrens eingeordnet.

6. Maßnahmen zur Risikoreduktion

6.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden geeignete Maßnahmen zur Risikoreduktion für unterschiedliche Einsatzfälle identifiziert. Dabei liegt der Fokus auf bestehenden Maßnahmen sowie deren Wirksamkeit und Kosten. Ein besonderes Augenmerk wird auf die Einsatzbedingungen gelegt, da die Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass ein undifferenzierter Einsatz von Maßnahmen nicht die gewünschten Wirkungen erzielt. Dabei flossen die Erkenntnisse von Schöne (2013) mit ein.

Es sind die Entstehungsbereiche der Risiken (Entscheidungsbereich vor dem Bahnübergang, Räumungsbereich hinter dem Bahnübergang) zu trennen, da jeweils spezifische Wirkungszusammenhänge und Einflussfaktoren gelten. Eine Prinzipskizze ist in Abbildung 3 in Abschnitt 3.2 zu finden.

Abhängig vom Ergebnis der Risikobewertung gemäß Kapitel 5 sind ggf. Maßnahmen zur Risikobeherrschung und Risikoreduktion zu treffen.
Grundsätzlich sind die Beseitigung oder Verschiebung problematischer Verkehrsanlagen sowie die direkte Veränderung der ermittelten Einflussfaktoren möglich. Solch relevante Parameter sind insbesondere die **Sicherungsart**, aber auch die Sichtverhältnisse sowie die Geschwindigkeiten.
Die Risikobeherrschung kann jedoch abhängig von den örtlichen Verhältnissen auch **zusätzliche bauliche oder technische Maßnahmen** umfassen, welche zu einer Risikoreduktion führen können.

Die konkrete Entscheidung über die zu treffenden Maßnahmen muss unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse erfolgen.

Nach einer kurzen Beschreibung der Maßnahme erfolgt die Dokumentation der zu erwartenden Kosten (Investition und Betrieb) und der Abschreibungszeiträume. Weiterhin wird der voraussichtliche Effekt der Maßnahme dargestellt, wobei sich die Bandbreite durch verschiedene Vergleichsszenarien und Bezugsgrößen (Rückgang der Unfälle, Rückgang der Missachtung der Verkehrsregelung) erklärt. In den meisten Fällen wird die Wirksamkeit als „Rückgang der Unfälle“ um einen gewissen Prozentsatz ausgewiesen und die dazugehörige Quelle angegeben. Zusätzlich werden die Stichprobengröße sowie die Anzahl der Studien, die den entsprechenden Untersuchungen zugrunde liegen, angegeben.
Die Kosten beziehen sich grundsätzlich auf den angegeben Referenzfall. Die Kostenangaben zu den eisenbahnseitigen Sicherungsarten beruhen auf Erfahrungswerten aus dem Planungsgeschäft von Um- und Neubauten. Die wesentlichen beiden Quellen der Kostenangaben der rein straßenseitigen Maßnahmen sind eine „Kostenschätzung für Maßnahmen an Unfallhäufungen“ (LISt, 2014) und eine „Standardisierte Wirksamkeitsanalyse von sicherheitsverbessernden Maßnahmen an Unfallhäufungen auf Außerortsstraßen“ (Spahn, 2011). Es handelt sich jeweils um durchschnittliche Größenordnungen, welche je nach örtlichen Besonderheiten variieren können.

6.2 Entscheidungsbereich

Hier werden Maßnahmen vorgestellt, die das Risiko im Entscheidungsbereich vor dem Bahnübergang reduzieren können.

6.2.1. Sicherungsarten

Die Kostenangaben zu den eisenbahnseitigen Sicherungsarten beruhen auf Erfahrungswerten aus dem Planungsgeschäft. Die Ausstattung eines kompletten BÜ erfordert neben den eigentlichen sicherungstechnischen Elementen (z. B. Lichtsignale, Schranken und Antriebe) noch den Kabeltiefbau (im Umfang der Einschaltstrecken beidseitig) entlang der Eisenbahnstrecke und begleitende Straßenbaumaßnahmen. Die Kostenangaben sind so gewählt, dass die üblichen Parameter der einzelnen Sicherungsarten berücksichtigt werden und als Orientierungswerte ausreichend.

Eine kurze Zusammenfassung enthält Tabelle 31; eine detaillierte Aufstellung ist in Anlage 34 zu finden.

Tabelle 31: Sicherungstechnische Maßnahmen - kurze Zusammenfassung (Quellen: siehe Anlage 34)

Sicherungstechnische Maßnahme	Investitionskosten (ca.) [€]	Betriebskosten/ Jahr (ca.) [€/a]
Lichtsignale (LS)	300.000 (neu)	24.3000
Halbschranke (HS)	400.000 (neu) 110.000 (Nachrüstung bei LS)	32.400
Vollabschluss (VS) (inklusive Gefahrenraumfreimeldeanlage)	600.000 (neu) 220.000 (Nachrüstung bei HS)	42.600

6.2.2. Maßnahmen zur Erhöhung der Wahrnehmbarkeit

Ziele der folgenden Maßnahmen sind vor allem die **Erhöhung der Wahrnehmbarkeit von Bahnübergängen und Schienenfahrzeugen** sowie die **Reduzierung der Annäherungsgeschwindigkeiten der Straßenfahrzeuge**.

Bauliche Maßnahmen zur Geschwindigkeitsreduzierung der Straßenfahrzeuge vor dem Bahnübergang können die Sicherheit erhöhen, indem sie mehr Zeit zur Wahrnehmung des Bahnübergangs und der Sicherungseinrichtungen schaffen. Allerdings besteht die Gefahr, dass sie zu viel Aufmerksamkeit auf sich ziehen und beispielsweise von der Beobachtung der Bahnstrecke ablenken (Cairney, 1991). Jedoch überwiegen dabei die positiven Effekte der Geschwindigkeitsdämpfung. Eine Anwendung kommt damit allenfalls **an aktiven Bahnübergängen** infrage.

Eine detaillierte Aufstellung ist in Anlage 35 zu finden.

Weitere in verschiedenen Ländern angewendete Maßnahmen, zu denen zwar bisher keine ausreichenden Erkenntnisse über die Wirksamkeit vorliegen, die jedoch tendenziell die Wahrscheinlichkeit von Gefährdungen durch unbeabsichtigtes Fehlverhalten senken, werden nachfolgend genannt:

- Einsatz von **Blitzlichtern anstelle von Blinklichtern** am Bahnübergang, um eine bessere Wahrnehmung zu erzielen, insbesondere wenn die Aufmerksamkeit der Straßenverkehrsteilnehmer durch die Straßenführung abgelenkt ist (Richards, 1991; Cairney, 1991),
- **Wiederholung der Sicherungseinrichtungen** für Straßenverkehrsteilnehmer, die in einem bestimmten Abstand vor dem Bahnübergang einbiegen und deren Blickrichtung dadurch abgelenkt ist (Gibson, 2004).
- ergänzende **Verkehrszeichen für besondere Situationen** wie einseitige Sichteinschränkungen, spitze Winkel oder Parallelführung (Lerner et al., 2002; Hanker, 1939).

Über **Stoppschilder** vor Bahnübergängen kommt ein Fachartikel zu folgendem Fazit:

*"Stoppschilder vor Bahnübergängen eignen sich für solche Fälle, in denen sie das notwendige Verhalten der Fahrzeugführer klarstellen. Damit erhöht sich die Verkehrssicherheit, da durch das Anhalten die Hörbarkeit der akustischen Signale der Schienenfahrzeuge gewährleistet wird bzw. die in Höhe des Andreaskreuzes vorhandene Übersicht auf die Bahnstrecke genutzt werden kann. Dies trifft im Wesentlichen auf Bahnübergänge zu, die bisher allein durch hörbare Signale der Schienenfahrzeuge gesichert sind und dementsprechend nur schwachen Straßenverkehr und geringe Geschwindigkeiten der Schienenfahrzeuge aufweisen. Zur Erhöhung der Erkennbarkeit von Bahnübergängen, zum Ausgleich von Kenntnisdefiziten der Straßenverkehrsteilnehmer oder zur Verringerung von Verkehrsverstößen sind Stoppschilder hingegen nicht geeignet." (*Schöne et al., 2011c)

Aktuell geforscht wird an **PeriLight,** welches vor passiven Bahnübergängen mit der „Sicherung durch Übersicht“ (ausreichender Sicht) eingesetzt werden kann. Durch das sich nähernde Straßenfahrzeug werden zwei Blitzlichter ausgelöst. Der Straßenverkehrsteilnehmer soll durch die optischen Reize veranlasst werden, nach links und rechts zu schauen, um so einen herannahenden Zug rechtzeitig wahrzunehmen und zu bremsen. Eine Evaluationsstudie ergab eine deutliche Erhöhung der Anzahl der Blicke in die rechte bzw. linke Peripherie (Grippenkoven et al., 2016).

Maßnahmen für nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer

Eine Maßnahme, die unbeabsichtigte Fehler von Fußgängern während eines absichtlichen Fehlverhaltens vermeiden soll, wird von der Federal Railroad Administration (2001b) genannt: **Warnanzeigen,** die **über** die **Annäherung eines zweiten Zuges** informieren, bewirken eine Verminderung des riskanten Verhaltens durch Übersehen des zweiten Zuges bei einer Zugbegegnung um 14 %. Allerdings stellen solche Vorfälle nur einen geringen Teil der Gesamtgefährdung dar, da Zugbegegnungen selten und starken zufälligen Einflüssen unterworfen sind. Deshalb kann für diese Maßnahme keine allgemeingültige Aussage getroffen werden.

Es gibt verschiedene **Umlaufsperren** und ähnlich wirkende Einrichtungen, wobei sich die Anordnungen aus dem öffentlichen Straßenverkehrsraum (z. B. zur Querung von Straßenbahngleisen) nur bedingt für einen Einsatz im Eisenbahnbereich eignen. Bei der Deutschen Bahn gibt es seit dem 18.12.2012 eine neue Standardbauform. Diese ist gemäß (DB Netz, 2012) auch mit Rollstühlen und Fahrrädern mit Überlänge (z. B. durch Anhänger) nutzbar. Es gelten die **Einsatzhinweise**:
Verkehrsteilnehmer/Spitzenstunde:
- bis max. 50 einfache Ausführung,
- bis max. 200 doppelte Ausführung.

Geschwindigkeit Schienenfahrzeug:
- bis max. 80 km/h auf zweigleisigen Strecken
- bis max. 120 km/h auf eingleisigen Strecken

Eine detaillierte Aufstellung ist in Anlage 36 zu finden.

Ergänzende Maßnahmen (insbesondere gegen Alleinunfälle von Fußgängern):
- Taktile Leitstreifen
- Gummieinsätze in Spurrillen
- Kontrastierende Materialien (Izadpanah et al,. 2014)

- Idee: Akustische Signale bei Missachtung (Lichtschranke?)

6.2.3. Maßnahmen zur Sanktionierung & baulichen Trennung der Richtungsfahrstreifen

Gegen absichtliche Fehlhandlungen können angedrohte oder tatsächlich durchgeführte **Sanktionierungsmaßnahmen** wirken. Hierfür wird in der Literatur insbesondere die für den Straßenverkehrsteilnehmer erkennbare Aufzeichnung von Rotlichtverstößen durch Kameras an aktiven Bahnübergängen genannt (Richards, 1991).

Für Bahnübergänge mit Halbschranken ist eine weitere wesentliche Maßnahme bekannt, mit der das Umfahren als Form absichtlichen Fehlverhaltens unterbunden werden soll. Dabei handelt es sich um die **Trennung der Richtungsfahrstreifen durch bauliche Vorkehrungen** (**Separatoren, Fahrbahnteiler, Mittelinseln**).

Die bisher genannten Maßnahmen wirken im Wesentlichen auf das Verhalten motorisierter Straßenverkehrsteilnehmer. Für die nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmer existieren kaum Maßnahmen gegen absichtliche Fehlhandlungen, zumal vor allem Fußgänger fast immer eine Möglichkeit finden können, um in den Gefahrenbereich zu gelangen, beispielsweise durch Überklettern der Schranken.

Eine detaillierte Aufstellung ist in Anlage 37 zu finden.

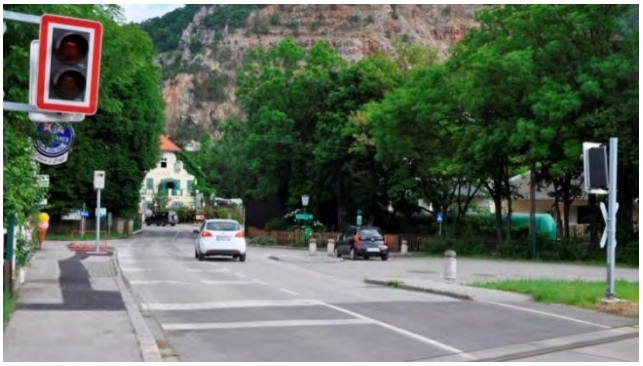
6.3 Räumungsbereich

Hier werden Maßnahmen vorgestellt, die das Risiko im Räumungsbereich hinter dem Bahnübergang reduzieren können. Eine detaillierte Aufstellung ist in Anlage 38 zu finden.

6.4 Empfehlungen

In den Abschnitten 6.2 und 6.3 wurde eine Vielzahl an grundsätzlich möglichen Maßnahmen vorgestellt. Bei einigen liegen jedoch nur wenige Quellen oder keine konkreten Referenzfälle vor. Die hier folgend in Tabelle 32 und Tabelle 33 zusammengefassten Maßnahmen beruhen auf gesicherten Quellenangaben und können daher empfohlen werden.

Tabelle 32: Empfohlene Maßnahmen - mit besonders starker Risikoreduzierung

Maßnahmen	Abbildungen[8]
bauliche Trennung der Richtungsfahrstreifen durch Fahrbahnteiler oder Separatoren → zur Reduzierung des Umfahrens von Halbschranken → im Entscheidungsbereich	 **Abbildung 43: Zusätzliche Leitschwellen (Quelle: Federal Railroad Administration, 2009)**
Rotlichtüberwachung durch Rotlichtkameras → zur Reduzierung absichtlicher Missachtungen von Lichtsignalen oder Halbschranken → im Entscheidungsbereich	 **Abbildung 44: Rotlichtüberwachung durch Rotlichtkameras (Quelle: NEON, 2016)**
technische Gefahrenraumfreimeldung → zum Ausschluss gefährlicher Auswirkungen von Rückstaus hinter dem Bahnübergang → im Räumungsbereich	 **Abbildung 45: technische Gefahrenraumfreimeldeanlage**

[8] Alle Abbildungen ohne Quellenangaben wurden von den Autoren dieses Berichtes selbst erstellt.

Tabelle 33: Empfohlene Maßnahmen - weitere

Maßnahmen	Abbildungen[9]
Dynamisches Anzeigesystem („Dialogdisplay“) → zur Erhöhung der Wahrnehmbarkeit an passiven (nichttechnisch gesicherten) Bahnübergängen → im Entscheidungsbereich	 **Abbildung 46: Dialogdisplay (Quelle: Rösiger, 2006)**
Geschwindigkeitsschwellen/Bodenschwellen[10] → zur Erhöhung der Wahrnehmbarkeit an aktiven (technisch gesicherten) Bahnübergängen → im Entscheidungsbereich	 **Abbildung 47: Bodenschwelle**
vorgeschaltete Lichtzeichen → zum Ausschluss gefährlicher Auswirkungen von Rückstaus hinter dem Bahnübergang → im Räumungsbereich	 **Abbildung 48: BÜ mit vorgeschalteten Lichtzeichen**

[9] Alle Abbildungen ohne Quellenangaben wurden von den Autoren dieses Berichtes selbst erstellt.
[10] Baulich-rechtliche Rahmenbedingungen beachten. Nicht innerorts anordnen.

7. Bewertungsverfahren

7.1 Ablauf

Für die Bewertung eines Bahnübergangs sind zunächst all seine Parameter zu betrachten, welche im qualitativen Modell definiert wurden (siehe Abschnitt 5.2.5). Während ein Teil der Parameter aus Datenbanken und Unterlagen entnommen werden kann, ist für einen Teil der Parameter eine Ortsbesichtigung erforderlich. Teilweise können Luftbildauswertungen unterstützen.

Tabelle 34: Datenherkunft der Parameter des qualitativen Modells

Parameter	Quellen
DTV Schienenverkehr	Betriebsdaten des Schienenverkehrs (Statistisches Bundesamt), Fahrplanunterlagen (DB Netz), Zählungen vor Ort
Geschwindigkeit Schienenfahrzeug	Infrastrukturregister „stredax“ (DB Netz), Verzeichnis zulässiger Geschwindigkeiten (DB Netz)
Sicherungsart	BÜ-Datenbank (DB Netz), Kreuzungsplan (DB Netz), Besichtigung vor Ort
Vorsperrzeit	Schätzungen anhand von Fahrplanunterlagen und dem Verzeichnis zulässiger Geschwindigkeiten (DB Netz), Messungen vor Ort
DTV Straßenverkehr	Straßendatenbanken der Länder, Schätzungen mit Hilfe von leichter ermittelbaren Merkmalen (z. B. Lage innerorts, Nähe zu Quellen und Zielen mit starkem Fußgängerverkehr) indirekt, Zählungen vor Ort
Verkehrssituation Straßenverkehr	Kreuzungsplan (DB Netz), Luftbildauswertung, Besichtigung vor Ort
Sichtverhältnisse Straßenverkehr	Luftbildauswertung, Besichtigung vor Ort
Risiko Räumungsbereich	Kreuzungsplan (DB Netz), Luftbildauswertung, Besichtigung vor Ort

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass stets mit den jeweiligen Durchschnittswerten aller Parameter zu rechnen ist. Mit Hilfe der Beschreibungen und Orientierungswerte erfolgt sodann die Auswahl der passenden Punktwerte (siehe Abschnitt 5.2.6). Aus den Punktwerten der einzelnen Parameter wird für die beiden Teilbereiche „nichtmotorisiert“ und „motorisiert“ jeweils eine Summe berechnet, die ein Maß für das Risiko am Bahnübergang bildet. Die einfache Addition der einzelnen Punktwerte ist möglich, da die Punkte stellvertretend für die logarithmierten Risikowerte stehen. Dabei ist für motorisierte Straßenverkehrsteilnehmer die räumliche Trennung zwischen dem Entscheidungsbereich vor dem Bahnübergang und dem Räumungsbereich hinter dem Bahnübergang zu beachten.

Es wurde zunächst mathematisch ermittelt, welche minimalen und maximalen aufsummierten Ergebnis-Punktwerte sich theoretisch ergeben können.

Der Vollabschluss schließt sowohl unbeabsichtigtes als auch beabsichtigtes Fehlverhalten weitgehend aus und kann damit als wirksamste Sicherungsart bezeichnet werden. Daher wurde für diese Sicherungsart ermittelt, wie hoch die akzeptierte Summe der Ergebnis-Punktwerte maximal sein darf. Daraus ergaben sich die Grenzwerte von 22 Punkten für nichtmotorisierte Straßenverkehrsteilnehmer und von 24 Punkten für motorisierte Straßenverkehrsteilnehmer. Diese Punktwerte gelten als Obergrenze für die Einstufung des mittleren Risikos - siehe Tabelle 37. Es fanden grundsätzlich die bisher üblichen maximalen Werte der Parameter Verwendung. Die Sichtverhältnisse sind für motorisierte Straßenverkehrsteilnehmer überwiegend als sehr schlecht einzustufen, da für aktive Bahnübergänge nicht explizit Sichtflächen freigehalten werden und daher an solchen Bahnübergängen eher von Sichthindernissen durch Bewuchs und Bebauung auszugehen ist. Hingegen sind die Sichtverhältnisse für nichtmotorisierte Straßenverkehrsteilnehmer überwiegend als mittel einzustufen, da die Sichtmöglichkeit auf die Bahnstrecke unmittelbar vor Betreten des Gefahrenbereichs auch ohne explizit freigehaltene Sichtflächen zumeist gegeben ist und somit günstigere Verhältnisse als für motorisierte Straßenverkehrsteilnehmer herrschen.

In Tabelle 35 und Tabelle 36 erfolgte die übersichtliche Zusammenstellung aller Werte für die beiden Teilbereiche.

Teilbereich „nichtmotorisiert“

Tabelle 35: Ergebnis-Punktwert für nichtmotorisierte Straßenverkehrsteilnehmer

Punktwerte nichtmotorisiert	**Min.**	**Max.**	**Akzeptierter Wert**
DTV Schienenverkehr	1	3	3 (Max.)
Geschwindigkeit Schienenfahrzeug	1	7	7 (Max.)
Sicherungsart	1	4	1 (Vollabschluss)
Vorsperrzeit	1	3	3 (Max.)
DTV Straßenverkehr	1	5	5 (Max.)
Sichtverhältnisse Straßenverkehr	1	5	3 (mittel)
Ergebnis	**6**	**27**	**22 (Max. akzeptiert)**

Teilbereich „motorisiert“

Tabelle 36: Ergebnis-Punktwert für motorisierte Straßenverkehrsteilnehmer

Punktwerte motorisiert	**Min.**	**Max.**	**Akzeptierter Wert**
DTV Schienenverkehr	1	3	3 (Max.)
Geschwindigkeit Schienenfahrzeug	1	7	7 (Max.)
Sicherungsart	1	9	1 (Vollabschluss)
Vorsperrzeit	1	3	1 (Vollabschluss)
DTV Straßenverkehr	1	4	4 (Max.)
Verkehrssituation Straßenverkehr	1	3	3 (sehr komplex)
Sichtverhältnisse Straßenverkehr	1	5	5 (sehr schlecht)
Ergebnis (Entscheidungsbereich)	**7**	**34**	**24 (Max. akzeptiert)**
Risiko Räumungsbereich	1	4	2 (vorgeschaltete Lichtzeichen)

Zur Interpretation der Ergebnisse liegt eine dreistufige Skala (von risikoarm bis risikoreich) vor, welche in Tabelle 37 zu finden ist.

Tabelle 37: Risiko-Einstufung der Summe der Ergebnis-Punktwerte

Summe der Ergebnis-Punktwerte für Straßenverkehrsteilnehmer		**risikoarm**	**mittleres Risiko**	**risikoreich**
nichtmotorisiert		6 bis 13	14 bis 22	23 bis 27
motorisiert	Entscheidungsbereich	7 bis 15	16 bis 24	25 bis 34
	Räumungsbereich	1	2	3 bis 4

Wird der Bahnübergang eingestuft

- als risikoarm, besteht kein unmittelbarer Handlungsbedarf,
- mit einem mittleren Risiko, ist dieses zwar akzeptiert, es sollte jedoch eine umfassende örtliche Prüfung stattfinden, ob risikoreduzierende Maßnahmen notwendig sind,
- als risikoreich, ist der Einsatz geeigneter Maßnahmen zur Risikoreduktion angezeigt.

Dabei kann grundsätzlich auf die Zusammenstellung der Sicherheitsmaßnahmen in Kapitel 6 zurückgegriffen werden. Wichtig ist die getrennte Betrachtung der beiden Straßenverkehrsteilnehmergruppen. Außerdem dürfen Maßnahmen zur Risikobeherrschung im Entscheidungsbereich nicht zur Kompensation des Risikos im Räumungsbereich angerechnet werden und umgekehrt.

Die wichtigste Maßnahme ist die Änderung der Sicherungsart, deren Wirkung unmittelbar durch die Punktwerte sichtbar ist. Eine detaillierte Aufstellung aller weiteren Maßnahmen ist in Anlage 35 bis Anlage 38 zu finden.

7.2 Anwendungsbeispiel

Nach der Vorstellung des theoretischen Ablaufs in Abschnitt 7.1 soll nun hier ein konkretes Beispiel gegeben werden. Es handelt sich um den Bahnübergang mit der DB-ID 16821 an der eingleisigen Nebenbahn 6606 im sächsischen **Weixdorf** - am Haltepunkt (Hp) gelegen. Zwischen Dresden und Königsbrück verkehren Mo-Fr stündlich sowie am Wochenende zweistündlich Nahverkehrszüge. Die Einschätzung wurde anhand des in Abschnitt 5.2.6 definierten Punkteschemas vorgenommen. Einzelne Parameterangaben konnten aus den Datenbanken, welche der quantitativen Modellierung zu Grunde lagen, entnommen werden. Zusätzlich wurde eine Besichtigung vor Ort durchgeführt, bei der auch ein Foto mit Blick aus Richtung Westen auf den BÜ entstand (siehe Abbildung 49). Einen Luftbild-Screenshot zeigt ergänzend Abbildung 50. Hinweis: Die EUB-Unfalldatenbank weist für die Jahre 2005 bis 2011 keinen Unfall an diesem Bahnübergang aus.

Abbildung 49: Foto BÜ Weixdorf Hp

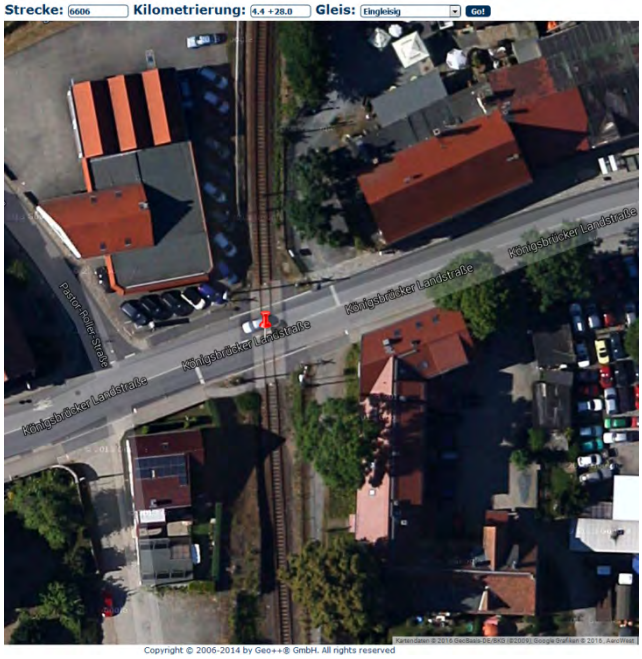


Abbildung 50: Luftbild-Screenshot BÜ Weixdorf Hp [Ausschnitt aus: DBGEO, 2016]

In Tabelle 38 und Tabelle 39 erfolgte die Einordnung der Beispielwerte. Dabei ist zu beachten, dass sich die Sicherungsart im Sinne des Bewertungsverfahrens zwischen nichtmotorisierten und motorisierten Verkehrsteilnehmern unterscheidet, da es für die Fußwege keine Halbschranken gibt, sondern praktisch nur die Lichtsignale (hier als Blinklichter ausgeführt) wirken.

Teilbereich „nichtmotorisiert“

Tabelle 38: Ergebnis-Punktwert für nichtmotorisierte Straßenverkehrsteilnehmer

Punktwerte nichtmotorisiert	**Min.**	**Max.**	**Akzeptierter Wert**	**Beispiel Weixdorf**
DTV Schienenverkehr	1	3	3 (Max.)	2 (ca. 29 Sfz/d)
Geschwindigkeit Schienenfahrzeug	1	7	7 (Max.)	2 (50 km/h)
Sicherungsart	1	4	1 (Vollabschluss)	3 (Lichtsignale)
Vorsperrzeit	1	3	3 (Max.)	2 (über 60 bis 120 s)
DTV Straßenverkehr	1	5	5 (Max.)	3 (ca. 301 bis 1000)
Sichtverhältnisse Straßenverkehr	1	5	3 (mittel)	2 (gut)
Ergebnis	**6**	**27**	**22 (Max. akzeptiert)**	**14**

Teilbereich „motorisiert“

Tabelle 39: Ergebnis-Punktwert für motorisierte Straßenverkehrsteilnehmer

Punktwerte motorisiert	**Min.**	**Max.**	**Akzeptierter Wert**	**Beispiel Weixdorf**
DTV Schienenverkehr	1	3	3 (Max.)	2 (ca. 29 Sfz/d)
Geschwindigkeit Schienenfahrzeug	1	7	7 (Max.)	2 (50 km/h)
Sicherungsart	1	9	1 (Vollabschluss)	5 (Halbschranken)
Vorsperrzeit	1	3	1 (Vollabschluss)	1 (bis 120 s)
DTV Straßenverkehr	1	4	4 (Max.)	3 (6593 Kfz/d)
Verkehrssituation Straßenverkehr	1	3	3 (sehr komplex)	2 (komplex)
Sichtverhältnisse Straßenverkehr	1	5	5 (sehr schlecht)	4 (schlecht)

Ergebnis (Entscheidungsbereich)	**7**	**34**	**24 (Max. akzeptiert)**	**19**
Risiko Räumungsbereich	1	4	2 (vorgeschaltete Lichtzeichen)	2 (mittel)

Die dreistufige Skala gemäß Tabelle 37 ergibt sowohl für nichtmotorisierte Straßenverkehrsteilnehmer (14 Punkte) als auch für motorisierte Straßenverkehrsteilnehmer (19 Punkte im Entscheidungsbereich und 2 Punkte im Räumungsbereich) die Einstufung mit einem mittleren Risiko. Auch wenn dieses zwar akzeptiert ist, sollte dennoch eine umfassende örtliche Prüfung stattfinden, ob risikoreduzierende Maßnahmen notwendig sind.

Die bereits in Abschnitt 5.2.7 berechneten Beispiel-Szenarien fallen grundsätzlich in die mittlere Risiko-Einstufung. Dies ist plausibel, da diesen Beispiel-Szenarien auch mittlere Eingangswerte zu Grunde liegen.
Im Teilbereich „nichtmotorisiert“ sei auf eine Abweichung hingewiesen:
In Tabelle 27: Punktwertberechnung qualitatives Modell Sicherungsart Vollabschluss erfolgt knapp die Einstufung als risikoarm mit 13 Punkten. Dies ist plausibel, da hier eine mittlere zulässige Geschwindigkeit von 80 km/h mit der wirksamsten technischen Sicherungsart kombiniert wurde.
Im Teilbereich „motorisiert“ sei auf drei Abweichungen hingewiesen:
In Tabelle 27: Punktwertberechnung qualitatives Modell Sicherungsart Vollabschluss erfolgt knapp die Einstufung als risikoarm mit 15 Punkten. Dies ist plausibel, da hier eine mittlere zulässige Geschwindigkeit von 80 km/h mit der wirksamsten technischen Sicherungsart kombiniert wurde.
In Tabelle 29: Punktwertberechnung qualitatives Modell Sicherungsart Lichtsignale erfolgt knapp die Einstufung als risikoreich mit 25 Punkten. Dies ist plausibel, da hier die höchste zulässige Geschwindigkeit von 160 km/h mit der schwächsten technischen Sicherungsart kombiniert wurde.
In Tabelle 30: Punktwertberechnung qualitatives Modell Sicherungsart passiv erfolgt knapp die Einstufung als risikoreich mit 25 Punkten. Dies ist plausibel, da hier die höchste zulässige Geschwindigkeit von 160 km/h mit der schwächsten nichttechnischen (passiven) Sicherungsart kombiniert wurde.

8. Empfehlungen für Regelwerke und Rechtsnormen

Neben den grundsätzlichen Empfehlungen von Schöne (2013), sollen hier die Ergebnisse des qualitativen Modells und des Bewertungsverfahrens Berücksichtigung finden.

Die Vorgaben zur straßenseitigen Gestaltung von Bahnübergängen sind in Deutschland auf mehrere Regelwerke für Bahnbetreiber und Straßenverkehrs- sowie Straßenbaubehörden (nachfolgend zusammengefasst als Straßenbehörden bezeichnet) verteilt. Hier werden ausschließlich die öffentlichen Eisenbahnen des Bundes betrachtet.

Grundsätzlich könnte ein Bewertungsverfahren, wie es in der vorliegenden Untersuchung vorgestellt wurde, direkt in den Regelwerken vorgeschrieben werden. Dabei wäre die Forderung nach einer risikoorientierten Gestaltung der Bahnübergänge auf Verordnungsebene anzusiedeln und dort gleichzeitig ein akzeptiertes Risiko festzulegen. Gleichzeitig könnte ein Großteil der bisher dort fest definierten Einsatzkriterien entfallen. Das eigentliche Verfahren wäre angesichts seines Detaillierungsgrades auf der Ebene der anerkannten Regeln der Technik einzuordnen. Da dies jedoch eine Abkehr von der langjährigen Praxis bedeutete und zudem noch die Praxistauglichkeit des vorgestellten Verfahrens nachzuweisen ist, werden als Vorstufe zunächst wichtige risikoorientierte Änderungen und Ergänzungen der bestehenden Regeln vorgeschlagen.

8.1 Eisenbahn

8.1.1. Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)

Die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO, 2008) stellt grundlegende Anforderungen an die Sicherung von Bahnübergängen und gibt Einsatzkriterien und Erscheinungsbilder der Sicherungsarten vor, soweit diese in den Verantwortungsbereich des Bahnbetreibers fallen.

Die bahnübergangsspezifischen Vorgaben der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung sind bisher nur in wenigen Punkten risikoorientiert. Hierzu gehören die nach der **Straßenverkehrsstärke** (§ 11 Abs. 7 und 13) abgestuften Einsatzkriterien der Sicherungsarten, wenngleich sich dieser Einfluss nach den gewonnenen Erkenntnissen relativiert. Praktisch führt vor allem die Unterscheidung in Haupt- und Nebenbahn tendenziell zu einer risikoorientierten Gestaltung, da diese die zugehörigen Risikofaktoren (Schienenverkehrsstärke, Geschwindigkeiten der Schienenfahrzeuge) zumindest grob widerspiegelt.

Mit Hilfe der Erkenntnisse der vorliegenden Untersuchung müssen einerseits feinere Abstufungen der bereits enthaltenen Risikofaktoren vorgenommen, andererseits auch neue Risikofaktoren als Einsatzkriterien berücksichtigt werden.

