

Forschung und Entwicklung

Optimierung der Rauchableitung und Personenführung in U-Bahnhöfen: Experimente und Simulationen (ORPHEUS)

Teilvorhaben:

Entrauchungskonzepte für komplexe unterirdische Verkehrsstationen

Schlussbericht



Förderkennzeichen: 13N13381

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Technologiezentrum

Forschungsstelle:

Rud. Otto Meyer Technik Ltd. & Co. KG

Forschung und Entwicklung

Tilsiter Straße 162

D-22047 Hamburg

Tel.: +49 (0)40 / 6949 - 2204

Fax: +49 (0)40 / 6949 - 2609

FuE@ROM-Technik.de

www.rom-technik.de

Autoren: Dipl.-Ing. Holm Klusmann
Dipl.-Ing. Peter Thiel (Projektleiter)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N13381 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichungen liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Aufgabenstellung ROM Technik F&E	8
1.2	Voraussetzungen ROM Technik F&E.....	9
1.3	Planung, wissenschaftlicher Stand vor Beginn des Vorhabens	11
1.4	Schutzrechte	13
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	13
1.6	Insolvenz der Imtech Deutschland GmbH & Co. KG	13
2	Zielsetzungen und Grenzwerte (AP 2.1)	15
3	Entrauchungskonzepte für neue und existierende Anlagen (AP 2.3)	16
3.1	Grundlagen: Modellgesetze / Ähnlichkeitskennzahlen	17
3.1.1	Geometrische Ähnlichkeit	18
3.1.2	Physikalische Ähnlichkeit.....	18
3.1.3	Maßstabsfaktoren zwischen Modell- und Hauptausführung	19
3.2	Grundlagen: Thermikvolumenstrom.....	22
3.3	Grundlagen: Erfassung von Schadgasen mit Hilfe von Drallströmungen.....	23
3.4	Maßnahmen zur Begrenzung der Rauchausbreitung innerhalb der von einem Brand betroffenen Ebene	26
3.4.1	Modellbau	26
3.4.2	Brandherdmodellierung.....	29
3.4.3	Modellierung der Tunnelwiderstände	34
3.4.3.1	Druckverlust-Volumenstrom-Messung über den Bauwerkskörper	34
3.4.3.2	Nachbildung der Tunnelwiderstände mit Lochblechen.....	36
3.4.3.3	Variation der Tunnelwiderstände.....	36
3.4.3.4	Ergebnisse der Versuchsreihe „Variation der Tunnelwiderstände“	37
3.4.3.5	Vergleichsgröße der Tunnelwiderstände.....	40
3.4.4	Entrauchungskonzepte für die Rauchbegrenzung innerhalb eines Bahnsteigs	41
3.4.4.1	U-Bahnbrand ohne maschinelle Entrauchung.....	41
3.4.4.2	Konzept mit punktueller Entrauchung	44
3.4.4.3	Konzepte mit linienförmiger Entrauchung	46
3.4.5	Entrauchungskonzepte für die Rauchbegrenzung in der Verteilerebene	51
3.4.5.1	Geschäftsbrand in der Verteilerebene.....	52

3.4.5.2	Gepäck- bzw. Kinderwagenbrand in der Verteilerebene	56
3.5	Maßnahmen zur Verhinderung einer geschossübergreifenden Rauchausbreitung	61
3.5.1	Untersuchung von typischen Aufgangsbreiten.....	62
3.5.2	Modellbau und Brandherdmodellierung	64
3.5.3	Massstabsfaktoren.....	67
3.5.4	„Nullversuch“.....	68
3.5.5	Linienabsaugung	69
3.5.6	Sperrströmung	70
3.5.7	Sperrströmung in Kombination mit einer Rauchschrürze	71
3.5.8	Linienabsaugung und Sperrströmung	72
3.5.9	Kombination Linienabsaugung und Luftschleier	73
3.5.10	Fazit	74
4	Übertragbarkeit auf andere Infrastrukturen (AP 2.6)	76
5	Zusammenfassung	81
6	Veröffentlichung der Ergebnisse	83
7	Literatur	87
	Videoverzeichnis	90
	Abbildungsanhang	91

1 Einleitung

Ziel des Vorhabens ist die Erforschung von Konzepten zur Verbesserung der Personensicherheit im Brandfall in unterirdischen Verkehrsanlagen.

