RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Untersuchung strömungsklimatischer Eigenschaften von U-Bahnsystemen zur Prognose der Schadstoffausbreitung im CBRNE Gefahrenfall

Abschlussbericht im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens:

Organisationsübergreifende Gefahrenabwehr zum Schutz von Menschen und kritischen Infrastrukturen durch optimierte Prävention und Reaktion (ORGAMIR), Teilvorhaben 6

Pflitsch, Andreas; Brüne, Markus; Killing-Heinze, Michael; Spiegel, Jonathan; Ringeis, Julia

September 2011

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzfassung **3**
1.1 Aufgabenstellung 3
1.2 Voraussetzungen 3
1.3 Planung und Ablauf 4
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand 5
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 7

2 Eingehende Darstellung **8**
2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse 8
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 28
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 29
2.4 Verwertbarkeit des Ergebnisses 29
2.5 Fortschritte anderer 29
2.6 Veröffentlichungen 30

1 Kurzfassung

1.1 Aufgabenstellung

Zielsetzung des BMBF-Verbundprojektes OrGaMIR (Laufzeit 01.02.2008 - 31.03.2011, Förderkennzeichen 13N9623 bis 13N9629) war die Entwicklung und Implementierung von Methoden zum Schutz von Menschen in U-Bahn-Systemen in Notfällen, die mit einer Freisetzung toxischer Gase einhergehen. Das Teilprojekt Tunnelklimatologie hatte die Aufgabe, alle notwendigen Informationen zur Beurteilung der aktuellen sowie prognostizierten Strömungssituation zu erheben und Analysen hinsichtlich der Ausbreitung von Schadgasen im Gesamtsystem der U-Bahn (Tunnel) sowie zum Einfluss baulicher Eigenschaften dieses Systems auf die Ausbreitungsbedingungen zu liefern.

Im Einzelnen umfassten die Aufgaben des Teilprojekts Tunnelklimatologie die folgenden Punkte:

- Planung und Implementierung eines Messsystems zur Erhebung von Lufttemperatur-, Strömungs- und Wetterdaten
- Sicherstellung der Datenerfassung, -speicherung und -übertragung
- Entwicklung einer Echtzeit Ausbreitungsprognose für das Gesamtsystem (Tunnel) auf Basis der Messdaten
- Bereitstellung der Rohdaten und weiterverarbeiteter Daten und Integration in ein Gesamt-Softwaresystem zur Nutzung der Daten durch Projektpartner
- Bereitstellung technischer Infrastruktur für Projektpartner
- Auswertung der Messdaten mit Hinblick auf eine Analyse der klimatologischen Eigenschaften des U-Bahnsystems und eine Bewertung baulich-architektonischer Eigenschaften einzelner Systemkomponenten (Stationen, Tunnel) im Hinblick auf ihre sicherheitsrelevanten Eigenschaften im Falle eines Brandes oder Terroranschlages mit der Verbreitung toxischer Gase

1.2 Voraussetzungen

Zu Projektbeginn gab es bereits eine mehrjährige Erfahrung mit Messungen in verschiedenen U-Bahnsystemen in Deutschland und den USA. Dadurch lagen sowohl hinsichtlich

grundlegender Faktoren und Elemente der U-Bahn-Klimatologie als auch der einzusetzenden Messtechnik bereits umfangreiche Kenntnisse vor.

Zu einem Zeitpunkt als der Projektantrag bereits in einer fortgeschrittenen Phase war, sagte der im Projekt vorgesehene U-Bahnbetreiber seine Bereitschaft zur Zusammenarbeit ab. Für das U-Bahnsystem dieses Betreibers lagen bereits mehrjährige Erfahrungen vor. Zum einen waren bereits verschiedene Messkampagnen durchgeführt worden, wodurch Kenntnisse über die Klimatologie des Systems und die technische Infrastruktur vorhanden waren. Zum anderen bestanden auch langjährige persönliche Kontakte und Kenntnisse über die Organisationsstruktur und Zuständigkeitsbereiche.

Glücklicherweise konnte kurzfristig ein anderer, in fachlicher Hinsicht sehr attraktiver Betreiber gefunden werden. Durch diese Umstände waren zu Projektbeginn jedoch noch keine Ansprechpartner bekannt und auch Ortskenntnisse und Wissen über die Infrastruktur mussten erst intensiv in der Anfangsphase erworben werden.

Die Erfahrungen aus den vorangegangen Untersuchungen in verschiedenen U-Bahnsystemen konnten jedoch bei der Durchführung des Projekts sowohl in messtechnischer wie auch klimatologischer Sicht gut genutzt werden.

1.3 Planung und Ablauf

Zentral für die Bewältigung der beschriebenen Aufgaben war zunächst die Planung und der Aufbau eines Messsystems um die Erfassung der im weiteren Verlauf benötigten Daten sicherzustellen. Dazu gehörte die konkrete Festlegung der Messpunkte (Strömungsmessung, Lufttemperaturmessung, automatische Wetterstationen), die Beschaffung der Messgeräte und des Installationsmaterials, die Verlegung von Kabeln zur Spannungsversorgung und Datenübertragung, die Anbringung der Messgeräte, die Einrichtung eines Computers zur Speicherung und Bereitstellung der Messdaten.

Im weiteren Verlauf standen die Weiterverarbeitung und Analyse der Daten und ihre Integration in ein Gesamtsystem zur gemeinsamen Nutzung durch die Projektpartner im Mittelpunkt.

Zur Absicherung der Simulationsrechnungen im Bereich einer U-Bahn-Station, sowie zur erweiterten Untersuchung der klimatischen Verhältnisse in Tunneln und Stationen und des Einflusses baulich-architektonischer Eigenschaften des U-Bahn-Systems wurden im Verlaufe des Projekts mehrere Ausbreitungsversuche mit dem Tracergas SF6 durchgeführt.

Unter Nutzung der Messdaten wurde im Teilprojekt Tunnelklimatologie ein Modell für das Tunnelklima entwickelt, welches die Ausbreitung eines Giftstoffes anhand der aktuellen sowie der zu erwartenden Strömungssituation beschreibt. Dieses Modell wurde in einem Softwarealgorithmus umgesetzt und die Ergebnisse über eine von der Universität Paderborn zur Verfügung gestellte Schnittstelle in ein Gesamtsystem integriert, für die

anschließend - durch Projektpartner durchgeführte - Visualisierung und Ableitung von Handlungsempfehlungen.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Vorangegangene Untersuchungen auf dem Feld der U-Bahn-Klimatologie haben gezeigt, dass U-Bahn-Systeme ein komplexes, räumlich und zeitlich variables Strömungssystem aufweisen. Das Strömungsgeschehen wird einerseits durch Luftbewegungen, die durch den Zugverkehr ausgelöst werden, bestimmt. Zusätzlich findet ein natürlicher Luftaustausch mit der Atmosphäre statt, welcher die Grundlage für die sogenannte natürliche Hintergrundströmung bildet. Während die zuginduzierten Strömungen nur während des Verkehrsbetriebs wirksam sind und bei Betriebsruhe nach wenigen Minuten zum Erliegen kommen, ist die natürliche Hintergrundströmung ganztägig wirksam. Während des Verkehrsbetriebs wird sie durch die zuginduzierte Strömung überlagert, ist aber trotzdem ein wirksamer Faktor im Strömungsgeschehen. Ein weiterer Einflussfaktor, der aber nicht in allen U-Bahn-Systemen vorliegt, sind Luftströmungen in Folge aktiver Belüftungseinrichtungen wie Ventilatoren. Charakteristisch sind häufige und rasche Änderungen der Strömungsrichtung und Geschwindigkeit und Strömungsgeschwindigkeiten von wenigen cm/s bis zu ca. 10 m/s, in Einzelfällen auch darüber.

Um im Falle einer Freisetzung giftiger Gase die Ausbreitungsverhältnisse beurteilen zu können, sind ein grundlegendes Verständnis der klimatischen Verhältnisse des betroffenen U-Bahn-Systems sowie aktuelle Informationen über Strömung, Lufttemperatur und äußere Witterungsverhältnisse erforderlich. Da davon ausgegangen wird, dass der Fahrbetrieb in einem solchen Fall zumindest in Teilbereichen eines U-Bahn-Systems eingestellt und eine etwaige aktive Belüftung abgeschaltet wird, liegt das Hauptaugenmerk auf einer Beurteilung der natürlichen Hintergrundströmung.

Entsprechend dieses Wissenstandes wurden im Projekt Ultraschallanemometer zur Strömungsmessung eingesetzt, die einen entsprechenden Messbereich und eine hohe zeitliche Ansprechbarkeit und Auflösung aufweisen. Um die Hintergrundströmung beurteilen zu können wurde ein zuvor entwickeltes Verfahren eingesetzt, dass es ermöglicht, die Hintergrundströmung auch bei laufendem Fahrbetrieb zu identifizieren. Dadurch wird es möglich, ohne Verzögerung Informationen über die nach Einstellung des Verkehrsbetriebs zu erwartende Strömungssituation und somit die zu erwartende Ausbreitung der Schadgase verfügbar zu machen. Im Notfall besteht dadurch ein wichtiger Zeitvorteil.

Zur allgemeinen Beurteilung der Stabilitätsverhältnisse und atmosphärischen Einflüsse wurden Lufttemperaturen innerhalb des U-Bahn-Systems, sowie die Wetterverhältnisse mit automatischen Wetterstationen erfasst.

Die Messdaten wurden mittels Ethernet auf einen zentralen Messrechner übertragen und dort gespeichert. Die jeweils aktuellen Messdaten sowie Berechnungen aus diesen Daten

wurden in einer MySQL-Datenbank auf dem Messrechner abgelegt und mittels Internet und VPN-Tunnel zur Verarbeitung dem Gesamtsystem OrGaMIR verfügbar gemacht.

Die Durchführung von Tracergasversuchen mit dem Tracergas SF6 wurde mittels manueller Auslassung und Probenahme sowie nachgelagerter Analyse im Labor realisiert.

Literatur

PFLITSCH, A.; ARNOLD, U. & P. COMBS (1999): An initial study of linkages between subterranean and street-level climate in New York City. In: Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, ICUCPO 2.03, Sydney

PFLITSCH, A.; RUSCHKOWSKI, M. & P. COMBS (1999): Breeze vs. blast : Quantifying passive and forced airflows through New York City's subway platforms. In: Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, ICUC 19.1, Sydney

PFLITSCH, A. (2000): Untersuchungen von Luftströmungen in Untergrundbahnen im Hinblick auf die Ausbreitung von Luftschadstoffen. In: Tagungsband der METTOOLS IV , Konferenz zur Umweltmeteorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, S. 28-30, Stuttgart

PFLITSCH, A.; ARNOLD, U. & P. COMBS (2000): An initial study of linkages between subterranean and street-level climate in New York City. In: Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium: Selected Papers from the Conference ICB-ICUC'99 (Sydney, 8-12 November 1999), WCASP- 50, WMO/TD NO. 1026, S. 481 - 486, Genf

PFLITSCH, A. & CH. GEPPERT (2000): Comparison of airflow in two different passively ventilated subway systems - New York City (USA) and Dortmund (Germany). In: Proceedings of the Third Symposium on the Urban Environment, S. 110-111, Davis (CA)

PFLITSCH, A. & CH. STORZ (2000): Comparison of the bioclimatological impact/stress in two different subway systems - New York City (USA) and Dortmund (Germany). In: Proceedings of the Third Symposium on the Urban Environment, S. 167-168, Davis (CA)

PFLITSCH, A. (2001): Stadtklima im Untergrund. In: Geographische Rundschau, 53 Jg., Heft 1, S. 34-40

PFLITSCH, A. (2001): Alarm in der U-Bahn: Mit NADiS sicher aus dem Tunnel. In: Rubin, 11 Jg., Heft 1, S. 6-11

PFLITSCH, A (2001): Investigations on air currents in underground public transportation systems. In: Meteorologische Zeitschrift, Vol. 10, Nr. 4, S. 239-246

PFLITSCH, A. & H. KÜSEL (2001): U-Bahn-Klimatologie - Ein neues Forschungsfeld für das Management möglicher Katastrophenfälle in U-Bahn-Systemen. In: Nahverkehrspraxis, Nr. 12, S. 17-19

STORZ, CH. & A. PFLITSCH (2002): Investigation of biometeorological stress in the subway system in New York City. In: Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology & Aerobiology, Kansas City/USA, Kansas City (MO)

PFLITSCH, A. & KÜSEL, H. (2003): Subway-Climatology - New Research Field for the Management of Possible Catastrophes in Subway Systems. In: Man and Climate in the 20th Century, Studia Geograficzne 75, University of Wroclaw. Edited by: Pyka, J., L.; Dubicka, M.; Szczepankiewicz-Szmyrka, A.; Sobik, M.; Blas, M., S. 384-394

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projekts fand eine intensive Zusammenarbeit mit verschiedenen Stellen statt.