Nach den Erkenntnissen der vorliegenden Untersuchung stellt die **Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge** einen der stärksten Einflussfaktoren auf das Risiko dar. Die bisherige Unterscheidung in Haupt- und Nebenbahn führt nur zu zwei Geschwindigkeitsstufen: bis 80 km/h und bis 160 km/h (§ 11 Abs. 2, 6 und 7 i. V. m. § 40 Abs. 2). Innerhalb der passiven Sicherungsarten und für Privatwege gibt es zusätzliche Geschwindigkeitsgrenzen, die jedoch nur einen kleinen Teil der Bahnübergänge betreffen. Daher müssen weitere Unterteilungen der Geschwindigkeiten vorgenommen werden. Ein Vorschlag ist in Tabelle 16 zu finden.

Die Grenzwerte der **Straßenverkehrsstärke** (§ 11 Abs. 13) sollten überprüft werden. Die gegenwärtige Regelung lässt mit bis zu 2500 Kraftfahrzeugen pro Tag einen Bereich zu, in dem

die Begegnungswahrscheinlichkeit besonders hoch ist (höhere Verkehrsstärken werden durch den „Stott-Effekt“ kompensiert).

In die Auswahl der Sicherungsarten nach der Straßenverkehrsstärke werden bislang außerdem nur Kraftfahrzeuge einbezogen, während nichtmotorisierte Straßenverkehrsteilnehmer keine Rolle spielen (§ 11 Abs. 13). Dies vernachlässigt deren Risiken, was angesichts des vergleichsweise hohen Schadensausmaßes dieser Verkehrsarten nicht vertretbar ist. Deshalb muss auch für nichtmotorisierte Straßenverkehrsteilnehmer die Verkehrsstärke berücksichtigt werden, was angesichts der aufwändigen Datenbeschaffung auch über leichter ermittelbare Merkmale (z. B. Lage innerorts, Nähe zu Quellen und Zielen mit starkem Fußgängerverkehr) indirekt möglich ist.

Weiterhin ist das Risiko an einem Bahnübergang direkt proportional zur **Schienenverkehrsstärke**. Zwar weisen Hauptbahnen oft eine höhere Schienenverkehrsstärke auf als Nebenbahnen, jedoch ist dieser Zusammenhang nicht zwingend. Demzufolge sollte auch die konkrete Schienenverkehrsstärke als Entscheidungskriterium aufgenommen werden.

Weitere Risikofaktoren ergeben sich vor allem aus dem **straßenverkehrlichen Umfeld** vor dem Bahnübergang (z. B. bauliche Ausführung, Verkehrsregelung). Dieses gehört zwar nach gegenwärtiger Rechtslage nicht in den Zuständigkeitsbereich des Bahnbetreibers, berührt jedoch aufgrund der Auswirkungen wiederum die Sicherungseinrichtungen in seiner Zuständigkeit. Auf der Ebene der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung muss daher zumindest die Berücksichtigung straßenverkehrlicher Umgebungsfaktoren bei der Auswahl der Sicherungsart gefordert werden. Dadurch wird auch eine Abstimmung des Bahnbetreibers mit den Straßenverkehrs- und Straßenbaubehörden notwendig. Daher sollten Änderungen bei der Gestaltung von Bahnübergängen und ihrem Umfeld im Einvernehmen zwischen Bahn-betreiber und Straßenverkehrsbehörde durchgeführt werden.

Die **Sicherungsarten** selbst sind bisher in unterschiedlicher Qualität differenziert. Während für die passiven Sicherungsarten detaillierte Einsatzkriterien bestehen (§ 11 Abs. 7), werden die aktiven Sicherungsarten ohne Angabe einer Rangfolge lediglich genannt (§ 11 Abs. 6). Angesichts der gravierenden Unterschiede in der Wirksamkeit der Sicherungsarten (mehrere Zehnerpotenzen) muss hier eine stärkere Differenzierung erfolgen. Eine Möglichkeit ist in Tabelle 17 und Tabelle 21 zu finden.

Nahezu alle bestehenden Vorschriften zu Bahnübergängen in der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung beziehen sich auf den Entscheidungsbereich vor bzw. am Bahnübergang. Risiken erwachsen jedoch auch aus Straßenverkehrsanlagen im Räumungsbereich hinter dem Bahnübergang. Dementsprechend muss eine Grundforderung aufgenommen werden, nach der bei vorhersehbarer **Rückstaugefahr** hinter einem Bahnübergang Vorkehrungen zum sicheren Räumen zu treffen sind.

8.1.2. Richtlinie „Bahnübergänge planen und instand halten“ (DB-Richtlinie 815)

Konkrete Gestaltungsvorgaben bis hin zu Maßangaben enthalten nachgeordnete Regelwerke, wie die DB-Richtlinie „Bahnübergänge planen und instand halten“ (DB Netz, 2008b).

Die DB-Richtlinie 815 „Bahnübergänge planen und instand halten“ enthält Vorschriften für den Bahnbetreiber und von ihm beauftragte Planer. In der Richtlinie wird vor allem die Ausgestaltung der Sicherungseinrichtungen behandelt. Sie konkretisiert die Vorgaben der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung. Demzufolge eignet sich die Richtlinie für die Aufnahme zusätzlicher Risikofaktoren als Einsatzkriterien für die Sicherungsarten.

Bisher ist die Risikoorientierung in unterschiedlicher Tiefe ausgeprägt. Während beispielsweise für die Sicherung durch Lichtsignale exakte Einsatzbedingungen bis hin zu Schienenverkehrsstärke und Geschwindigkeiten vorgeschrieben werden (815.0032 Abschn. 1 Abs. 3), gibt es für die Entscheidung zwischen Halbschranken und Vollabschluss lediglich das Kriterium der maximalen Annäherungszeit (815.0032 Abschn. 1 Abs. 8).

Die Zulässigkeitsgrenzen der Annäherungszeit – die in der vorliegenden Untersuchung zur Vorsperrzeit gehört –, müssen neu diskutiert werden. Zwar führt ein Anstieg zu häufigerem absichtlichem Fehlverhalten und somit zu einem größeren Risiko (besonders bei nichtmotorisierten Verkehrsarten), gleichzeitig haben steigende Vorsperrzeiten durch den „Stott-Effekt“ aber auch eine senkende Wirkung auf das Risiko der motorisierten Verkehrsarten.

Eine Anhebung der bisherigen Untergrenzen (20 s für Lichtsignale, 26 s für Halbschranken) ist in diesem Zusammenhang allenfalls in geringem Maße sinnvoll. Für die Obergrenze müssen die auftretenden Verkehrsarten berücksichtigt werden. Während die bestehenden Werte (90 s für Lichtsignale, 240 s für Halbschranken) bei ausschließlich motorisiertem Verkehr am Bahnübergang akzeptiert werden können, müssen bei nichtmotorisiertem Verkehr kleinere Obergrenzen gelten.

Außerdem ist die bisherige Regelung, wonach die größte zulässige Annäherungszeit nur für jeweils eine Zugfahrt gilt, nicht akzeptabel. Hierdurch ist theoretisch eine beliebig lange Sperrzeit erlaubt, sofern für jede einzelne Zugfahrt die zulässige Annäherungszeit eingehalten wird. Der Ansatz, mit einer Begrenzung der Zeitwerte einem absichtlichen Fehlverhalten der Straßenverkehrsteilnehmer vorzubeugen, wird damit konterkariert.

Die notwendige Regelungstiefe hinsichtlich der Sicherungsarten hängt von den Anpassungen der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung ab. Als örtliche Risikofaktoren, die ebenfalls für die Auswahl der Sicherungsart relevant sein können, müssen die Straßenführung sowie Ablenkungsfaktoren integriert werden.

Für den Räumungsbereich existieren bisher pauschale Vorgaben, die das Risiko nur grob widerspiegeln (815.0032 Abschn. 1 Abs. 17 und 18). Deshalb müssen die Risikofaktoren aus diesem Bereich, insbesondere die tatsächliche Rückstaugefahr und die Erkennbarkeit der Wartepflicht bzw. der übergeordneten Verkehrsströme für die Straßenverkehrsteilnehmer, als neue Kriterien für entsprechende Gegenmaßnahmen aufgenommen werden.

Zudem sind die in der Richtlinie enthaltenen Lösungsmöglichkeiten verhältnismäßig starr, obwohl für bestimmte Risiken verschiedenartige Maßnahmen existieren (vgl. Kapitel 6). Daher empfiehlt sich die Aufnahme eines Maßnahmenkatalogs, aus dem sich geeignete Einsatzfälle und erwartete Wirkungen ergeben.

8.2 Straße

8.2.1. Straßenverkehrs-Ordnung (StVO)

In der Straßenverkehrs-Ordnung (2010) sind neben Verhaltensregeln für die Straßenverkehrsteilnehmer die Erscheinungsbilder der Verkehrszeichen und -einrichtungen festgelegt.

Für die Verhaltensvorschriften in der Straßenverkehrs-Ordnung (§ 19) ergibt sich aus der vorliegenden Untersuchung kein konkreter Änderungsbedarf. Die Risiken entstehen überwiegend durch fehlende Wahrnehmung relevanter Informationen oder durch Verstöße gegen Verhaltensvorschriften, nicht jedoch durch Unklarheiten oder Lücken in den Verkehrsregeln.

Auch Erfahrungen aus dem Ausland lassen nicht erwarten, dass geänderte oder ergänzte Verkehrsregeln eine messbare Wirkung erzielen. So wurden in Ungarn im Jahr 1997 für Bahnübergänge grundsätzlich Höchstgeschwindigkeiten von 30 km/h innerhalb und 40 km/h außerhalb geschlossener Ortschaften eingeführt, die jedoch weder das Geschwindigkeitsniveau noch die Unfallzahlen beeinflussen konnten (Mocsári, 2004).

Neben den Verhaltensvorschriften enthält die Straßenverkehrs-Ordnung auch Vorgaben zu Zuständigkeiten (§ 45 Abs. 2). Diese räumen dem Bahnbetreiber das uneingeschränkte Recht zur Verkehrsregelung durch die Sicherungseinrichtungen unmittelbar am Bahnübergang ein, während die übrigen Straßenanlagen in ausschließliche Zuständigkeit der Straßenbehörden fallen. Um den Wechselwirkungen zwischen Bahnübergang und straßenverkehrlichem Umfeld gerecht zu werden und die damit verbundenen Risikofaktoren zu berücksichtigen, muss die gegenseitige Abstimmung zwischen Bahnbetreiber und Straßenbehörden verpflichtend vorgeschrieben werden. Diese darf sich nicht nur auf Maßnahmen unmittelbar am Bahnübergang beschränken, sondern muss das Umfeld einschließen. Dieser Ansatz führt letztlich zur Empfehlung, die bahn- und straßenseitigen Vorgaben in einem gemeinsamen Regelwerk zu verankern, auf das sich beide Kreuzungspartner gegenseitig berufen können und dessen Einhaltung z. B. im Rahmen der Verkehrsschau überprüft werden kann.

8.2.2. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO)

Die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (2001) richtet sich an die Straßenbehörden und schreibt Maßnahmen in deren Verantwortungsbereich vor.

Die Verwaltungsvorschrift bindet nur die Straßenbehörden. Deshalb können nur Vorgaben für Anlagen in deren Zuständigkeitsbereich getroffen werden, die jedoch die Risiken des gesamten Bahnübergangs beeinflussen. Hier müssen analog zu den Regeln für Straßenkreuzungen (zu § 8, Randnr. 1 bis 13) auch Regeln zur Gestaltung der Straßenanlagen vor und hinter Bahnübergängen aufgenommen werden.

Nach den in Kapitel 6 der vorliegenden Untersuchung dargelegten Grundsätzen der Risikobeherrschung muss die Vermeidung oder Verschiebung problematischer Straßenverkehrsanlagen im Umfeld des Bahnübergangs im Vordergrund stehen. Ist dies nicht möglich, sind die Anlagen so zu gestalten, dass sie möglichst wenig vom Bahnübergang ablenken, beispielsweise durch Verringern nicht bahnübergangsspezifischer Verkehrszeichen oder Anpassen der Verkehrsregelung. Erst als letztes Mittel sollten Gegenmaßnahmen zur Kompensation des Risikos ergriffen werden. Diese Rangfolge muss in der Verwaltungsvorschrift durch die entsprechende Formulierung zu den einzelnen betrieblichen Einrichtungen erkennbar werden.

8.2.3. Technische Regelwerke Straße

Konkrete Gestaltungsvorgaben zum straßenseitigen Umfeld von Bahnübergängen sind in den relevanten Entwurfsregelwerken für Straßen (FGSV, 2006; FGSV, 2012) nicht enthalten.

Nach § 2 EBKrG gilt allerdings auch, dass *„neue Kreuzungen von Eisenbahnen und Straßen, die nach der Beschaffenheit ihrer Fahrbahn geeignet und dazu bestimmt sind, einen allgemeinen Kraftfahrzeugverkehr aufzunehmen“* als Überführungen herzustellen sind. Sollen plangleiche Bahnübergänge dennoch in entsprechende Entwurfsregelwerke aufgenommen werden, ist folgendes zu empfehlen:

- Wie im Kapitel 8.1.2 bereits thematisiert wurde, sind im Entscheidungsbereich vor allem ausreichende Sichtmöglichkeiten für die Straßenverkehrsteilnehmer zur Abwendbarkeit gefährlicher Situationen von Bedeutung, da sie bei allen Sicherungsarten einen senkenden Einfluss auf das Risiko besitzen. Dabei könnte vor allem die Forderung nach einer möglichst rechtwinkligen Führung der Straße zur Bahnstrecke (als Grundvoraussetzung für günstige Sichtbeziehungen) für die Entwurfsrichtlinien relevant sein.
- Im Räumungsbereich ist es vor allem die Art der Verkehrsregelung hinter dem Bahnübergang, die in Verbindung mit den Sichtverhältnissen und den Verkehrsstärken die Häufigkeit und Dauer des Aufenthalts wartepflichtiger Straßenfahrzeuge im Gefahrenbereich und damit das Risiko bestimmt. Hierfür könnte jeweils eine Einzelfallbetrachtung der Risikofaktoren gemeinsam mit dem Bahnbetreiber vorgeschrieben werden. Angesichts der vergleichsweise geringen Anzahl von Bahnübergängen im Zuständigkeitsbereich einzelner Straßenverkehrsbehörden erscheint der damit verbundene Aufwand vertretbar.

Im Gegensatz zu den straßenseitigen Entwurfsrichtlinien werden Bahnübergänge innerhalb des „Merkblatts für Verkehrsschauen“ (FGSV, 2013) thematisiert. Demnach sind *„regelmäßige Bahnübergangsschauen der für die Sicherung von schienengleichen Bahnübergängen wichtigen Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen…*“ erforderlich. Oben genannte Aspekte zu Sichtbeziehungen werden nicht thematisiert. Allerdings wird für nähere Angaben auf den „Leitfaden zur Durchführung von Bahnübergangsschauen“ (BLFA StVO, 2003) verwiesen. Nach diesem sollten Bahnübergänge *„bis zu ihrer Beseitigung einheitlich so zu gestalten sein, dass sie rechtzeitig und eindeutig erkennbar, übersichtlich, begreifbar sowie sicher befahrbar und begehbar sind*“. Weiterhin sind Bahnübergänge *„durch den Bau von Überführungen, durch die Einrichtung technischer Sicherungen, insbesondere von Schranken oder Lichtzeichenanlagen, durch die Herstellung von Sichtflächen an Bahnübergängen, die nicht technisch gesichert sind, oder in sonstiger Weise zu ändern, wenn und soweit es die Sicherheit oder die Abwicklung des Verkehrs unter Berücksichtigung der übersehbaren Verkehrsentwicklung erfordert*“. Darüber hinaus enthält der Leitfaden eine Prüfliste zur Durchführung einer Bahnübergangsschau. Diese Prüfliste deckt alle wesentlichen sicherheitsrelevanten Aspekte, unter Anderem zum Räumungsbereich (beispielsweise Freihalten der Räumungsstrecke) und zum Entscheidungsbereich (Überprüfung der Sichtbeziehungen), ab.

Teilweise treten die Risiken nur zeitlich begrenzt auf, wenn beispielsweise Straßenbauarbeiten durchgeführt werden oder sich durch Straßenumleitungen die Verkehrsstärke am Bahnübergang ändert. Die Auswirkungen auf das kollektive Risiko über einen größeren Betrachtungszeitraum sind gering, allerdings können die individuellen Risiken kritische Werte annehmen. Deshalb sollten in die Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA, 1995) verbindliche Vorgaben zur Berücksichtigung von Bahnübergängen aufgenommen werden.

9. Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Ausgehend von den besonderen Eigenschaften der Kreuzungsstelle Bahnübergang und des dortigen Unfallgeschehens, insbesondere hinsichtlich der Unfallschwere, ergibt sich die Notwendigkeit einer detaillierten Betrachtung der Verkehrssicherheit an diesen Stellen. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der in den vergangenen 50 Jahren kaum weiterentwickelten rechtlichen Rahmenbedingungen in Deutschland.

Der **Forschungsstand** zeigt, dass nur durch risikoorientierte Ansätze eine zielgerichtete Sicherheitsarbeit für Bahnübergänge möglich ist. Diese sind international bereits verbreitet, haben aber in Deutschland bisher weder Eingang in die Regelwerke noch in die Praxis gefunden. Daraus leitet sich das Erfordernis ab, solche Ansätze für deutsche Bahnübergänge zu entwickeln und zu etablieren.

Zu diesem Zwecke wurden im ersten Schritt **Bestands- und Unfalldaten** eines Untersuchungskollektivs der Bundesländer Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Sachsen beschafft, teilweise nacherhoben und aufbereitet. Dabei zeigte sich, dass bereits die Beschaffung grundlegender Parameter erheblichen Aufwand bereitet sowie dass solche Daten bisher offensichtlich nicht für systematische Auswertungen verwendet bzw. benötigt wurden.

Aus der durchgeführten Auswertung für einzelne Parameter ließen sich kaum sinnvolle Erkenntnisse gewinnen, da einerseits mehrere Parameter zusammenwirken und andererseits Abhängigkeiten zwischen den Parametern untereinander bestehen oder zu vermuten sind. Um die multifaktoriellen Wirkungszusammenhänge mit einem ausreichenden Detaillierungsgrad abbilden zu können, müssen daher geeignete Risikomodelle gebildet werden.

Zur Vorbereitung der **quantitativen Modellierung** wurden die erklärenden Variablen auf Korrelation überprüft, mit dem Resultat, dass vereinzelt starke und mittlere Zusammenhänge zwischen den Merkmalen festzustellen sind. Vor allem die Sicherungsart und der durchschnittlich tägliche Verkehr (DTV) korrelieren vor allem miteinander, aber auch mit weiteren Merkmalen. Der Zusammenhang zwischen der Sicherungsart und dem durchschnittlich täglichem Verkehr ist damit zu erklären, dass im Zuge von Straßen mit hohem DTV tendenziell aufwendigere Sicherungsarten (Vollabschluss) und an Straßen mit geringerem DTV eher einfache Lösungen der Sicherung von Bahnübergängen (Lichtsignal) zur Anwendung kommen. Zusammenfassend wurden separate quantitative Modelle für die Sicherungsarten technisch und nichttechnisch erstellt. Eine zusätzliche Differenzierung nach der Unfallschwere war aufgrund der geringen Unfallzahl an Bahnübergängen nicht möglich. Mit diesen Modellen lässt sich einerseits die Wirkung verkehrlicher und infrastruktureller Merkmale auf das Unfallgeschehen quantifizieren und können andererseits Erwartungswerte hinsichtlich des Unfallgeschehens an einem Bahnübergang ermittelt werden. Dabei konnten an technisch gesicherten Bahnübergängen die

- Sicherungsart,
- Kurvigkeit sowie
- maximale Geschwindigkeit der Bahn

als Einflüsse auf das Unfallgeschehen an Bahnübergängen identifiziert werden. Ein Einfluss auf das Unfallgeschehen an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen konnte der

- Straßenklasse (Fuß- und Radweg oder allgemeiner Fahrverkehr),
- Straßenoberfläche sowie
- Entfernung zum nächsten Knotenpunkt

nachgewiesen werden.

Bei der Anwendung des Modells sollte berücksichtigt werden, dass sich aufgrund der in der Realität sehr geringen Unfallzahlen (an 8% der betrachteten Bahnübergänge wurden Unfälle registriert) auch geringe Mittelwerte (Unfälle je Bahnübergang) sowie geringe Varianzen in der Stichprobe ergeben. Dieser Effekt („low-mean-value“) hat innerhalb der Modellierung zu einer guten Anpassung bei geringer Anzahl von berücksichtigten Variablen geführt. Auch wenn der Einfluss einzelner Merkmale auf das Unfallgeschehen quantifiziert wurde, konnte die Anpassung des Modells an die Realität nicht eindeutig bewertet werden.

Das **qualitative Modell** dient der Abschätzung des kollektiven Risikos eines einzelnen Bahnübergangs unter Verwendung verschiedener Parameter. Dabei wird nach motorisierten und nichtmotorisierten Verkehrsarten unterschieden. Weiterhin werden bei den motorisierten Straßenverkehrsteilnehmern die Entstehungsbereiche der Risiken in Entscheidungs- und Räumungsbereich aufgeteilt. Dem Verfahren liegen vor allem umfangreiche Literaturstudien, qualifizierte Schätzungen und ergänzende empirische Untersuchungen zugrunde. Die Einflussfaktoren sind dabei:

- die Schienenverkehrsstärke,
- die Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge,
- die Sicherungsart,
- die Vorsperrzeit,
- die Straßenverkehrsstärke,
- die Verkehrssituation im Straßenverkehr
- die Sichtverhältnisse im Straßenverkehr
- das Risiko im Räumungsbereich.

Das Ziel des qualitativen Modells ist die Klassifizierung des Risikos und des Wirkungsgrades der Maßnahmen, welche zur Reduzierung der Unfallzahlen durchgeführt werden; eine Schätzung der Unfallzahl erfolgt hier also nicht. Im qualitativen Modell werden die Parameter mit Punktwerten belegt.

Zur Reduzierung des Risikos wurden geeignete **Maßnahmen** recherchiert und in einem Maßnahmenkatalog aufbereitet. Dieser enthält Maßnahmen für den Entscheidungs- und Räumungsbereich. Im Entscheidungsbereich wurde zusätzlich nach Maßnahmen hinsichtlich der Sicherungsarten, zur Erhöhung der Wahrnehmbarkeit, für nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer sowie zur Sanktionierung und baulichen Trennung der Richtungsfahrstreifen unterschieden. Nach einer kurzen Beschreibung der Maßnahme erfolgt die Dokumentation der zu erwartenden Kosten (Investition und Betrieb) und der Abschreibungszeiträume. Weiterhin wird die voraussichtliche Wirkung der Maßnahme dargestellt.
Beispiele für Maßnahmen mit einer besonders starken Risikoreduzierung sind:

- bauliche Trennung der Richtungsfahrstreifen durch Fahrbahnteiler oder Separatoren,
- Einsatz von Rotlichtkameras,
- Einsatz technischer Gefahrenraumfreimeldeanlagen.

Das **Bewertungsverfahren** setzt auf dem qualitativen Modell auf. Für die Bewertung eines Bahnübergangs werden all seinen Parametern Punktwerte zugeordnet. Nach der Addition dieser Punktwerte erfolgt die Risikoeinstufung von risikoarm bis risikoreich. Abhängig vom Ergebnis der Risikobewertung sind Maßnahmen zu Risikobeherrschung zu treffen.

Aus den erzielten Erkenntnissen wurden **Empfehlungen zur Weiterentwicklung der Regelwerke und Rechtsnormen** abgeleitet. Hierzu gehört die Forderung nach einer stärkeren Risikoorientierung der Gestaltungsregeln, die insbesondere die aufgezeigten Einflussfaktoren berücksichtigen müssen.

9.2 Ausblick

Die Ausführungen zum Ausblick spiegeln in wesentlichen Teilen auch die Erkenntnisse von Schöne (2013) wieder.

9.2.1. Eigene Forschung

Im Rahmen der Untersuchung wurde festgestellt, dass zu zahlreichen Aspekten der Bahnübergangssicherheit weiterer Forschungsbedarf besteht. Nachfolgend sind die identifizierten Ansätze für weiterführende Untersuchungen zusammengestellt.

Ein wesentliches Problem bei der Analyse der Risikofaktoren stellt die unzureichende **Datengrundlage** dar. Sowohl die Bestands- als auch die Unfalldaten sollten einheitlicher und umfassender erhoben, zentral gesammelt und für wissenschaftliche Untersuchungen zugänglich gemacht werden. Zur Unfallaufnahme entwickelte bereits der Arbeitskreis Unfallaufnahme und Unfallauswertung (2003) ein verbessertes Verfahren, das jedoch bisher nicht zur Anwendung gekommen ist. Dieses Verfahren sollte aufgegriffen und in ein noch zu entwickelndes Gesamtkonzept zur Bahnübergangsstatistik integriert werden. Als Beitrag hierzu kann auch der Ansatz von Demmer (2012) betrachtet werden, die Bahnübergangsunfälle genauer zu kategorisieren.

Bei der **Modellierung des quantitativen Modells** zeigte sich eine Problematik, die international als low-mean-value bezeichnet wird (Maher und Summersgill, 1996). Es hat sich gezeigt, dass an Bahnübergängen nur kleine Zahlen an Unfällen registriert wurden – im gesamten Kollektiv verteilen sich 103 Unfälle mit Personen- und Sachschaden in sieben Jahren (2005-2011) auf 1.040 Bahnübergänge, was einen Durchschnittswert von 0,1 Unfälle je Bahnübergang ergibt. Bei der Anwendung generalisierter linearer Modelle können kleine Mittelwerte bei der Modellerstellung dazu führen, dass sich bereits bei geringer Anzahl von berücksichtigten Variablen eine gute Anpassung ($\chi 2/df$ nahe 1; vgl. Kapitel 3) ergibt, da das Kollektiv nur eine geringe Varianz aufweist. Nach Ye, Zhang und Lord (2008) können bei Mittelwerten kleiner 0,3 unabhängig von der verwendeten Teststatistik Probleme auftreten. Der Problematik vieler unfallfreier Stellen könnte mit der Anwendung von ZI („zero-inflated“)-Modelle begegnet werden (Shankar et al., 1997; Lee und Mannering, 2002), wobei zwei Zustände unabhängig voneinander betrachtet werden – ein sicherer (unfallfreie Stellen) und unsicherer Zustand (unfallbelastete Stellen). Allerdings entbehrt die Annahme eines sicheren Zustandes (keine Unfälle) jeder theoretischen Grundlage und lehnt den Unfallentstehungsprozess praktisch ab (Lord et al., 2005). Bei derartig geringen Unfallzahlen wird daher eine Detailanalyse des Unfallgeschehens (Auswertung der Unfallhergangstexte) als zielführender erachtet.

Bei der Recherche zu den risikoreduzierenden **Maßnahmen** wurde deutlich, dass nur zu einem kleinen Teil wissenschaftlich gesicherte Erkenntnisse über deren Wirksamkeit vorliegen. In Verbindung mit den zahlreichen in der Literatur enthaltenen Vorschlägen besteht die Gefahr, in der Praxis unwirksame oder sogar schädliche Maßnahmen anzuwenden. Deshalb sollte eine Systematik zur Wirkungsüberprüfung solcher Maßnahmen entwickelt werden. Im Kern muss dabei das Erreichen des angestrebten Ziels – beispielsweise eine verbesserte Wahrnehmung der Schienenfahrzeuge oder der Sicherungseinrichtungen zum Zwecke der Risikoreduzierung – anhand geeigneter Parameter analysiert werden.

Weiterhin können zur Risikoreduktion auch technische Maßnahmen eingesetzt werden, welche moderne Möglichkeiten der Informationsübertragung und -darbietung nutzen (oft als „innovative Maßnahmen“ bezeichnet) und dabei auf vorhandene Infrastrukturen zurückgreifen. Hierzu gehört

die Integration von Warnungen vor Bahnübergängen in Autoradios oder Navigationssysteme (zu Ansätzen siehe Khoudour et al. (2010) und Vondracek und Kispert (2011)). Neben Fragen der technischen Realisierung ist dabei wiederum die erzielbare Risikoreduzierung von Interesse.

9.2.2. Sonstiges

Da Zusammenpralle an Bahnübergängen vergleichsweise seltene Ereignisse sind, sollte die statistische Basis durch die Einbeziehung von Beinaheunfällen vergrößert werden. Unter der Annahme, dass in diesen Fällen der Eintritt eines Zusammenpralls nur durch eine Notreaktion vermeidbar war, können die übrigen Risikofaktoren wie bei einem eingetretenen Zusammenprall erfasst und ausgewertet werden. Dadurch sind gleichzeitig genauere Erkenntnisse darüber erzielbar, wodurch die Abwendbarkeit von Unfällen beeinflusst wird. Ansätze zur Auswertung von Beinaheunfällen auf Gleisbaustellen, die teilweise auf Bahnübergänge übertragbar sind, finden sich bei Rauh und Wilfert (2000).

Neben der statistischen Auswertung von Unfällen oder Beinaheunfällen können wesentliche Erkenntnisse zu Risikofaktoren auch aus Verhaltensuntersuchungen gewonnen werden. Besonders großer Forschungsbedarf besteht dabei zum Verhalten nichtmotorisierter Straßenverkehrsteilnehmer. Zwar ist die Vielfalt der Unfallhergänge bekannt, allerdings liegen kaum Erkenntnisse zu konkreten Risikofaktoren und Wirkungszusammenhängen vor. Mittels verdeckter Videobeobachtung unterschiedlicher Bahnübergangssituationen und anschließender systematischer Auswertung, wie beispielsweise von Hoefert (2012), sind mit vertretbarem Aufwand aussagekräftige Ergebnisse erzielbar.

Das **Bewertungsverfahren** sollte anhand weiterer realer Bahnübergänge getestet werden. Dabei ist eine Vielfalt der Rahmenbedingungen anzustreben. Auf der Grundlage der dabei erzielten Erkenntnisse sind dann ggf. Anpassungen des Verfahrens vorzunehmen.

10. Summary

Due to the special features of level crossings in addition to their accident characteristics, especially the high accident severity, it is necessary to have a detailed look on the safety of these level crossings. This is especially valid for the reason that in the past 50 years the legal framework in Germany has hardly been developed further.

The **current state of research** shows that a specific safety management for level crossings is only possible by use of risk based approaches. They are already common in international context but are not widely used neither in European nor in German legal framework and practical conditions until now. From this fact, the need for developing and establishing such approaches for German level crossings can be derived.

For that purpose, in the first step **inventory and accidental data** from a research collective of the federal states Baden-Württemberg, Rhineland-Palatinate and Saxony were obtained. Partly these data had to be post-elated and edited. Thereby, it was clearly visible that even obtaining fundamental parameters lead to extensive effort and that those data obviously were not used or needed for systematic examinations in the past.

From the conducted analysis for single parameters hardly reasonable findings could be drawn, because on the one hand multiple parameters act together and on the other hand dependencies between the parameters among themselves exist or can be assumed. To display these multifactorial relationships in a sufficient level of detail, appropriate risk models have to be created.

In preparation of the **quantitative modelling**, the depending variables have been reviewed for correlations. The result shows sporadic strong and middle relationships between the attributes. Among other parameters, especially the mode of safeguarding and the average daily traffic volume (DTV) correlate with each other. The context between the mode of safeguarding and the average daily traffic volume can be explained with the fact, that roads with high DTV normally have a higher level of protection to safeguard the level crossing (e. g. by use of full barriers), whereas roads with low DTV mostly are protected by simple means (e. g. by use of traffic lights). Concluding, separate quantitative models for the technical safeguarding and non-technical safeguarding of level crossings were created. A further differentiation regarding accident severity was not possible due to the low number of accidents at level crossings. With these models on the one hand the impact of infrastructural and traffic attributes on the accidents at level crossings can be quantified. On the other hand, the expected value of accidents at level crossings can be investigated. Hereby, for technical safeguarding the following parameters were identified as influences for accident characteristics:

- mean of safeguarding the level crossing,
- curvature
- maximum speed of the line

For non-technical safeguarding the following parameters were identified as influences for accident characteristics:

- classification of the road (pedestrian- and cycle way or normal road),
- pavement of the road and
- distance to the next junction

Using the model, one should consider that the very low number of accident in the reality (8 % of the level crossings showed accidents) leads to low mean values (accidents per level crossing) and low variances in the sample. This low-mean-value-effect affected the modelling by good adaption with few variables taken into account. Even with quantification of the influence of single values on the accidents, it is not possible to definitely evaluate the adaption of the model towards the reality.

The **qualitative model** serves the estimation of collective risks of a single level crossing by using different parameters. Hereby, it is differed between motorised and non-motorised traffic. Furthermore, using motorised traffic the origin of risk is classified into decision area and evacuation area. The procedure is based on substantial analysis of literature, qualified estimations and supplementary empirical studies. The influencing factors are:

- the rail traffic load,
- the train speed,
- the mean of safeguarding the level crossing,
- the pre-locking time,
- the road traffic load,
- the road traffic situation,
- the conditions of sight for the road traffic
- the risk in the evacuation area.

The aim of the qualitative model is to classify the risk and the effectiveness of the measures, that are performed to reduce the number of accidents. An estimation of the number of accidents is not done here. Within the qualitative model, the parameters will be judged in a points-based system.

To reduce the risk, appropriate **measures** were researched and arranged in a catalogue of measures. It incorporates measures for the decision area and the evacuation area. Within the decision area additionally the measures were divided into means of safeguarding, effecting non-motorised participants and differing the structural separation of the traffic lanes. After a short description of the measure, the expected costs (invest and operation) and depreciation period were documented. Furthermore, the likely impact of the measure is shown.
Examples for measures with extraordinary high reduction of risks are:

- structural separation of traffic lanes by means of divisional islands or separators,
- use of red light camera supervision,
- use of technical intersection clear detection.