Als Teil unserer städtischen Infrastruktur sind Verkehrsanlagen von zentraler Bedeutung für unsere Gesellschaft. Eine besonders große Herausforderung hinsichtlich der Sicherheit stellen unterirdische Verkehrsanlagen dar. Dies spiegelt sich in den geförderten Projekten wie z. B. METRO (Schweden, [1]) oder OrGaMIR / OrGaMIRPLUS (BMBF, [2], [3]) wider, aber auch z. B. in dem Bauprojekt Stuttgart 21, bei dem der Brandschutz immer wieder kontrovers diskutiert wird. Risiken und Gefahren werden einerseits durch Schadensereignisse deutlich, die viele Opfer forderten und ein großes Medienecho auslösten (z. B. King's Cross oder Daegu, siehe Bild 1.1) aber insbesondere durch häufig auftretende Vorfälle, die nicht in den Fokus der Öffentlichkeit gelangt sind (Berlin 2000 [4], Frankfurt 2010 [5], Berlin 2011 [6]).



Bild 1.1: Rauchaustritt aus einem brennenden U-Bahnhof in Daegu, Südkorea (2003) [7].

Die besondere Schwierigkeit und Komplexität einer Schadenslage, die durch einen Brand entsteht, wurde in OrGaMIR nicht behandelt und in dem Projekt METRO nicht vollständig bearbeitet. Im letzteren wurden nur am Rande Entrauchungsmaßnahmen für einfache Stationstypen untersucht. Bisher fehlt beispielsweise die Entwicklung von Entrauchungskonzepten für komplexe Anlagen, die zentral für die Sicherheit von Personen in unterirdischen Verkehrsanlagen ist und in diesem Projekt im Zentrum stehen werden. Die Komplexität eines solchen Szenarios beruht im Wesentlichen auf der aktiven Ausbreitung von heißem Rauch

oder anderen Schadstoffen in thermisch getriebenen Strömungen. Diese können eine starke Dynamik entwickeln, sind nur schwer zu beherrschen und stellen für den Schutz und die Rettung von Menschen die größte Gefahr dar. Rauch erschwert in erheblichem Maße die Eigenrettung von Personen und die Arbeiten der Rettungskräfte, weil durch ihn die Sicht- und Orientierungsbedingungen sowie die Atemluftqualität in drastischer Weise verschlechtert werden. Der überwiegende Anteil von Opfern, die bei Bränden zu beklagen sind, ist auf die toxische Wirkung des Brandrauchs zurückzuführen. Im Gegensatz zu Straßentunneln und Bahnhöfen stellen U-Bahnhöfe mit stark variierenden und geringen Deckenhöhen von bis zu 2,20 m zudem ein erhebliches Gefahrenpotential dar. Diese Faktoren stellen das interorganisationale Krisenmanagement vor massive Herausforderungen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes ORPHEUS (**O**ptimierung der **R**auchableitung und **P**ersonenführung in U-Bahnhöfen: **E**xperimente und **S**imulationen) sollen Konzepte und Lösungen zur Verbesserung der Personensicherheit und der Gefahrenabwehr in unterirdischen Verkehrsanlagen erarbeitet werden, wobei der Fokus auf Brandszenarien mit starker Rauchentwicklung liegt. Die drei Forschungsschwerpunkte sind:

- 1) Realbrandversuche und Erfassung des Ist-Zustandes der existierenden technischen Schutzmaßnahmen, der Sicherheitskonzepte, der Messtechnik und der Validität numerischer Werkzeuge
- 2) Technologien und Konzepte zum Schutz von Personen vor Brandrauch insbesondere von Menschen mit speziellen Bedürfnissen und Einschränkungen, und
- 3) Einbindung der Ergebnisse in das interorganisationale Krisen- und Einsatzmanagement. Diese beinhalten einerseits die präventiven Schutzmaßnahmen in Form von Konzepten zur Entrauchung, andererseits die reaktive Erfassung der Gefahrenlage und die Einbeziehung der Rettungskräfte sowie der direkten und indirekten Beteiligten.