Die Betreibergesellschaft der U-Bahn ermöglichte den Zugang zu den Tunneln und Stationen für die Installation der Messgeräte, Begehungen und Messkampagnen und stellte Informationen sowie technische Infrastruktur (Energieversorgung, Datenübertragung) und Räumlichkeiten zur Verfügung. Für die Installationsarbeiten fand eine Zusammenarbeit mit Partnern der Betreibergesellschaft statt.

Bei der Einrichtung des Messaufbaus stand Dipl.-Ing. Jürgen Loh für Fragen der Datenübertragung und -speicherung als Berater zur Verfügung. Die Tracergasversuche wurden in Zusammenarbeit mit der Universität Duisburg-Essen vorgenommen, die Material für die Versuche bereitstellte und die Analyse der gewonnenen Proben durchführte.

Desweiteren fand eine enge Zusammenarbeit mit den Projektpartnern statt. Für das Institut für Mikrotechnik Mainz wurde die technische Infrastruktur zur Installation der Stoffsensorik bereitgestellt sowie die Installation durchgeführt.

Für die Entwicklung der Ausbreitungsprognose im Gesamtsystem der U-Bahn wurde eine Softwareumgebung, die durch die Universität Paderborn bereitgestellt wurde, genutzt.

Insbesondere mit der Universität Paderborn, dem Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG und Indanet erfolgte eine Abstimmung über die Bereitstellung notwendiger Eingangsdaten für die Weiterverarbeitung durch diese Partner und über die dazu erforderlichen Schnittstellen.

Eine Zusammenarbeit, die sich erst während des laufenden Projektes ergab, war die mit der Metro in Newcaste upon Tyne in Nordengland. Hier wurden zahlreiche Temperatur- und Strömungsmessungen in Tunneln und Stationen durchgeführt, welche das Messprogramm in Berlin sinnvoll erweiterten. Die Messergebnisse aus dem kleinen U-Bahnsystem von Newcastle brachten insbesondere in Bezug auf die Wirkung von Lüftungseinrichtungen aber auch hinsichtlich systemspezifischer architektonischer Fragestellungen wichtige Erkenntnisse.

2 Eingehende Darstellung

Da die Ergebnisse des Projekts als sicherheitsrelevant zu bewerten sind, soweit sie Rückschlüsse auf konkrete örtliche Gegebenheiten zulassen, wird in diesem Bericht bei der Eröterung der Ergebnisse auf eine namentliche Nennung des U-Bahnsystems sowie der untersuchten U-Bahnstationen u.ä. verzichtet. Dies betrifft Ergebnisse der Strömungsanalysen, der SF6-Versuche und der Bewertung der sicherheitsrelevanten baulich-architektonischen Charakteristika einzelner U-Bahnstationen.

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Aufbau eines optimalen Messsystems zur Erfassung der aktuellen Strömungsbedingungen
Nach einer eingehenden Analyse des U-Bahn-Netzes wurde die Messung geplant. Um das Gesamtsystem klimatologisch zu erfassen sowie Informationen über unterschiedliche Stationsarchitekturen zu erhalten, wurden drei Stationen ausgewählt, bei denen es sich jeweils um Kreuzungsbahnhöfe mit zwei Ebenen handelt, die über verschiedene Tunnel alle miteinander verbunden sind. Des Weiteren wurden Standorte an den Tunnelportalen eingerichtet, um den Einfluss der Außenwitterung auf die Tunnel zu untersuchen.

Eine der drei Stationen wurde für die Einrichtung eines Demonstrators für das OrGaMIR-System ausgewählt. Hierfür wurde eine Station mit einer vergleichsweise hohen Komplexität und Fahrgastzahl ausgewählt. Die Station zählt nicht zu den wichtigsten Stationen des U-Bahn-Netzes, die Anschluss an den regionalen und überregionalen Schienenverkehr haben. Allerdings ist sie ein wichtiger Kreuzungsbahnhof zweier Linien, liegt in einem Stadtteilzentrum und hat eine direkte Anbindung an ein Einkaufszentrum.

Das Messnetz wurde erfolgreich wie geplant installiert, die Dokumentation des Messaufbaus mit sämtlichen Plänen ist im Anhang beigefügt.

Grundlagen für Gesamtprojekt liefern, exakte und zuverlässige Informationen über gegenwärtige und bevorstehende Strömungs- und Ausbreitungsbedingungen
Die Messdaten zur vorherrschenden Strömungssituation wurden zunächst in einer Datenbank auf dem lokalen Messrechner abgelegt. Parallel wurden diese Daten analysiert und

rechnerisch um den Einfluss des Zugverkehrs bereinigt um somit Prognosedaten für die zu erwartende Strömung nach einer evtl. notfallbedingten Einstellung des Verkehrsbetriebs zu liefern.

Unter Nutzung einer Entwicklungsumgebung der Universität Paderborn wurde eine Schnittstelle zur Integration der Daten in ein gemeinsam genutztes Softwaresystem auf einem Server der Universität Paderborn entwickelt. Über eine Anbindung an das Internet und Nutzung eines VPN-Tunnels wurden die Daten aus der Datenbank des Messrechners auf den Server in Paderborn übertragen und so den anderen Partnern zur Nutzung für Simulationsrechnung, Visualisierung und die Ableitung von Handlungsanweisungen zur Verfügung gestellt.

Entwicklung eines „Klimamodells" für die kurzfristige Prognose der Stabilität der aktuellen Strömungs und Ausbreitungsbedingungen sowie zur Ausweisung von Gefahrenbereichen

Hinsichtlich dieser Zielsetzung wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Für die Demonstratorstation konnten eindeutige Zusammenhänge zwischen der Außenwitterung und der Strömung in der Station und den angrenzenden Tunnelbereichen ermittelt werden, die dazu geeignet sind die Hintergrundströmung in diesem Bereich des U-Bahn-Systems zu prognostizieren.

- Durch die SF6-Versuche und weitere Sondermessungen, z.B. in Notausgängen, konnten weitere Details mit Relevanz für die Strömungsklimatologie erfasst werden, wie z.B. die Ausbildung von Kaltluftseen und der Nachweis von Kamineffekten.

- Die Entwicklung eines Ausbreitungsmodells ermöglicht es, die Ausbreitung eines Gases von einem Ausgangspunkt durch ein gesamtes U-Bahn-System zu beschreiben und prognostizieren und Gefahrenbereiche auszuweisen.

Diese Ergebnisse sind nachfolgend im Einzelnen dargestellt. Mit Hinblick auf die Hinführung des OrGaMIR-Systems zur Marktreife steht es noch aus, die genannten Ergebnisse stärker zusammenzuführen. So nutzt z.B. das Ausbreitungsmodell noch nicht alle Erkenntnisse, die durch die Klimamessungen gewonnen wurden. Darüber hinaus konnten bislang nicht alle Messdaten erschöpfend analysiert werden.

Klimamodell - Ergebnisse der strömungsklimatischen Analysen, Vorhersage der Hintergrundströmung

In der untersuchten U-Bahn konnte eine klar ausgebildete natürliche, d.h. vom Zugverkehr unabhängige, Hintergrundströmung nachgewiesen werden. Diese bildet sich besonders deutlich und damit gut nachweisbar während der nächtlichen Betriebsruhe aus, bzw. wenn keine Störungen durch den Zugverkehr vorliegen. Aber auch während der Betriebsstunden, und hier sogar während der morgendlichen und nachmittäglichen Stoßzeiten, konnte eine wirksame natürliche Hintergrundströmung nachgewiesen werden. Diese vom Zugverkehr unabhängige Strömung wird jedoch, in Abhängigkeit vom Verkehrstakt, mehr oder weniger stark, durch den Zugverkehr maskiert und ist zunächst nicht sichtbar. Durch die

aufwändige Anpassung bestehender Filterverfahren an die Bedingungen der Berliner U-Bahn kann diese mittlerweile sichtbar und für das Sicherheits-System nutzbar gemacht werden.

Die natürliche Hintergrundströmung ist an verschiedenen Standorten (Tunnel) sehr konstant, hier liegt zu 98 % die gleiche Strömungsrichtung vor. An anderen Standorten herrschen eher alternierende Strömungen vor, welche durch mehr oder weniger häufige Luftströmungswechsel charakterisiert sind, so dass an diesen Standorten allgemeingültige Aussagen kaum möglich sind. Das bedeutet, dass an vielen Standorten, mit Kenntnis der allgemeinen Strömungssituation, selbst bei einer statischen Fluchtwegebeschilderung, die Wahrscheinlichkeit den richtigen Fluchtweg zu wählen deutlich höher ist, als eine Flucht nach dem Zufallsprinzip.

Die Ausprägung der verschiedenen Strömungen steht in Wechselwirkung mit dem äußeren Wettergeschehen. Wie bereits für andere U-Bahn-Systeme nachgewiesen, bilden der Temperaturunterschied zwischen der Tunnel- und der Außenatmosphäre, die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Stationsebenen sowie die Strömungsverhältnisse im Bereich der Tunnelportale die bestimmenden Antriebe.

Im Rahmen von Ausbreitungsversuchen mittels eines Tracergases konnten folgende Ergebnisse erzielt werden: Zusammenfassend haben alle Tracerversuche die bisher gewonnenen Erkenntnisse aus den Strömungsmessungen bestätigt. Treppenaufgänge, insbesondere zwischen verschiedenen Stationsebenen, fungieren vielfach als „Abluftkamine“. Für Stationsaus- bzw. -zugänge ist die Situation weniger eindeutig, hier fungieren viele als Abluftkamine. Zugänge durch die, zumindest zeitweilig, Kaltluft in die Station eindringt sind ebenfalls keine Seltenheit.

Es hat sich gezeigt, dass lange und steile Treppenaufgänge, insbesondere wenn sie eine zwischenliegende Ebene überbrücken, stärkere Kamineffekte aufweisen, als kurze und richtungsändernde Aufgänge. Der direkte Weg von der untersten Plattform an die Oberfläche muss nicht unbedingt der sicherste Weg sein. Insbesondere die klimatologische Ausprägung der Station entscheidet jedoch über die Bereiche mit einem starken und einem schwachen Kamineffekt. In Abbildung 2.1 sind die Ergebnisse der Tracerversuche an der Demonstratorstation zusammengefasst.