The **procedure of examination** uses the qualitative model. For the level crossing assessment all parameters were rated with points. After addition of the points, the risks were classified in categories from low risk up towards risky. Dependent on the result of this risk assessment, measures for the risk control will be set.

From the achieved findings **recommendation for the advancement of the rules and legal framework** were derived. One of this is the demand for a stronger risk orientation of the design rules, which now must address the shown influencing factors.

Literaturverzeichnis

ALCAM Working Group (2010): The Australian Level Crossing Assessment Model - ALCAM in Detail. URL: http://www.transport.nsw.gov.au/sites/default/file/levelcrossings/ALCAM_In_Detail-NSW.pdf, abgerufen am 06.09.2011.

Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (2001): vom 26. Januar 2001 (Bundesanzeiger S. 1419, 5206), zuletzt geändert am 17. Juli 2009 (Bundesanzeiger Nr. 110, S. 2598).

Amann, Horst; Körner, Georg; Kröh, Joachim (1981): Das Verhalten der Wegbenutzer am Bahnübergang. in: Zeitschrift für Verkehrssicherheit 28 Heft 3.

Anandarao, Sudhir; Martland, Carl D. (1998): Level crossing safety on East Japan Railways Company: Application of probabilistic risk assessment techniques. in: Transportation 25, S. 265-286.

Arbeitskreis Unfallaufnahme und Unfallauswertung (2003): Arbeitskreis Unfallaufnahme und Unfallauswertung im Unterausschuss "Verkehrssicherheit an Bahnübergängen" des Bund-Länder-Fachausschusses StVO: Aufnahme von Verkehrsunfällen und Örtliche Unfalluntersuchung an Bahnübergängen. unveröffentlicht. Mainz.

Austin, Ross D.; Carson, Jodi L. (2002): An alternative accident prediction model for highway-rail interfaces. in: Accident Analysis and Prevention 34, S. 31-42.

Australian Transport Safety Bureau (2001): Level Crossing Accidents: A Literature Survey. Sydney.

Bald, Stefan (1991): Grundlagen für die Anwendung von Risikoanalysen im Straßenwesen. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt. Darmstadt.

Basler, Ernst und Partner (1986): Sicherheit an Bahnübergängen – Schlussbericht. München.

Beard, Marcus; Melo, Paulo (2010): Level Crossing Risk Tool for Portuguese Railways (REFER). Konferenzunterlagen, 11th World Level Crossing Symposium, Tokyo.

Bepperling, Sonja-Lara (2008): Validierung eines semi-quantitativen Ansatzes zur Risikobeurteilung in der Eisenbahntechnik. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Braunschweig.

Berg, W. D.; Oppenlander, J. C. (1969): Accident analysis at at railroad-highway grade crossings in urban areas. in: Accident Analysis & Prevention 1, S. 129-141.

Bowman, Brian L. (1987): The Effectiveness of Railroad Constant Warning Time Systems. in: Transportation Research Record 1114, S. 111-122.

Braband, Jens (2005): Risikoanalysen in der Eisenbahn-Automatisierung. Hamburg.

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2006): Endbericht ISIS-EK - Intelligentes System zur Identifikation und Signalisierung an nicht-technisch gesicherten Eisenbahnkreuzungen. Salzburg.

Bund-Länder Fachausschuss Straßenverkehrsordnung (BLFA StVO) (2003): Leitfaden zur Durchführung von Bahnübergangsschauen. Düsseldorf.
Caird, J. K. et al. (2002): A Human Factors Analysis of Highway-Railway Grade Crossing Accidents in Canada. Calgary.
Cairney, Peter (1991): Some Possible Low-Cost Treatments for Railway Level Crossings. Konferenzunterlagen zur Improving Safety at Railway Level Crossings Conference. Adelaide.
Castro, Cándida (2009): Human factors of visual and cognitive performance in driving. Boca Raton.
Cohen, Amos S. (1987): Blickverhalten und Informationsaufnahme von Kraftfahrern - Bericht zum Forschungsprojekt 8306/3 der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach.
Cohen, J. (1992): A Power Primer. In: Psychological Bulletin, Vol 12 (1), S. 155-159.
Cohen, J.; Cohen, P.; West, S. G.; Aiken, L. S. (2003): Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences (3rd edition); Mahwah, N. J.: Lawrence Erlbaum Associates.
Cooper, Douglas L.; Ragland, David R. (2007): Driver Behavior at Rail Crossings: Cost-Effective Improvements to Increase Driver Safety at Public At-Grade Rail-Highway Crossings in California. Berkeley.
DBGEO (2016): URL: http://db.geopp.de/gnrailnav_servlet/GNOpenLayersV3, abgerufen am 12.02.2016.
DB Netz (2004): Richtlinie 819.12 Signalanlagen planen - Technische Bahnübergangs-Sicherungsanlagen, gültig ab 01.03.2004. Frankfurt/Main.
DB Netz (2005): Bahnübergänge im Spiegel der Statistik 2004. Frankfurt/Main.
DB Netz (2006): Bahnübergänge im Spiegel der Statistik 2005. Frankfurt/Main.
DB Netz (2007): Bahnübergänge im Spiegel der Statistik 2006. Frankfurt/Main.
DB Netz (2008a): Bahnübergänge im Spiegel der Statistik 2007. Frankfurt/Main.
DB Netz (2008b): Richtlinie 815 Bahnübergänge planen und instand halten, gültig ab 01.11.2008. Frankfurt/Main.
DB Netz (2009): Bahnübergänge im Spiegel der Statistik 2008. Frankfurt/Main.
DB Netz (2010): Bahnübergänge im Spiegel der Statistik 2009. Frankfurt/Main.
DB Netz (2011): Bahnübergänge im Spiegel der Statistik 2010. Frankfurt/Main.
DB Netz (2012): Allgemeingültige Technische Mitteilung TM 2012-238 I.NVT 4 zu RIL 815.0030 Abschn. 4 (8) Umlaufsperren an BÜ für Fußgänger und Radfahrer , Frankfurt am Main.
DB Netz (2014): Streckendatenbank Stredax. URL: http://stredax.bahn.de, abgerufen im Zeitraum Januar 2014 bis April 2014.

Demmer, Matthias (2012): Entwicklung eines Verfahrens zur verbesserten Erfassung, Kategorisierung und Auswertung von Unfällen an Bahnübergängen. Diplomarbeit, TU Dresden. Dresden.
DIN EN 15528 (2013): Bahnanwendungen - Streckenklassen zur Bewerkstelligung der Schnittstelle zwischen Lastgrenzen der Fahrzeuge und Infrastruktur.
EBE (2016): URL: http://www.ebe-solutions.at/de/ebe-rail/isis-lane-lights, abgerufen am 15.04.2016.
EBO (1967): Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 8. Mai 1967 (BGBl. 1967 II S. 1563).
EBO (2008): Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 8. Mai 1967 (BGBl. 1967 II S. 1563), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 19.03.2008 (BGBl. I S. 467).
Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle (1999): Anordnung A 21 00 00 der EUB vom 15.11.1999.
Erke, Heiner; Wimber, Paul (1980): Wirksamkeit von Lichtsignalanlagen zur Sicherung von Bahnübergängen - Bericht zum Forschungsprojekt 7437 der Bundesanstalt für Straßenwesen. Köln.
Erke, H. (2000): Neue Formen der Sicherung von Bahnübergängen, DB AG, ADAC, TU Braunschweig.
Fahrmeir, L.; Kneib, T.; Lang, S. (2009): Regression - Modelle, Methoden und Anwendungen, 2. Auflage, Heidelberg.
Federal Highway Administration (1986): Railroad-Highway Grade Crossing Handbook, Second Edition. Washington, DC.
Federal Highway Administration (2003): Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD), 2003 Edition. Washington, DC.
Federal Highway Administration (2007): Railroad-Highway Grade Crossing Handbook. Washington (2., überarbeitete Auflage).
Federal Railroad Administration (2001a): North Carolina “Sealed Corridor” Phase I. U.S. DOT Assessment Report: Report to Congress. Federal Railroad Administration, U.S. Department of Transportation. Washington, DC.
Federal Railroad Administration (2001b): Intelligent Transportation Systems at Highway-Rail Intersections – A Cross-Cutting Study. URL: http://ntl.bts.gov/lib/jpodocs/repts_te/13587/13587.pdf, abgerufen am 20.02.2012.
Federal Railroad Administration (2009): North Carolina “Sealed Corridor” Phase I, II, and III Assessment, Washington, D.C.
Feßl, Thomas; Robatsch, Klaus; Stefan, Christian (2005): Unfallgeschehen auf Eisenbahnkreuzungen in Österreich und Abschätzung des Unfallrisikos. in: Straßenverkehrstechnik, Heft 8.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (1995): Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA). Köln.
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2003): Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN). Köln.
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2003): Empfehlungen für Anlagen des öffentlichen Personenverkehrs (EAÖ). Köln.
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2006): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen – RASt 06. Köln.
Forschungsgemeinschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2010): Richtlinien für Lichtsignalanlagen. Köln.
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2012): Richtlinien für die Anlage von Landstraßen – RAL. Köln.
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2013): Merkblatt für die Durchführung von Verkehrsschauen – MDV. Köln.
Field (2009): Discovering Statistics Using SPSS. London: Sage.
Füser, Sven (2001): Theoretische Betrachtungen von Zusammenprallen an Bahnübergängen. Dissertation, Universität Hannover. Hannover.
Gitelman, V.; Hakkert, A. S. (1997): The evaluation of road-rail crossing safety with limited accident statistics. in: Accident Analysis and Prevention 29, S. 171-179.
Grewe, Günther (1978): Straßenverkehrsdelinquenz und Marginalität - Untersuchungen zur institutionellen Regelung von Verhalten. Frankfurt/Main, Bern, Las Vegas.
Griffioen, Edwin (2004): Improving level crossing using findings from human behaviour studies. Konferenzunterlagen, 8th International Level Crossing Symposium, Sheffield.
Grippenkoven, Jan; Thomas, Birte; Lemmer, Karsten (2016): PeriLight - effektive Blicklenkung am Bahnübergang. In: Der Eisenbahningenieur 01/16, S. 48-51.
Hahn, Martin (2006): Analyse der Sicherung europäischer Bahnübergänge. Studienarbeit, TU Dresden. Dresden.
Hanker, Robert (1939): Die Sicherung unübersichtlicher Kreuzungen von Eisenbahn und Straße. in: Gleistechnik und Fahrbahnbau 15, S. 57-61.
Harnen, S. et al. (2006): Motorcycle accident prediction model for junctions on urban roads in Malaysia. In: Malaysian Institute of Road Safety Research MIROS; Advances in Transportation Studies (Journal), Section A8, S. 31-39.
Heavisides, Jay; Barker, John (2008): Impact of Traffic Flow on Level Crossing Risk. Konferenzunterlagen, 10th World Level Crossing Symposium. Paris.

Heilmann, Wolfgang (1984): Grundlagen und Verfahren zur Abschätzung der Sicherheit an Bahnübergängen. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt.
Hoefert, Christoph (2012): Untersuchungen zum Verhalten von Wegbenutzern an Bahnübergängen mit Umlaufsperren. Diplomarbeit, TU Dresden. Dresden.
Hristov, Borislav (2011): Untersuchung des Blickverhaltens von Kraftfahrern auf Autobahnen. Dissertation, TU Dresden. Dresden.
Hutcheson, G.; Sofroniou, N. (1999): The Multivariate Social Scientist – Introductory Statistics Using Generalized Linear Models; London: Sage Publications.
Internationaler Eisenbahnverband (2005): Sicherheit an Bahnübergängen – Bibliographie. Paris.
Izadpanah P.; Elmadhoon , M.; Hawash, J.; Rouhieh, B.; Hadayeghi, A.(2014): Improving Pedestrian Safety at Grade Railway Crossings, Burlington.
Khoudour, Louahdi et al. (2010): PANsafer Project - Towards a safer level crossing. Konferenzunterlagen, 11th World Level Crossing Symposium. Tokyo.
Klein, Rudolf; Raab, Friedrich (1955): Grundsätzliches zur Sicherheit der Wegübergänge in Schienenhöhe. in: Sicherheit am Bahnübergang, Sonderheft der Eisenbahntechnischen Rundschau. Darmstadt.
Ko, Byungkon et al. (2007): Evaluation of Flexible Traffic Separators at Highway-Railroad Grade Crossings. in: Journal of Transportation Engineering 133, S. 397-405.
Korve, H.W.; Farran J.I.; Mansel, D.M. et al. (1996): Integration of Light Rail Transit into City Streets. Washington, DC: Transit Cooperative Research Report 17, Transportation Research Board.
Lee, J.; Mannering, F.L. (2002): Impact of roadside features on the frequency and severity of run-off-roadway accidents: an empirical analysis. Accident Analysis and Prevention 34(2), 149-161.
Lerner, Neil D. et al. (2002): Traffic-Controll Devices for Passive Railroad-Highway Grade Crossings, NCHRP-Report 470. Washington, D.C..
Lindberg, Ginnar (2002): The marginal cost of road/rail level crossing accidents on Swedish Railways. URL: http://www.its.leeds.ac.uk/projects/unite/downloads/D9_8c.doc, abgerufen am 29.02.2012.
Lippold, Christian et al. (2007): Orientierungssichtweite - Definition und Beurteilung (Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 977). Bonn.
LISt Gesellschaft für Verkehrswesen und ingenieurtechnische Dienstleistungen mbH (2014): Kostenschätzung für Maßnahmen an Unfallhäufungen. unveröffentlicht. Dresden.
Lord, D.; Washington, S. P.; John, N. I., (2005): Poisson, Poisson-gamma and zero-inflated regression models of motor verhicle crashes: balancing statistical fit and theory. Accident Analysis and Prevention 37(2005), 35-46.

Maher, M. J.; Summersgill, I. (1996): A comprehensive methodology for the fitting of predictive accident models Accid Anal Prev. 1996 May; 28(3): 281-96. Transport Research Laboratory. Crowthorne.
Maier, R.; Berger, R.; Schüller, H.; Heine, A., (2013): Bewertungsmodell für die Verkehrssicherheit von Straßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft V 226.
Marx, Erich; Skoric, Bernd; Lösch, Gunter (2000): Österreichweite Erfassung und Analyse der Unfallhäufungsstellen an nicht-technisch gesicherten Eisenbahnkreuzungen der ÖBB. Wien.
Marx, Erich; Skoric, Bernd; Lösch, Gunter (2003): Österreichweite Erfassung und Analyse der Unfallhäufungsstellen an nicht-technisch gesicherten Eisenbahnkreuzungen der ÖBB - Fortschreibung mit Daten bis Ende 2000. Wien.
Meadow, L. (1994): Los Angeles Metro Blue Line Light Rail Safety Issues. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1433, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
Mocsári, Tibor (2004): Safety Evaluation of Level Crossings in Hungary. Konferenzunterlagen, 8th International Level Crossing Symposium, Sheffield.
Müller, Wilhelm (1965): Gedanken zur Bewertung von Kreuzungen zwischen Eisenbahn und Straße. in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden 12, Heft 1.
National Transportation Safety Board (1998): Safety Study - Safety at Passive Grade Crossings. Washington, D.C..
NEON (2016): Überwachungskamera installiert - Aktion scharf bei Eisenbahnkreuzung in Winzendorf. URL: http://m.noen.at/wr-neustadt/aktion-scharf-bei-eisenbahnkreuzung-in-winzendorf/13.429.224, abgerufen am 19.07.2016.
Oh, Jutaek; Washington, Simon P.; Nam, Doohee (2006): Accident prediction model für railway-highway interfaces. in: Accident Analysis and Prevention 38, S. 346-356.
Omori, Takeshi; Abe, Yoshimichi; Kubota, Hiroyuki (2010): New approach to countermeasures for the prevention of level crossing accidents - Accident prevention through risk evaluation. Konferenzunterlagen, 11th World Level Crossing Symposium, Tokyo.
Park, Y.-J. and Saccomanno, F.F (2005a): Collision frequency analysis using treebased stratification. J. Transport. Res. Record 1908, 121–129, TRB, National Research Council, Washington, DC.
Park, Y.-J. and Saccomanno, F.F. (2005b): Evaluating factors affecting safety at highway–railway grade crossings. J.Transport. Res. Record 1918, 1–9, TRB, National Research Council, Washington, DC.
Rail Accident Investigation Branch (2011): Rail Accident Report - Investigation into the safety of automatic open level crossings on Network Rail’s managed infrastructure. Report 12/2011. Derby.

Rail Safety & Standards Board (2007): Use of Risk Models an Risk Assessment for Level Crossings by Other Railways. Cambridge. URL: http://www.rssb.co.uk/SiteCollectionDocuments/pdf/reports/research/T524_rpt_final.pdf, abgerufen am 24.06.2010.
Raslear, Thomas G. (1996): Driver Behavior at rail-highway grade crossings: A signal detection theory analysis. in: Carroll, A. A.; Helser. J. L. (Herausgeber): Safety of highway-railroad grade crossings, Volume II - Appendices. Washington DC.
Rauh, Hans-Joachim; Wilfert, Bernd (2000): Erfassung und Auswertung von Beinahe-Unfällen bei Arbeiten im Gleisbereich. in: Eisenbahningenieur 51, Nr. 8, S. 63-65.
Reinhold, Gerd (1997): Soziologie-Lexikon. Wien.
Reurings, M.; Janssen, T.; Eenink, R.; Elvik, R.; Cardoso, J.; Stefan, C. (2005): Accident Prediction Models and Road safety Impact assessment: a state-of-the-art. Schlussbericht zum RIPCORD-ISEREST-Projekt.
Richards, Stephen H.; Heathington, K. W. (1990): Assessment of Warning Time Needs at Railroad-Highway Grade Crossings with Active Traffic Control. in: Transportation Research Record 1254, S. 72-84. Washington D.C..
Richards, Stephen H.; Heathington, K. W.; Fambro, Daniel B. (1990): Evaluation of Constant Warning Times Using Train Predictors at a Grade Crossing with Flashing Light Signals. in: Transportation Research Record 1254, S. 60-71. Washington D.C.,.
Richards, Stephen H. (1991): An Overview of the International Symposium on Rail-Highway Grade Crossing Safety and Research. Konferenzunterlagen zur Improving Safety at Railway Level Crossings Conference. Adelaide.
Richter, Peter et al. (1996): Fehlverhalten und psychophysiologische Aktivierung von Kraftfahrern als Bewertungskriterien der Gestaltungsgüte von Straßenverkehrsanlagen. Dresden.
Rösiger, Tini (2006): Wirkungsüberprüfung eines dynamischen Rückmeldesystems auf das Fahrerverhalten am technisch nicht gesicherten BÜ. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
Saccomanno, Frank; Lai, Xiaoming (2004): Analysis of Grade Crossing Collisions and Counter-Measures. Konferenzunterlagen, 8th International Level Crossing Symposium, Sheffield.
Saccomanno, F.F. and Lai, X. (2005): A model for evaluating countermeasures at highway–railway grade crossings. J. Transportat. Res. Record 1918, 18–25.
Saccomanno, F.F.; Park, P.Y.J.; Fu, L. (2006): Analysis of Countermeasure Effects for Highway-Railway Grade Crossings, Proceedings of 9th International Level Crossing Safety and Trespass Prevention Symposium, Montreal, Canada.
Saccomanno, F.F.; Park, P.Y.J.; Fu, L. (2007): Estimating countermeasure effects for reducing collisions at highway-railway grade crossings, Accident Analysis and Prediction 39.

Saccomanno, Frank F.; Park, Peter Young-Jin; Fu, Liping (2009): Estimating countermeasure effects for reducing collissions at highway-railway grade crossings. in: Accident Analysis and Prevention 39 S. 406-416.
Schöne, Eric (2011a): Auf dem Weg zu einem gemeinsamen Regelwerk für Bahnübergänge. in: Der Eisenbahningenieur 62, Nr. 11, S. 37–38
Schöne, Eric; Buder, Jens (2011b): Einfluss der Ortskenntnis auf das Verhalten an Bahnübergängen. in: Der Eisenbahningenieur 62 Heft 6, S. 38-42.
Schöne, Eric; Buder, Jens (2011c): Einsatz von Stoppschildern an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen. in: Der Eisenbahningenieur 62 Heft 3, S. 25-29.
Schöne, Stefanie (2011d): Einfluss der Zeitabläufe an Bahnübergängen mit Halbschranken auf das Verhalten nichtmotorisierter Straßenverkehrsteilnehmer. Studienarbeit, TU Dresden. Dresden.
Schöne, Eric (2013): Ein risikobasiertes Verfahren zur Sicherheitsbeurteilung von Bahnübergängen. Dissertation, Dresden.
Schweers und Wall (2011): Eisenbahnatlas Deutschland. Köln (8. Auflage).
SELCAT-Arbeitsgruppe (2008a): D3 - Report on Risk Modelling Techniques for level crossing risk and system safety evaluation. URL: http://www.iva.ing.tu-bs.de/levelcrossing/selcat/lcDocuments/866-866-26_SELCAT-D3.pdf, abgerufen am 04.06.2011.
SELCAT-Arbeitsgruppe (2008b): D4 - Report on Cost Benefit Analysis methods for level crossings. URL: http://www.iva.ing.tu-bs.de/levelcrossing/selcat/lcDocuments/867-867-26_SELCAT-D4.pdf, abgerufen am 04.06.2011.
Shahriari, Mohammed (1993): Safety at Rail/Road Level Crossings. Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg.
Shankar, V.; Milton, J.; Mannering, F.L. (1997): Modeling accident frequency as zero-altered probability processes: an empirical inquiry. Accid. Anal. Prev. 29 (6), 829–837.
Spahn, V. (2011): Standardisierte Wirksamkeitsanalyse von sicherheitsverbessernden Maßnahmen an Unfallhäufungen auf Außerortsstraßen, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen und Raumplanung, Universität der Bundeswehr München, Heft 56, München.
Statistisches Bundesamt (2010): Betriebsdaten des Schienenverkehrs (mit Daten zur Schienennetzfrequentierung) 2009, DESTATIS, Fachserie 8, Reihe 2.1. Wiesbaden.
Statistisches Bundesamt (2012a): Verkehrsunfälle 2011, DESTATIS, Fachserie 8, Reihe 7. Wiesbaden.
Statistisches Bundesamt (2012b): Betriebsdaten des Schienenverkehrs (mit Daten zur Schienennetzfrequentierung) 2011, DESTATIS, Fachserie 8, Reihe 2.1. Wiesbaden.
Stefan, Christian (2012), Austrian Institut of Technology GmbH, E-Mail-Korrespondenz, vom 08.11.2012.

Stefan, Christian; Stütz, Rainer; Machata, Klaus (2012): Erstellung eines Risikomodells für Eisenbahnkreuzungen für die ÖBB Infrastruktur AG. in: Straßenverkehrstechnik 56, Nr. 10, S. 617-624.
Stevens, Geoff (2004): Train Horns - Nuisance or Risk Reduction Measure? Konferenzunterlagen, 8th International Level Crossing Symposium. Sheffield.
Stevens, J. P. (2002): Applied multivariate statistics for the social sciences - SAS - SPSS, 4th edition, Mahwah.
Stott, Peter Frank (1987): Automatic Open Level Crossings - A Review of Safety. London.
Straßenverkehrs-Ordnung (2010): Straßenverkehrs-Ordnung vom 16. November 1970 (Bundesgesetzblatt, Teil I, S. 1565), zuletzt geändert mit Verordnung vom 1. Dezember 2010 (Bundesgesetzblatt, Teil I, S. 1737).
Summersgill, I.; Kennedy, J.V.; Hall, R.D.; Hickford, A.; Barnard, S.R. (2001): Accidents at junctions on one-way urban roads. Crowthorne: Transport Research Laboratory (TRL Report 510).
Taylor, M.C.; Baruya, A.; Kennedy, J.V. (2002): The relationship between speed and accidents on rural single-carriageway roads. Crowthorne: Transport Research Laboratory (TRL Report 511).
Taylor, M.C.; Lynam, D.A.; Baruya, A. (2000): The effects of drivers' speed on the frequency of road accidents. Crowthorne: Transport Research Laboratory (TRL Report 421).
Turner, Claire et al. (2010): A Trial of Vehicle Activated Signs to Prevent Road Vehicles Blocking Back over Level Crossings. Konferenzunterlagen, 11th World Level Crossing Symposium. Tokyo.
Ubalde, Luis; Bachiller, Adrina; Casas, Carles (2004): Criteria for level crossing removal risk evaluation and cost-benefit analysis. Konferenzunterlagen, 8th International Level Crossing Symposium. Sheffield.
U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (US DOT) (1986): Railroad-Highway Grade Crossing Handbook, Second Edition. Washington D.C.
U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (US DOT) (2002): Guidance on Traffic Control Devices at Highway-Rail Grade Crossings Highway/Rail Grade Crossing Technical Working Group. Washington D.C.
Utah Department of Transportation (UDOT) (2013): Pedestrian Grade Crossing Manual; Salt Lake City.
van de Water, Frans W.; Leo Gossen (2006): Neues Sicherungskonzept für BÜ mit Vollabschluss in den Niederlanden. in: Signal+Draht 98 Heft 5, S.26-30.
Vijendran, Marie; Beard, Marcus; Stevens, Geoff (2004): Red Light Violations at Level Crossings. Konferenzunterlagen, 8th International Level Crossing Symposium. Sheffield.
Vondracek, Michael; Kispert, Christian (2011): NavTrain - mind the train! in: Eisenbahntechnische Rundschau Nr. 9, S. 76-79.

Ward, Nicholas John; Wilde, Gerald J. S. (1996): Driver approach behaviour at an unprotected railway crossing before and after enhancement of lateral sight distances. in: Safety Science 22, S. 63-75.
Washington, Simon; Oh, Jutaek (2006): Bayesian methodology incorporating expert judgment for ranking countermeasure effectiveness under uncertainty: Example applied to at grade railroad crossings in Korea. in: Accident Analysis and Prevention 38 S.234-247.
Wigglesworth, Eric C. (1978): Human Factors in Level Crossing Accidents. in: Accident Analysis and Prevention 10, S. 229-240.
Wigglesworth, Eric C. (2001): A human factors commentary on innovations at railroad-highway grade crossings in Australia. in: Journal of Safety Research 32, S. 309-321.
Ye, Z.; Zhang, Y.; Lord, D. (2008): Investigating Goodness-of-fit Statistics for Generalized Linear Crash Models with Low Sample Mean Values. College Station, Texas: Texas A&M University – URL: https://ceprofs.civil.tamu.edu/dlord/Papers/Ye_et_al._GOF.pdf (28.04.2009)
Zalinger, A. D.; Rogers, B. A.; Johri, H. P. (1977): Calculation of Hazard Indices for Highway-Railway Crossings in Canada. in: Accident Analysis and Prevention 9, S.257-273.
Zierke, Benedikt (2010): Sichere Gestaltung von Landstraßen durch definierte Straßentypen. Dissertation, TU Berlin. Berlin.
Zodtl, Evelyn (2005): Eisenbahnkreuzungsunfälle in Österreich - Verkehrsunfälle auf Eisenbahnkreuzungen 1993-2002 - Dringlichkeitsreihe zur Sanierung der Unfallstellen. Wien.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehen ... 2
Abbildung 2: Aufbau des Modells für die Risikoanalyse (Quelle: Schöne, 2013) ... 6
Abbildung 3: Prinzipskizze zu den Entstehungsbereichen der Risiken ... 25
Abbildung 4: Fehlerbaumdarstellung als Grundlage zum Aufbau qualitatives Modell (Quelle: Schöne, 2013, bearbeitet) ... 26
Abbildung 5: Bahnübergänge mit manuell zu erhebenden Parametern ... 28
Abbildung 6: Anteil der Bahnübergänge der Deutschen Bahn an allen Bahnübergängen nach EBO bundesweit (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2010; Infrastrukturdatenbank DB) ... 30
Abbildung 7: Anteil der Bahnübergänge des Untersuchungsgebiets an allen Bahnübergängen nach EBO bundesweit (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2010) ... 31
Abbildung 8: Anteil der Bahnübergänge der Deutschen Bahn an allen Bahnübergängen nach EBO im Untersuchungsgebiet (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2010; Infrastrukturdatenbank DB) ... 31
Abbildung 9: Vergleich der Inhalte der Datenquellen EUSKa und EUB ... 33
Abbildung 10: Vergleich der Verunglücktenstruktur der Datenquellen EUSKa (links) und EUB (rechts) ... 34
Abbildung 11: Verteilung der Bahnübergänge DB und Unfälle (EUB) des Untersuchungskollektives auf die Bundesländer ... 37
Abbildung 12: Lichtzeichen (Quelle: Anlage 5 zur Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung) ... 38
Abbildung 13: Lichtzeichen mit Halbschranke (Quelle: Anlage 5 zur Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung) ... 38
Abbildung 14: Postensicherung ... 39
Abbildung 15: Sicherungsarten im Untersuchungskollektiv (Quelle: Datenbank DB 01/2014; Luftbild-Auswertungen) ... 39
Abbildung 16: Stärke des Schienenverkehrs an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2010) ... 42
Abbildung 17: Straßenklassen an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Datenbank DB 01/2014) ... 43
Abbildung 18: Maximale Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: DB Netz, 2014) ... 44
Abbildung 19: Anzahl der Gleise an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Luftbild-Auswertungen) ... 45
Abbildung 20: Streckenklassen an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: DB Netz, 2014) ... 47
Abbildung 21: Nähe zu einem Bahnhof bzw. Haltepunkt der Bahnübergänge des Untersuchungskollektivs (Quelle: Schweers und Wall, 2011) ... 47
Abbildung 22: Kreuzungswinkel Schiene/ Straße an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Luftbild-Auswertungen) ... 48
Abbildung 23: Längsneigung an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Straßendatenbanken/ Digitales Geländemodell) ... 49
Abbildung 24: Kurvigkeit an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Straßendatenbanken/ Luftbild-Auswertungen) ... 50
Abbildung 25: Fahrstreifenanzahl an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Straßendatenbanken/Luftbild-Auswertungen) ... 51
Abbildung 26: Gehwege an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Straßendatenbanken/Luftbild-Auswertungen) ... 52

Abbildung 27: Separate Radverkehrsführung an den Bahnübergängen des Untersuchungskollektivs (Quelle: Straßendatenbanken/Luftbild-Auswertungen) 53
Abbildung 28: Entfernung der Bahnübergänge des Untersuchungskollektivs zu Anschlüssen an das übergeordnete Straßennetz (Quelle: Straßenkarten/ Luftbild-Auswertungen)..... 54
Abbildung 29: Entfernung der Bahnübergänge des Untersuchungskollektivs zu Knotenpunkten mit gleichrangigen Straßen (Quelle: Straßenkarten/Luftbild-Auswertungen) 54
Abbildung 30: Entfernung der Bahnübergänge des Untersuchungskollektivs zu Knotenpunkten mit untergeordneten Straßen (Quelle: Straßenkarten/Luftbild-Auswertungen) 55
Abbildung 31: Unfallkategorie (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Untersuchungskollektives..... 57
Abbildung 32: Verunglückte (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Untersuchungskollektives..... 57
Abbildung 33: Art der Verkehrsbeteiligung (EUB) bei Unfällen an Bahnübergängen DB des Untersuchungskollektives..... 58
Abbildung 34: Unfallursache (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Untersuchungskollektives..... 59
Abbildung 35: Strecken (Schienenwege-Kategorie) (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Untersuchungskollektives 60
Abbildung 36: Sicherungsart (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Untersuchungskollektives..... 61
Abbildung 37: Straßenklasse (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Untersuchungskollektives..... 62
Abbildung 38: Sicherungsart bei Unfällen (GDV) an Bahnübergängen..... 63
Abbildung 39: Zusammenhang zwischen dem durchschnittlich täglichen Verkehr (DTV) und der Sicherungsart an technisch gesicherten Bahnübergängen..... 68
Abbildung 40: Straßenoberfläche an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen 78
Abbildung 41: Eintreffenswahrscheinlichkeit unter Einfluss des „Stott-Effekts“ (Quelle: Heavisides et al., 2008) 81
Abbildung 42: Qualitatives Modell 89
Abbildung 43: Zusätzliche Leitschwellen (Quelle: Federal Railroad Administration, 2009)..... 106
Abbildung 44: Rotlichtüberwachung durch Rotlichtkameras (Quelle: NEON, 2016) 106
Abbildung 45: technische Gefahrenraumfreimeldeanlage..... 106
Abbildung 46: Dialogdisplay (Quelle: Rösiger, 2006) 107
Abbildung 47: Bodenschwelle 107
Abbildung 48: BÜ mit vorgeschalteten Lichtzeichen 107
Abbildung 49: Foto BÜ Weixdorf Hp..... 111
Abbildung 50: Luftbild-Screenshot BÜ Weixdorf Hp [Ausschnitt aus: DBGEO, 2016] 112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der ausländischen Studien ... 19
Tabelle 2: Datenumfang quantitatives Modell ... 36
Tabelle 3: Belastungsklassen der Bahnstrecken (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2010) ... 40
Tabelle 4: Streckenklassen (Quelle: DIN EN 15528) ... 46
Tabelle 5: Definition der Unfall- und Verunglücktenkategorien in EUSKa und EUB ... 56
Tabelle 6: Übersicht Eingangsvariablen Modellbildung ... 66
Tabelle 7: Korrelationsmatrix ... 67
Tabelle 8: Übersicht der Teilmodelle und zugrundeliegender Kollektive ... 71
Tabelle 9: Unfalldichtemodell (Unfälle je BÜ und Jahr) der Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) an technisch gesicherten Bahnübergängen mit DTV_Kfz ... 73
Tabelle 10: Unfalldichtemodell (Unfälle je BÜ und Jahr) der Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) an technisch gesicherten Bahnübergängen ohne DTV_Kfz ... 75
Tabelle 11: Unfalldichtemodell (Unfälle je BÜ und Jahr) der Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen mit Kfz- (≤ 2.500 Kfz/24h), Rad- und Fußgängerverkehr ... 77
Tabelle 12: Angenommene Fehlerwahrscheinlichkeiten im Entscheidungsbereich (Quelle: Schöne, 2013) ... 82
Tabelle 13: Beispiel Punktwerte und Risiko ... 90
Tabelle 14: Quellen zur Herleitung der Punktwerte aller Parameter ... 90
Tabelle 15: Punktwerte für DTV Schienenverkehr ... 92
Tabelle 16: Punktwerte für Geschwindigkeit Schienenfahrzeug ... 93
Tabelle 17: Punktwerte für Sicherungsart (nichtmotorisiert) ... 93
Tabelle 18: Punktwerte für Vorsperrzeit (nichtmotorisiert) ... 94
Tabelle 19: Punktwerte für DTV Straßenverkehr (nichtmotorisiert) ... 94
Tabelle 20: Punktwerte für Sichtverhältnisse Straßenverkehr (nichtmotorisiert) ... 94
Tabelle 21: Punktwerte für Sicherungsart (motorisiert) ... 95
Tabelle 22: Punktwerte für Vorsperrzeit (motorisiert) ... 95
Tabelle 23: Punktwerte für DTV Straßenverkehr (motorisiert) ... 96
Tabelle 24: Punktwerte für Verkehrssituation Straßenverkehr (motorisiert) ... 96
Tabelle 25: Punktwerte für Sichtverhältnisse Straßenverkehr (motorisiert) ... 96
Tabelle 26: Punktwerte für Risiko Räumungsbereich (motorisiert) ... 97
Tabelle 27: Punktwertberechnung qualitatives Modell Sicherungsart Vollabschluss ... 98
Tabelle 28: Punktwertberechnung qualitatives Modell Sicherungsart Halbschranken ... 99
Tabelle 29: Punktwertberechnung qualitatives Modell Sicherungsart Lichtsignale ... 99
Tabelle 30: Punktwertberechnung qualitatives Modell Sicherungsart passiv ... 100
Tabelle 31: Sicherungstechnische Maßnahmen - kurze Zusammenfassung (Quellen: siehe Anlage 34) ... 102
Tabelle 32: Empfohlene Maßnahmen - mit besonders starker Risikoreduzierung ... 106
Tabelle 33: Empfohlene Maßnahmen - weitere ... 107
Tabelle 34: Datenherkunft der Parameter des qualitativen Modells ... 108
Tabelle 35: Ergebnis-Punktwert für nichtmotorisierte Straßenverkehrsteilnehmer ... 109
Tabelle 36: Ergebnis-Punktwert für motorisierte Straßenverkehrsteilnehmer ... 109
Tabelle 37: Risiko-Einstufung der Summe der Ergebnis-Punktwerte ... 110
Tabelle 38: Ergebnis-Punktwert für nichtmotorisierte Straßenverkehrsteilnehmer ... 112
Tabelle 39: Ergebnis-Punktwert für motorisierte Straßenverkehrsteilnehmer ... 112
Tabelle 40: Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten nach Sicherungsarten (Müller, 1965) ... 177