Ein besonderes Merkmal des Projektes stellen reale Brandversuche in einer unterirdischen U-Bahnstation mit mehreren Ebenen dar. Hierfür wird von den Berliner Verkehrsbetrieben ein sich in Betrieb befindlicher Bahnhof zur Verfügung gestellt.

Um den Schutz vor Brandrauch zu erhöhen, werden Konzepte in Form von Maßnahmen zur Rauchkontrolle oder maschineller Entrauchung erarbeitet. Bei den Arbeiten zur Konzipierung von Entrauchungssystemen werden kritische bzw. störungsanfällige Bereiche der Fluchtwege beachtet. Um die Dynamik der Auswirkungen von Störungen, z. B. durch toxische Rauchgase oder verringerte Sichtweiten, zu evaluieren, werden auch numerische Simulationen zur Evakuierung und Rauchausbreitung herangezogen.

Die beiden in diesem Vorhaben betrachteten Szenarien sind zum einen ein Brand in einem in den Bahnhof einfahrenden U-Bahnwagen und zum anderen ein Brand in einer Verteilerebene. Als Ursache kommen technische Defekte, Brandstiftung oder Terroranschlag in Frage. Im Fokus des Projekts stehen ursachenunabhängig die Rauchentwicklung und die dadurch entstehende Gefahr für Menschen. Heiße toxische Rauchgase können bereits durch einen kleinen Brand schnell in großen Mengen erzeugt werden und sich rasch ausbreiten. Dieser zieht aufgrund des thermischen Auftriebs über Treppenaufgänge, Belüftungsschächte u.a. Öffnungen nach oben. Häufig bilden Treppenaufgänge, welche von fliehenden Personen genutzt werden, jedoch die einzigen Abzugswege. Im ersten Szenario (Brand in einem einfahrenden U-Bahnwagen) sind die Bewegungsrichtungen von giftigem Rauch und Menschen identisch.

Aufgrund der zunehmend multiplen Verwendungszwecke von Verteilerebenen, z. B. in Form von Geschäften, Kiosken oder Imbissständen, sollen im zweiten Szenario Brände in einer solchen Ebene betrachtet werden. Problematisch an dieser Stelle ist die Tatsache, dass es meist nur eine einzige Verteilerebene gibt, durch welche alle Wege von den Gleisen nach oben und damit alle Fluchtwege führen. Somit würden im Notfall die Menschen, den Fluchtwegmarkierungen folgend, von einer nicht verrauchten Ebene nach oben in einen stark verrauchten Bereich laufen. Im Falle von großen Menschenmengen z. B. zu Stoßzeiten bliebe der Rückweg nach unten durch nachströmende Menschen versperrt.

.

1.1 Aufgabenstellung ROM Technik F&E

Das vorliegende Teilprojekt der ROM Technik Ltd. & Co. KG mit dem Titel "Entrauchungskonzepte für komplexe unterirdische Verkehrsstationen" umfasst das Themengebiet der Entrauchungstechniken. Das Ziel dieses Teilprojekts ist die Erforschung innovativer Methoden und Konzepte um zukünftige Schutzmaßnahmen, insbesondere der Rauchableitung, effektiver zu gestalten.

Unterirdische Anlagen stellen für den Brandschutz aufgrund folgender Aspekte eine besondere Herausforderung dar:

- a) komplexe Gebäudestrukturen – viele Ebenen, Verbindung von Räumen durch Gänge,
- b) kompakte Volumen – die Raumhöhe ist in existierenden Anlagen sehr niedrig, sodass entstehender Brandrauch direkt in Kontakt mit Personen treten kann,
- c) hohes Personenaufkommen – U-Bahnsysteme sind auf den Transport großer Menschenmengen ausgerichtet, welche im Allgemeinen heterogen sind.

Diese besondere Komplexität erfordert die Erforschung neuer innovativer Ansätze.

Das Ziel der Forschungsarbeiten von ROM Technik ist die Erforschung eines Entrauchungskonzeptes und der dafür notwendigen lufttechnischen Maßnahmen, die sich sowohl auf existierende als auch neu zu bauende unterirdische Bahnstationen übertragen lassen.