Selbst ein Gasgemisch, welches deutlich schwerer als Luft ist, strömt aus der unteren Bahnhofsebene in die höher liegenden Stationsebenen. Der in den Treppenaufgängen stark ausgebildete Kamineffekt und die hier auftretenden Turbulenzen führen das schwerere Gas aufwärts und entweder über die Ausgänge nach außen, oder in die sich anschließenden Tunnelbereiche.

Das von einer Station in die Tunnel gelangte Gas (während der Betriebsruhe) strömt teilweise durch die Notausgänge nach außen, erreicht aber teilweise auch die benachbarten Bahnhöfe in hohen Konzentrationen. Es werden jedoch nicht alle Nachbarbahnhöfe kontaminiert. Welche Nachbarstationen durch das Gas erreicht werden hängt von der vorherrschenden Hintergrundströmung sowie den sonstigen klimatischen Bedingungen ab.

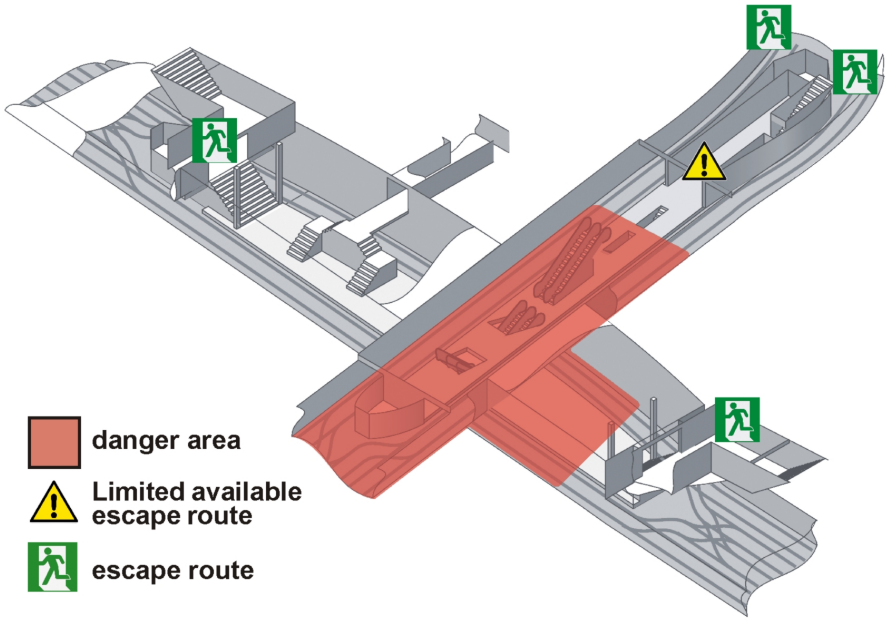

Abbildung 2.1: Zusammenfassende Bewertung der Strömungs- und Ausbreitungssituation in der ausgewählten U-Bahnstation basierend auf verschiedenen Ausbreitungstests mit dem Tracergas SF6.

So wurde festgestellt, dass massive Kaltlufteinbrüche in tiefer gelegenen Streckenabschnitten zu Strömungsblockaden führen und eine weitere Gasausbreitung im Tunnelsystem verhindern. Die diesen Bereichen vorgelagerten Stations- und Tunnelöffnungen bilden dann hervorragende „Abluftkamine“ und sind in diesem Fall für eine Flucht ungeeignet (siehe Abb. 2.2)

Die Wirkung der natürlichen Hintergrundströmung konnte auch für die Betriebszeiten nachgewiesen werden. Tracergasversuche während des Zugverkehrs haben gezeigt, dass sich das Gas in Richtung der Hintergrundströmung deutlich rascher ausbreitet, als in die entgegengesetzte Richtung und das bei zweigleisigem Zugverkehr in beide Richtungen. Die raschere Gasausbreitung in Strömungsrichtung betrug ca. 5 bis 10 Minuten für die dem Emissionsort angrenzenden Stationen, siehe Abb. 2.3.

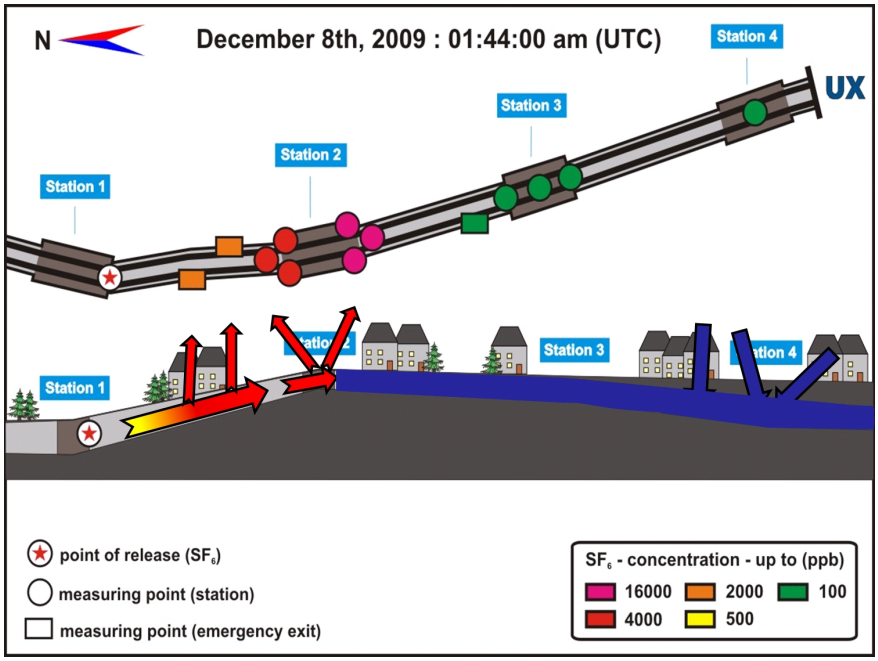

Abbildung 2.2: SF6-Verteilung 30 min nach Gasfreisetzung während der nächtlichen Betriebsruhe, eindringende Außenluft (blaue Pfeile), Kaltluftsees (blau) sowie z.T. aus den Notausgängen und Stationszugängen austretende (rote Pfeile) Warmluftströmung.

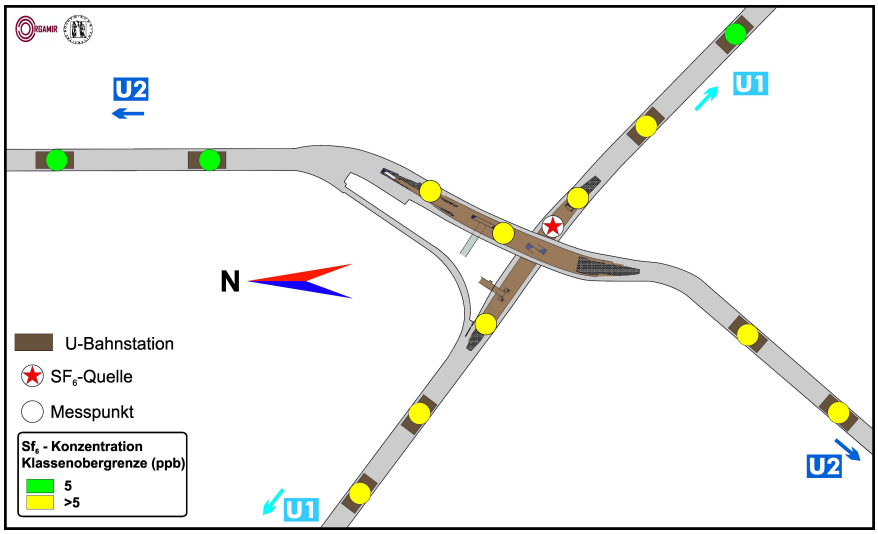

Abbildung 2.3: Darstellung der Konzentrationsverteilung des Tracergases SF6 ca. 8 Minuten nach Gasfreisetzung auf der unteren Ebene der ausgwählten U-Bahnstation während der Betriebszeiten, also mit Zugverkehr.

Ausbreitungsmodell Tunnel
Basierend auf den erfassten Grundlagendaten zur aktuellen wie prognostizierten Strömungssituation wurde ein Ausbreitungsmodell für das Tunnelsystem entwickelt, dass es ermöglicht, die aktuelle wie prognostizierte Ausbreitung zu beschreiben und Gefahrenbereiche im U-Bahn-System auszuweisen.

- Input-Daten
Als Eingabeinformationen werden der Ausbreitungsprognose folgende Daten übergeben:

- Ort des Schadensereignisses mit geogr. Koordinaten und Angaben zur Höhenlage in einem U-Bahnsystem spezifischen Bezugssystem
- Verkehrsbetrieb läuft oder ist gestoppt
- aktuelle Strömungsdaten sowie prognostizierte Strömungsdaten
- eine Kennzahl die angibt, wie stabil die Strömungssituation eingestuft wird

Die Angaben über den Verkehrszustand und die Stabilität der Strömungssituation werden beim aktuellen Entwicklungsstand nicht von der Ausbreitungsprognose ausgewertet.

- Prüfung ob ein neues Ereignis oder ein wiederholter Aufruf der Ausbreitungsprognose für ein bereits bekanntes Ereignis vorliegt
Zunächst wird geprüft, ob es sich bei dem gemeldeten Ereignis um ein neues Ereignis oder um einen wiederholten Aufruf für ein bereits bekanntes Ereignis handelt. Dazu werden Informationen aus einer Datenbank abgefragt, die Informationen zu Ort und Zeit des letzten gemeldeten Ereignisses enthält. Falls die Koordinaten des aktuellen Ereignisses mit denen in der Datenbank übereinstimmen und der Wert für die Uhrzeit eines vergangenen Ereignisses weniger als eine Stunde hinter der aktuellen Uhrzeit zurückliegt, wird angenommen, dass ein wiederholter Aufruf vorliegt. In der Datenbank wird die Zeitangabe aktualisiert, d.h. die aktuelle Zeit wird gespeichert. Stimmen die Ortskoordinaten nicht überein, oder liegt das letzte gemeldete Ereignis über eine Stunde zurück, wird von einem neuen Ereignis ausgegangen. Orts- und Zeitangabe werden auf den Wert des aktuell gemeldeten Ereignisses gesetzt.

Der wiederholte Aufruf ist bislang nicht implementiert. Vorgesehen ist folgende Vorgehensweise: Liegt ein wiederholter Aufruf für ein bereits bekanntes Ereignis vor, werden die Ergebnisse der letzten Ausbreitungsprognose für dieses Ereignis aus der Datenbank abgerufen. Eine neue Ausbreitungsprognose anhand der aktuellen Strömungsdaten wird durchgeführt und anschließend werden die Ergebnisse zusammengeführt.

Dabei werden für bereits bei der letzten Ausbreitungsprognose betroffene Stationen die Zeitangaben angepasst. Dabei wird die Zeit berücksichtigt, die seit dem letzten Aufruf vergangen ist. Auf Grund geänderter Strömungsbedingungen ist es möglich, dass andere Ausbreitungswege und somit neue Stationen zur Liste der betroffenen Stationen hinzugefügt werden.