Tabelle 41: Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten nach Sicherungsarten (Heilmann, 1984) ... 178
Tabelle 42: Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten nach Sicherungsarten (Überblick) 180
Tabelle 43: Angenommene Fehlerwahrscheinlichkeiten im Entscheidungsbereich..... 180

Anlagen

Anlage 1 Verteilung der Bahnübergänge DB und Unfälle (EUB) des Gesamtkollektives auf die Bundesländer ... 141

Anlage 2 Sicherungsarten im Gesamtkollektiv ... 142

Anlage 3 Stärke des Schienenverkehrs an Bahnübergängen des Gesamtkollektives ... 143

Anlage 4 Straßenklassen an Bahnübergängen des Gesamtkollektives ... 144

Anlage 5 Maximale Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives ... 145

Anlage 6 Anzahl der Gleise an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives ... 146

Anlage 7 Streckenklassen an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives ... 147

Anlage 8 Nähe zu einem Bahnhof bzw. Haltepunkt der Bahnübergänge des Gesamtkollektives ... 148

Anlage 9 Kreuzungswinkel Schiene/ Straße an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives ... 149

Anlage 10 Längsneigung an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives ... 150

Anlage 11 Kurvigkeit an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives ... 151

Anlage 12 Fahrstreifenanzahl an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives ... 152

Anlage 13 Gehwege an den Bahnübergängen im Gesamtkollektiv ... 153

Anlage 14 Separate Radverkehrsführung an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives ... 154

Anlage 15 Entfernung der Bahnübergänge des Gesamtkollektives zu Knotenpunkten mit übergeordneten, gleichrangigen und untergeordneten Straßen ... 155

Anlage 16 Unfallkategorien (EUB) und Verunglückte (EUB) an Bahnübergängen DB des Gesamtkollektives ... 158

Anlage 17 Art der Verkehrsbeteiligung (EUB) bei Unfällen an Bahnübergängen DB des Gesamtkollektives ... 159

Anlage 18 Unfallursache (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB ... 160

Anlage 19 Strecken (Schienenwege-Kategorie) (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Gesamtkollektives ... 161

Anlage 20 Sicherungsart (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Gesamtkollektives ... 162

Anlage 21 Straßenklasse (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Gesamtkollektives ... 163

Anlage 22 Quantitatives Teilmodell der Unfälle mit Personenschaden (U(P)) für technisch gesicherte Bahnübergänge ... 164

Anlage 23 Quantitatives Teilmodell der Unfälle mit Sachschaden (U(S)) für technisch gesicherte Bahnübergänge ... 165

Anlage 24 Quantitatives Teilmodell der Unfälle mit Personenschaden (U(P)) für nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge ≤ 2.500 Kfz/24h ... 166

Anlage 25 Quantitatives Teilmodell der Unfälle mit Sachschaden (U(S)) für nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge ≤ 2.500 Kfz/24h ... 167

Anlage 26 **Quantitatives Teilmodell der Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) für nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge mit allg. Kfz-Verkehr (≤ 2.500 Kfz/24h) ... 168**

Anlage 27 **Quantitatives Teilmodell der Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) für nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge mit ausschließlich Fuß- und Radverkehr ... 169**

Anlage 28 **Modellanalyse des quantitativen Teilmodells für technisch gesicherte Bahnübergänge mit Berücksichtigung des DTV ... 170**

Anlage 29 **Modellanalyse des quantitativen Teilmodells für technisch gesicherte Bahnübergänge mit Berücksichtigung des DTV ... 171**

Anlage 30 **Quantitatives Teilmodell der Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) für das gesamte Kollektiv der technisch gesicherten Bahnübergänge (n=1986) ... 172**

Anlage 31 **Quantitativen Teilmodells für nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge mit und ohne auffällige Residuen ... 175**

Anlage 32 **Modellanalyse des quantitativen Teilmodells für nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge ... 176**

Anlage 33 **Herleitung Wirksamkeit Sicherungsarten (Schöne, 2013, S. 73ff) ... 177**

Anlage 34 **Maßnahmen im Entscheidungsbereich - Sicherungsarten ... 182**

Anlage 35 **Maßnahmen im Entscheidungsbereich - zur Erhöhung der Wahrnehmbarkeit ... 183**

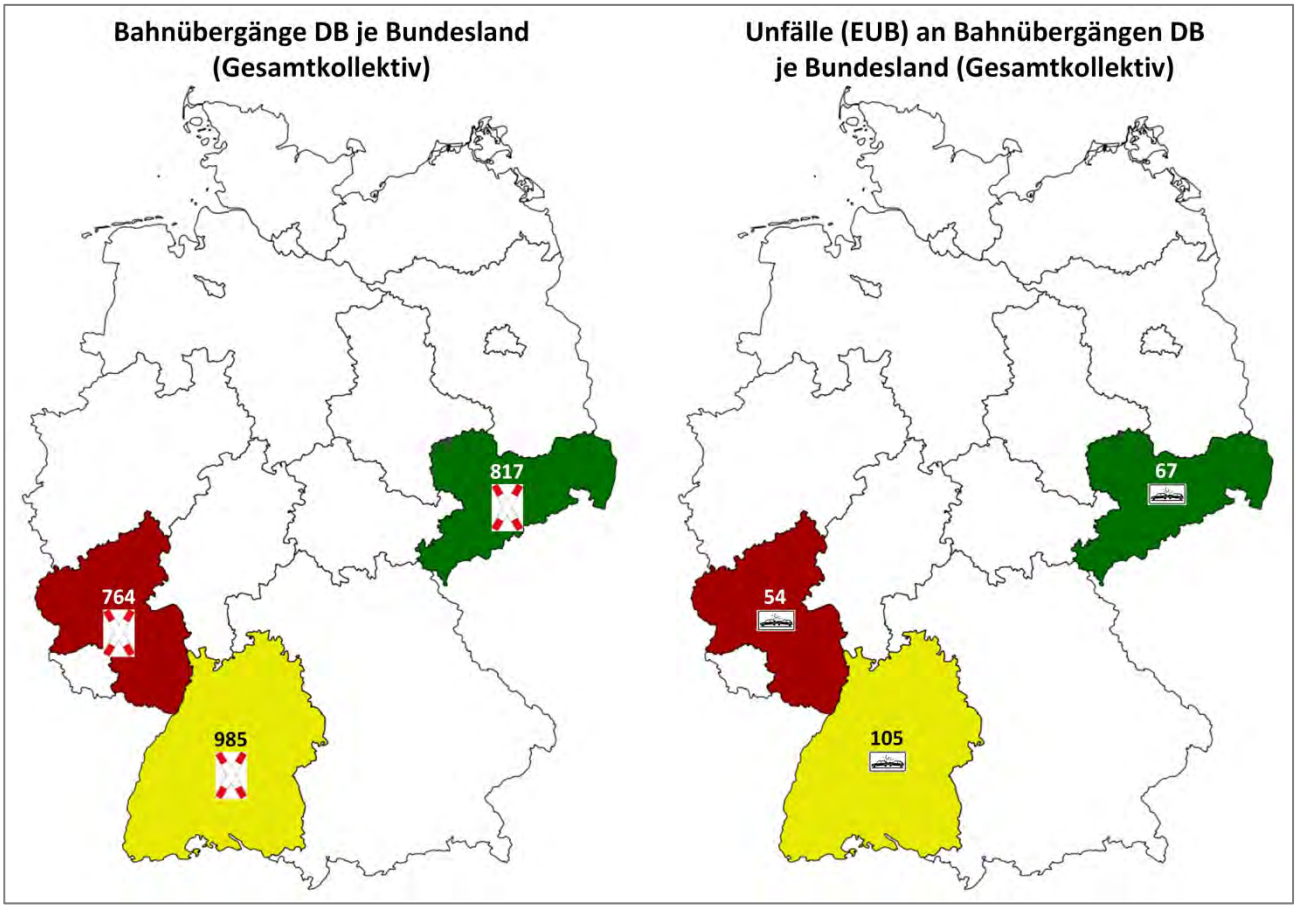
Anlage 36 **Maßnahmen im Entscheidungsbereich - nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer ... 187**

Anlage 37 **Maßnahmen im Entscheidungsbereich - Sanktionierung und bauliche Trennung der Richtungsfahrstreifen ... 190**

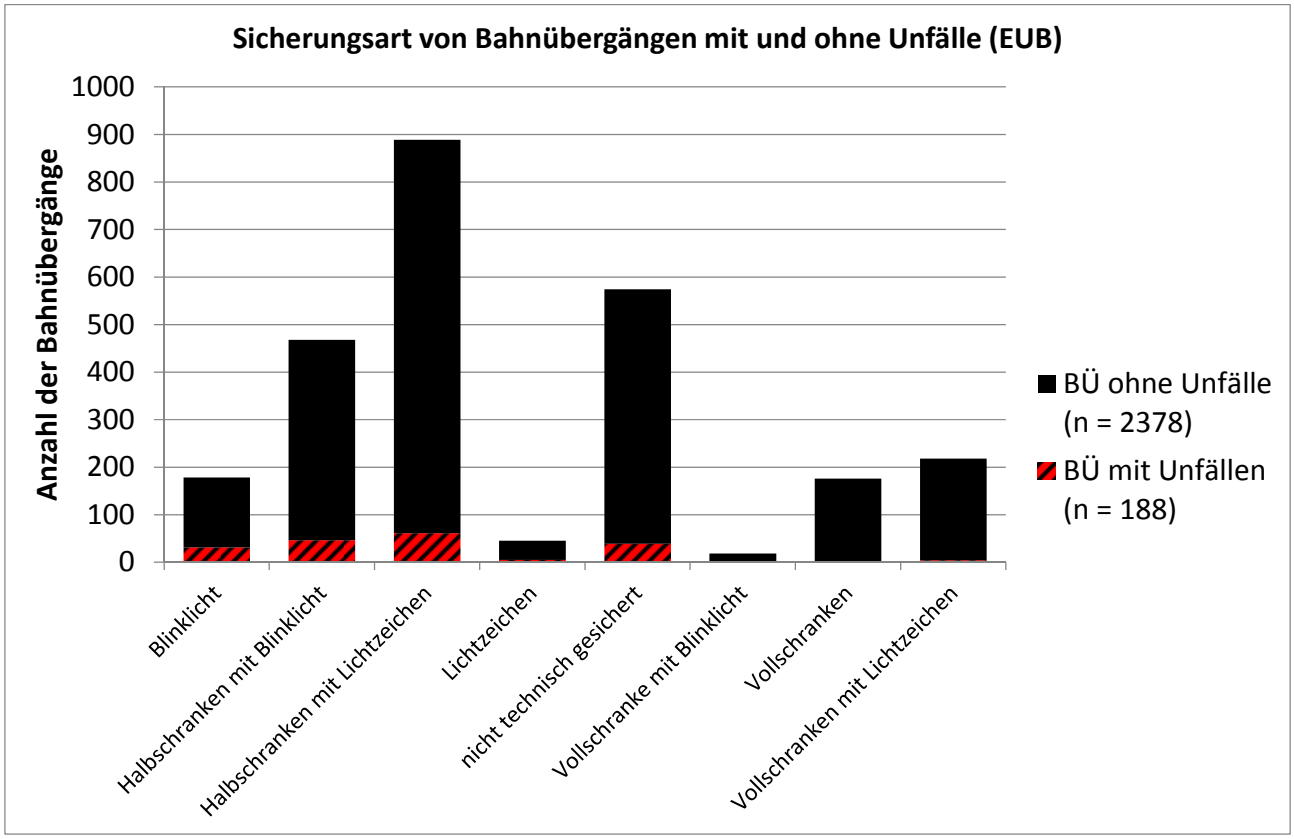
Anlage 38 **Maßnahmen im Räumungsbereich ... 192**

Anlage 39 **Beispiel für komplexe Verkehrssituation ... 195**

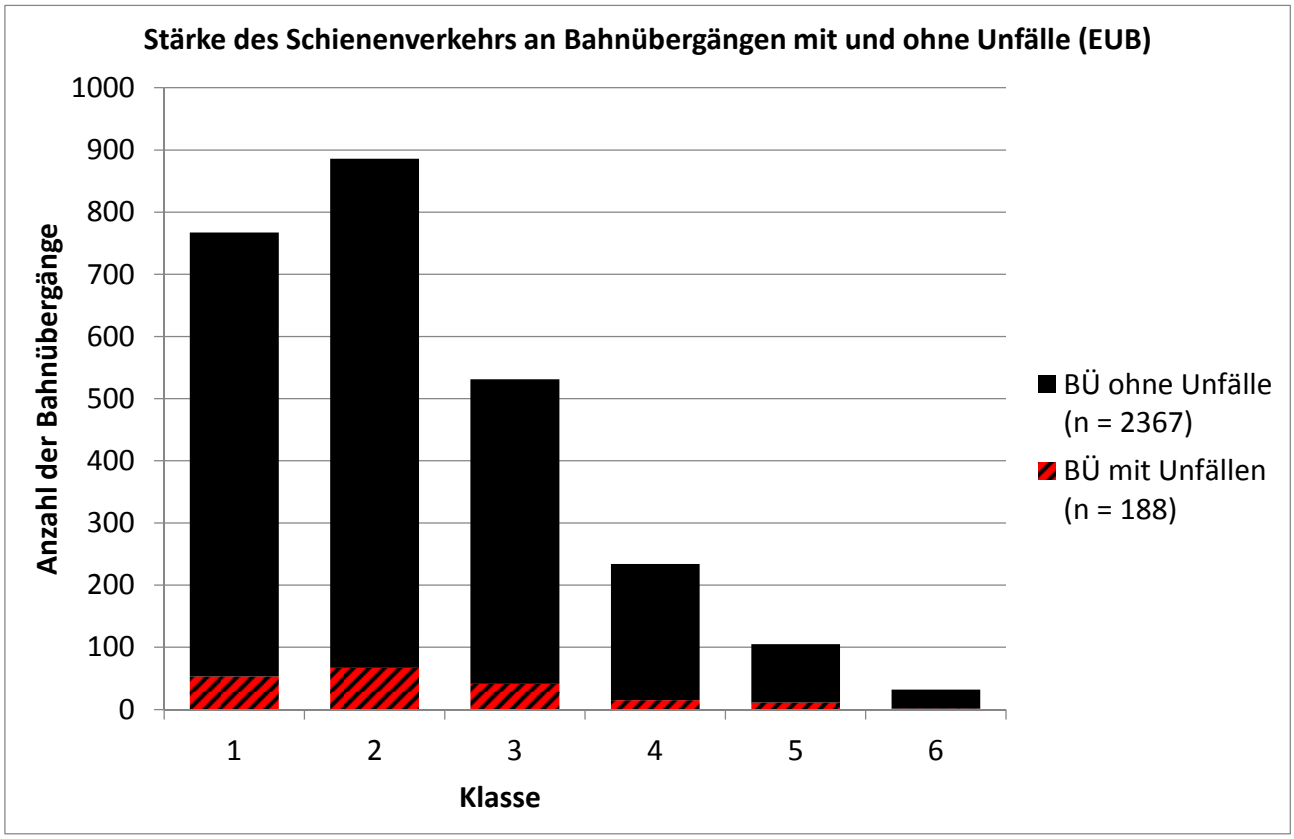
Anlage 1 Verteilung der Bahnübergänge DB und Unfälle (EUB) des Gesamtkollektives auf die Bundesländer



Anlage 2 Sicherungsarten im Gesamtkollektiv

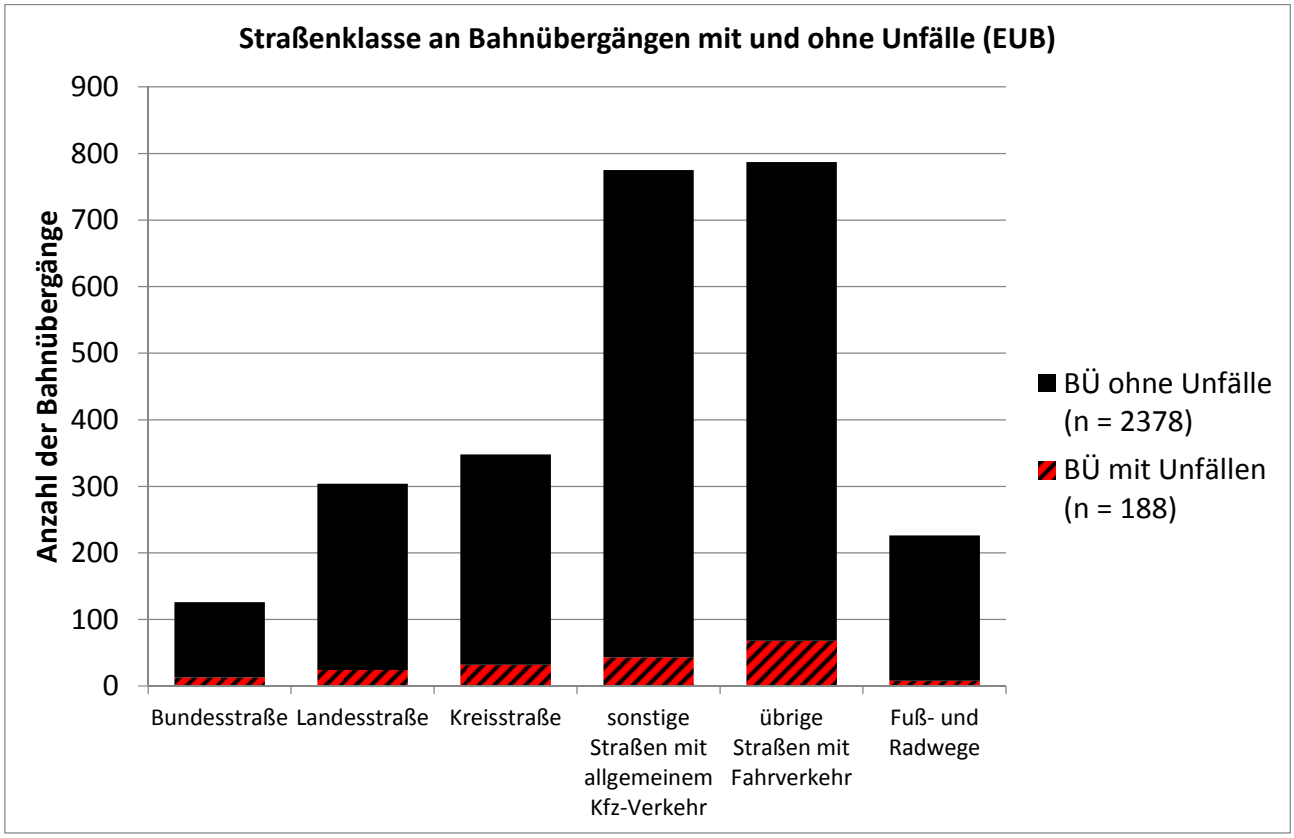


Anlage 3 Stärke des Schienenverkehrs an Bahnübergängen des Gesamtkollektives

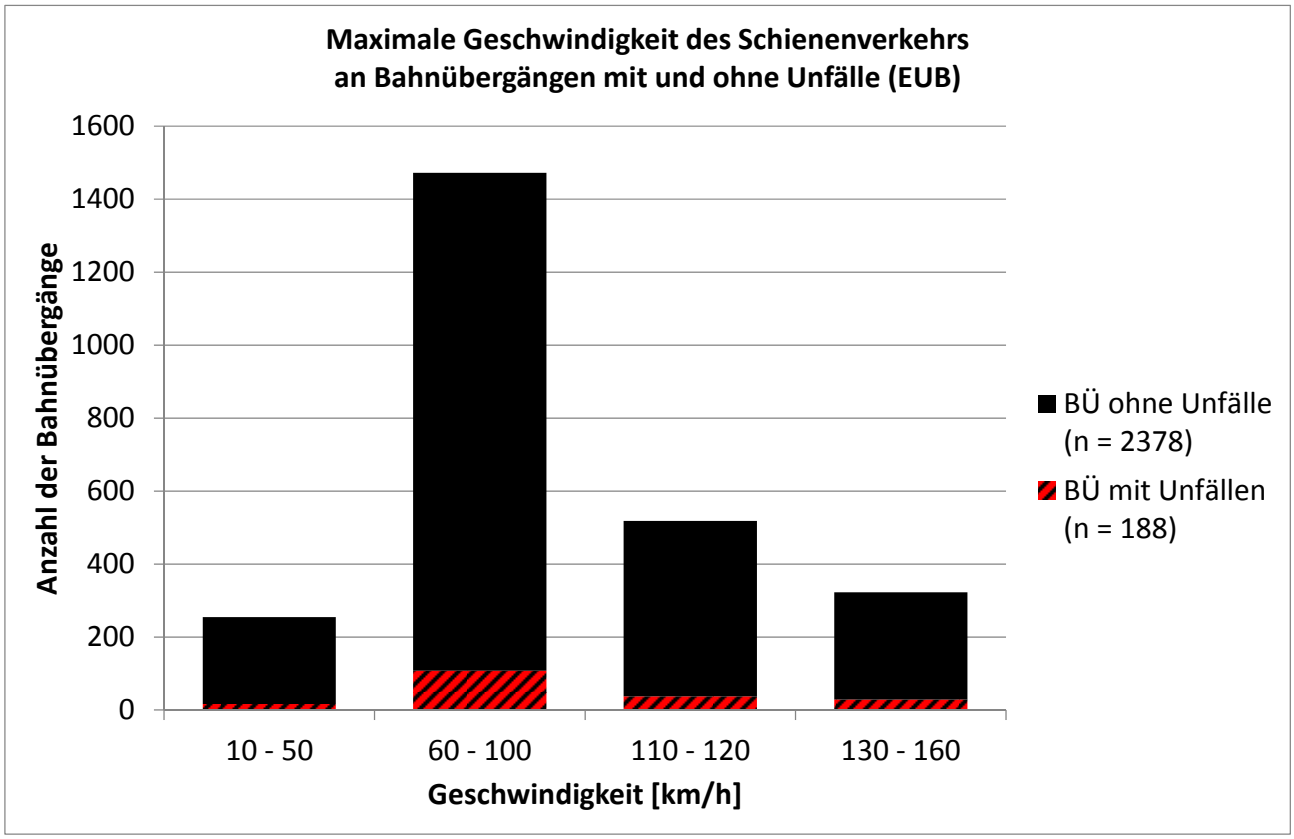


Hinweis: für 11 BÜ (ohne Unfälle) lag keine Klassenangabe vor (siehe 4.3.1).

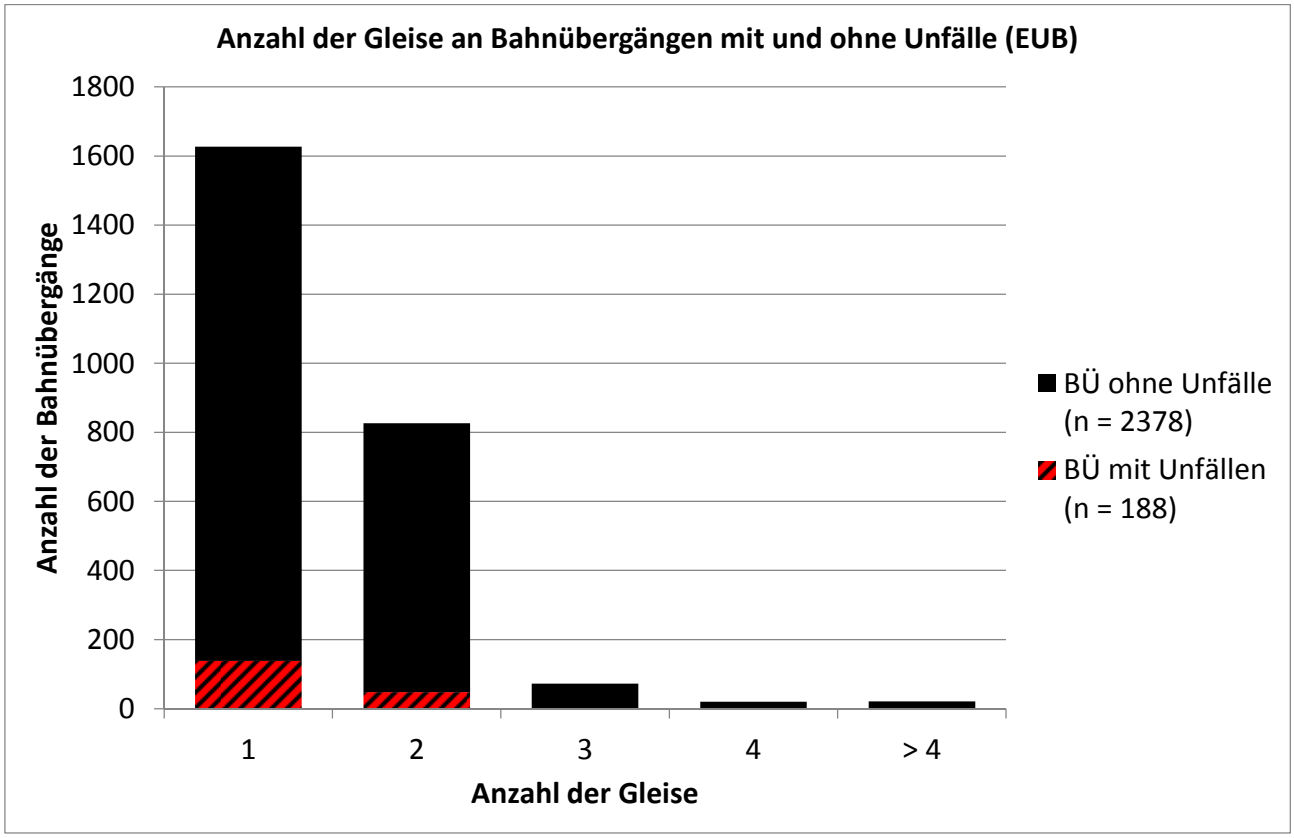
Anlage 4 Straßenklassen an Bahnübergängen des Gesamtkollektives



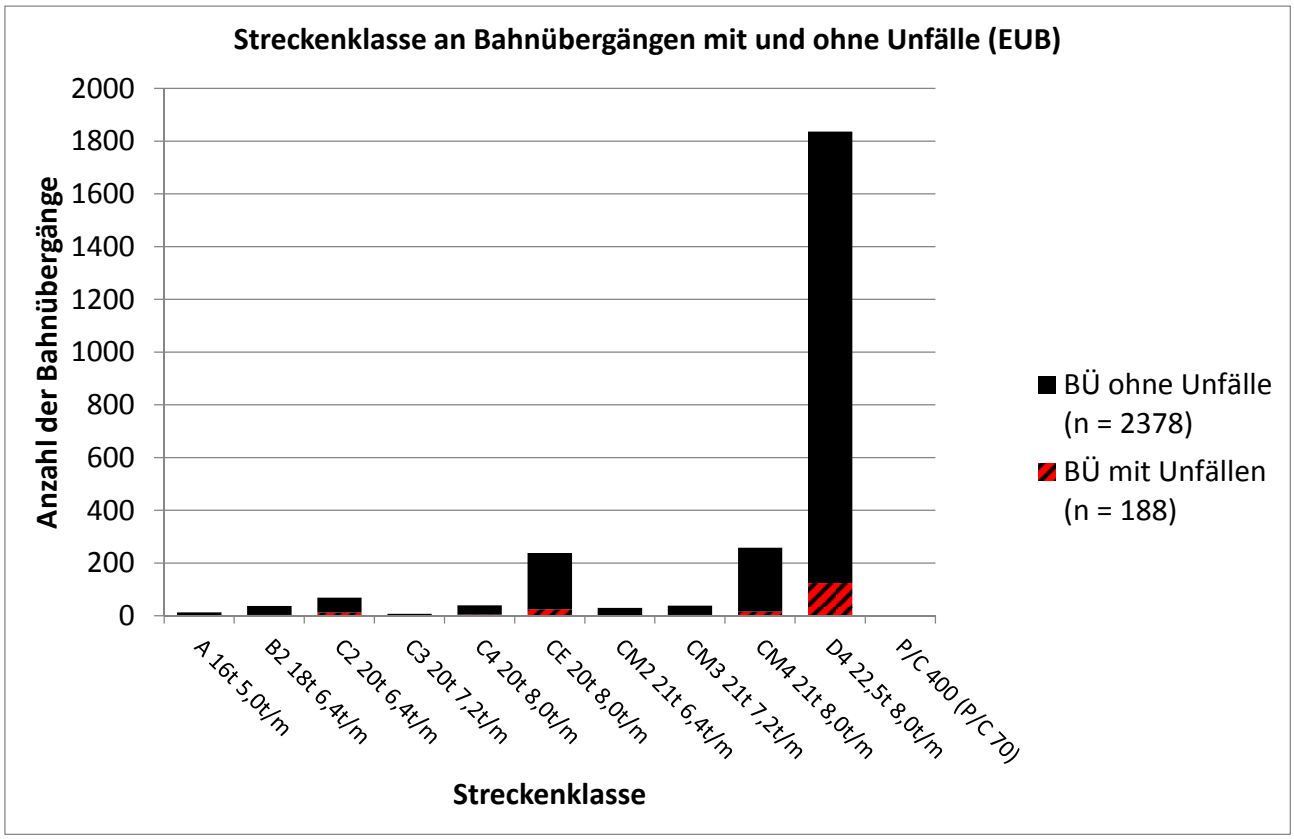
Anlage 5 Maximale Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives



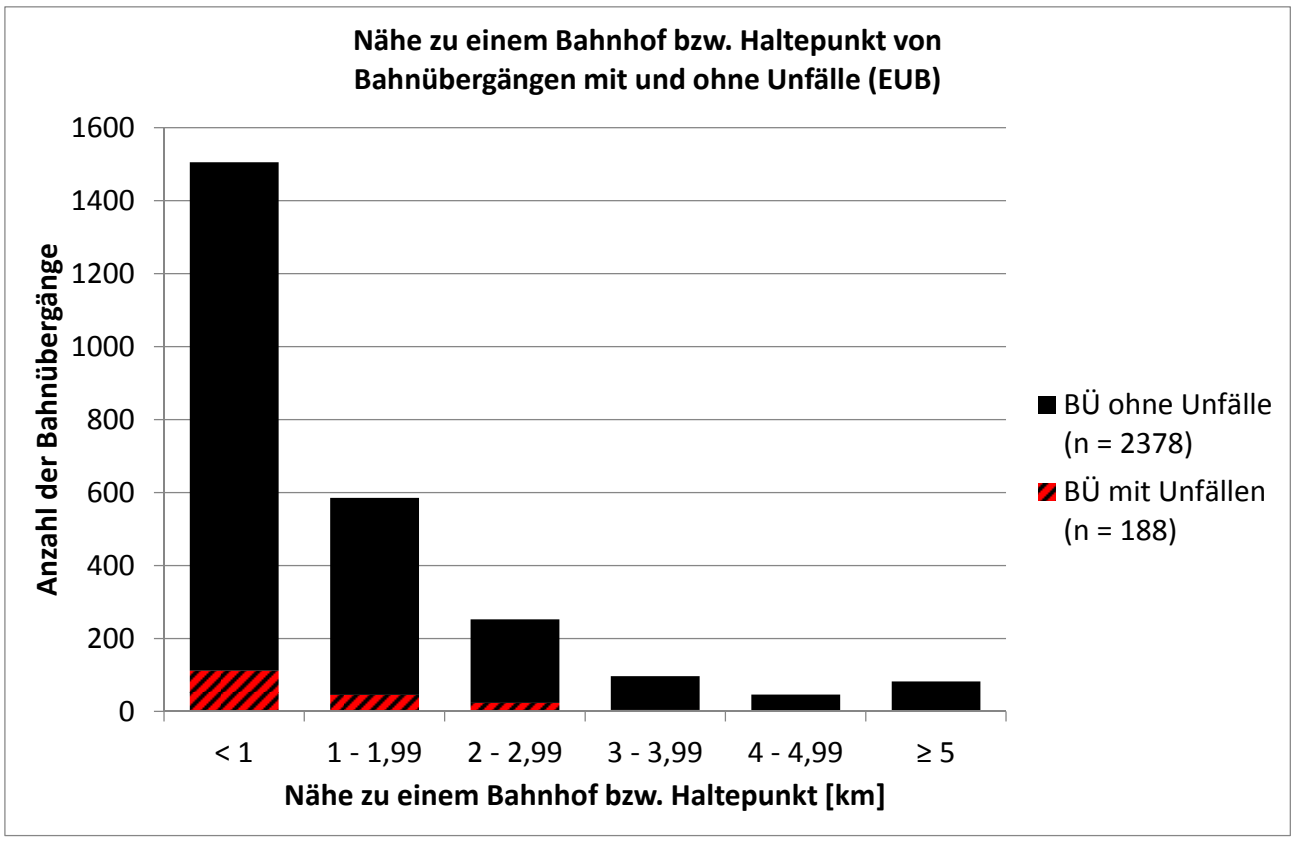
Anlage 6 Anzahl der Gleise an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives



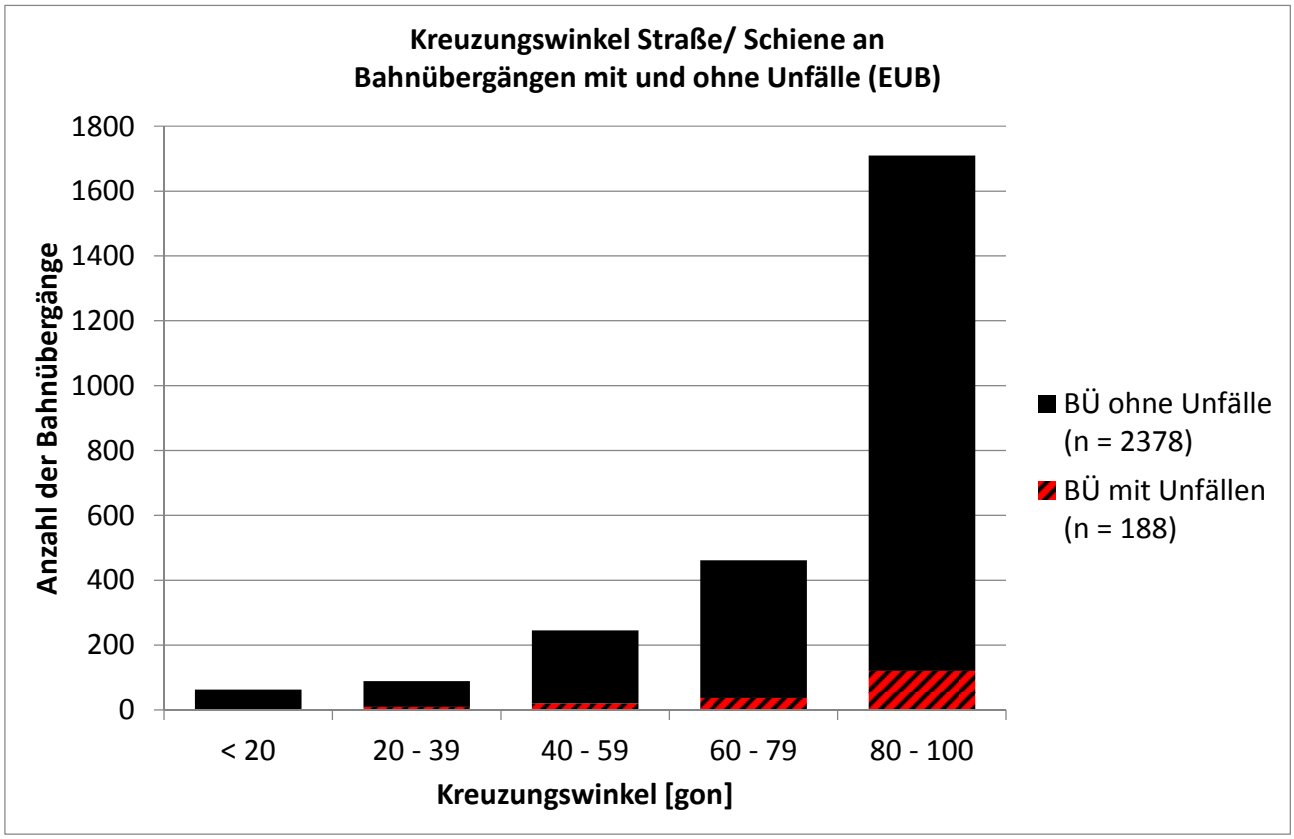
Anlage 7 Streckenklassen an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives



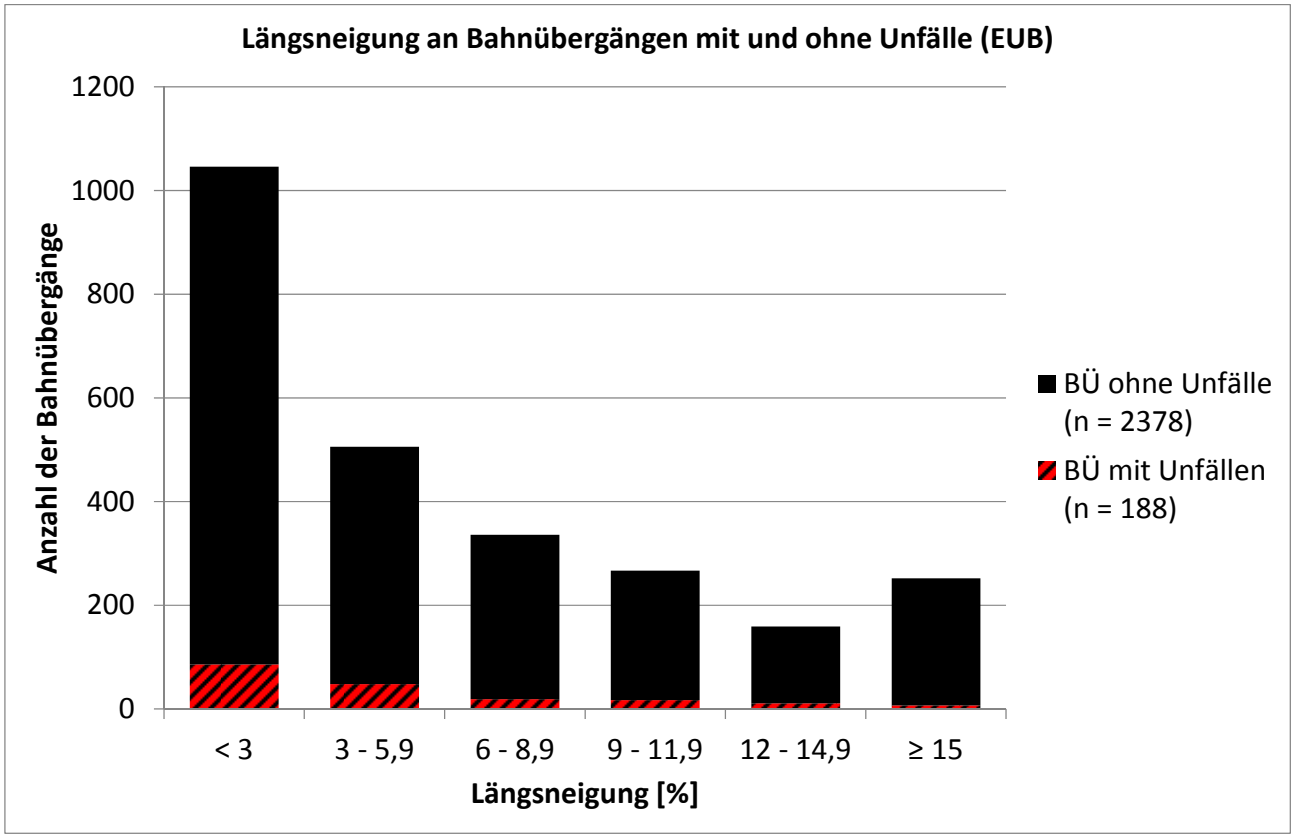
Anlage 8 Nähe zu einem Bahnhof bzw. Haltepunkt der Bahnübergänge des Gesamtkollektives



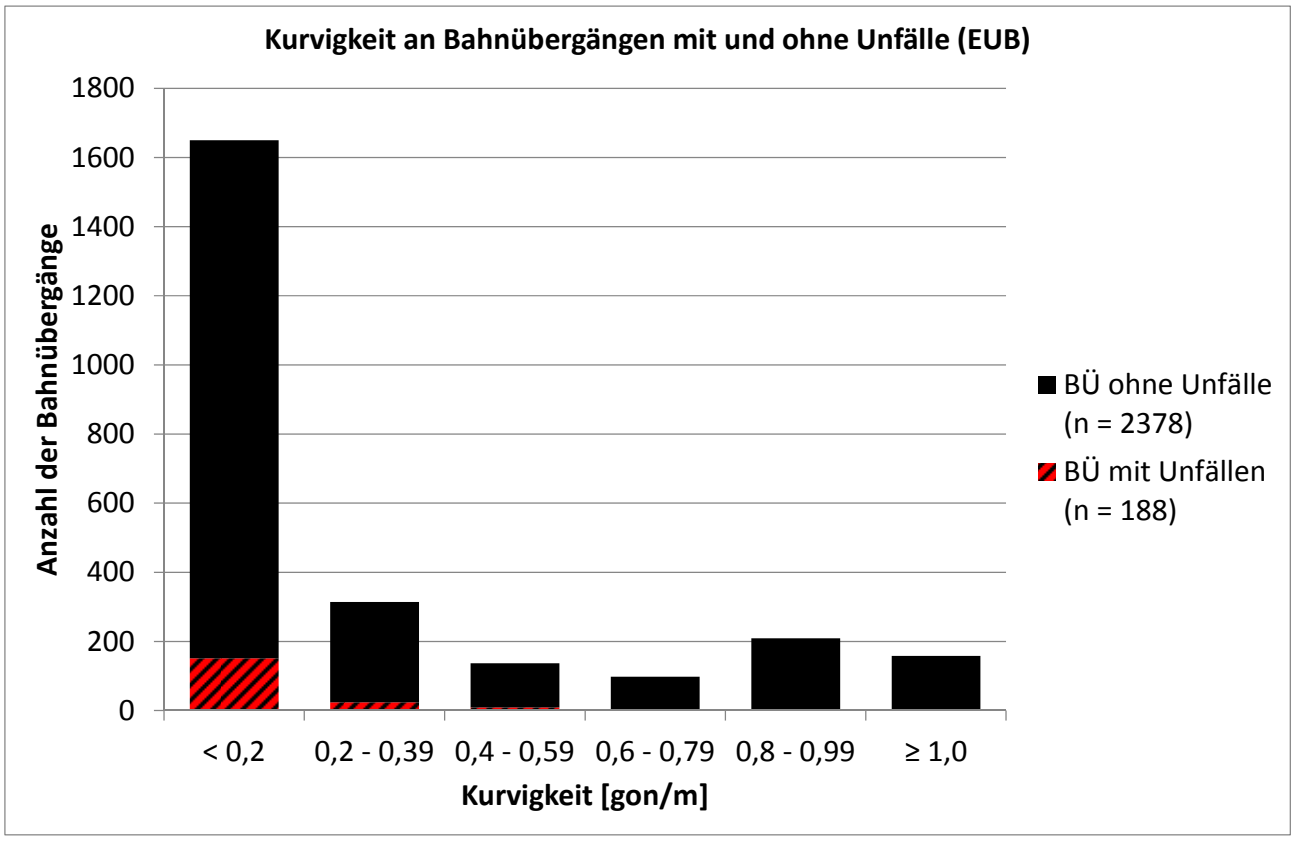
Anlage 9 Kreuzungswinkel Schiene/ Straße an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives



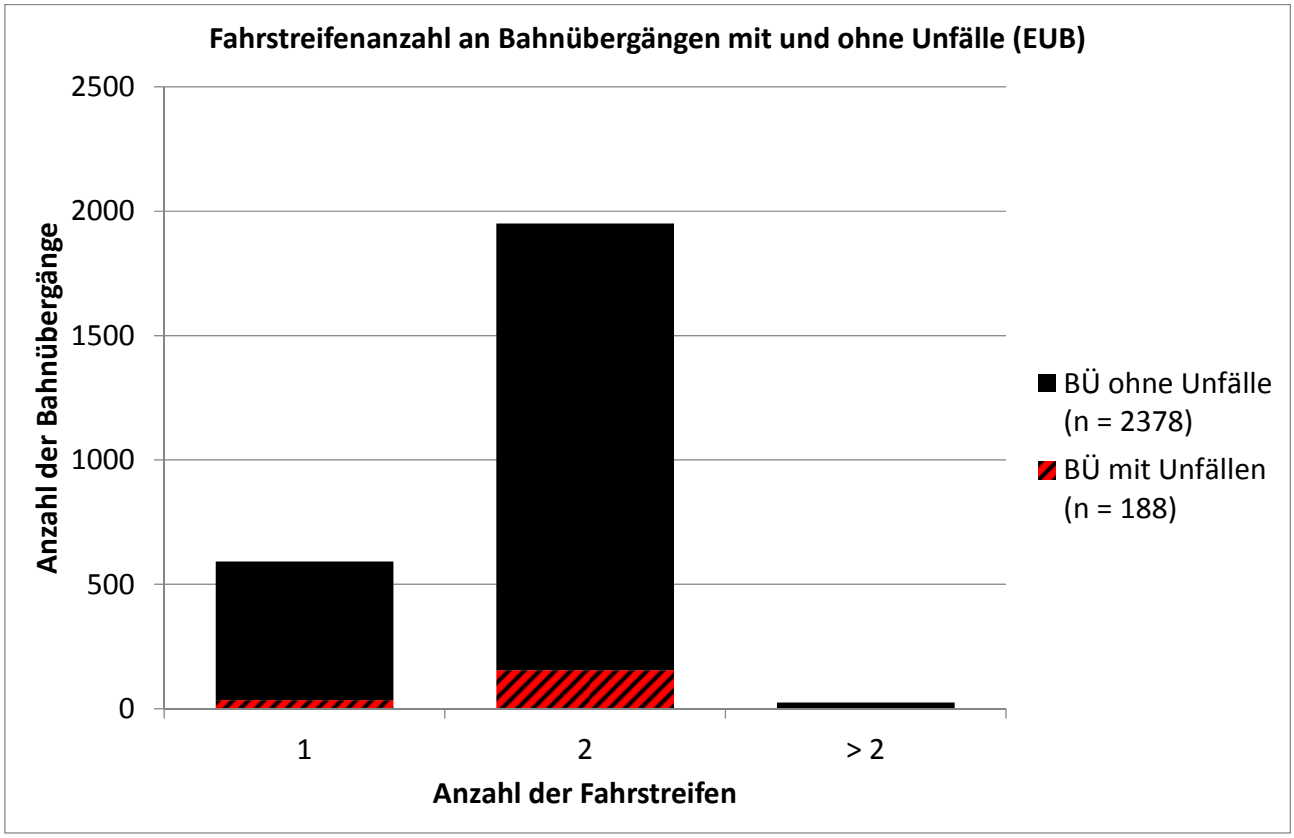
Anlage 10 Längsneigung an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives



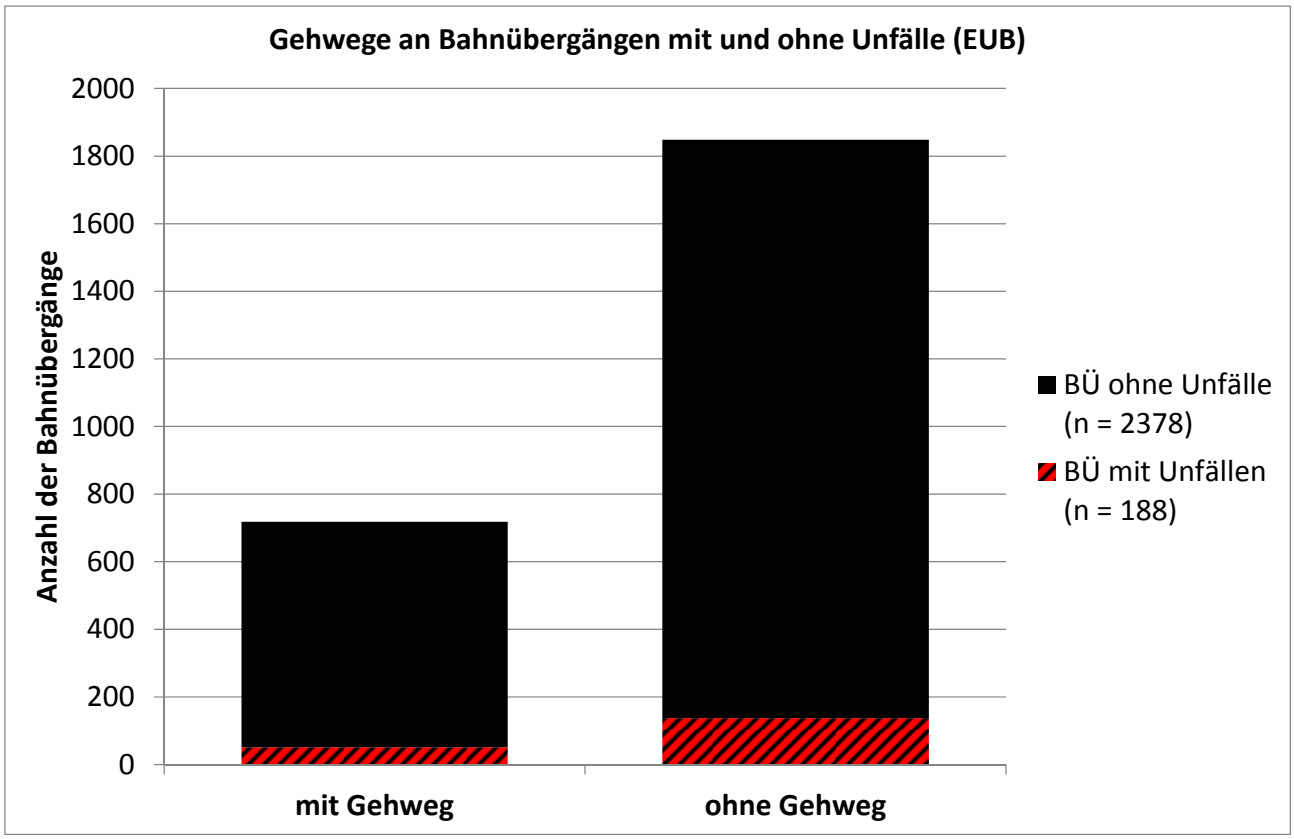
Anlage 11 Kurvigkeit an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives



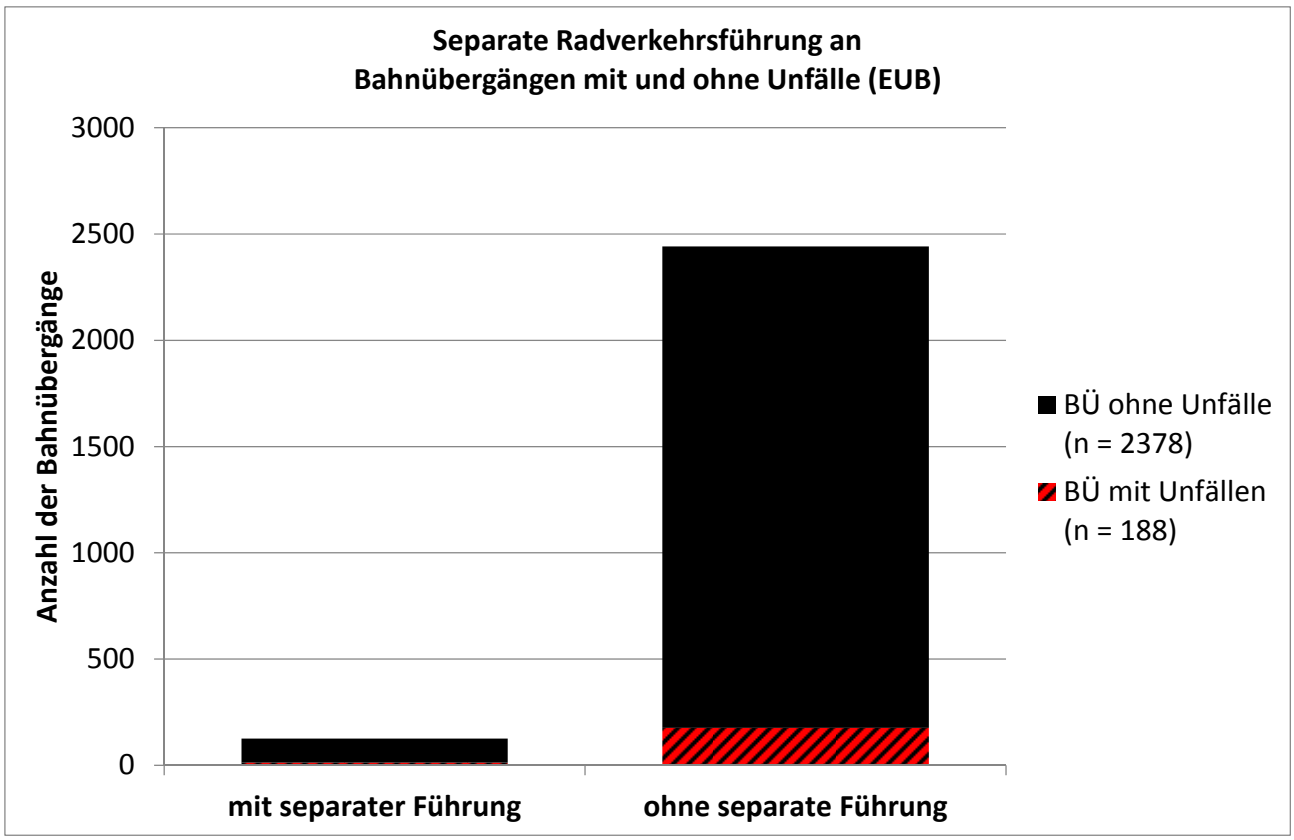
Anlage 12 Fahrstreifenanzahl an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives



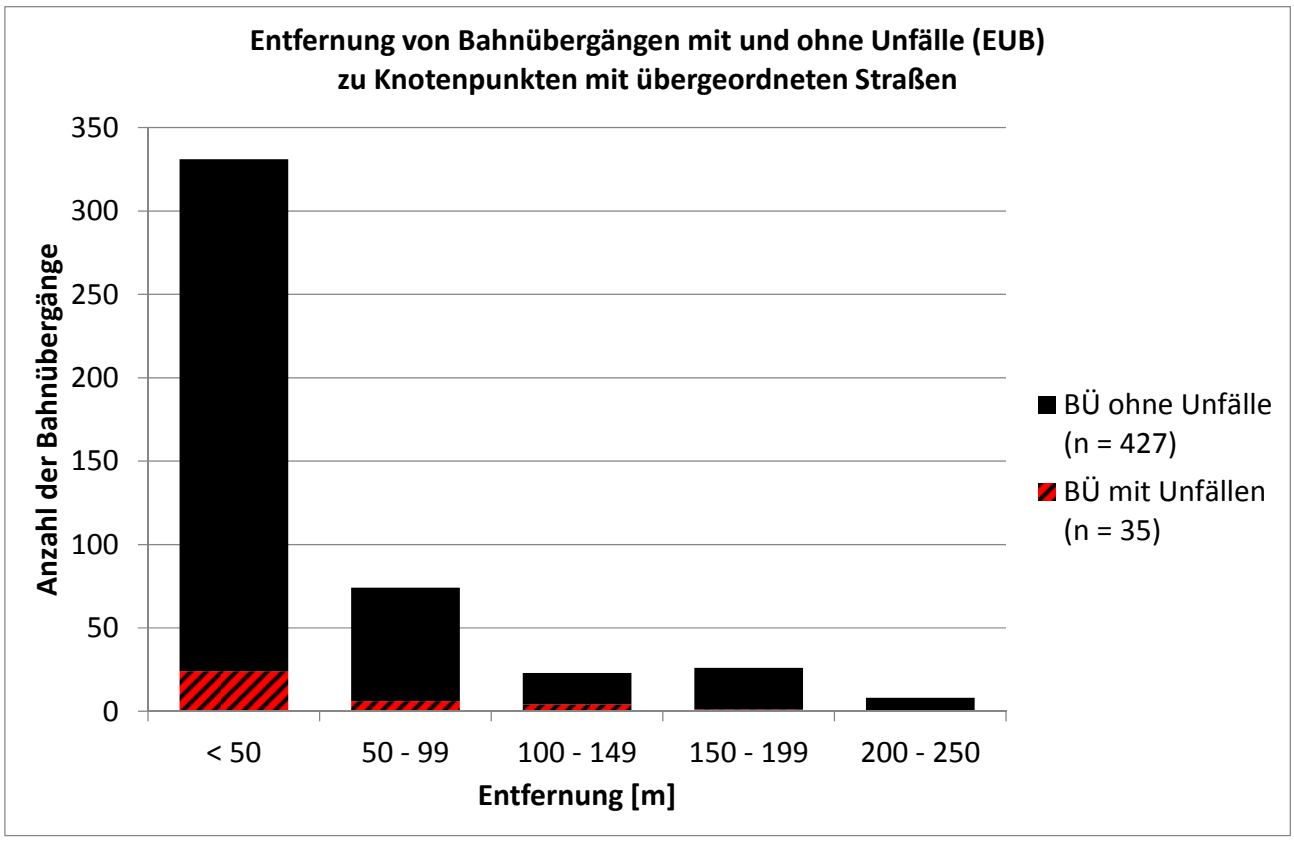
Anlage 13 Gehwege an den Bahnübergängen im Gesamtkollektiv

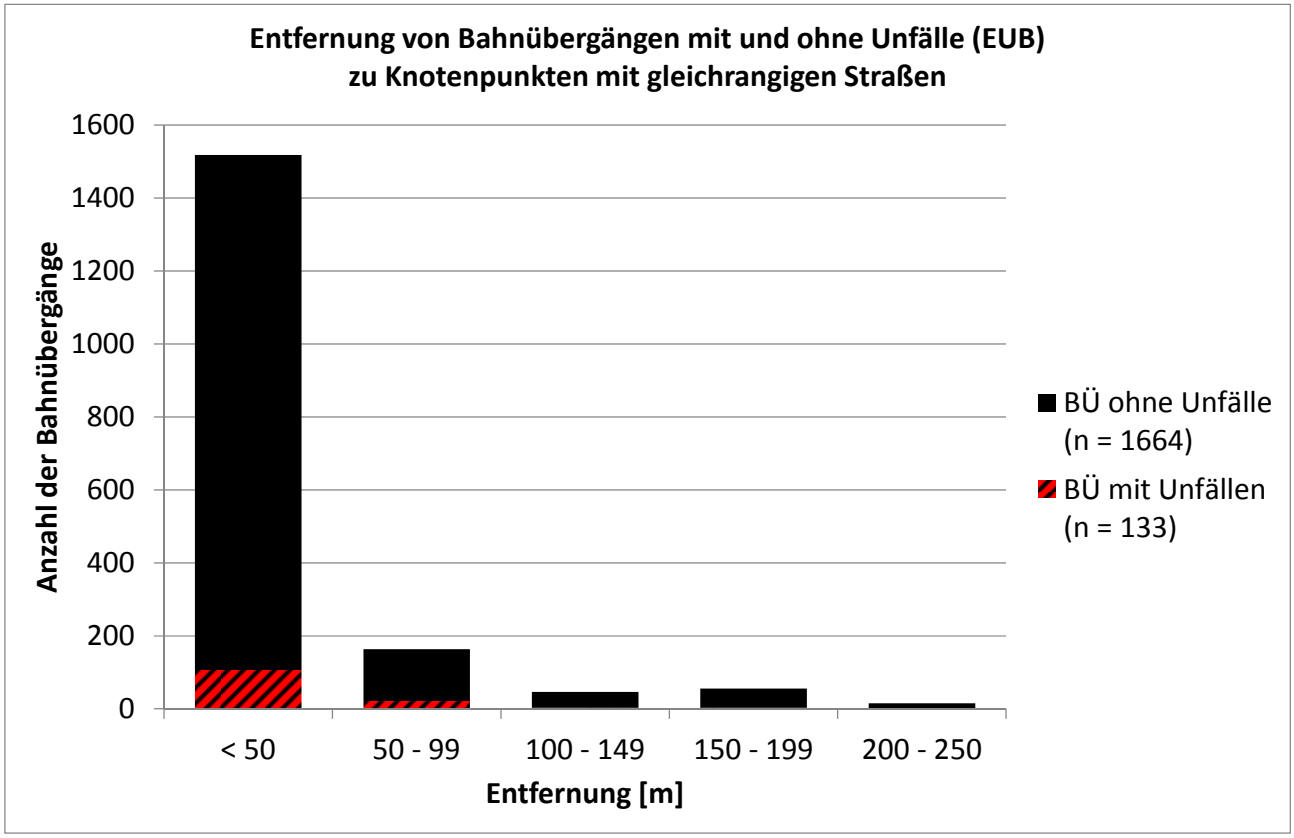


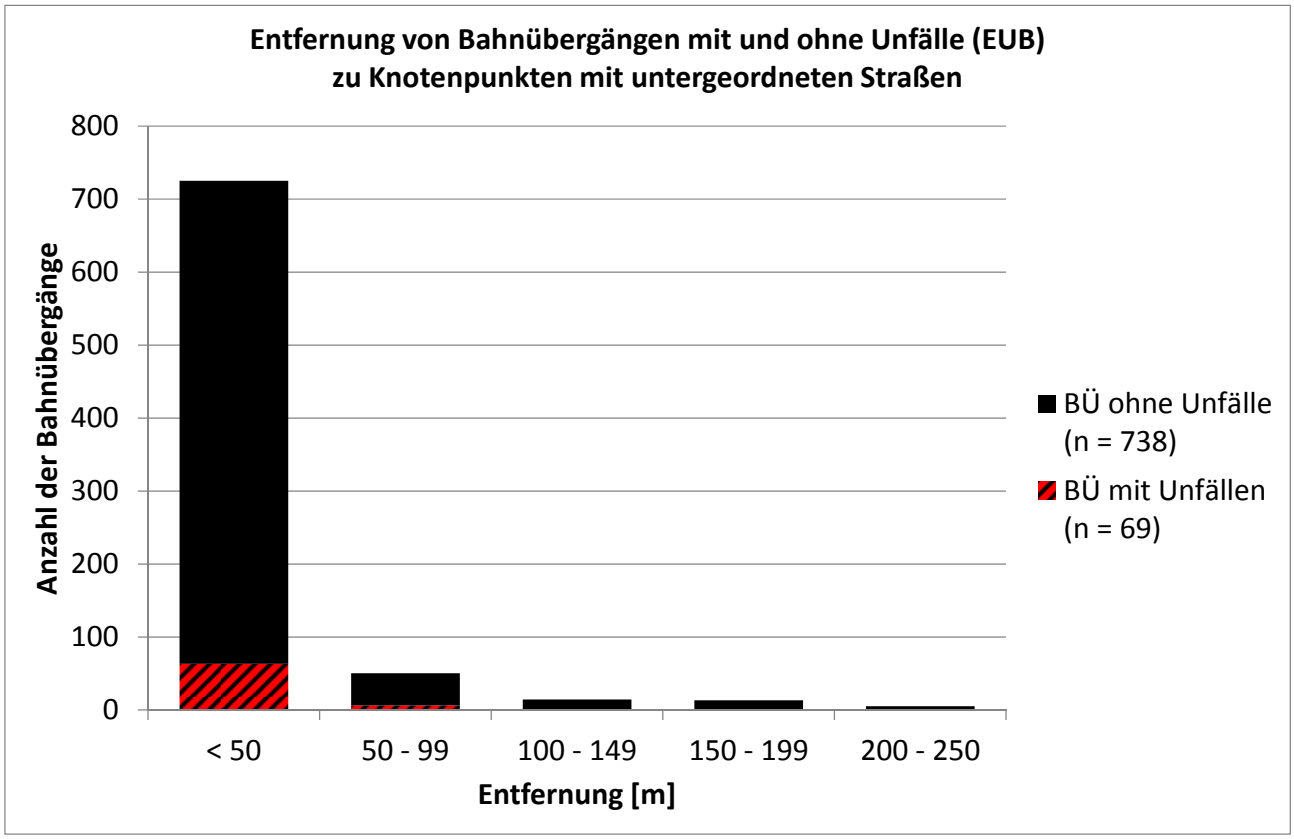
Anlage 14 Separate Radverkehrsführung an den Bahnübergängen des Gesamtkollektives



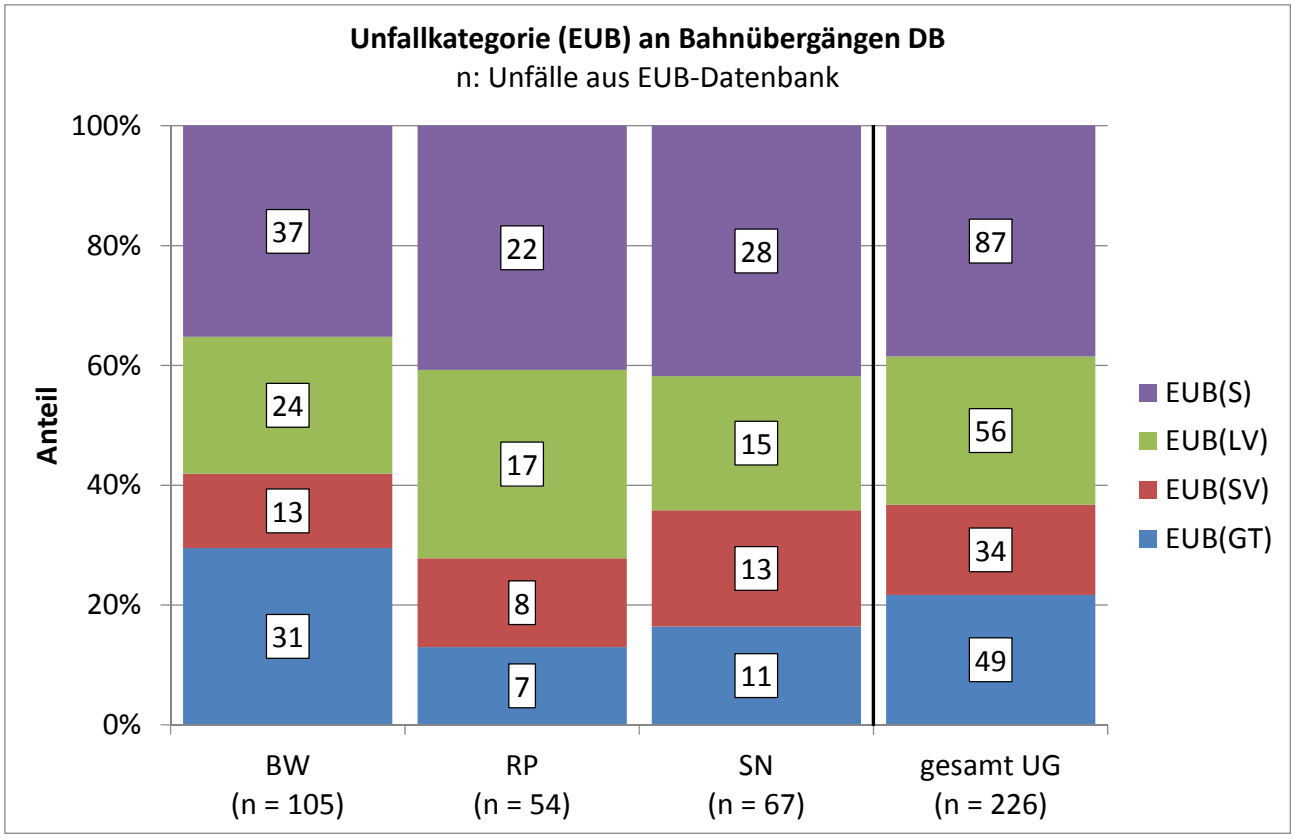
Anlage 15 Entfernung der Bahnübergänge des Gesamtkollektives zu Knotenpunkten mit übergeordneten, gleichrangigen und untergeordneten Straßen

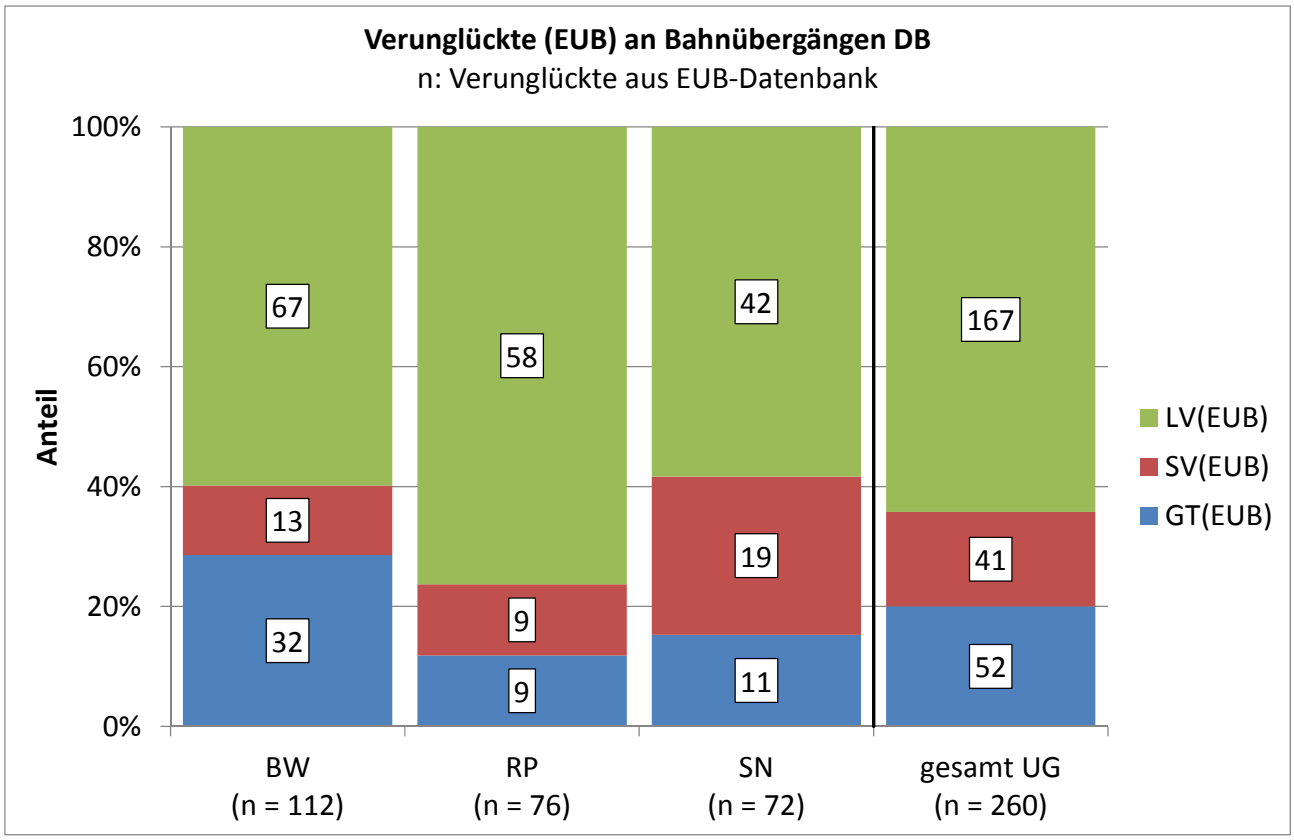




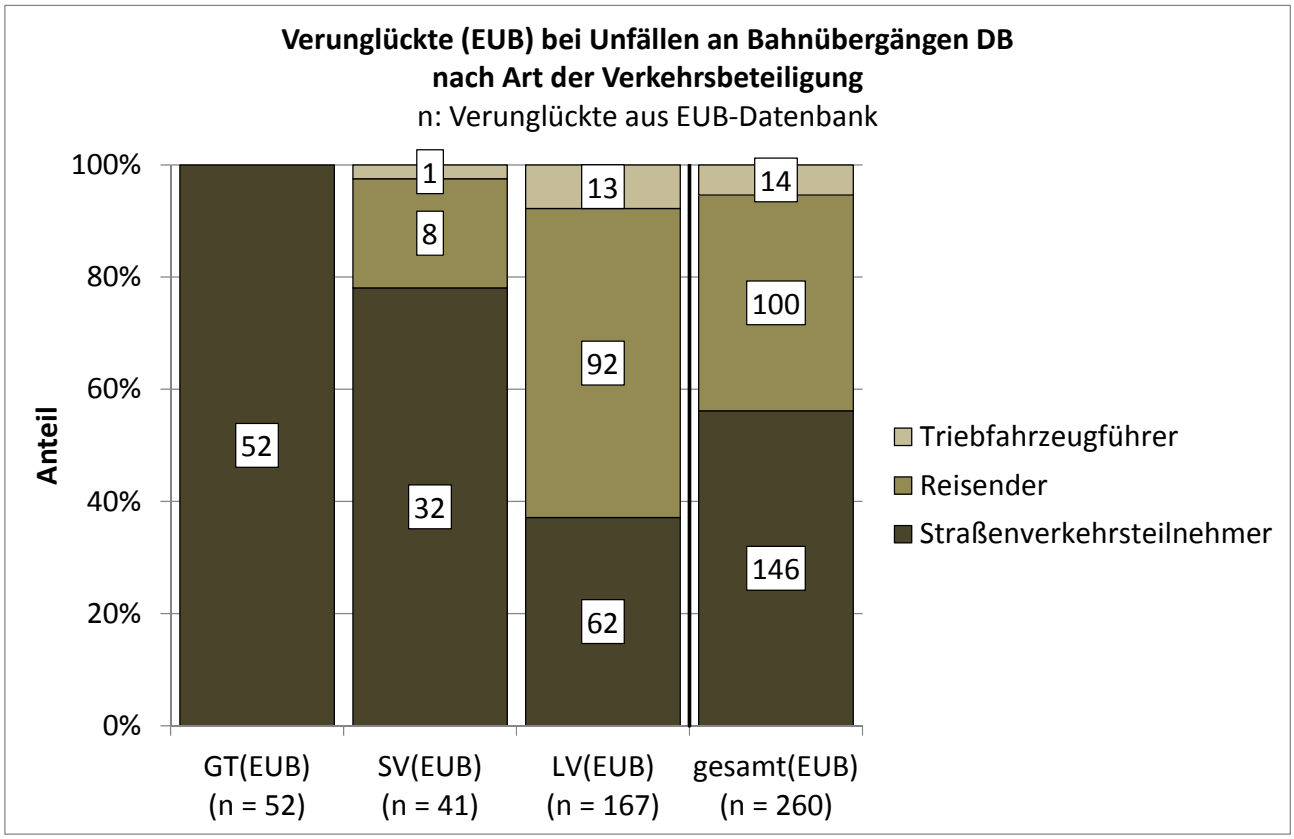

Entfernung von Bahnübergängen mit und ohne Unfälle (EUB)
zu Knotenpunkten mit untergeordneten Straßen
Anzahl der Bahnübergänge
800
700
600
500
400
300
200
100
0
< 50
50 - 99
100 - 149
150 - 199
200 - 250
Entfernung [m]
BÜ ohne Unfälle (n = 738)
BÜ mit Unfällen (n = 69)

Anlage 16 Unfallkategorien (EUB) und Verunglückte (EUB) an Bahnübergängen DB des Gesamtkollektives

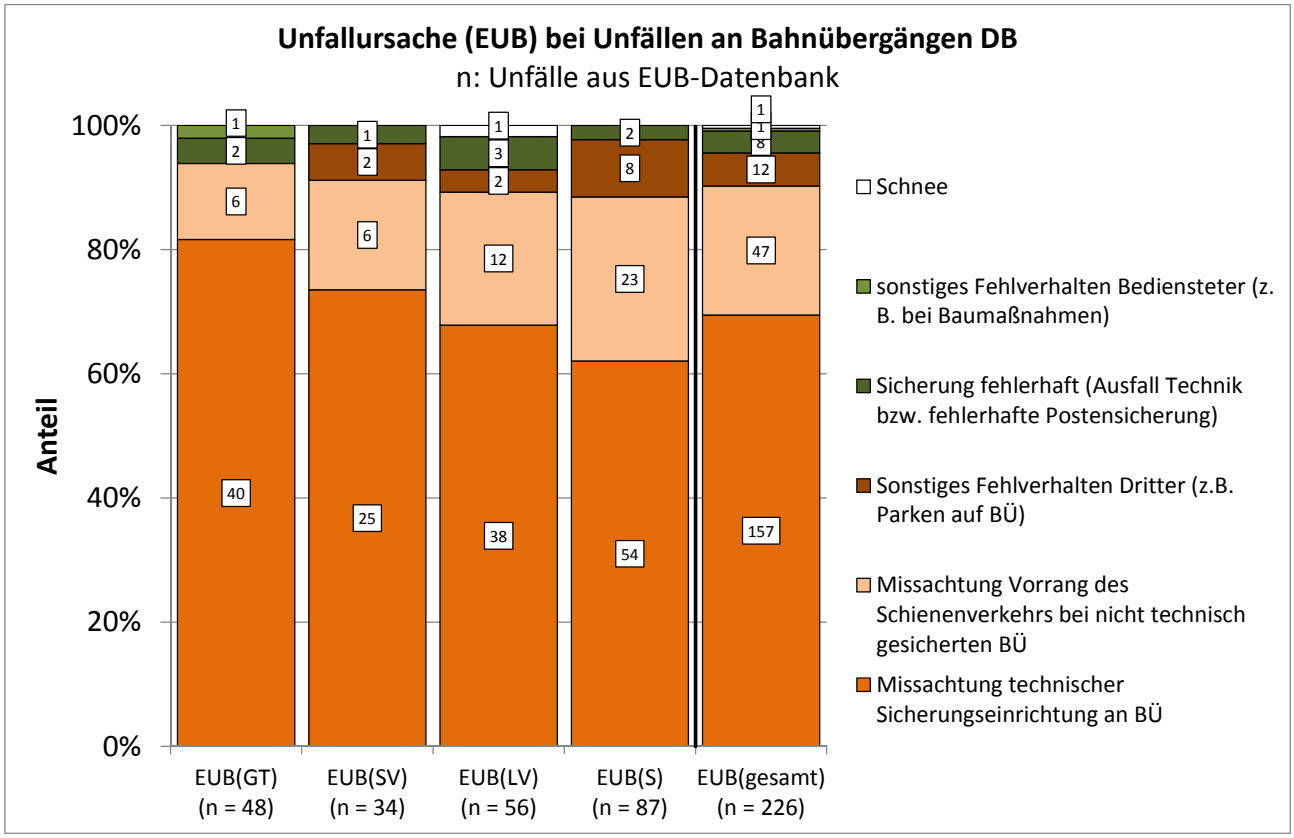




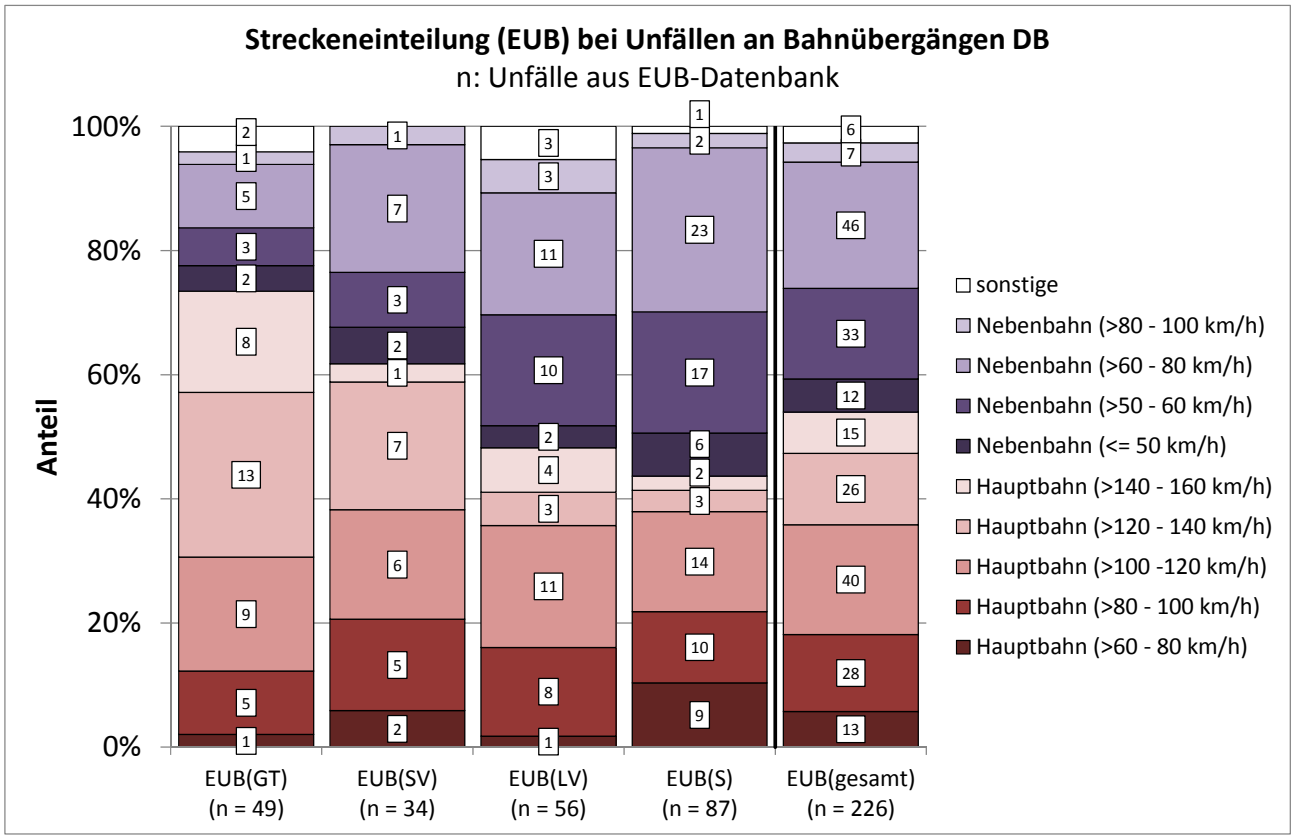
Anlage 17 Art der Verkehrsbeteiligung (EUB) bei Unfällen an Bahnübergängen DB des Gesamtkollektives



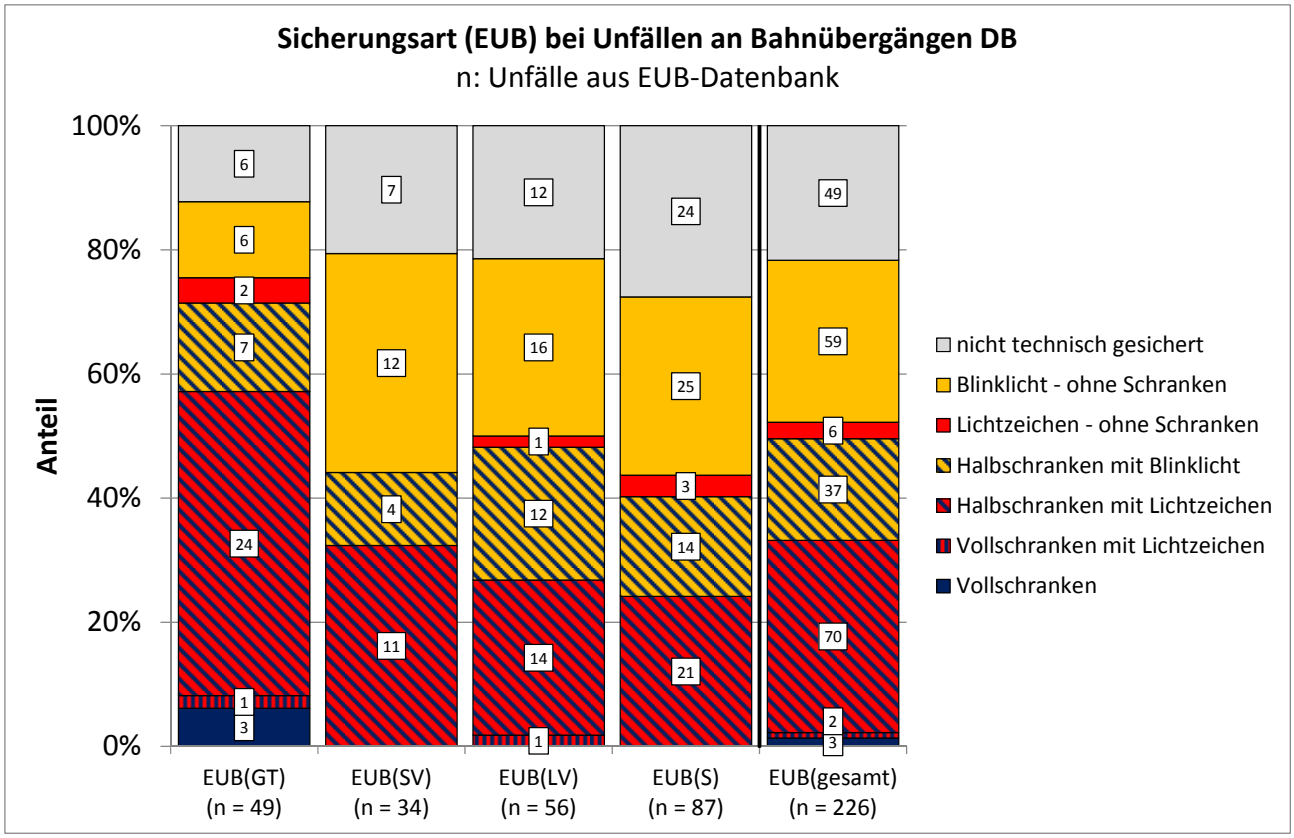
Anlage 18 Unfallursache (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB



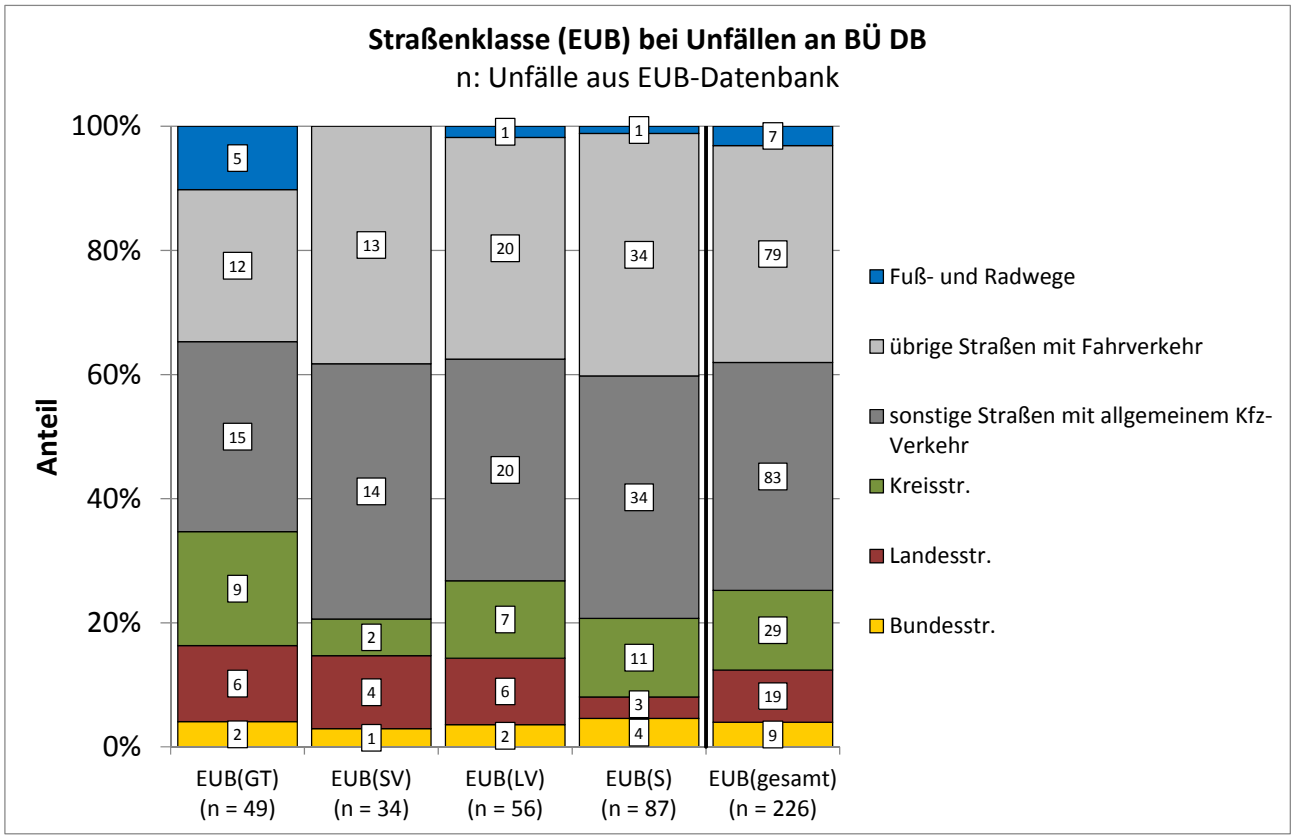
Anlage 19 Strecken (Schienenwege-Kategorie) (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Gesamtkollektives



Anlage 20 Sicherungsart (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Gesamtkollektives



Anlage 21 Straßenklasse (EUB) der Unfälle an Bahnübergängen DB des Gesamtkollektives



Anlage 22 Quantitatives Teilmodell der Unfälle mit Personenschaden (U(P)) für technisch gesicherte Bahnübergänge

technisch gesicherte Bahnübergänge (n = 473; U(P) EUB 2005-2011 = 42)

	Parameter	Koeffizient[a]	Standard-fehler	95%-K.-intervall Min	Max	p[b]	Neg.-Bin.-Verteilung Vert.-Param.	Pearson-χ2	Poisson-Verteilung Pearson-χ2	df	χ2/df
Nullmodell	k	-4,367 ****	0,1721	-4,549	-3,874	< .0001	2,5	481,729	588,667	472	1,247
Endmodell	k	-2,642 ****	0,3926	-3,256	-1,717	< .0001	0,1	469,068	473,219	467	1,013
	SiArt Vollschranke	-3,403 ****	0,8357	-5,041	-1,766	< .0001					
	SiArt Halbschranke	-2,248 ****	0,4695	-3,168	-1,328						
	SiArt Blinklicht/Lichtzeichen	0	.	.	.						
	K (Kurvigkeit Straße)	-1,069 ^{0,129}	0,7036	-2,448	0,31	0,069					
	vB 160 km/h	1,678 ****	0,4037	0,886	2,469	< .0001					
	vB 120 km/h	0,985 *	0,3995	0,202	1,768						
	vB 100 km/h	0	.	.	.						

[a] Signifikanz der Koeffizienten (Schätzung basierend auf der Neg.-Bin.-Verteilung); Wald-Test: * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; **** p ≤ 0,0001

[b] Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

$$\frac{\mathbf{U(P)_{techn_ges_B\ddot{U}}}}{\mathbf{B\ddot{U} \cdot a}} = \mathbf{0,071 \cdot e^{-3,403 \cdot SiArt - 1,069 \cdot K + 1,678 \cdot vB}}$$

mit	SiArt	Sicherungsart (Vollschranke=1; Halbschranke=0,66; Blinklicht/Lichtzeichen=0)	[-]
	K	Kurvigkeit (Straße; ≤ 250 m zum BÜ oder bis zu benachbarten gleich- oder höherrangigen KP)	[gon/m]
	vB	maximale Geschwindigkeit Bahn (über 120 bis 160 km/h=1; über 100 bis 120 km/h=0,587; bis 100 km/h=0)	[-]

Anlage 23 Quantitatives Teilmodell der Unfälle mit Sachschaden (U(S)) für technisch gesicherte Bahnübergänge

technisch gesicherte Bahnübergänge (n = 473; U(S) EUB 2005-2011 = 17)

	Parameter	Koeffizient[a]	Standard-fehler	95%-K.-intervall Min	Max	p[b]	Neg.-Bin.-Verteilung Vert.-Param.	Pearson-χ2	Poisson-Verteilung Pearson-χ2	df	χ2/df
Nullmodell	k	-5,272 ****	0,2381	-5,583	-4,649	< .0001	0	456	456	472	0,966

[a] Signifikanz der Koeffizienten (Schätzung basierend auf der Neg.-Bin.-Verteilung); Wald-Test: * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; **** p ≤ 0,0001

[b] Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Eine Beschreibung des Teilmodells in Form eines funktionalen Zusammenhangs ist nicht sinnvoll.

Anlage 24 Quantitatives Teilmodell der Unfälle mit Personenschaden (U(P)) für nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge ≤ 2.500 Kfz/24h

nicht technisch gesicherte Bahnübergänge mit Kfz-Verkehr ≤ 2.500 Kfz/24h (n = 567; U(P) EUB 2005-2011 = 23)

	Parameter	Koeffizient[a]	Standard-fehler	95%-K.-intervall Min	Max	p[b]	Neg.-Bin.-Verteilung Vert.-Param.	Pearson-χ2	Poisson-Verteilung Pearson-χ2	df	χ2/df
Nullmodell	k	-5,151 ****	0,222	-5,43	-4,56	< .0001	3	572,892	643	566	1,135
Endmodell	k	-3,978 ****	0,3787	-4,564	-3,08	< .0001	0	508,536	508,536	563	0,903
	StrOb unbefestigt	-1,188 ^{0,106}	0,7351	-2,629	0,253	< .05					
	StrOb befestigt	0	.	.	.						
	smax	-0,06 *	0,0263	-0,112	-0,009	< .05					
	Entf_KP	-0,02 ^{0,051}	0,0105	-0,041	5,40E-05	< .01					

[a] Signifikanz der Koeffizienten (Schätzung basierend auf der Neg.-Bin.-Verteilung); Wald-Test: * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; **** p ≤ 0,0001

[b] Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

$$\frac{\mathbf{U(P)_{nicht_techn_ges_BÜ}}}{\mathbf{BÜ \cdot a}} = \mathbf{0,019 \cdot e^{-1,188 \cdot StrOb - 0,06 \cdot smax - 0,02 \cdot Entf_KP}}$$

mit	StrOb	Straßenoberfläche (unbefestigt=1; befestigt=0)	[-]
	smax	Längsneigung (Straße)	[%]
	Entf_KP	Entfernung zum nächsten Knotenpunkt	[m]

Anlage 25 Quantitatives Teilmodell der Unfälle mit Sachschaden (U(S)) für nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge ≤ 2.500 Kfz/24h

nicht technisch gesicherte Bahnübergänge mit Kfz-Verkehr ≤ 2.500 Kfz/24h (n = 567; U(S) EUB 2005-2011 = 21)

	Parameter	Koeffizient[a]	Standard-fehler	95%-K.-intervall Min	Max	p[b]	Neg.-Bin.-Verteilung Vert.-Param.	Pearson-χ2	Poisson-Verteilung Pearson-χ2	df	χ2/df
Nullmodell	k	-5,242 ****	0,2245	-5,526	-4,646	< .0001	1,5	568,421	600	566	1,06
Endmodell	k	-4,562 ****	0,3053	-5,005	-3,808	< .0001	0,9	570,736	589,783	564	1,046
	StrOb unbefestigt	-1,345 ^{0,071}	0,745	-2,805	0,116	< .05					
	StrOb befestigt	0	.	.	.						
	smax	-0,061 *	0,0294	-0,119	-0,004	0,068					

[a] Signifikanz der Koeffizienten (Schätzung basierend auf der Neg.-Bin.-Verteilung); Wald-Test: * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; **** p ≤ 0,0001

[b] Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

$$\frac{\mathbf{U(S)_{nicht_techn_ges_BÜ}}}{\mathbf{BÜ \cdot a}} = \mathbf{0,01 \cdot e^{-1,345 \cdot StrOb - 0,061 \cdot smax}}$$

mit	StrOb	Straßenoberfläche (unbefestigt=1; befestigt=0)	[-]
	smax	Längsneigung (Straße)	[%]

Anlage 26 Quantitatives Teilmodell der Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) für nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge mit allg. Kfz-Verkehr (≤ 2.500 Kfz/24h)

nicht technisch gesicherte Bahnübergänge mit allg. Fahrverkehr ≤ 2.500 Kfz/24h (n = 370; U(P,S) EUB 2005-2011 = 34)

	Parameter	Koeffizient[a]	Standard-fehler	95%-K.-intervall Min	Max	p[b]	Neg.-Bin.-Verteilung Vert.-Param.	Pearson-χ2	Poisson-Verteilung Pearson-χ2	df	χ2/df
Nullmodell	k	-4,333 ****	0,1786	-4,527	-3,827	< .0001	0,9	370,641	401,294	369	1,088
Endmodell	k	-4,011 ****	0,2018	-4,251	-3,46	< .0001	0,3	369,594	380,197	367	1,036
	StrOb unbefestigt	-0,784 ^{0,14}	0,5307	-1,824	0,256	0,115					
	StrOb befestigt	0	.	.	.						
	Entf_KP	-0,005 ^{0,086}	0,0029	-0,011	0,001	0,134					

[a] Signifikanz der Koeffizienten (Schätzung basierend auf der Neg.-Bin.-Verteilung); Wald-Test: * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; **** p ≤ 0,0001

[b] Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

$$\frac{\mathbf{U(P,S)_{nicht_techn_ges_BÜ_Kfz}}}{\mathbf{BÜ \cdot a}} = \mathbf{0,018 \cdot e^{-0,784 \cdot StrOb - 0,005 \cdot Entf_KP}}$$

mit	StrOb	Straßenoberfläche (unbefestigt=1; befestigt=0)	[-]
	Entf_KP	Entfernung zum nächsten Knotenpunkt	[m]

Anlage 27 Quantitatives Teilmodell der Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) für nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge mit ausschließlich Fuß- und Radverkehr

nicht technisch gesicherte Bahnübergänge mit ausschließlich Fuß- und Radverkehr (n = 197; U(P,S) EUB 2005-2011 = 10)