- Aufbau des U-Bahn-Netzes im Prognosesystem
In einer Datenbank sind Angaben zu allen U-Bahn-Stationen und allen Strecken zwischen

den einzelnen Stationen abgelegt. Zu Beginn eines jeden Aufrufs der Ausbreitungsprognose werden diese Informationen aus der Datenbank abgefragt und in zwei Variablen gespeichert. Angaben zu den Stationen werden in einer Liste vom Typ „Knoten“, zu den Strecken vom Typ „Kanten“ gespeichert. Für jeden Knoten werden alle angrenzenden Kanten, für jede Kante die angrenzenden Knoten (als Startknoten und Endknoten) mit gespeichert. Darüber hinaus wird für jeden Knoten der Abstand (horizontal Luftlinie) zum aktuellen Schadensereignis errechnet und gespeichert. Für jede Kante wird die aktuelle dort gemessene wie prognostizierte Strömung abgespeichert. Liegen keine Strömungsmessdaten vor, wird eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s und eine Wahrscheinlichkeit der Strömungsrichtung für beide Strömungsrichtungen (Startknoten-Endknoten, Endknoten-Startknoten) von 50% angenommen.

- Lokalisierung des Schadensereignisses im U-Bahn-Netz

Ein Schadensereignis kann durch eine Benutzereingabe oder durch die Stoffsensorik gemeldet werden, diese Quelleninformation wird aber dem Ausbreitungssystem nicht direkt zur Verfügung gestellt. Übermittelt werden stattdessen die geogr. Koordinaten der Schadensmeldung sowie eine Höhenangabe. Anhand dieser Höhenangabe kann das Schadensereignis einer bestimmten Ebene im U-Bahn-System zugeordnet werden, für jede dieser Ebenen sind bestimmte Intervalle des Höhenwerts festgelegt. Durch das Prognosesystem wird zunächst überprüft, ob die Koordinaten des gemeldeten Ereignisses mit den Koordinaten eines Stoffsensors übereinstimmen. Wenn dies der Fall ist, wird das Schadensereignis dem Ort dieses Stoffsensors (einem Knoten, bzw. einer Kante) zugeordnet. Kann kein Stoffsensor zugeordnet werden, wird die Liste der Knoten, die nach ihrer aufsteigenden Entfernung zum Schadensereignis sortiert ist, durchgegangen und der nächstgelegene Knoten, der auf der gleichen Höhenebene wie das Schadensereignis liegt gesucht („erster Knoten“). Anschließend wird überprüft, ob das Schadensereignis genau diesem Knoten zugeordnet werden kann. Dies ist der Fall wenn die Koordinaten unter Berücksichtigung einer festgelegten Ortsungenauigkeit übereinstimmen. Fällt das Schadensereignis genau auf den Knoten, wird dieser als Startpunkt für die Ausbreitungsprognose („SpreadingPoint“) festgelegt. Fällt das Schadensereignis nicht genau auf den gefundenen Knoten, werden alle Nachbarknoten des ersten Knotens herausgesucht und aus ihnen derjenige ausgewählt, für den gilt, dass das Schadensereignis zwischen beiden Knoten liegt („zweiter Knoten“). Auf der Kante die den ersten und zweiten Knoten verbindet wird hilfsweise ein neuer Knoten konstruiert („SpreadingPoint“) und die Kante entsprechend der Entfernung des Spreading Point zum ersten und zweiten Knoten in zwei neue Kanten unterteilt. Wenn keine Zuordnung des Schadensereignisses erfolgen kann (z.B. im Falle fehlerhafter Koordinaten oder Höhenangaben), wird eine entsprechende Fehlermeldung ausgegeben und die Ausbreitungsrechnung beendet.

- Berechnung der Ausbreitungsprognose

Ausgehend vom Spreading Point werden alle möglichen Wege durch das U-Bahn-Netz abgegangen. Für jeden dabei erreichten Knoten wird die Wahrscheinlichkeit, ob der Knoten betroffen ist und zu welchem Zeitpunkt er erreicht wird berechnet. Dazu werden die Informationen über die Länge der Streckenabschnitte und die Strömungsgeschwindigkeiten

genutzt. Wenn ein Knoten auf mehreren Wegen erreicht werden kann wird dies berücksichtigt.

Ein Weg wird abgebrochen wenn:

- er bereits einmal abgegangen wurde
- er oberirdisch wird
- die Strömungsrichtung der Gehrichtung entgegengesetzt ist

Desweiteren gilt:

- gestoppt wird an Endknoten einer U-Bahn-Linie (Knoten mit nur einer angrenzenden Kante)
- Wege werden nicht zurück gelaufen
- liegt der Spreading Point auf einer Kante, darf diese Kante nicht durchlaufen werden.

- Ausgabedaten
Für jeden Knoten im U-Bahn-Netz wird ausgegeben, ob der Knoten durch das Ereignis betroffen sein wird, mit welcher Wahrscheinlichkeit dies der Fall ist und zu welchem Zeitpunkt. Darüber hinaus wird für festgesetzte zukünftige Zeitpunkte angegeben, ob der Bahnhof betroffen ist und mit welcher Wahrscheinlichkeit. Hier kann ein Bahnhof zunächst als nicht betroffen ausgewiesen werden, zu einem späteren Zeitpunkt als betroffen und noch später als mit höherer Wahrscheinlichkeit betroffen, falls er auf einem zweiten Ausbreitungsweg erst zu einem späteren Zeitpunkt erreicht wird.

Informationen über die notwendige Anzahl und die sinnvolle Positionierung der Sensoren zur CBRNE-Gefahrenstoffdetektion
Die oben beschriebenen Ergebnisse bzgl. der Strömungssituation im Bereich der Demonstratorstation konnten dazu genutzt werden, optimale Standorte für die Installation der CBRNE-Sensorik zu bestimmen, die dazu geeignet waren mit einem Minimum an Sensoren eine bestmögliche Detektion zu gewährleisten. Für einfach aufgebaute Stationen mit wenigen Zugängen und einem symmetrischen Aufbau, lassen sich nach Projektabschluss einfach die sinnvollsten Positionen für die CBRNE-Sensorik bestimmen. Da jedes U-Bahnnetz und viele Bahnhöfe sehr individuell gestaltet sind müssen die Ergebnisse für ganze U-Bahnnetze oder komplexere Stationen sehr spezifisch angepasst werden. Hier spielen die Anzahl der Stockwerke, die Anzahl und Lage der Ausgänge aus der Station, die Gestaltung von Verteilerebenen und Auf- und Übergängen eine wichtige Rolle. Zudem hängt die Auswahl aber auch von den Erfordernissen des Fahrbetriebes, den Sicherheitsbestimmungen bzw. den Wünschen des Betreibers ab.

Erkenntnisse zur Beeinflussung bzw. Minimierung der Gefährdungssituation durch eine geeignete Systemarchitektur bzw. bauliche Maßnahmen
- Aktueller Forschungsstand zur Sicherheit in Bahnhöfen
Das Thema Sicherheit auf Bahnhöfen ist in den letzten Jahren ein sehr präsentes Thema

in der Gesellschaft geworden; verantwortlich dafür sind in erster Linie immer wieder teils äußerst brutale Gewaltverbrechen und das große mediale Echo auf dieselbigen. So ist es nicht verwunderlich, dass im Zusammenhang mit den Suchbegriffen „Sicherheit“ und „U-Bahnhof“ von den großen Internetsuchmaschinen zunächst solche Treffer gelistet werden, die sich mit Gewaltverbrechen auseinandersetzen und auch die Homepage des Betreibers des untersuchten U-Bahnsystems sich beim Thema Sicherheit zunächst mit der Prävention von Gewaltverbrechen beschäftigt, bevor Ratschläge im Falle eines Brandfalls erteilt werden. Dabei sind Brände in U-Bahnhöfen und Tunnelanlagen nicht minder gefährlich und treten auch häufiger auf, als diese von den großen Nachrichtenmagazinen und Tageszeitungen vermittelt werden, zumeist aber glücklicherweise mit glimpflichem Ausgang. Neben zwei Ereignissen über die auch bundesweit in den Medien berichtet wurde, gab es in den letzten zehn Jahren zahlreiche kleine Brände in verschiedenen U-Bahnstationen und Tunneln des untersuchten U-Bahnsystems, die lediglich in Form kleiner Artikel in der Lokalpresse behandelt wurden. Als Ursache für diese wurden in den meisten Fällen Kurzschlüsse, Kabelbrände, Schwelbrände und Brandstiftung ermittelt und es ist vor allem der Umsicht der damals betroffenen Mitarbeiter des Betreibers zu verdanken, dass die Brände rechtzeitig entdeckt und gelöscht wurden. Um das Brandrisiko durch Schwellbrände zu senken, gilt seit einigen Jahren ein Rauchverbot auf allen Bahnhöfen, was jedoch wenig konsequent umgesetzt wird. So wird ein Brand in einem U-Bahnhof im Jahr 2009 auf eine weggeworfene Zigarettenkippe zurückgeführt.

Da der giftige Rauch die größte Gefahr für die Fahrgäste ist, ist es essentiell für diese, die Gefahrenzone schnellstmöglich zu verlassen, was durch die Architektur der Bahnhöfe teilweise erheblich erschwert wird. So hat die Stiftung Warentest bereits im Jahr 2001, noch vor den Anschlägen vom 11. September 2001, 28 große Bahnhöfe, die Verkehrsknotenpunkte innerhalb Europas darstellen, untersucht. Bewertet wurden unter anderem das Brandschutzkonzept sowie im Falle einer Evakuierung die Orientierung auf den Bahnhöfen und die vorhandenen Fluchtwege. Das Ergebnis ist ernüchternd; lediglich der Bahnhof Oriente in Lissabon, der zu diesem Zeitpunkt erst drei Jahre zuvor fertig gestellt wurde, bekam die Gesamtnote „Gut“, alle anderen Bahnhöfe erhielten Noten von „Befriedigend“ bis „Mangelhaft“. Zwei wichtige Bahnhöfe des untersuchten U-Bahnsystems schnitten bei der Untersuchung mit „Befriedigend“ ab. Bemängelt wurden vor allem die unzureichenden Brandschutzkonzepte der Bahnhöfe (Bewertung 3,8 und 3,4) sowie die schlechten Orientierungsmöglichkeiten auf den Bahnhöfen und insbesondere für einen der Bahnhöfe die extrem langen unterirdischen Fluchtwege. Neben der Stiftung Warentest führen auch noch andere Institutionen und Arbeitsgruppen Untersuchungen zur Brandgefährdung von U-Bahnhöfen durch, so zum Beispiel der TÜV Nord, der eine Beurteilung der Gefährdungssituation anhand von Brandsimulationen vorschlägt und vornimmt . Im Rahmen von OrGaMIR wurde nun eine bauliche Bewertung aller unterirdischen Bahnhöfe des untersuchten U-Bahnnetzes vorgenommen.

- Vorbereitung der Vermessungsgänge und Begehungsplan

Bevor mit der eigentlichen Vermessung der Bahnhöfe begonnen wurde, wurde zunächst ein Überblick über das gesamte System gewonnen. Anschließend wurden sieben möglichst

verschiedenartig gebaute U-Bahnstationen ausgewählt und begangen, um anhand ihrer architektonischen Eigenheiten die Bewertungskriterien zur Komplexität und zum Gefährdungspotential im Falle einer Verrauchung zu erstellen.