	Parameter	Koeffizient[a]	Standard-fehler	95%-K.-intervall Min	Max	p[b]	Neg.-Bin.-Verteilung Vert.-Param.	Pearson-χ2	Poisson-Verteilung Pearson-χ2	df	χ2/df
Nullmodell	k	-4,927 ****	0,3673	-5,491	-4,051	< .0001	7	196,115	265,8	196	1,356
Endmodell	k	-4,397 ****	0,5143	-5,252	-3,236	< .0001	0,1	185,955	185,955	193	0,963
	StrB_KLS weitere	1,198 ^{0,122}	0,7752	-0,321	2,717	0,065					
	StrB_KLS D4 22,5t 8,0t/m (Standard)	0 .	.	.	.						
	smax	-0,064 ^{0,072}	0,0354	-0,133	0,006	0,09					
	Entf_KP	-0,031 ^{0,111}	0,0193	-0,069	0,007	< .01					

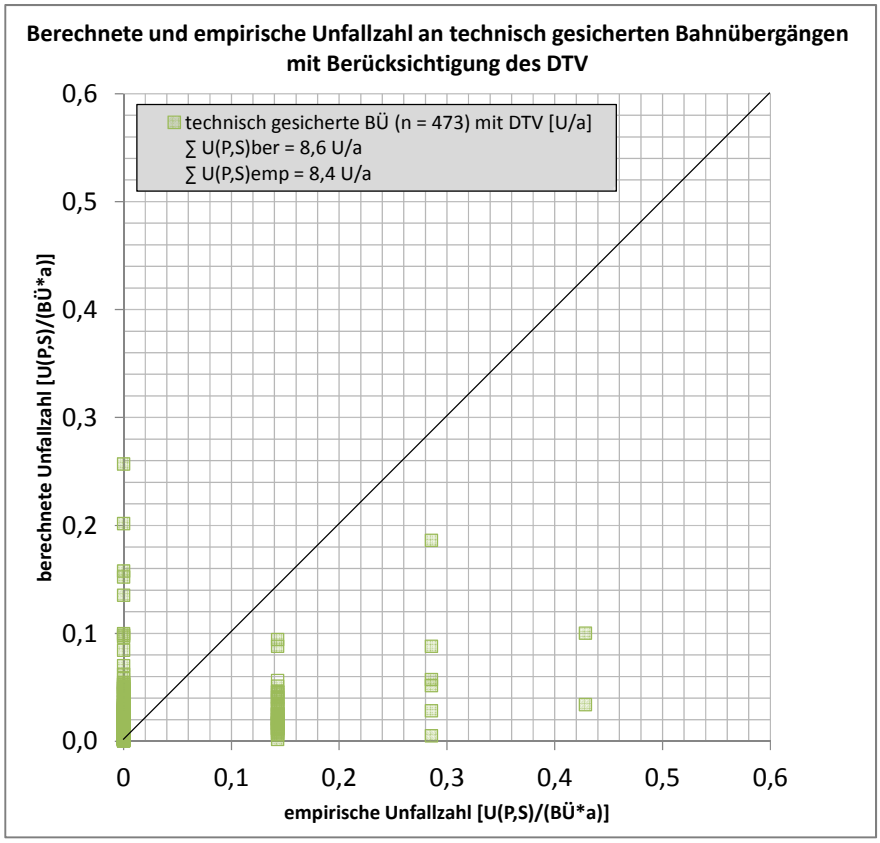
[a] Signifikanz der Koeffizienten (Schätzung basierend auf der Neg.-Bin.-Verteilung); Wald-Test: * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; **** p ≤ 0,0001

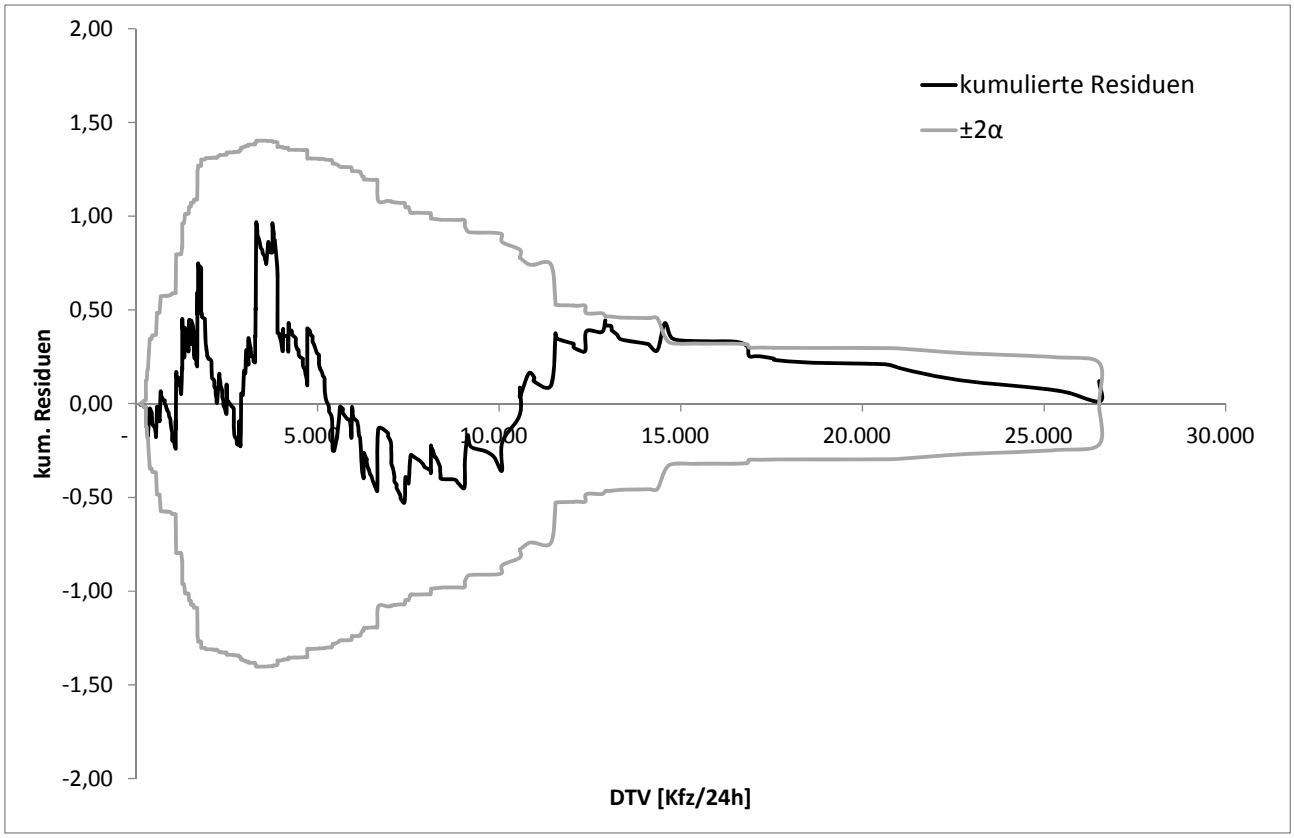
[b] Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

$$\frac{\mathbf{U(P,S)_{nicht_techn_ges_BÜ_Fg_Rf}}}{\mathbf{BÜ \cdot a}} = \mathbf{0,012 \cdot e^{1,198 \cdot StrB_{KLS} - 0,064 \cdot smax - 0,031 \cdot Entf_KP}}$$

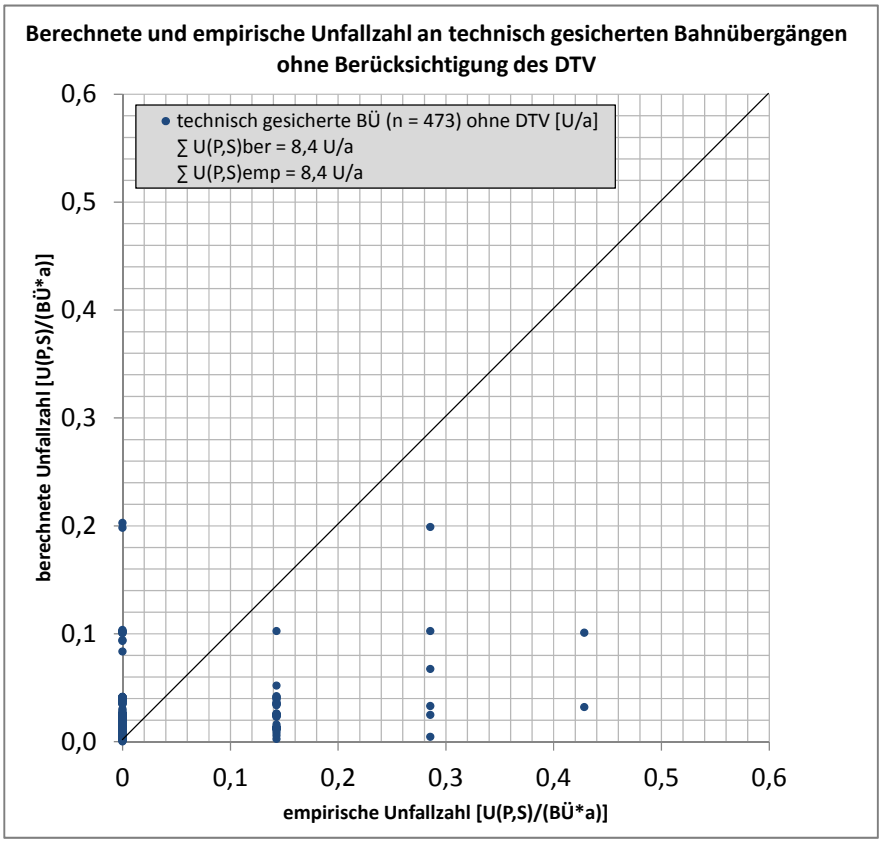
mit	StrB_KLS	Streckenklasse Bahn (D4 22,5t 8,0t/m (Streckenklasse 10)=0; weitere (Streckenklassen 1-9 und 11)=1)	[-]
	smax	Längsneigung (Straße)	[%]
	Entf_KP	Entfernung zum nächsten Knotenpunkt	[m]

Anlage 28 Modellanalyse des quantitativen Teilmodells für technisch gesicherte Bahnübergänge mit Berücksichtigung des DTV





Anlage 29 Modellanalyse des quantitativen Teilmodells für technisch gesicherte Bahnübergänge mit Berücksichtigung des DTV



Anlage 30 Quantitatives Teilmodell der Unfälle mit Personen- und Sachschaden (U(P,S)) für das gesamte Kollektiv der technisch gesicherten Bahnübergänge (n=1986)

technisch gesicherte Bahnübergänge mit Kfz-Verkehr von 0 bis 25.000 Kfz/24h (beob.Wertebereich) (n = 1986; U(P,S) EUB 2005-2011 = 181)

	Parameter	Koeffizient[a]	Standard-fehler	95%-K.-intervall Min	Max	p[b]	Ieg.-Bin.-Verteilun Vert.-Param.	Pearson-χ2	Poisson-Verteilung Pearson-χ2	df	χ2/df
Nullmodell	Konstante k	-4,341 ****	0,0875	-4,354	-4,011	< .0001	4	2030,935	2773,165	1991	1,393
q_Bahn	k	-4,266 ****	0,4862	-5,063	-3,157	< .0001	4	2025,008	2764,619	1984	1,393
	ln_q_Bahn	-0,02 [0,872]	0,1217	-0,258	0,219	0,864					
Endmodell	k	-4,984 ****	0,5754	-5,956	-3,7	< .0001	1,6	2003,732	2312,675	1981	1,167
	ln (q_Bahn)	0,271 *	0,1264	0,023	0,518	< .05					
	Vollschranke	-3,22 ****	0,4462	-4,095	-2,346	< .0001					
	Halbschranke	-1,449 ****	0,2279	-1,896	-1,003						
	Blinklicht/Lichtzeichen	0	.	.	.						
	FS_Anz >1 Fahrstreifen	1,013 **	0,3642	0,299	1,727	< .01					
	FS_Anz 1 Fahrstreifen	0									

[a] Signifikanz der Koeffizienten (Schätzung basierend auf der Neg.-Bin.-Verteilung); Wald-Test: * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; **** p ≤ 0,0001

[b] Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

$$\frac{\mathbf{U(P,S)_{techn_ges_B\ddot{U}}}}{\mathbf{B\ddot{U}\cdot a}} = \mathbf{0,007\cdot q_Bahn^{0,271}\ e^{-3,22\cdot SiArt+1,012\cdot FS_Anz}}$$

mit	q_Bahn	Schienenverkehrsstärke	[Fz/24h]
	SiArt	Sicherungsart (Vollschranke=1; Halbschranke=0,45; Blinklicht/Lichtzeichen=0)	[-]
	FS_Anz	Anzahl Fahrstreifen (Anzahl Fahrstreifen>1=1,013; Anzahl Fahrstreifen≤1=0)	[-]

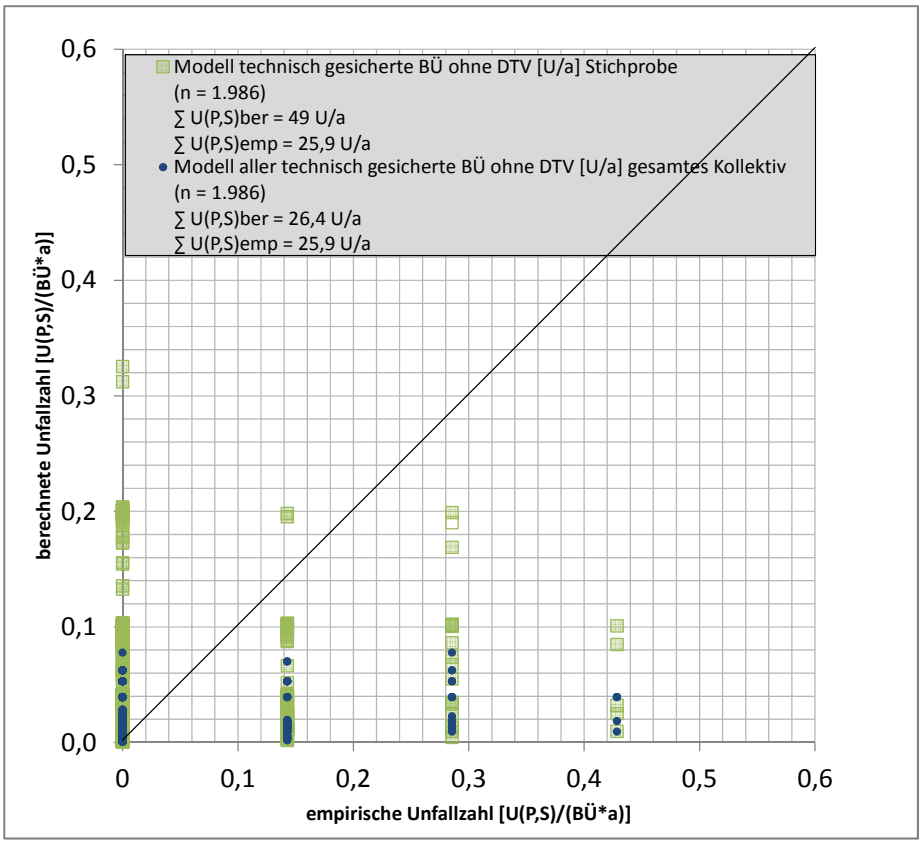
Aus den Ergebnissen der Modellierung lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Durch das Endmodell werden 58% (1-((1-1,167)/(1-1,393))=0,58) der im Nullmodell enthaltenen Varianz erklärt.
- Im Endmodell weist die Expositionsgröße Schienenverkehrsstärke (q_Bahn) einen degressiv positiven Einfluss auf das Unfallgeschehen an technisch gesicherten Bahnübergängen auf. Es ist anzumerken, dass zwischen der Sicherungsart (SiArt) und der Schienenverkehrsstärke eine Korrelation mittlerer Stärke besteht (vgl. Kapitel 5.1.2, Tabelle 7). Da aber auch ohne die Schienenverkehrsstärke (q_Bahn) keine genauere Schätzung der Koeffizienten für die Sicherungsart (SiArt) möglich wäre (ohne die Schienenverkehrsstärke würden die Koeffizienten der Sicherungsart einen Teil der Schienenverkehrsstärke erklären; siehe Problematik DTV (Kapitel 5.1.2)), wurde dieser Wirkungszusammenhang zunächst trotzdem abgebildet.
- Die Expositionsgröße durchschnittlich täglicher Verkehr (DTV_Kfz) konnte nicht geprüft werden, da nicht für alle Fälle entsprechende Daten vorlagen.
- Technisch gesicherte Bahnübergänge mit Blinklicht oder Lichtzeichen weisen im Vergleich zu Bahnübergängen mit Halbschranke ein um den Faktor 4,3 (= 1/e(-3,22•0,45)) und im Vergleich zu Bahnübergängen mit Vollschranke ein um den Faktor 25 (= 1/e(-3,22•1)) höheres Unfallrisiko auf (SiArt). Dass die Sicherungsart (SiArt) aufgrund starker Korrelation einen Teil des durchschnittlich täglichen Verkehr (DTV_Kfz) erklärt, ist nicht auszuschließen (vgl. Kapitel 5.1.2, Tabelle 7).
- Bahnübergänge im Zuge von Straßen mit mehr als einem Fahrstreifen haben im Vergleich zu Bahnübergängen im Zuge von Straßen mit maximal einem Fahrstreifen (auch Fuß- und Radwege) ein um den Faktor 2,8 (e(1,013•1)) höheres Unfallrisiko. Dass die Anzahl der

Fahrstreifen (FS_Anz) einen Teil des durchschnittlich täglichen Verkehr (DTV_Kfz) erklärt, ist wahrscheinlich (vgl. Kapitel 5.1.2, Tabelle 7).

- Die Kurvigkeit im Verlauf der Straße erwies sich als nicht signifikant (vgl. Kapitel 5.1.3, Abschnitt „Unfalldichtemodell für technisch gesicherte Bahnübergänge ohne DTV_Kfz“).
- Die maximale Geschwindigkeit Bahn (vB; starke Korrelation mit der Schienenverkehrsstärke (q_Bahn)), erwies sich auf Basis dieser Stichprobe als nicht signifikant (vgl. Kapitel 5.1.3, Abschnitt „Unfalldichtemodell für technisch gesicherte Bahnübergänge ohne DTV_Kfz“).

Die Ergebnisse der Gegenüberstellung der empirischen und berechneten Unfallzahlen zeigt nachfolgende Abbildung.



Vergleicht man das Modell nach Kapitel 5.1.3, Abschnitt „Unfalldichtemodell für technisch gesicherte Bahnübergänge ohne DTV_Kfz“ mit dem o.g. Modell auf Basis aller technisch gesicherten Bahnübergänge im Kollektiv, zeigt sich Folgendes:

- Die Gesamtunfallzahl wird mit dem Modell nach Kapitel 5.1.3, Abschnitt „Unfalldichtemodell für technisch gesicherte Bahnübergänge ohne DTV_Kfz“ stark überschätzt. Dies ist aber plausibel, da die mittlere Unfallzahl innerhalb der Stichprobe, welche dem entsprechenden Modell zugrunde liegt, höher ist (0,12 U/BÜ*7a; vgl. Kapitel 5.1.3) als im gesamten Kollektiv der nicht technisch gesicherten Bahnübergänge (0,09 U/BÜ*7a). Das Modell, welches auf Basis aller technisch gesicherten Bahnübergänge erstellt wurde, schätzt die Gesamtunfallzahl genau.
- Mit Ausnahme der Bahnübergänge mit einer empirischen Unfallzahl von Null, wird die Unfallzahl durch beide Modelle deutlich unterschätzt, was auf die Vielzahl der Bahnübergänge ohne registriertes Unfallgeschehen zurückzuführen ist. Die Unterschätzung in diesen Fällen ist mit dem Modell für alle technisch gesicherten Bahnübergänge deutlich höher.
- Beide Modelle prognostizieren Unfälle an Bahnübergängen, für die im Untersuchungszeitraum keine Unfälle registriert wurden, was darauf zurückzuführen ist, dass für Bahnübergänge, die „unfallbegünstigende“ Infrastrukturmerkmale aufweisen, auch ein Auftreten von Unfällen

ermittelt wird. Diese Überschätzung liegt im Bereich des Modells nach Kapitel 5.1.3, Abschnitt „Unfalldichtemodell für technisch gesicherte Bahnübergänge ohne DTV_Kfz“ höher.

Anlage 31 Quantitativen Teilmodells für nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge mit und ohne auffällige Residuen

nicht technisch gesicherte Bahnübergänge mit Kfz-Verkehr ≤ 2.500 Kfz/24h (n = 567; U(P,S) EUB 2005-2011 = 44)

	Parameter	Koeffizient[a]	Standard-fehler	95%-K.-intervall Min	Max	p[b]	Neg.-Bin.-Verteilung Vert.-Param.	Pearson-χ2	Poisson-Verteilung Pearson-χ2	df	χ2/df
Nullmodell	k	-4,502 ****	0,1616	-4,663	-4,029	< .0001	1,9	568,101	652	566	1,152
Endmodell	k	-3,93 ****	0,1862	-4,139	-3,409	< .0001	0,4	566,512	585,556	563	1,04
	StrK_KLS Fuß- und Radweg	-0,483 ^{0,239}	0,4101	-1,286	0,321	0,173					
	StrK_KLS allg. Fahrverkehr	0	.	.	.						
	StrOb unbefestigt	-1,203 *	0,5308	-2,243	-0,162	< .01					
	StrOb befestigt	0	.	.	.						
	Entf_KP	-0,006 *	0,0028	-0,012	-0,001	< .05					

[a] Signifikanz der Koeffizienten (Schätzung basierend auf der Neg.-Bin.-Verteilung); Wald-Test: * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; **** p ≤ 0,0001

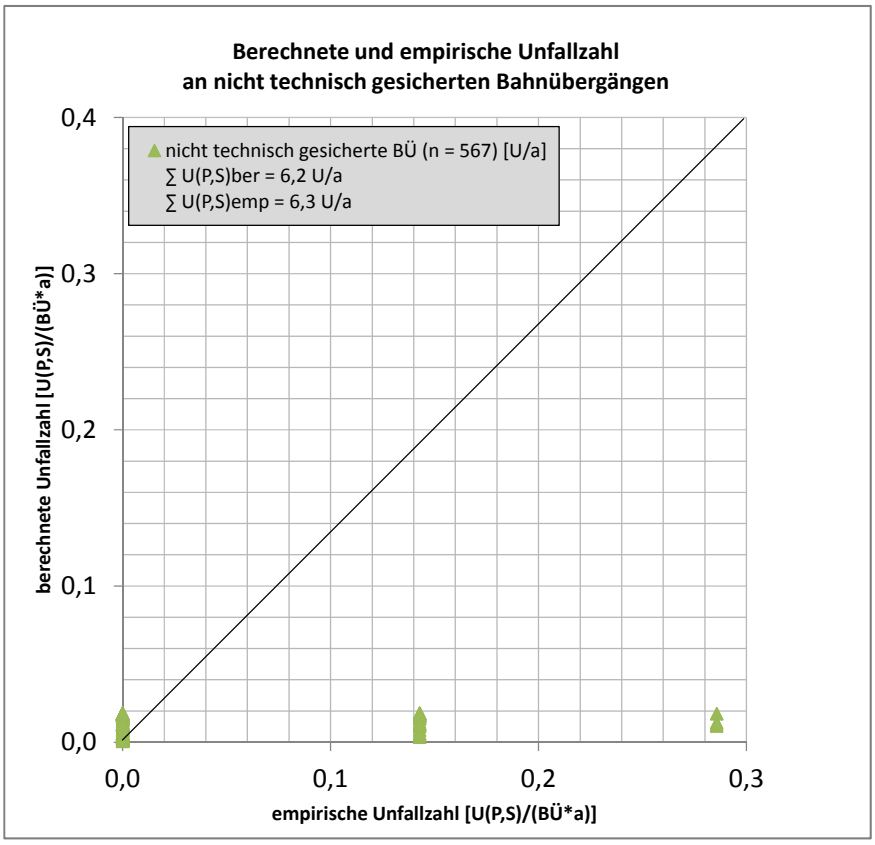
[b] Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Endmodell ohne Hebel-werte	k	-3,944 ****	0,1861	-4,153	-3,424	< .0001	0,4	561,018	580,045	553	1,049
	StrK_KLS Fuß- und Radweg	-0,49 ^{0,234}	0,4115	-1,297	0,316	0,168					
	StrK_KLS allg. Fahrverkehr	0	.	.	.						
	StrOb unbefestigt	-1,222 *	0,5317	-2,264	-0,18	< .01					
	StrOb befestigt	0	.	.	.						
	Entf_KP	-0,006 ^{0,076}	0,0031	-0,012	0,001	0,103					

a Signifikanz der Koeffizienten (Schätzung basierend auf der Neg.-Bin.-Verteilung); Wald-Test: * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; **** p ≤ 0,0001

b Signifikanz der Modelleffekte (basierend auf dem Likelihood-Ratio-Test)

Anlage 32 Modellanalyse des quantitativen Teilmodells für nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge



Anlage 33 Herleitung Wirksamkeit Sicherungsarten (Schöne, 2013, S. 73ff)

Zur Wirksamkeit der Sicherungsarten existieren zahlreiche Untersuchungen im In- und Ausland, allerdings mit unterschiedlichen Bezugsgrößen und Zielstellungen.

Bei ausländischen Quellen ist bei einer Ableitung aus dem Unfallgeschehen zudem zu beachten, dass insbesondere für Bahnübergänge mit Vollabschluss unterschiedliche Einsatzvorschriften hinsichtlich Gefahrenraumfreimeldung und Signaldeckung existieren, die in Deutschland nach gegenwärtiger Vorschriftenlage (EBO, 2008; DB Netz, 2004; DB Netz, 2008b) zwingend erforderlich sind.

Naturgemäß weisen die Sicherungsarten aufgrund der unterschiedlichen Intensität ihrer dargebotenen Reize eine abgestufte Sperrwirkung auf. Während die passive Sicherung wegen des meist erforderlichen bewussten Suchverhaltens der Straßenverkehrsteilnehmer als schwächste Form zu betrachten und daher am anfälligsten für unbeabsichtigtes Fehlverhalten ist, tritt diese Art des Fehlverhaltens bei Lichtsignalen seltener auf. Allerdings sind diese beiden Sicherungsarten praktisch unwirksam gegenüber absichtlichem Fehlverhalten. Halbschranken setzen aufgrund der eindeutigen Sperrwirkung die Häufigkeit des unbeabsichtigten Fehlverhaltens weiter herab und erschweren beabsichtigtes Fehlverhalten. Ein Vollabschluss schließt sowohl unbeabsichtigtes als auch beabsichtigtes Fehlverhalten weitgehend aus und kann damit als wirksamste Sicherungsart bezeichnet werden. (Amann et al., 1981)

Als erste Orientierung sollen die Werte von Müller (1965) betrachtet werden, der die Wirksamkeit verschiedener Sicherungsarten von Bahnübergängen der Deutschen Reichsbahn auf Basis von Schätzungen und früheren Erkenntnissen beurteilte. Er vernachlässigte dabei technische Ausfälle und betrachtete nur das fahrlässige und vorsätzliche Fehlverhalten der Straßenverkehrsteilnehmer. Die für die vorliegende Untersuchung relevanten Ergebnisse (nur vollautomatische Anlagen ohne Mitwirkung von Schrankenwärtern) sind in Tabelle 40 dargestellt.

Tabelle 40: Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten nach Sicherungsarten (Müller, 1965)

Sicherungsart	Fehlerwahrscheinlichkeit
Übersicht	10^{-1}
Blinklichter	10^{-2}
Halbschranken	10^{-3}
Vollabschluss	10^{-4}

Müller (1965) ging von einer Abstufung des Fehlverhaltens zwischen den Sicherungsarten in Höhe jeweils einer Zehnerpotenz aus. Allerdings differenzierte er nicht zwischen motorisierten und nichtmotorisierten Straßenverkehrsteilnehmern. Deshalb soll von einer Geltung der Werte nur für Fahrer motorisierter Straßenfahrzeuge ausgegangen werden, da das Verhalten von Radfahrern und Fußgängern erheblich davon abweicht. Die Schätzung von 10^{-4} für den Vollabschluss dürfte allerdings mindestens eine Zehnerpotenz zu hoch angesetzt sein, da andernfalls je 10 000 Straßenfahrzeuge ein Schrankendurchbruch oder ein eingeschlossenes Straßenfahrzeug zu verzeichnen wären, was der Lebenswirklichkeit widerspricht. Allerdings war die Angabe zu dieser Sicherungsart ausdrücklich rein theoretischer Natur, da automatisierte Bahnübergänge mit Vollabschluss (ohne Schrankenwärter) zum damaligen Zeitpunkt nicht existierten.

Im Rahmen des von Berg und Oppenlander (1969) vorgestellten Priorisierungsverfahrens zur Erhöhung der Sicherheit an US-amerikanischen Bahnübergängen wurde auch die Wirksamkeit verschiedener Sicherungsarten (nicht-reflektierende Andreaskreuze, reflektierende Andreaskreuze, Blinklichter, Halbschranken) für Kraftfahrzeuge untersucht. Die Angaben wurden aus der Unfallhäufigkeit abgeleitet und erfolgten relativ zur passiven Sicherung mit nicht-

reflektierenden Andreaskreuzen. Bezieht man die Angaben auf reflektierende Andreaskreuze, die in Deutschland als Standard gelten, können folgende Verhältnisse abgeleitet werden:

- Blinklichter sind etwa um den Faktor 10 wirksamer als eine passive Sicherung,
- Halbschranken sind etwa um den Faktor 2,5 wirksamer als Blinklichter.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen verglich die Wirksamkeit von Blinklichtern und Lichtzeichen an Bahnübergängen. Neben der Feststellung, dass hinsichtlich der Beachtung kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen beiden Erscheinungsbildern besteht, können aus der Untersuchung konkrete Fehlverhaltensquoten entnommen werden. Die Missachtungsquote bei roten Blinklichtern bzw. roten Lichtzeichen lag zwischen $2 \cdot 10^{-2}$ und $6 \cdot 10^{-2}$. Dabei wurden nur Pkw berücksichtigt, die bei der Einschaltung des Blinklichts bzw. Lichtzeichens einen Abstand vom Bahnübergang hatten, der deutlich größer war als der Anhalteweg. (Erke und Wimber, 1980)

In der Untersuchung von Amann, Körner und Kröh (1981) zum Verhalten von Straßenverkehrsteilnehmern an Bahnübergängen finden sich ebenfalls konkrete Fehlverhaltensquoten. Wegen fehlender Angabe der Rahmenbedingungen zu den übrigen beobachteten Sicherungsarten kann allerdings nur der Wert für Halbschranken verwendet werden. Für die absichtliche Missachtung geschlossener Halbschranken durch motorisierte Straßenverkehrsteilnehmer wurde eine relative Häufigkeit von 10^{-3} ermittelt.

In den wahrnehmungspsychologischen Betrachtungen von Raslear (1996) wurden ebenfalls Unterschiede zwischen den Sicherungsarten analysiert. Dabei wurde die Effektivität aus einem Vergleich der beobachteten Unfallhäufigkeit mit der theoretischen Begegnungshäufigkeit berechnet. Da in diesen Werten auch die Unabwendbarkeit enthalten ist, können die absoluten Werte hier nicht verwendet werden. Die passive Sicherung wurde zudem als komplett unwirksam eingestuft, was angesichts zahlreicher genteiliger Untersuchungen nicht realistisch erscheint. Deshalb kann nur die relative Abstufung zwischen der Wirksamkeit von Halbschranken gegenüber Blinklichtern übernommen werden, für die ein Faktor von 10 angegeben wurde.

Eine quantitative Unterscheidung zwischen Kraftfahrern sowie Fußgängern und Radfahrern wurde von Heilmann (1984) vorgenommen, der das Verhalten bei verschiedenen Sicherungsarten beobachtete. Die Werte für gefährliches Fehlverhalten (d. h. ohne Verstöße wie Rotlichtmissachtung bei noch geöffneten Schranken, die sich nicht unmittelbar gefährlich auswirken) sind in Tabelle 41 dargestellt.

Tabelle 41: Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten nach Sicherungsarten (Heilmann, 1984)

Sicherungsart	**Fehlhandlungswahrscheinlichkeit**	
	Kraftfahrzeuge	Radfahrer/Fußgänger
Pfeifsignale	$7 \cdot 10^{-1}$	–
Übersicht	$4 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$
Blinklichter/Lichtzeichen	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$
Halbschranken	$7 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-1}$
Vollabschluss	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-2}$

Heilmann (1984) interpretierte sämtliches gefährliche Fehlverhalten, das an aktiven Bahnübergängen beobachtet wurde, als absichtliche Fehlhandlungen der Straßenverkehrsteilnehmer. Bei den Werten für passive Bahnübergänge erfolgte keine Unterscheidung zwischen gefährlichem und ungefährlichem Fehlverhalten, sodass die Wahrscheinlichkeiten für das hier interessierende gefährliche Fehlverhalten geringer sein dürften. Bei der Sicherung durch Pfeifsignale, deren Probleme für motorisierte Straßenverkehrsteilnehmer bereits seit langer Zeit bekannt sind (vgl. Hanker, 1939; Klein und Raab, 1955; National

Transportation Safety Board, 1998), wurde vorausgesetzt, dass die Hälfte der Kraftfahrer ein Fenster geöffnet hat.

Das Blickverhalten von Straßenverkehrsteilnehmer an durch Übersicht gesicherten Bahnübergängen ist unter den hier benötigten idealen Umgebungsbedingungen schwer beobachtbar, weil der Blickzeitpunkt je nach individuellem Fahrverhalten stark variiert und die Bahnstrecke aus größerer Entfernung auch ohne erkennbare Kopfbewegungen weit übersehbar ist. Anhaltspunkte können jedoch verschiedene Studien liefern, bei denen die Sicht eingeschränkt und dadurch ein Überblicken der Bahnstrecke nur durch bewusste Kopfbewegungen möglich war.

So fand Rösiger (2006) heraus, dass an einem solchen Bahnübergang etwa ein Drittel aller motorisierten Straßenverkehrsteilnehmer nicht in die sichteingeschränkte Richtung schaute, obwohl dies für ein sicheres Überqueren objektiv notwendig gewesen wäre. Ähnliche Erkenntnisse erzielten Schöne et al. (2011b), wobei Fahrzeugführer hinsichtlich des sicheren Blickverhaltens eine Fehlhandlungsquote von $2 \cdot 10^{-1}$ bis $3 \cdot 10^{-1}$ aufwiesen. Allerdings beruhen die genannten Ergebnisse auf Beobachtungen der Kopfbewegungen ohne Annäherung von Schienenfahrzeugen, sodass real von einer niedrigeren Fehlverhaltenswahrscheinlichkeit ausgegangen werden muss.

Für die Fehlhandlungswahrscheinlichkeit von Fußgängern bei einer Sicherung durch Übersicht ohne zusätzliche akustische Signale nennt Stevens (2004) einen Wert von rund $2 \cdot 10^{-1}$. Hoefert (2012) beobachtete an Bahnübergängen von Fußwegen mit unterschiedlichen Sichtverhältnissen, rechnete Gruppeneffekte heraus (indem nur Personen mit einem zeitlichen Mindestabstand zum Vorgänger betrachtet wurden) und ermittelte hinsichtlich des jeweils örtlich erforderlichen Blickverhaltens Fehlverhaltensquoten von $2 \cdot 10^{-1}$ bis $7 \cdot 10^{-1}$. Hier gelten aufgrund der methodischen Schwierigkeiten, insbesondere der fehlenden Interaktionen mit Zügen, ebenfalls die oben genannten Einschränkungen.

In einer Untersuchung von Schöne (2011d) wurde das Verhalten von Fußgängern und Radfahrern an Bahnübergängen mit Halbschranken beobachtet. Unter Herausrechnung von Missachtungen während des Schließvorgangs und von Gruppeneffekten ergab sich dabei eine Fehlverhaltensquote von etwa $5 \cdot 10^{-2}$. Allerdings traten diese Missachtungen an Bahnübergängen mit sehr langen mittleren Vorsperrzeiten auf.

Trotz der vielfach postulierten Unwirksamkeit der Pfeifsignale belegen US-amerikanische Studien ihre Bedeutung für die Sicherheit an Bahnübergängen, wenn sie zusätzlich zur Übersicht eingesetzt werden. So wird von Raslear (1996) berichtet, dass sich die Unfallhäufigkeit in Florida nach dem Verbot von Pfeifsignalen verdreifachte. Theoretisch wird dies mit einer schnelleren Blickzuwendung in die Richtung begründet, aus der sich das Schienenfahrzeug nähert: Statt des Scannens eines Bereichs von 180° reduziert sich der Suchbereich auf etwa 10°, nachdem das Pfeifsignal wahrgenommen wurde. Eine Ursache hierfür kann allerdings im größeren Schallpegel der US-amerikanischen Schienenfahrzeuge liegen. Daher lässt sich diese Erkenntnis nur übertragen, wenn die Wahrnehmung der Pfeifsignale sichergestellt ist.

Für nichtmotorisierte Straßenverkehrsteilnehmer hat die Sicherung durch Pfeifsignale im Vergleich zu den motorisierten Straßenverkehrsteilnehmern größere Bedeutung. Nach Stevens (2004) erhöht das Fehlen von Pfeifsignalen ergänzend zur vorhandenen Übersicht das Risiko für nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer um den Faktor 10, nach Saccomanno und Lai (2004) für motorisierte Verkehrsteilnehmer etwa um den Faktor 1,3. Allerdings werden die Signale nicht immer von den Triebfahrzeugführern abgegeben, wofür von Stevens (2004) und Heilmann (1984) übereinstimmend Werte von etwa 10^{-1} angegeben werden. Damit kann die Wirksamkeit nicht besser als dieser Wert sein.

Bei einem Teil der Straßenverkehrsteilnehmer ist mit eingeschränkten Hörfähigkeiten (betrifft alle Verkehrsarten) bzw. Sehfähigkeiten (betrifft nur Fußgänger) zu rechnen, wodurch eine Sicherung mit nur akustischer bzw. nur optischer Wahrnehmung für die betreffenden Personen von vornherein unwirksam ist. Dieser Sachverhalt entzieht sich allerdings einer quantitativen Bewertung und ist im Sinne der Diskriminierungsfreiheit als qualitative Anforderung zu formulieren.

Tabelle 42: Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten nach Sicherungsarten (Überblick)

Quelle	motorisierte Verkehrsarten				nichtmotorisierte Verkehrsarten			
	Über-sicht	Licht-signale	Halbschranken	Vollab-schluss	Über-sicht	Licht-signale	Halbschranken	Vollab-schluss
Müller (1965)	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	-	-	-	-
Berg, Oppenlander (1969)		: 10	: 2,5	-	-	-	-	-
Erke und Wimber (1980)	-	$2 \cdot 10^{-2}$ ...$6 \cdot 10^{-2}$	-	-	-	-	-	-
Amann,Körner,Kröh (1981)	-	-	10^{-3}	-	-	-	-	-
Raslear (1996)		: 10	-	-	-	-	-	-
Heilmann (1984)	$4 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Rösiger (2006)	$2 \cdot 10^{-1}$ ...$3 \cdot 10^{-1}$	-	-	-	-	-	-	-
Stevens (2004)	$2 \cdot 10^{-1}$	-	-	-	-	-	-	-
Hoefert (2012)	$2 \cdot 10^{-1}$ ...$7 \cdot 10^{-1}$	-	-	-	-	-	-	-
Schöne (2011d)	-	-	-	-	-	-	$5 \cdot 10^{-2}$	-

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich in der Literatur insbesondere zu den motorisierten Straßenverkehrsteilnehmern ein relativ homogenes Bild zur Wirksamkeit der verschiedenen Sicherungsarten zeigt (Tabelle 42), obwohl mangels konkreter Angaben von einer gewissen Streuung der Rahmenbedingungen ausgegangen werden muss.

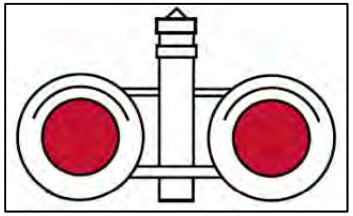
Im Wesentlichen bestätigen die Quellen die Größenordnungen der von Müller (1965) angenommenen Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten. Allerdings treffen diese Werte nicht für Fußgänger und Radfahrer zu; hier ist wegen der geringeren Akzeptanz der Sicherungseinrichtungen von einer höheren Grundgefährdung auszugehen.

Tabelle 43: Angenommene Fehlerwahrscheinlichkeiten im Entscheidungsbereich

Verkehrsart	**motorisiert**	**nichtmotorisiert**
passive Sicherung	10^{-1}	10^{-1}
Lichtsignale	10^{-2}	$6 \cdot 10^{-2}$
Halbschranken	10^{-3}	10^{-2}
Vollabschluss	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-3}$

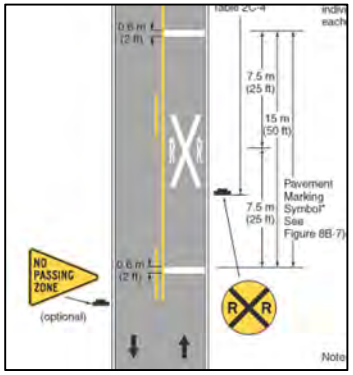
Vergleicht man die Fehlerwahrscheinlichkeiten aus Tabelle 43 mit den beobachteten Fehlhandlungshäufigkeiten aus der Literatur, ergibt sich eine relativ gute Übereinstimmung der Größenordnungen. Für motorisierte Straßenverkehrsteilnehmer entsprechen sie weitgehend den von Müller (1965) geschätzten Werten.

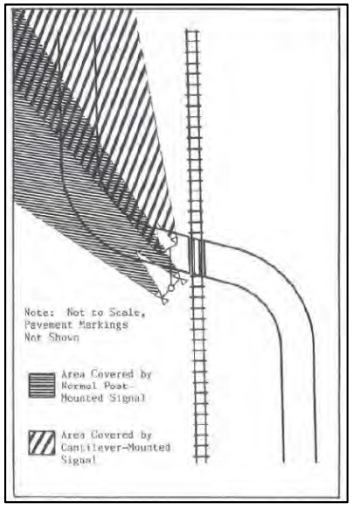
Anlage 34 Maßnahmen im Entscheidungsbereich - Sicherungsarten

Maßnahme	Beschreibung	Kosten			Effekt				
		Investitions-kosten (ca.) [€]	**Abschrei-bungs-zeitraum [2] [a]**	**Betriebs-kosten/ Jahr [2] [€/a]**	**Rückgang der Unfälle um [%]**	**Referenzfall**	**Quelle**	**Stich-proben-größe (BÜ)**	**Anzahl Studien**
Blinklichter (abwechselnd aufblinkende Signalgeber)  (UDOT, 2013)	Durch Zugdetektion wird Blinklicht am amerikanischen Bahnübergang ausgelöst.	3.000 [1] 6.000 [2] (*zusätzliche)* 117.500 [2] (*neu)* deutsche BÜ siehe LS	20	4.700	31 - 63 %	0-Fall	Saccomanno und Lai, 2005	k.A.	k.A
					63 - 70 %	0-Fall	US DOT, 1986	k.A.	3
					54 %	beschildert	Saccomanno et al., 2006	k.A.	10
					53 %	0-Fall	Park und Saccomanno, 2005a	6.014	1
					51 %	0-Fall	Park und Saccomanno, 2005b	k.A.	1
Lichtsignale (LS)		**300.000** [3] 400.000 [1] 235.000 [2]	20	**24.3000** [3] 9.400	64 %	unbekannt	Saccomanno et al., 2006	k.A.	4
Halbschranke (HS)		**400.000** [3] (*neu*) 110.000 [3] (*vorher LS*)	-	**32.400** [3]	72 %	beschildert	Saccomanno et al., 2006	k.A.	10
					52 %	Blinklicht	Saccomanno et al., 2006	k.A.	7
Vollabschluss (VS) (inklusive Gefahrenraumfreimeldeanlage)		**600.000** [3] (*neu*) 220.000 [3] (*vorher HS*)	-	**42.600** [3]	82 %	unbekannt	Federal Railroad Administra-tion, 2009	77	1
					83 - 96 %	0- Fall	US DOT, 1986	k.A.	3
					66 - 69 %	Blinklicht	US DOT, 1986	k.A.	3
					75 %	Halbschranke	Saccomanno et al., 2006	k.A.	5

[1] Angaben LISt, 2014
[2] Angaben Spahn, 2011
[3] Angaben zu eisenbahnseitigen Sicherungsarten beruhen auf Erfahrungswerten aus dem Planungsgeschäft von Um- und Neubauten

Anlage 35 Maßnahmen im Entscheidungsbereich - zur Erhöhung der Wahrnehmbarkeit

Maßnahme	Beschreibung	Kosten			Effekt				
		Investitions-kosten (ca.) [€]	Abschrei-bungs-zeitraum [2)] [a]	Betriebs-kosten/ Jahr [2)] [€/a]	Rückgang der Unfälle um [%]	Referenzfall	Quelle	Stich-proben-größe (BÜ)	Anzahl Studien
Dynamisches Anzeigesystem (Dialogdisplay) (bei passiven BÜ) (Rösiger, 2006)	Kraftfahrzeugführer erhalten eine verbale Rückmeldung über ihre angemessene oder zu hohe Geschwindigkeit.	7.500	-	-	*Rückgang der Gefährdungen: 20 %*	Nichttechnisch gesicherter BÜ ohne Dialogdisplay	Rösiger, 2006	1 BÜ, 6320 Querungen	1
Piktogramme  (MUTCD, 2003)		1.500 [1)] 1.700 [2)]	5	-	bis zu 50 %	unbekannt	Washington und Oh, 2006	33	1
					21 %	unbekannt	Saccomanno et al., 2006	k.A.	7

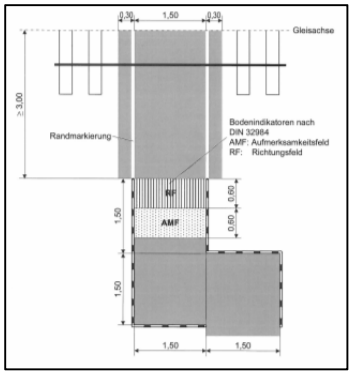
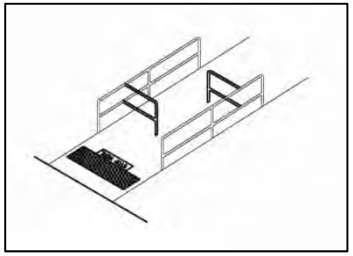
Maßnahme	Beschreibung	Kosten			Effekt				
		Investitions-kosten (ca.) [€]	Abschrei-bungs-zeitraum [2)] [a]	Betriebs-kosten/ Jahr [2)] [€/a]	Rückgang der Unfälle um [%]	Referenzfall	Quelle	Stich-proben-größe (BÜ)	Anzahl Studien
Blitzleuchten Eisenbahn (an den führenden Schienenfahrzeugen) (bei passiven BÜ)		-	-	-	*Rückgang der Gefährdungen:* 10 %	Nichttechnisch gesicherter BÜ ohne Blitzleuchten	Basler und Partner, 1986	Keine (Experten schätzung)	1
Zusätzliches Blinklicht als Vorankündigung  (US DOT, 1986)	Bei fehlender Sicht oder wenn die Aufmerksamkeit durch die Straßenführung abgelenkt ist, wird durch zusätzliche Licht-signale/ Blinklichter auf das zu er-wartende Haltegebot am Bahnübergang hingewiesen (primär in Kurvenlage).	3.000 [1)] 6.000 [2)]	10	4.700	bis zu 50 %	unbekannt	Washington und Oh, 2006	k.A.	2
Reflektierende Markierungsknöpfe	Quer zur Fahrrichtung liegende reflektierende Markierungsknöpfe zur Verdeutlichung der Haltlinie.	3/ m [2)]	5		Verbesserung der Nacht-sichtbarkeit.		-		

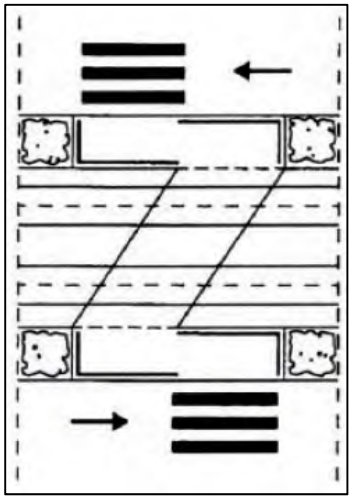
Maßnahme	Beschreibung	Kosten			Effekt				
		Investitions-kosten (ca.) [€]	Abschrei-bungs-zeitraum [2)] [a]	Betriebs-kosten/ Jahr [2)] [€/a]	Rückgang der Unfälle um [%]	Referenzfall	Quelle	Stich-proben-größe (BÜ)	Anzahl Studien
Warnlichter in der Fahrbahn/ Bodenmarkierungsleuchten (Lane Lights) (bei aktiven BÜ) [4] (Ausschnitt aus EBE, 2016)	*„Durch das Aufleuchten der Lane Lights wird eine optische Schranke erzeugt, die Verkehrsteilnehmer zu erhöhter Vorsicht und zum Anhalten vor neuralgischen Punkten (kritische Infrastrukturbereiche) auffordert.“* (EBE, 2016)	33.000 [5]	-	-	-	-	Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2006	-	-
Andreaskreuz mit Kontrastblende (autokiste.de)		1.000 [1)] 2.100 [2)]	20	-	unbekannt	unbekannt	keine	-	-
Geschwindigkeitsschwellen/ Bodenschwellen (speed humps) (bei aktiven BÜ)	Baulich-rechtliche Rahmenbedingungen beachten. Nicht innerorts anordnen.	25/ m [2)]	-	-	**20 %**	unbekannt	Saccomanno et al., 2006	k.A.	3
					36 - 40 %	unbekannt	Washington und Oh, 2006	1.162	3
Geschwindigkeitstrichter	Schrittweise Reduktion der Geschwindigkeit über 70 - 50 - 30 km/h (Erke, 2000)	4.000 [1)] 8.400 [2)] (*bei 4 Schildern*)	20	-	20 %	unbekannt	Saccomanno et al., 2006	k.A.	3

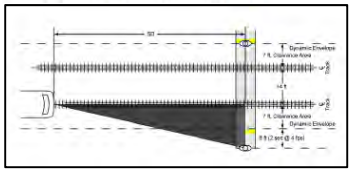
Maßnahme	Beschreibung	Kosten			Effekt				
		Investitions-kosten (ca.) [€]	**Abschrei-bungs-zeitraum [2] [a]**	**Betriebs-kosten/ Jahr [2] [€/a]**	**Rückgang der Unfälle um [%]**	**Referenzfall**	**Quelle**	**Stich-proben-größe (BÜ)**	**Anzahl Studien**
Rüttelstreifen	Schrittweise Reduktion der Geschwindigkeit	unbekannt	-	-	unbekannt	unbekannt	keine	-	-
Geschwindigkeitsüberwachung		70.000 [1] (*ortsfeste; Gerät+ Aufbau+ Stromanschl uss)*	k.A.	k.A.	56 - 65 %	unbekannt	Washington und Oh, 2006	5	1
		-	-	10.000 [1] 15.100 [2] (intensive mobile)	75 %	unbekannt	Saccomanno et al., 2006	k.A.	3
Reduktion der Längsneigung		120.000 [1),2)] (*bei 200 m Ausbau-länge*)	25	-	39 - 47 %	unbekannt	Washington und Oh, 2006	k.A.	2
Straßenumbau zum senkrechten **Kreuzungswinkel**		270.000 [1] 300.000 [2] (*bei 200 m Ausbau-länge*)	50	-	29 - 45 %	unbekannt	Washington und Oh, 2006	250	2
					1 %	0-Fall	Saccomanno und Lai, 2005;	k.A.	k.A.
Ausleuchtung des Bahnübergangs		10.000 [1]	k.A.	k.A.	15 - 45 %	unbekannt	Washington und Oh, 2006	k.A.	3
					44 %	unbekannt	Saccomanno et al., 2006	k.A.	4

[1] Angaben LISt, 2014
[2] Angaben Spahn, 2011
[4] Lane Lights werden nur für aktive BÜ empfohlen. Die zweite Systemlösung für passive BÜ wird nicht empfohlen, da sie die Aufmerksamkeit des Straßenverkehrsteilnehmers auf sich ziehen und somit gerade von der Beobachtung der Bahnstrecke (wie an passiven BÜ erforderlich) ablenken kann. Eine mögliche Alternative aus dem aktuellen Forschungsgeschehen stellt für passive BÜ PeriLight da.
[5] http://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20080110_OTS0201/pilotprojekt-mit-fahrbahnlichtern-in-wieselburg

Anlage 36 Maßnahmen im Entscheidungsbereich - nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer

Maßnahme	Beschreibung	Kosten			Effekt				
		Investitions-kosten (ca.) [€]	Abschrei-bungs-zeitraum [2)] [a]	Betriebs-kosten/ Jahr [2)] [€/a]	Rückgang der Unfälle um [%]	Referenzfall	Quelle	Stichprob engröße (BÜ)	Anzahl Studien
Umlaufsperre DB  (DB Netz, 2012)	Durch die großzügigen Abstände und die vereinfachte Anordnung kann bei der Querung die Aufmerksamkeit von der Umlaufsperre selbst auf die Bahngleise gelenkt werden. Einsatzhinweise beachten (siehe Abschnitt 6.2.2).	20.000 - 30.000 [3)] (*inklusive Zuwegung*)	-	-	unbekannt	unbekannt	keine	-	-
Umlaufsperre  (UDOT, 2013)	Einsatz vor allem an Stellen mit hohem Fußgängerverkehr oder Querungsdruck Ausreichenden Abstand zu Gefahrenbereich gewährleisten.	-	-	-	Geschwindig-keitsredu-zierung von Fußgängern und Rad-fahrern. (unbekannt)	unbekannt	keine	-	-

Maßnahme	Beschreibung	Kosten			Effekt				
		Investitions-kosten (ca.) [€]	Abschrei-bungs-zeitraum [2)] [a]	Betriebs-kosten/ Jahr [2)] [€/a]	Rückgang der Unfälle um [%]	Referenzfall	Quelle	Stichprob engröße (BÜ)	Anzahl Studien
Bahnkörper-Querungsstellen („Z-Grundform“)  (EAÖ, 2003)	Fußgänger soll so abgelenkt werden, dass sein Blick vorher immer in Richtung des entgegenkommenden Zuges gelenkt wird Ausreichenden Abstand zu Gefahrenbereich gewährleisten. An BÜ geometrisch anpassen. Einschränkungen [6)] bei Eisenbahnen beachten.	-	-	-	unbekannt	unbekannt	keine	-	-
Absperrgatter (Korve et al, 1996)	Strikte Absperrung des Gleisraums durch Absperrgatter. Können entweder zur Aufmerksamkeitssteigerung genutzt werden (jederzeit öffenbar) oder in Kombination mit Warnsignalen auch durch Zugdetektion geschlossen werden.	-			bis zu 50 %	unbekannt	Washington und Oh, 2006	3	1

Maßnahme	Beschreibung	Kosten			Effekt				
		Investitions-kosten (ca.) [€]	Abschrei-bungs-zeitraum [2] [a]	Betriebs-kosten/ Jahr [2] [€/a]	Rückgang der Unfälle um [%]	Referenzfall	Quelle	Stichprob engröße (BÜ)	Anzahl Studien
Sichtbeziehungen gewähren Train Speed (mph) / FHWA Pedestrian Sight Distance (ft)* 15 – 200 20 – 265 25 – 330 30 – 395 35 – 465 40 – 530 45 – 595 50 – 660 55 – 730 60 – 795 70 – 925 80 – 1,060 90 – 1,190 *Values are rounded up to nearest 5 feet  (UDOT, 2013)	nur bei entfernbaren Hindernissen	1.000 [1] *(je Sichthindernis)* *6.000* [2] *(bei 400 m Anfahr-sichtweite)*	5	-	bis zu 50 %	unbekannt	Washington und Oh, 2006	101	2

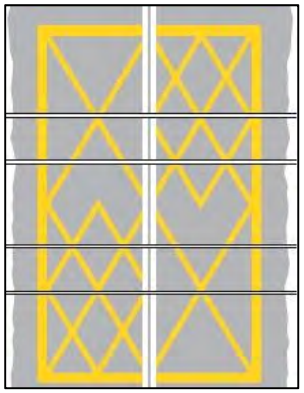
[1] Angaben LISt, 2014
[2] Angaben Spahn, 2011
[3] Angaben zu eisenbahnseitigen Sicherungsarten beruhen auf Erfahrungswerten aus dem Planungsgeschäft von Um- und Neubauten
[6] Bei Eisenbahnen nur auf zweigleisigen Strecken sinnvoll, wenn sichergestellt ist, dass die Gleise immer nur in eine Richtung befahren werden. Beides ist bei Eisenbahnenen nicht unbedingt der Fall.

Anlage 37 Maßnahmen im Entscheidungsbereich - Sanktionierung und bauliche Trennung der Richtungsfahrstreifen

Maßnahme	Beschreibung	Kosten			Effekt				
		Investitions-kosten (ca.) [€]	Abschrei-bungs-zeitraum[2)] [a][1)]	Betriebs-kosten/ Jahr[2)] [€/a]	Rückgang der Missachtung um [%]	Referenzfall	Quelle	Stichprobengröße (BÜ)	Anzahl Studien
Rotlichtüberwachung durch Rotlichtkameras (bei aktiven BÜ)	Auslösung bei Rotlichtverstoß bzw. Überfahrung des Gleisbereichs, z. B. bei geschlossenen Halbschranken Rechtliche Randbedingungen klären (Motorradfahrer)	-	-	10.000 [1)] 9.700 [2)] (*intensive mobile*)	84 %	Halbschranke	Meadow, 1994	1	1
					84 %		Raslear ,1996	-	-
					72 %	Halbschranke	Cooper und Ragland, 2007	-	-
					34 - 94 %		Caird et al., 2002	-	-
					70 %		Washington und Oh, 2006	-	-
		40.000 [1)] (*ortsfeste; Gerät+ Aufbau, Strom vorhanden*)	-	-	72 %	Halbschranke	Federal Railroad Administra-tion, 2009	1	1
Zusätzlicher Mittelstreifen/ Mittelinsel (bei Halbschranken)	Bauliche Ausdehnung (Länge und Breite) umfangreicher als bei Leitschwellen.	50.000 [1)] 42.400 [2)]	25	-	66 %	Halbschranke	Saccomanno et al., 2006	k.A.	4
					80 %	unbekannt	US DOT, 2002	k.A.	1
Zusätzliche Leitschwellen (bei Halbschranken) (Federal Railroad Administration, 2009)	15 cm hoher Mittelstreifen ist mit 60 - 90 cm hohen reflektierenden und elastischen Baken aus Kunststoff ausgestattet	10/ m [2)]	5-10	-	90 %		Ko et al., 2007	-	-
					75 - 80 %		Cooper und Ragland, 2007	-	-
					30 - 70 %	Halbschranke	Griffioen, 2004	-	-
					80 %		Caird et al., 2002	-	-
					66 %		Saccomanno, Park und Fu , 2009	-	-
					66 %	Halbschranke	Saccomanno et al., 2006	k.A.	4
					80 %	unbekannt	US DOT, 2002	k.A.	1

[1)] Angaben LISt, 2014
[2)] Angaben Spahn, 2011

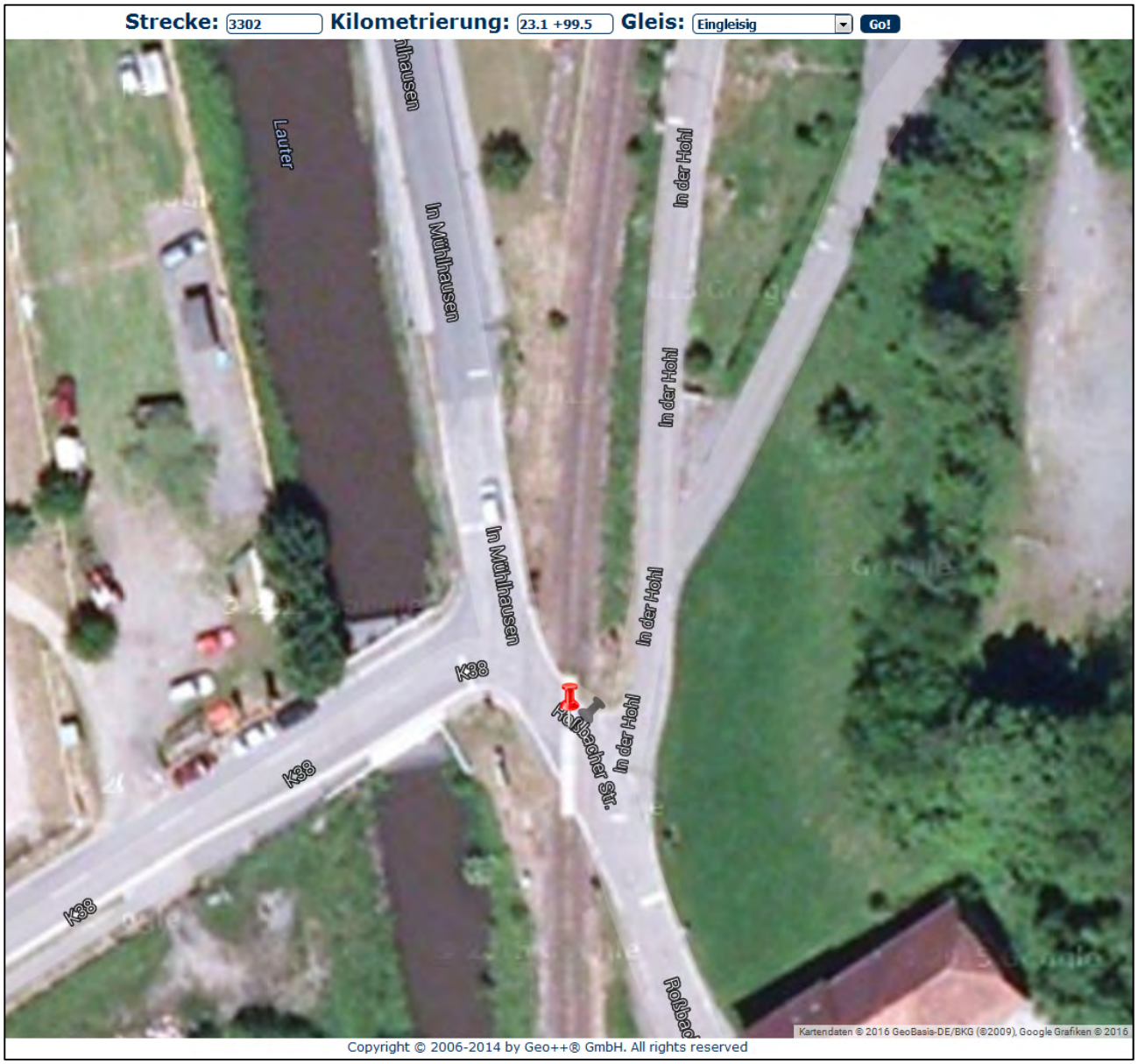
Anlage 38 Maßnahmen im Räumungsbereich

Maßnahme	Beschreibung	Kosten			Effekt				
		Investitions-kosten (ca.) [€]	Abschrei-bungs-zeitraum[2)] [a]	Betriebs-kosten/ Jahr[2)] [€/a]	Rückgang des Risikos um [%]	Referenzfall	Quelle	Stichprob engröße (BÜ)	Anzahl Studien
Auffällige Markierung der Fahrbahn im freizuhaltenden Gefahrenbereich **(Yellow-box-marking)**  (ukmotorists.com)	Bei häufigem Rückstau bis zum Bahnübergang soll die Markierung verdeutlichen, dass der Bereich freigehalten werden muss.	5.000 [1)] 1.100 [2)]	5	-	-	-	Gibson, 2004	-	-
Technische Gefahrenraumfreimeldung (Ergänzung zur Sicherungsart) (bei aktiven BÜ)	Die Fahrt von Schienenfahrzeugen wird erst zugelassen, wenn der Gefahrenbereich freigemeldet wurde.	100.000 [3)]			99 - 100 % [7)]		SELCAT-Arbeitsgruppe, 2008b	-	-

Maßnahme	Beschreibung	Kosten			Effekt				
		Investitions-kosten (ca.) [€]	Abschrei-bungs-zeitraum[2)] [a]	Betriebs-kosten/ Jahr[2)] [€/a]	Rückgang des Risikos um [%]	Referenzfall	Quelle	Stichprobengröße (BÜ)	Anzahl Studien
Vorsignalisierung mit vorgeschalteten Lichtzeichen und **Abhängigkeiten zu benachbarten Lichtsignalanlagen** des Straßenverkehrs (BÜSTRA) (bei aktiven BÜ)	Mit diesen Einrichtungen wird der übergeordnete Verkehrsstrom an vorgelagerten Knoten-punkten angehalten, um dem sonst warte-pflichtigen Verkehrs-strom das Räumen des Bahnübergangs zu ermöglichen.	200.000 [1)] 117.500 [2)]	20	4.700	100 % (annähernd, menschliche Fehlerwahr-scheinlichkeit beachten)		Schöne, 2013	keine (Experten schätzung)	keine
Dynamische Rückstauwarnanzeigen	Mit dynamischen Verkehrszeichen vor dem Bahnübergang können Straßenverkehrsteilneh mer aufgefordert werden, den Gefahrenbereich freizuhalten, wenn Sensoren einen Rückstau hinter dem Bahnübergang registrieren.				*Reduktion des Fehlverhaltens um* 30 %		Turner et al., 2010	-	-
					Reduktion des Fehlverhaltens um **40** - 60 %		Griffioen, 2004	-	-

[1)] Angaben LISt, 2014
[2)] Angaben Spahn, 2011
[3)] Angaben zu eisenbahnseitigen Sicherungsarten beruhen auf Erfahrungswerten aus dem Planungsgeschäft von Um- und Neubauten
[7)] Mit einer technischen Gefahrenraumfreimeldung können Gefährdungen im Räumungsbereich nahezu vollständig ausgeschlossen werden. Die Fahrt von Schienenfahrzeugen wird dabei erst zugelassen, wenn der Gefahrenbereich freigemeldet wurde. Im Rahmen der europäischen SELCAT-Studien wurde beispielhaft gezeigt, dass selbst eine Gefahrenraumfreimeldung auf niedrigem technischen Sicherheitsniveau (SIL 0) zu einer Senkung des Risikos um 99 % führen kann. Die heute zugelassenen Techniken weisen jedoch ein deutlich höheres Sicherheitsniveau auf, sodass technische Fehlfunktionen vernachlässigbar sind und von einer praktisch vollständigen Vermeidung räumungsbedingter Unfälle auszugehen ist.

Anlage 39 Beispiel für komplexe Verkehrssituation



Luftbild-Screenshot BÜ zwischen Wolfstein und Roßbach (Pfalz) [Ausschnitt aus: DBGEO, 2016]

GDV
DIE DEUTSCHEN VERSICHERER

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.

Wilhelmstraße 43 / 43G, 10117 Berlin
Postfach 08 02 64, 10002 Berlin

Telefon 030 / 20 20 - 50 00, Fax 030 / 20 20 - 60 00
Internet: www.gdv.de, www.udv.de