- Erstellung der Bewertungskriterien
Zur Erstellung der Bewertungskriterien zur Komplexität und zum Gefährdungspotential für die Fahrgäste im Falle einer Verrauchung eines Bahnhofes ist zunächst entscheidend zu wissen, wie sich Rauch aber auch die erwärmte U-Bahnluft im Normalfall verhält. Rauch, der bei einem Verbrennungsprozess entsteht, steigt für gewöhnlich auf und verteilt sich den Luftströmungen entsprechend; im Falle einer totalen Windstille steigt er daher gerade auf. Nur nach erfolgter Abkühlung ist Verbrennungsrauch so schwer, dass er wesentlich dichter als Luft ist und schon nach kurzer Aufstiegsphase abzusinken beginnt (vor allem aufgrund der mittransportierten relativ schweren Partikel, abhängig vom Verbrennungsprodukt). Da Rauch also in den meisten aller Fälle mit den Luftströmungen bewegt wird und nach oben steigt - gleiches wurde für die überwärmte U-Bahnluft insbesondere in den unteren Fahrebenen nachgewiesen wodurch diese Aussagen ebenfalls im Rahmen eines Terroranschlages gelten - sind die Decken-, Tunnel-, und Aufgangshöhen eines Bahnhofes entscheidend für das Überleben im Katastrophenfall.

Je niedriger die Deckenhöhen des Bahnsteiges und der Zwischenebenen sind, desto näher sind die Atemorgane der sich potentiell dort aufhaltenden Personen dem giftigen Rauch; die Aufgangshöhen sind entscheidend dafür, wie schnell der Rauch die Zwischenebenen erreicht. Besonders fatal sind daher solche Aufgänge, die deutlich höher sind, als die für gewöhnlich direkt neben ihnen liegenden Tunnel, und/oder die gleiche Höhe haben wie der gesamte Bahnsteig. Der Rauch kann aber nicht nur über die Aufgänge Zwischenebenen erreichen. Einige Bahnhöfe haben die architektonische Besonderheit galerieartiger Zwischenebenen, welche sich besonders verheerend im Fall eines Brandes oder Anschlages auswirken dürften. Die Zwischenebenen sind offen zum darunterliegenden Bahnhof; Rauch könnte also nicht nur über mehr oder weniger schmale Aufgänge auf die Zwischenebenen ziehen, sondern kann diese über die gesamte Breite des Bahnsteiges besonders schnell erreichen.

Bei einigen Bahnhöfen sind die Zwischenebenen zwar nicht galerieartig offen, dafür aber die Seitenwände der Aufgänge, so dass auch hier sehr viel mehr Rauch sehr viel schneller die Zwischenebene erreichen kann. Die Begehung einiger ausgewählter Bahnhöfe vorab (siehe oben) hat auch gezeigt, dass gerade die Lage und Gestaltung der Zwischenebenen maßgeblichen Einfluss auf die Überlebenswahrscheinlichkeit der Fahrgäste im Falle einer Brandkatastrophe hat, da man auf vielen Bahnhöfen nur über sie ins Freie gelangen kann. Die meisten Bahnhöfe mit Zwischenebenen verfügen über getrennte Zwischenebenen, die nur über den tiefer liegenden Bahnsteig miteinander verbunden sind, einige jedoch besitzen Zwischenebenen, die nebeneinander liegen oder hintereinander geschaltet sind, so dass sich der Rauch (oder Gas) auch von einer Zwischenebene zur nächsten zügig ausbreiten kann.

Daneben ist es natürlich für das Überleben entscheidend die potentielle Gefahrenzone schnell verlassen zu können. Gerade auf Bahnhöfen mit Umsteigmöglichkeiten sind die Zwischenebenen jedoch teilweise sehr unübersichtlich und verwinkelt, die Ausgänge dort

sind mitunter nur schwer zu erkennen oder ausschließlich über lange Wege zu erreichen. Diese Zwischenebenen dienen dann zum Teil auch noch anderen U-Bahnlinien oder aber auch S-Bahnlinien als Übergangsebene und gefährden in einem Brandfall dort somit nicht nur weitere Menschen, sondern hindern die Fahrgäste in der Gefahrenzone unter Umständen an einer schnellen Flucht. Die beste Fluchtmöglichkeit besteht natürlich bei Bahnhöfen mit direkten Ausgängen vom Bahnsteig ins Freie, ohne dazwischen geschaltete Zwischenebenen mit niedrigen Decken.

Ein weiterer Aspekt, der Personen generell eine Flucht vom Bahnsteig bzw. von den Zwischenebenen verkomplizieren kann, sind gebogene Bahnsteige, da die Beugung einen Überblick über den gesamten Bahnsteig deutlich erschwert und potentielle Ausgänge/Aufgänge nicht wahrgenommen werden können, zumal im Falle einer starken Verrauchung noch die Möglichkeit besteht selbst die Bahnsteigkrümmung nicht mehr richtig zu sehen und aufgrund dessen ins Gleisbett zu stürzen. Weiterhin erschwerend für eine Flucht sind schmale Aufgänge oder Ausgänge. Als schmal sind solche anzusehen, die schon bei normalen Fahrbetrieb kaum mehr als drei Fahrgäste nebeneinander den gleichzeitigen bequemen Aufstieg ermöglichen und es hier zwangsläufig zu Stausituationen kommt, die im Falle einer Panik, diese noch verschlimmern könnte. Neben der Breite der Aufgänge ist auch ihre Lage auf dem Bahnsteig entscheidend. Für gewöhnlich liegen an jedem Ende eines Bahnsteiges die Ausgänge, darüber hinaus verfügen mehrere auch noch über zusätzliche Aufgänge im mittleren Bereich des Bahnsteiges. Bei einigen Bahnhöfen liegen die Aufgänge jedoch ausschließlich mittig oder sind als sozusagen mittig zusammenführend bezeichnet worden. Damit gemeint sind brückenartige Aufgänge, die auf dem Bahnsteig mehr oder weniger mittig getrennt voneinander liegen, auf der Zwischenebene dann aber aufeinander zu laufen; so dass in Panik flüchtende Menschen auf der Zwischenebene sich direkt aufeinander zu bewegen würden, was zu einer weiteren Steigerung der Panik, zu Verletzten und zu Stausituationen führen kann.

Geschäfte sind als potentielle Gefahrenquellen eines Brandes auf zahlreichen Bahnsteigen ausgemacht worden. Bei den meisten Geschäften handelt es sich vorwiegend um größere oder kleinere Kioske (letztere meistens direkt auf dem Bahnsteig) und Bäckereien. Gerade bei U-Bahnhöfen mit Umsteigmöglichkeit wächst aber auch die Zahl und Größe der Geschäfte und es finden sich dort auch weitere Geschäfte wie Blumenhändler, Lebensmittelgeschäfte und Geschenkeläden. Von einigen Zwischenebenen führen auch Übergänge/Eingänge direkt in Geschäfte oder Einkaufspassagen.

Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen sind folgende 17 Kriterien zur Bewertung der Komplexität und des Gefährdungspotentials für Fahrgäste im Falle einer Verrauchung im Rahmen dieser Untersuchung erstellt worden:

1. Bahnhof verfügt über zwei U-Bahnebenen
2. Bahnhof verfügt über drei U-Bahnebenen
3. Bahnsteigdecke niedriger als 2,5m
4. Zwischenebenendecke niedriger als 2,5m
5. Bahnsteig besitzt keine direkten Aufgänge

6. Zwischenebenen sind miteinander verbunden
7. Zwischenebene ist auch Übergangsbereich zur S-Bahn, zu oberirdischen U-Bahnlinien oder für Kaufhäuser/Einkaufspassagen
8. Zwischenebene/n ist/sind galerieartig offen zum Bahnsteig
9. Zwischenebene/n ist/sind verwinkelt und/oder unübersichtlich
10. Zwischenebene/n und/oder Bahnsteig verfügen über Geschäfte
11. Zwischenebenen besitzen unterschiedlich viele Ausgänge (Differenz mehr als 1)
12. Aufgänge liegen nur mittig oder sind mittig zusammenführend
13. Lange Wege oder steile Aufgänge
14. Aufgänge sind seitlich offen
15. Aufgänge oder direkte Ausgänge sind schmal
16. Bahnsteig ist gebogen
17. Aufgang/Ausgang ist höher als der Tunnel

Diese 17 Kriterien werden entsprechend ihrer Bedeutung bezüglich des Gefährdungspotentials von Fahrgästen mit Hilfe eines Punkte-Systems unterschiedlich stark gewichtet.

Je negativer sich ein architektonischer Aspekt auf die Sicherheit der Fahrgäste im Falle einer Verrauchung auswirkt, desto größer ist sein Punktewert. Die Punktevergabe erfolgt in fünfer Schritten. Die Kriterien 7, 10, 11, 14, 15 und 16 werden als architektonische Eigenheiten gewertet, die nur einen geringen Einfluss auf die Sicherheit der Fahrgäste haben und mit fünf Punkten belegt. Mit 10 Punkten aufgrund ihres höheren Einflusses werden die Kriterien 1, 3, 5, 6, 9, und 13 bewertet. In Anbetracht ihres hohen Gefährdungspotentials im Fall einer Verrauchung erhalten die Kriterien 8, 12 und 17 jeweils 15 Punkte und die Bewertungskriterien 2 und 4 20 Punkte.

Punkte werden nur für negative bauliche Gegebenheiten vergeben, Positivpunkte zum Beispiel für das Nichtvorhandensein von Geschäften oder schmalen Aufgängen/Ausgängen werden nicht verteilt, da diese die negativen Auswirkungen der Bewertungskriterien auf die Sicherheit der Fahrgäste nicht adäquat kompensieren oder reduzieren können. So bleibt das Risiko auf einer Zwischenebene mit niedriger Deckenhöhe im Falle einer Verrauchung zu ersticken unvermindert gleich hoch, unterschiedslos ob diese über schmale oder breite Aufgänge erreicht werden kann oder mit Geschäften ausgestattet ist oder nicht. Die Vergabe von Positivpunkten würde die Bewertung nur verzerren und potentielle Risiken überdecken.

Nichtsdestotrotz sind neben den Bewertungskriterien noch zahlreiche andere architektonische Elemente und Informationen in den Datenblättern der Bahnhöfe vermerkt worden, um einen vollständigen Gesamteindruck von ihnen zu bekommen. Die Probebegehung der zu anfangs ausgewählten U-Bahnhöfe hat gezeigt, dass diese häufig nicht symmetrisch oder eben gebaut sind. So weisen zahlreiche Bahnhöfe verschiedene Deckenhöhen auf, meist offensichtlich in Form von Strukturdecken (Decken mit deutlich abgesetzten Mustern; mit pyramidenartigen, eckigen Halbhohlräumen), mitunter aber nicht gleichmäßig über den

Bahnsteig verteilt. Für gewöhnlich sind bei einem Bahnhof in der Mehrzahl auch nicht alle Ausgänge schmal, sondern nur einige oder auch nur ein einzelner.

Sollten für ein Bewertungskriterium verschiedene Ergebnisse vorliegen, wird im Sinne der Sicherheit der Fahrgäste immer das als Bewertungsgrundlage genutzt, welches sich am negativsten auf sie auswirken könnte. Punkte werden also auch dann vergeben, wenn nur einzelne Bereiche der Decke niedriger sind als 2,5m oder wenn nur einer von mehreren Ausgängen schmal ist. Es ist nicht verwunderlich, dass aufgrund der Vielzahl der Bahnhöfe, ihr unterschiedliches Alter und auch ihre Bedeutung innerhalb des Verkehrsnetzes ein einziger Bahnhof architektonische Strukturen aufweisen kann, die sonst kein anderer Bahnhof hat, die aber dennoch eine positive oder negative Rolle bei einer Entfluchtung spielen könnten. Diese sind dann bei dem jeweiligen Bahnhof unter Bemerkungen verzeichnet. Unter Bemerkungen finden sich aber auch alle Bauelemente, die zur besseren Vorstellung einer weiteren Erklärung bedürfen. Aus Gründen der Vertraulichkeit sind die Einzelbewertungen der Bahnhöfe dem Bericht nicht beigefügt.

- Dokumentation der architektonischen Bestandsaufnahme der Bahnhöfe
Insgesamt wurden bei allen Bahnhöfen 38 Bauelemente erfasst, diese wurden zum Teil mit ihrer Anzahl oder auch Höhenangaben erfasst zum Teil auch nur ihr Vorhandensein (ja/nein) vermerkt.

- Visualisierung und Auswertung
Zur besseren Auswertbarkeit der Bewertungen wurden auf Basis des Punktesystem sieben Gefährdungsstufen erstellt, von geringer Gefährdung bis außerordentlichen Gefährdung, in die die Bahnhöfe nach ihrer erzielten Punktzahl eingeordnet wurden. Sollte ein Übergangsbahnhof verschiedene Gefährdungsstufen für verschiedene Bahnsteige unterschiedlicher Linien aufweisen, so wird der Bahnsteig zur Ermittlung der Gefährdungsstufe herangezogen, der die schlechteste sprich höchste Bewertungspunktzahl erzielt hat

Die Auswertung ergab, dass es vor allem die Bahnhöfe ohne Übergangsmöglichkeit sind, die die Gefährdungsstufen gering und mäßig aufweisen. Es zeigt sich, dass in die zwei niedrigsten Gefährdungsstufen (die insgesamt 46% ausmachen) vor allem solche Bahnhöfe fallen, die keine Umstiegsmöglichkeit zu anderen Linien besitzen, dafür aber direkte Ausgänge aufweisen; von Gefährdungsstufe zu Gefährdungsstufe nimmt dann aber der Anteil der Bahnhöfe mit Übergängen zur S-Bahn oder anderen U-Bahnlinien kontinuierlich zu, bis schlussendlich die beiden höchsten Gefährdungsstufen nur von solchen Übergangsbahnhöfen gebildet werden. Mit gewissen Einschränkungen lässt sich also hieraus ableiten, dass die Gefährdung von Fahrgästen im Falle einer Verrauchung/Brandkatastrophe vor allem in Bahnhöfen mit Übergangsmöglichkeiten zu anderen Linien besonders hoch ist.

Abbildung 2.4 zeigt die Ergebnisse als Kreis-Diagramm. Wie daraus ersichtlich wird, gehören nach der vorgenommenen Bewertung insgesamt 29% der unterirdischen Bahnhöfe zu den vier höchsten Gefährdungskategorien (erhebliche bis außerordentliche Gefährdung), 45% hingegen aber immerhin zu den zwei niedrigsten Gefährdungsstufen (geringe und mäßige Gefährdung).

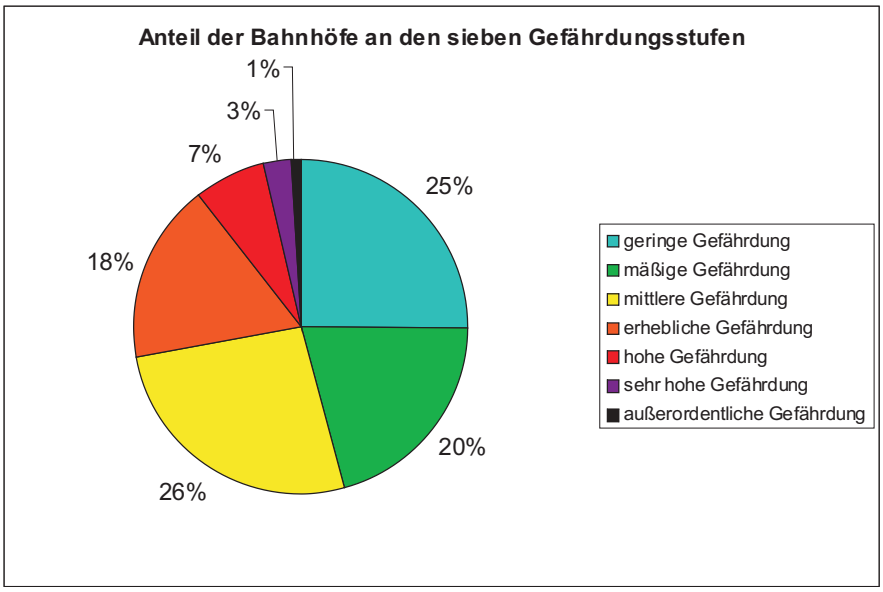

Abbildung 2.4: Anteil der Bahnhöfe an den sieben Gefährdungsstufen.

Diagramm 2.5 illustriert die Häufigkeit der einzelnen Kriterien bei der gesamten Bewertung. Es wird deutlich, dass einige architektonischen Aspekte häufiger anzutreffen sind, als andere. Die Kriterien vier und zehn (Zwischenebenendecke $<$ 2,5m und Zwischenebene oder Bahnsteig verfügt über Geschäfte) wurden in den untersuchten Bahnhöfen über 70-mal angetroffen, Kriterium fünf (Bahnsteig besitzt keine direkten Ausgänge) sogar 100-mal.

Gerade mit Hinblick auf das „herkömmliche“ Fluchtverhalten - der schnellen Flucht nach oben - ist vor allem die angetroffene Häufigkeit der Kriterien vier und zehn äußerst kritisch zu bewerten. Die große Anzahl der Bahnsteige ohne direkten Ausgang führt dazu, dass die Fahrgäste im Katastrophenfall über Zwischenebenen nach oben flüchten (müssen). Dabei stellen die oftmals niedrigen Decken in den Zwischenebenen eine noch höhere Gefährdung für die Passagiere dar, als das eigentliche Feuer selbst, da sich der giftige Rauch in Kopfhöhe der flüchtenden Fahrgäste befindet und schon wenige Atemzüge davon zum Tode führen können. Die Häufigkeit des Kriteriums fünf ist im Vergleich dazu nicht ganz so kritisch zu bewerten. Zwar stellt jedes Geschäft eine potentielle Brandquelle dar, jedoch haben sich diese in den letzten Jahren kaum als Startpunkt eines Feuers erwiesen (die meisten Brände sind auf Kurzschlüsse, Schwelbrände und Brandstiftung zurückzuführen). Sie sind zudem gesetzlich dazu verpflichtet einen Feuerlöscher bereit zu halten und zumindest die größeren unter ihnen verfügen darüber hinaus über Telefonanschlüsse, mit denen gegebenenfalls zusätzliche Hilfe angefordert werden kann.

In weitem Abstand zu den drei häufigsten Kriterien folgen die mit den Nummern elf, zwölf und 17 (Kriterium elf: Unterschiedliche Anzahl von Ausgängen von den Zwischenebenen; Kriterium zwölf: Aufgänge liegen nur mittig oder sind mittig zusammenführend; Kriterium

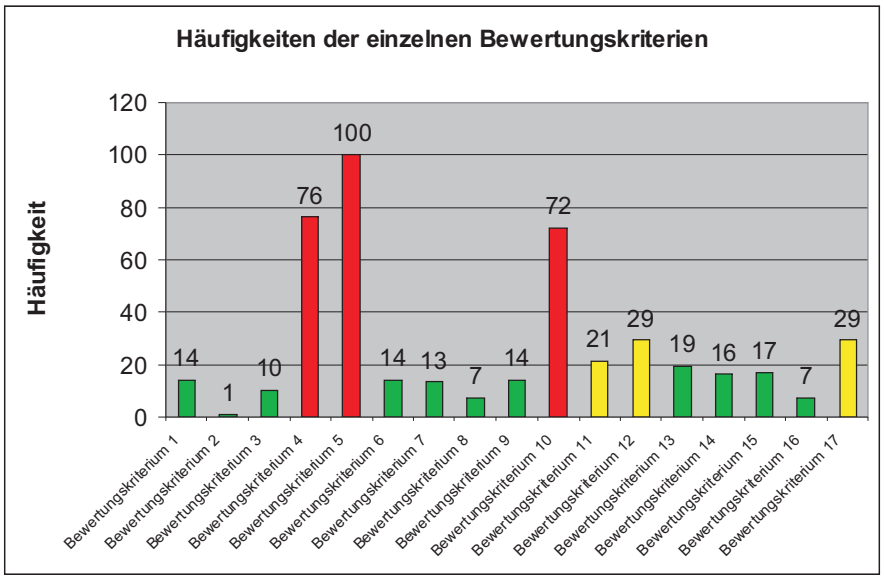

Abbildung 2.5: Häufigkeiten der einzelnen Bewertungskriterien.

17: Aufgangshöhe> Tunnelhöhe). Von diesen sind die Kriterien zwölf und 17 am kritischsten zu sehen, da in ihrem Fall der Rauch noch schneller auf die Zwischenebenen gelangen und durch die mittig zusammenführende Anordnung der Aufgänge zudem noch eine Stausituation für die flüchtenden Fahrgäste entstehen kann, da diese auf der Zwischenebene aufeinander zu strömen. Alle weiteren Kriterien sind jeweils weniger als 20-mal angetroffen worden. Positiv zu bewerten ist, dass ein gefährlicher baulicher Aspekt wie galerieartig offene Zwischenebenen (Kriterium acht) lediglich sieben Mal zu verzeichnen ist.

Eine Auswertung hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Bahnhöfe der verschiedenen Gefährdungsstufen über das Stadtgebiet zeigt kein regelmäßiges Muster was die Gefährdungsgrade der einzelnen U-Bahnhöfe angeht, sowohl die Bahnhöfe mit geringem Gefährdungsgrad als auch solche mit hohem bis außerordentlichen Gefährdungsgrad finden sich quer über die Stadt verteilt. Es lässt sich aber sehr wohl erkennen, dass es Streckenabschnitte im U-Bahnnetz gibt die gefährdeter sind als andere. So verfügen die zwei Linien jeweils nur über einen einzigen U-Bahnhof mit dem Status der geringen Gefährdung, dafür aber über zahlreiche Bahnöhfe deren Gefährdungsstufe bei erheblich und darüber hinaus liegt. Obwohl jüngsten Baudatums, weisen auch alle U-Bahnhöfe der neuesten Linie hohe Risiken auf. Die Streckenabschnitte, die vor 1930 in Betrieb genommen wurden und durch einfach gebaute Bahnhöfe gekennzeichnet sind und ein niedriges Gefährdungspotential aufweisen, lassen sich ebenfalls in der Karte erkennen.

Wie oben bereits erwähnt, weisen die Bahnhöfe mit den Inbetriebnahmejahren 1900-1929 oftmals niedrige Bewertungen auf, die sich stark von denen mit späterem Eröffnungsdatum unterscheiden. Dies wird umso anschaulicher (Abb. 2.6 bis Abb. 2.8), wenn eine

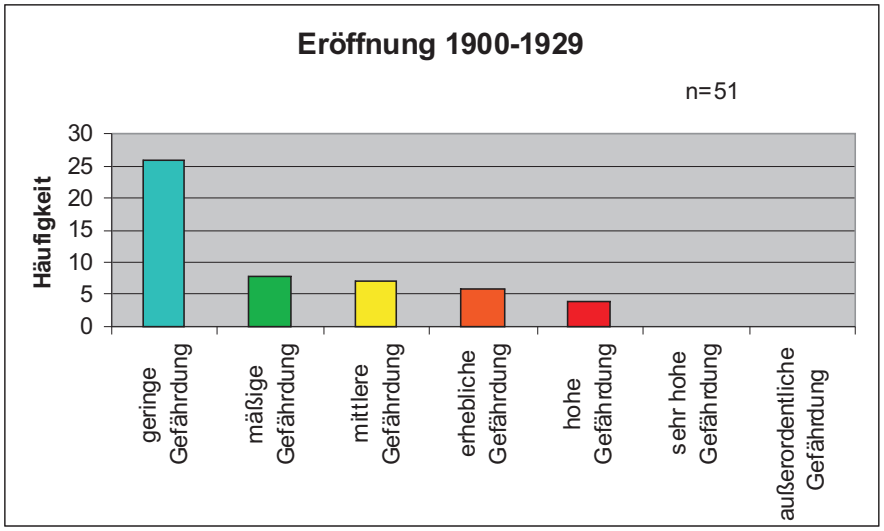

Abbildung 2.6: Häufigkeiten der einzelnen Gefährdungsstufen bei den Bahnhöfen mit den Eröffnungsjahren 1900-1929.

Unterteilung der bewerteten Bahnhöfe nach ihrem Inbetriebnahmejahr in vier Gruppen vorgenommen wird. Die Gruppe 1900-1929 hat ein überaus eindeutiges Maximum in der Gefährdungsstufe „gering“, wohingegen alle anderen Gruppen ihr Maximum, welches zudem weniger deutlich ausgeprägt ist, in der Gefährdungsstufe „mäßig“ besitzen. Dies ist vor allem auf den Umstand zurückzuführen, dass die Bahnhöfe der ersten 30 Jahre des 20. Jahrhunderts meist über direkte Ausgänge und keine Zwischenebenen verfügen.

- Fehleranalyse und Methodenkritik

Fehler bei den Messungen der Decken-, Aufgangs- und Tunnelhöhen können durch die Ungenauigkeiten des elektronischen Laser-Entfernungsmesser PLR 30 verursacht worden sein. Laut Hersteller liegt die Messgenauigkeit des elektronischen Laser-Entfernungsmesser PLR 30 bei +/- 2 mm. Bei den Begehungsgängen ist jedoch aufgefallen, dass diese den angegebenen Rahmen teilweise deutlich überschreiten und das bei zwei Messungen derselben Höhe teilweise Abweichungen im Bereich von mehreren cm angezeigt wurden. Diese Ungenauigkeiten waren umso stärker, je glatter und glänzender die Flächen waren, deren Höhe ermittelt werden sollte. Um die Fehlerquote möglichst gering zu halten wurden aus diesem Grund sämtliche Höhen jeweils dreimal vermessen. Darüber hinaus kann es auch noch zu individuellen Bedienungsfehlern gekommen sein. Da die weiteren Bewertungskriterien aufgrund von Beobachtungen bestätigt oder verneint wurden, ist nicht auszuschließen, dass einige baulichen Gegebenheiten bei den Begehungsgängen übersehen wurden, zum Beispiel seitlich offene Aufgänge oder Geschäfte. Insbesondere gilt dies aber für schiefe Decken und damit einhergehende unterschiedliche Deckenhöhen. Bei zahlreichen Bahnhöfen sind die Bahnsteigdecken nur augenscheinlich eben. In der Tat ist es vielmehr so, dass

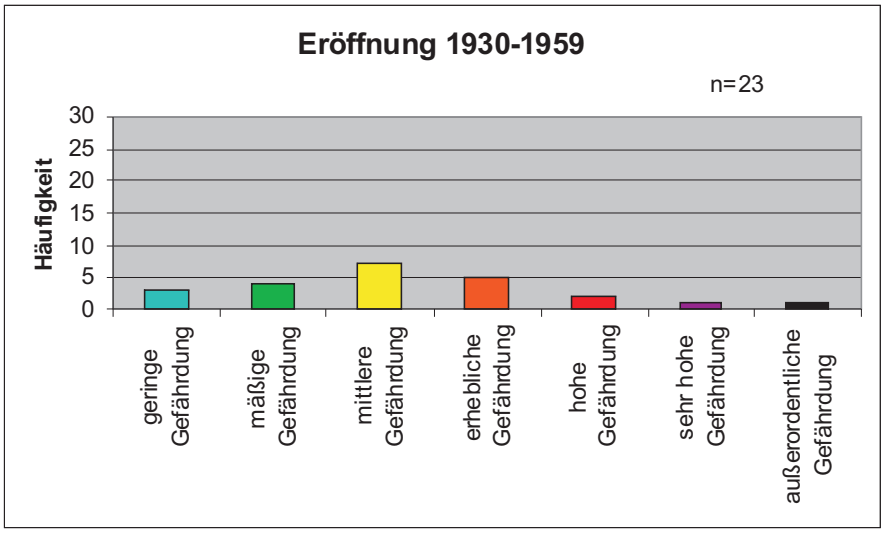

Abbildung 2.7: Häufigkeiten der einzelnen Gefährdungsstufen bei den Bahnhöfen mit den Eröffnungsjahren 1930-1959.

offensichtlich ebene Decken aber auch Böden mitunter Schwankungen von bis zu 20-30cm über die Bahnsteiglänge aufweisen. Diese Unebenheiten sind für den Betrachter nur sehr schwer auszumachen und sind erst im letzten Drittel der Begehungsgänge aufgefallen. Nach dieser Erkenntnis, sind die zuvor begangenen Bahnsteige noch einmal in Bezug auf dieses Kriterium hin untersucht worden, eine vollständige Dokumentation aller unebenen Decken und Böden kann jedoch nicht gewährleistet werden.

Das Kriterium „schmale Aufgänge/Ausgänge“ beruht lediglich auf Beobachtungen und nicht auf Vermessungen. Bei den Begehungsgängen wurde dokumentiert, wie viele Fahrgäste bequem nebeneinander die Treppe mit Gepäck hinaufgehen können; lag dieser Beobachtungswert bei weniger als vier, ist der Aufgang/Ausgang als schmal in den Datenblättern vermerkt worden. Im Nachhinein betrachtet hätte ein konkreter Wert für dieses Kriterium vorgegeben werden sollen.

Das Kriterium „lange Wege“ beruht ebenfalls auf keinem konkreten Wert, zumal dieses auch nur schwer hätte ausgemessen werden können, da zum Einen Fahrgäste häufig in den Messbereich laufen würden und der Entfernungsmesser nur Distanzen von 30 m und weniger erfasst. Wenn ein Weg zu einem Ausgang von einem relativ zentralen Punkt der Zwischenebene aus als lang bei der Bestandaufnahme empfunden wurde, so ist dies in den Datenblättern als Kriterium erfasst worden. Es lässt sich nicht ausschließen, dass einige Wege falsch eingeschätzt und trotz ihrer Länge in den Tabellen nicht erfasst wurden. Einige aufgenommene Kriterien sind erst im Verlauf der Begehungsgänge entstanden, da sich die jeweilige bauliche Gegebenheit bei den Probebegehungen bei keinem U-Bahnhof finden ließ, wie zum Beispiel Unterführungen oder Übergangstunnel.

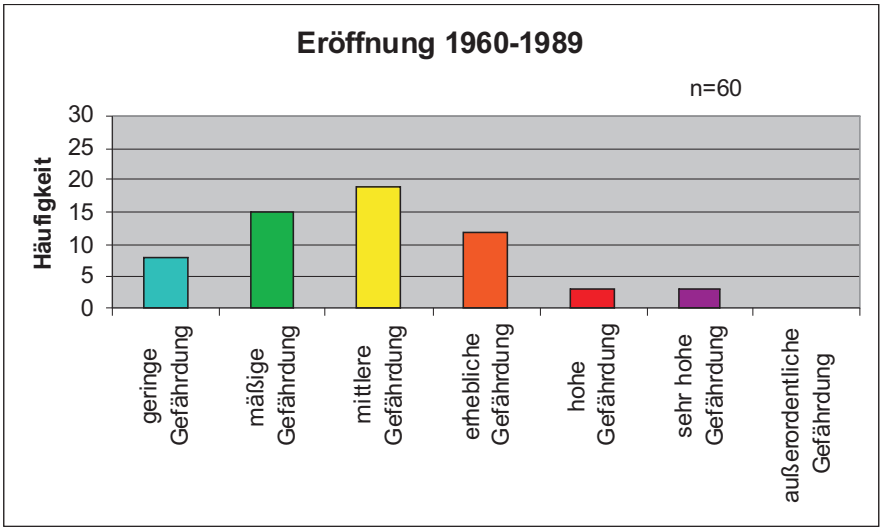

Abbildung 2.8: Häufigkeiten der einzelnen Gefährdungsstufen bei den Bahnhöfen mit den Eröffnungsjahren 1960-1989.

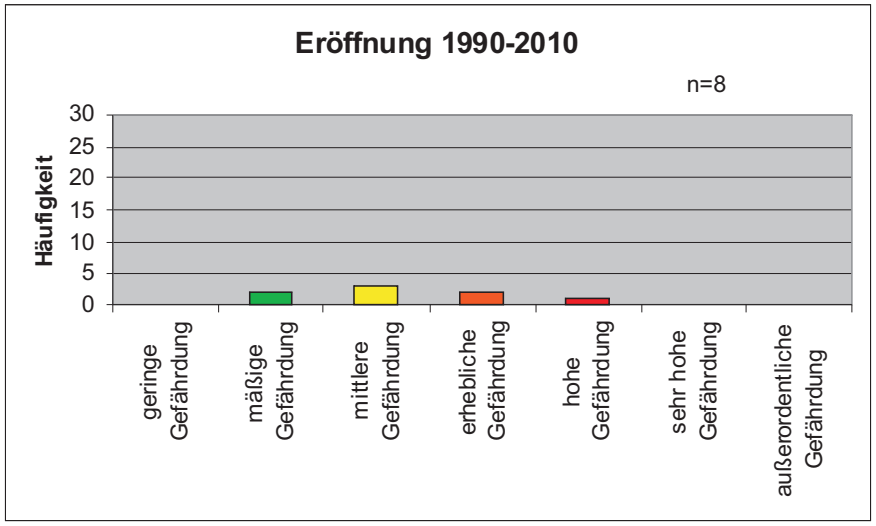

Abbildung 2.9: Häufigkeiten der einzelnen Gefährdungsstufen bei den Bahnhöfen mit den Eröffnungsjahren 1990-2010.

Die gewählten Kriterien und ihre Bewertung mit Punkten, welche entscheidend sind für die Einordnung eines U-Bahnhofes in eine bestimmte Gefahrenstufe, bieten sehr viel Diskussionspotential. Die Kriterien sind mit Hinblick auf ihren Gefährdungsgrad für Fahrgäste im Falle einer Verrauchung sorgfältig ausgesucht worden. In der Anfangsphase des Projektes wurde überlegt insgesamt 25 Bewertungskriterien für die Auswertung heranzuziehen, jedoch erschienen diese im weiteren Projektverlauf als zu zahlreich und es wurde schlussendlich eine Reduzierung auf 17 vorgenommen. Es ist bewusst, dass das eine oder andere Kriterium und sein Beitrag (oder Nicht-Beitrag im Falle seiner Nicht-Einbeziehung) als umstritten angesehen werden kann. So kann beispielsweise bemängelt werden, dass die Existenz von Übergangstunneln und Unterführungen nicht in die Bahnhofsbewertungen mit eingeflossen sind, obwohl es sich bei ihnen um langgezogene Gänge mit teils niedrigen Deckenhöhen handelt. Die Begehung der U-Bahnhöfe hat jedoch gezeigt, dass die meisten Übergangstunnel und Unterführungen unter dem Gleisniveau verlaufen. Berücksichtigt man die Verbreitung von Rauch im allgemeinen, nämlich das „Nach-oben-ziehen“ (vorausgesetzt der Rauch ist nicht aufgrund von zahlreichen mitgeführten großen Partikeln zu schwer zum Aufsteigen), so sind die tiefer gelegenen Übergangstunnel und Unterführungen vielleicht nicht als förderlich für eine schnelle Flucht zu bezeichnen, sie wirken sich aber auch nicht negativ auf diese aus und gewährleisten aufgrund ihrer tiefen Position länger atembare Luft als es verrauchte Zwischenebenen können.

- Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Architektur der U-Bahnhöfe äußerst vielschichtig ist, sich von Bahnhof zu Bahnhof stark voneinander unterschieden kann und dass ihre Ausgestaltung sich maßgeblich auf die Sicherheit der Fahrgäste im Katastrophenfall (sei es nun im Brandfall oder bei einem Terroranschlag) auswirkt. Positiv zu bewerten ist, dass ein Großteil der Bahnhöfe nach den vorgenommen Bewertungskriterien in die drei unteren Gefährdungsstufen fallen und lediglich 29% der Bahnhöfe die oberen vier Gefährdungsstufen aufbauen, unter denen sich allerdings auch die meisten U-Bahnhöfe mit Umsteigmöglichkeit und damit wichtige Verkehrsknotenpunkte befinden. Die Flucht ist (im allgemeinen) umso schwieriger von einem U-Bahnsteig zu bewerkstelligen, je mehr Übergangsmöglichkeiten ein U-Bahnhof bereit hält, da dann in den meisten Fällen auch verwinkelte und unübersichtliche Zwischenebenen, lange Gänge und steile Treppen vorzufinden sind.

Das größte Sicherheitsrisiko, nicht nur bei den U-Bahnhöfen mit Umsteigmöglichkeit, sind die oftmals niedrigen Zwischenebenendecken. Selbst bei Bahnhöfen, deren restliche Architektur keinen Grund zur Beanstandung gibt, würden sie sich im Verrauchungsfall als fatal für die Sicherheit der Fahrgäste erweisen, da sich der Rauch hier direkt in Kopfhöhe der Flüchtenden sammeln würde. Die Deckenhöhen der meisten Zwischenebenen können im Nachhinein, wenn überhaupt, wahrscheinlich nur mit viel Aufwand verändert werden, da die Überdeckungshöhen mitunter nur wenige dcm betragen; jedoch gäbe es Möglichkeiten, die Situation schon präventiv zu entschärfen.

Im Gegensatz zu den Deckenhöhen, lassen sich die Aufgangshöhen sehr viel leichter verändern. Deutlich niedrigere Aufgangshöhen und konsequent abschließende Rauchschürzen

(bei den Bestandsaufnahme der der U-Bahnhöfe wurden bei vielen zwar Hinweisschilder, die als Rauchschürzen fungieren, angetroffen, jedoch erstreckten sie sich in vielen Fällen nicht über die komplette Aufgangsbreite) könnten das Risiko, was von niedrigen Zwischenebenendecken zwar nicht aufheben, jedoch aber zumindest etwas reduzieren. Bei Aufgängen, deren Seiten offen sind, könnten diese durch Wände geschlossen werden. Obwohl aus ästhetischer Sicht äußerst ansprechend, sind vor allem galerieartig offene Zwischenebene ein großes Sicherheitsrisiko, da der Rauch aufgrund der fehlenden Wände noch schneller auf die Zwischenebenen gelangen und den Flüchtenden innerhalb kürzester Zeit den Weg abschneiden kann. Diese architektonische Gegebenheit wurde nur bei wenigen Bahnhöfen angetroffen, jedoch scheint gerade in den letzten Jahren dieses wieder zu einem bevorzugten Stilelement geworden zu sein. Bei Errichtung neuer Bahnhöfe sollte dringend auf dieses Bauelement verzichtet werden.

Auch die Unübersichtlichkeit vieler Zwischenebenen könnte vermindert werden. Auf zahlreichen Zwischenebenen sieht man die Ausgänge aufgrund zahlreicher Geschäfte, Winkel und Nischen nicht. Eine klarere Gestaltung würde sich auch hier positiv auf die Sicherheit der Fahrgäste auswirken.

Wie unter den Ergebnissen aufgeführt, sind es vor allem die älteren U-Bahnhöfe, die relativ einfach strukturiert und zumeist mit direkten Ausgängen ausgestattet sind. Auch wenn diese häufig schmal sind, so bieten sie dennoch die besten Fluchtwege. Sie sind für gewöhnlich kurz, wenig steil und führen direkt an die Oberfläche, die ein durchschnittlich trainierter Mensch auch mit angehaltenem Atem innerhalb weniger Sekunden erreichen kann. Zwar würde im Gefahrenfall der Rauch ebenfalls entlang der direkten Ausgänge nach oben entweichen, jedoch hat er dort im Gegensatz zu den Zwischenebenen keinerlei Möglichkeit sich zu sammeln und zu verdichten und die nach oben flüchtenden Menschen könnten dem Rauch bei Erreichen der Oberfläche schnell entkommen. Das Anlegen neuer Ausgänge ist aufwendig und teuer, jedoch sollte dies bei anstehenden Generalinstandsetzungen von U-Bahnhöfen als Möglichkeit zur Verbesserung der Sicherheit der Fahrgäste in seiner Machbarkeit zumindest überprüft werden.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabelle 2.1: Wichtigste Ausgabepositionen.

Position	Ziffer	Betrag (Euro)
Beschäftigte E12-E15	812	427.253,07
sonstige Beschäftigungsentgelte	822	39.449,17
Gegenstände bis zu 410 Euro	831	39.989,97
Vergabe von Aufträgen	835	271.844,05
Verbrauchsmaterial	843	8.632,95
Dienstreisen	846	51.539,37
Gegenstände und Investitionen über 410 Euro	850	108.682,70
Summe		**947.391,18**

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle durchgeführten Arbeiten waren nach heutigem Ermessen notwendig und angemessen.

2.4 Verwertbarkeit des Ergebnisses

Mit der exemplarischen Umsetzung des OrGaMIR-Systems aus Detektion, Tunnelklimatologie, Ausbreitungsrechnung und -simulation, Visualisierung sowie Informationsverdichtung und Generierung von Handlungsempfehlungen steht ein System zur Verfügung, das dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechend ermöglicht, Rettungseinsätze in U-Bahn-Systemen zu optimieren und die Sicherheit für die Beteiligten zu erhöhen. Das OrGaMIR-System ist dabei das einzig bekannte System, welches gemessene und modellierte Daten der Strömungssituation in ein solches Sicherheitssystem integriert.

Von Seiten der Tunnelklimatologie steht mit dem Ausbreitungsmodell zur Beschreibung der aktuellen sowie der Prognose der zu erwartenden Ausbreitung erstmalig ein Modell zur Verfügung, welches die Ausbreitung in einem komplexen Gesamtsystem abbildet. Das Modell integriert die erhobenen Mess- und Geometriedaten. Es ist erweiterbar um weitere Geometrie- und Klimamessdaten sowie andere systemspezifische Daten wie z.B. Angaben zur Orographie, zu aktiver Belüftung, Belüftungsschächten etc. und unter Anpassung der Daten übertragbar auf andere U-Bahn-Systeme.

Somit kann ein System angeboten werden, dass Betreibern und Rettungskräften eine auf eine aktuelle Gefährdungslage ausgerichtete Reaktion ermöglicht.

Neben dieser dynamischen Komponente mit aktueller Lagefeststellung konnten im Projekt auch verschiedene allgemeingültige Erkenntnisse gewonnen werden aus denen sich allgemeine Hinweise für den präventiven Brandschutz und die Flucht- und Rettungswegeplanung, sowie für die Planung und Umsetzung baulicher Anlagen ableiten lassen. Hier besteht die Möglichkeit U-Bahn-Betreiber zur Optimierung ihrer Notfallpläne für Entfluchtung und Rettung zu beraten, sowie Beratungsleistungen in der Bauphase von U-Bahnsystemen anzubieten.

2.5 Fortschritte anderer

Es sind uns keine Fortschritte anderer im Bereich der tunnelklimatologischen Forschung bekannt. Vielmehr müssen wir es als unsere Aufgabe ansehen die durch uns erlangten Ergebnisse einem breiteren Publikum bekannt zu machen. Dieses wurde bereits auf zahlreichen Vorträgen sowie Universitätsseminaren begonnen und ist durch zukünftige Veröffentlichungen zu erweitern.

2.6 Veröffentlichungen

PFLITSCH, A.; BRÜNE, M.; STEILING, B.; KILLING-HEINZE, M.; AGNEW, B.; IRVING, M.; LOCKHART, J. (2012): Air flow measurements in the underground section of a UK light rail system. In: Applied Thermal Engineering. Vol. 32, S. 22-30.

PFLITSCH, A.; BRÜNE, M.; RINGEIS, J. & KILLING-HEINZE, M. (in Druck): ORGAMIR - Development of a safety system for reaction of an event with emission of hazardous airborne substances - like a terror attack or fire - based on subway climatology. Tagungsband für: ISTSS 2010, Frankfurt am Main, 17. - 19.03.2010

PFLITSCH, A.; BRÜNE, M.; RINGEIS, J. & KILLING-HEINZE, M. (2009): ORGAMIR - Development of a safety system for reaction of an event with emission of hazardous airborne substances - like a terror attack or fire - based on subway climatology. 7th International Conference for Urban Climate (ICUC-7), Yokohama, Japan, 29.06. to 03.07.2009, ICUC-Proceedings auf DVD, Nr. 3759771-1-090520202709-002.pdf

Vorträge

- OrGaMIR - Development of a safety system for reaction to an event with emission of hazardous airborne substances - like a terrorist attack or fire - based on subway climatology, Tunnel Safety and Security, 4th International Symposium, Frankfurt am Main, Germany, 17.-19.03.2010

- U-Bahnklimatologie - Fluchtwege als Todesfallen ,IBM - Deutschland, Berlin, 13.01.2010 (01/10)

- U-Bahnklimatologie - Fluchtwege als Todesfallen, 28. Jahrestreffen des AK-Klima 2009, Hamburg, 30.10.-01.11.2009 (11/09)

- OrGaMIR - Development of a safety system for reaction to an event with emission of hazardous airborne substances - like a terrorist attack or fire - based on subway climatology, The 7th Conference on Urban Climate, ICUC7, Yokohama, Japan, 29.06.-03-07.2009

- Subway-Climatology in Newcastle upon Tyne - selected results, Newcastle University, Newcastle upon Tyne, UK, 08.06.2009 (06/09)

- ORGAMIR - Development of a safety system for reaction of an event with emission of hazardous airborne substances - like a terror attack or fire - based on subway climatology, Newcastle University, Newcastle upon Tyne, UK, 09.10.2008 (10/08)

- Subway-Climatology - A new field of research for managing fires and terror-attacks in subway systems., Newcastle University, Newcastle upon Tyne, UK, 08.10.2008 (10/08)