Der Forschungsgegenstand lässt sich hierbei im Wesentlichen in zwei zu betrachtende Aspekte gliedern:

1. **Maßnahmen zur Begrenzung der Rauchausbreitung innerhalb der von einem Brand betroffenen Ebene**

Wegen der geringen lichten Höhen unterirdischer Verkehrsanlagen in Verbindung mit der bei einem Brand zu erwartenden nennenswerten Rauchentwicklung ist mit einer raschen Verrauchung der Verkehrswege, die auch als Flucht- und Rettungswege dienen, zu rechnen. Gleichzeitig ist wegen

des möglichen hohen Personenaufkommens davon auszugehen, dass der für die Eigenrettung der Personen benötigte Zeitbedarf erhöht ist. Anlagentechnische Maßnahmen können die zur Verfügung stehende Zeit verlängern und damit das Ausmaß auftretender Personenschäden reduzieren.

In diesem Zusammenhang ist zu untersuchen, welche (lufttechnischen) Maßnahmen zur Begrenzung der Rauchausbreitung innerhalb einer Ebene zielführend sind und von welchen Einflussfaktoren ihre Dimensionierung maßgeblich bestimmt ist.

2. Maßnahmen zur Verhinderung einer geschossübergreifenden Rauchausbreitung

Es ist zu erwarten, dass die Volumenströme, die zur Begrenzung der Rauchausbreitung innerhalb einer Ebene notwendig sind, verhältnismäßig groß werden. Insbesondere für Bestandsgebäude ist hierbei die Umsetzung entsprechender Konzepte aus baulichen Gründen in Frage zu stellen. Daher besteht ein weiteres (gleichwertiges) Forschungsziel darin, lokale lufttechnische Konzepte zu identifizieren und zu optimieren, die eine geschossübergreifende Rauchausbreitung verhindern.

1.2 Voraussetzungen ROM Technik F&E

Die Forschung und Entwicklung (F&E) bei ROM Technik bietet seit fast 50 Jahren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten als Dienstleistungen im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung an. Seit den 70er Jahren steht ein leistungsstarkes, sehr gut ausgerüstetes strömungs- und wärmetechnisches Labor zur Verfügung. Die Vermessung von Räumen in verschiedenen Lastsituationen und mit verschiedenen TGA-Ausrüstungen (Lüftung, Heizung, Kühlung) im Maßstab 1:1 gehört zum Standard-Leistungsspektrum des Labors. Darüber hinaus werden Modellversuche zur Um- und Durchströmung von Gebäuden und Anlagen sowie zur Entwicklung von Brandschutzkonzepten von Großgebäuden durchgeführt, bei Bedarf die Entwicklung von Sonderkomponenten vorgenommen und als weiterer

Schwerpunkt die Entwicklung von Rauch- und Schadstofffassungssystemen vorangetrieben.

Seit ca. 30 Jahren wird zudem Gebäude-, Anlagen- und Strömungssimulation bei der ROM Technik F&E betrieben. Alle Werkzeuge zur umfassenden integralen Planung von komplexen Projekten, zum Teil in Zusammenarbeit mit dem BMBF entwickelt, sind vorhanden.

Forschungsschwerpunkte sind u. a. die energetische Optimierung von Gebäuden und Anlagen, die Verbesserung der Luftqualität und Behaglichkeit, die Minderung der Schadstoff- und Wärmebelastung an industriellen Arbeitsplätzen und die Entwicklung von Konzepten zur Rauchfreihaltung von Rettungswegen im Brandfall [8]. Architektonische Besonderheiten oder andere Einschränkungen erfordern hinsichtlich der Entrauchung regelmäßig die Erarbeitung von Sonderlösungen. Ein Beispiel stellt das Entrauchungskonzept im Mercedes-Benz Museum in Stuttgart dar (Bild 1.2). Um zu verhindern, dass im Falle eines Brandes Personen zu Schaden kommen oder wertvolle Ausstellungsgegenstände mit Brandrauch kontaminiert werden, wurde eine zunächst ungewöhnlich erscheinende Lösung entwickelt, die den Betrieb des Museums in seiner offenen Bauweise erst ermöglichte:

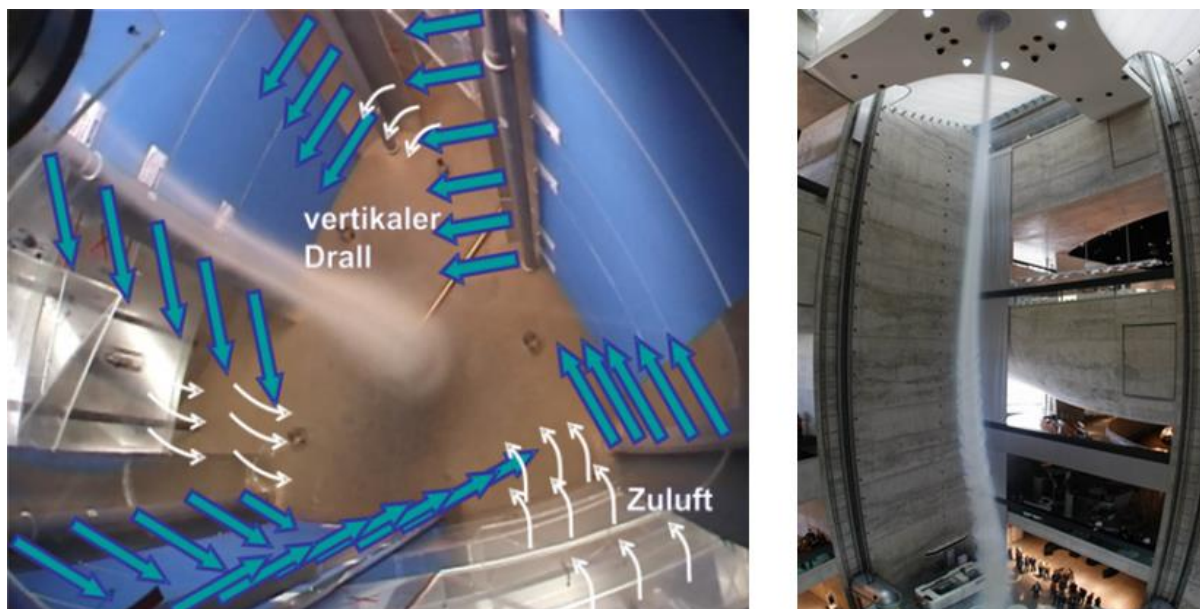


Bild 1.2: Drallentrauchung Fa. ROM Technik, Modell- und Realversuch. (Quelle: ROM)

Im Falle eines Brandes strömt der Brandrauch über die großen Öffnungen aus den Ausstellungsbereichen in das Atrium ab. Um zu verhindern, dass der Brandrauch in die weiteren Ausstellungsebenen eindringt, wurde ein künstlicher Tornado entwickelt, der sich über die gesamte Höhe des Atriums (ca. 40 m) erstreckt. Durch sein hohes Druckgefälle vom Randbereich zum Auge des Taifuns wird der Brandrauch aufgenommen und über einen im Dachbereich angeordneten Axialventilator ins Freie geführt([9], [10]).

Neben zahlreichen weiteren durchgeführten Auftragsarbeiten zur Entwicklung von Entrauchungskonzepten von Gebäuden (z. B. Flughafen Düsseldorf, Multifunktionsarena Düsseldorf, Maritim Hotel Düsseldorf, Pumpspeicherwerk Vianden, Messeturm Frankfurt/M.) wurden auch Forschungsarbeiten (z. B. HERMES, vfdb-Ringversuch zur Validierung von RWA-Dimensionierungsmethoden), diverse Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten sowie eine Dissertation [11] im Rahmen des Themenkomplexes Brandentrauchung im Labor durchgeführt.

1.3 Planung, wissenschaftlicher Stand vor Beginn des Vorhabens

Die besondere Schwierigkeit bei der Dimensionierung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen in unterirdischen Bahnstationen ergibt sich daraus, dass der Brandrauch aufgrund seines thermischen Auftriebs über Öffnungen nach oben abzieht. Bei den Öffnungen handelt es sich häufig um Treppenaufgänge, welche von fliehenden Personen genutzt werden. Bauliche Maßnahmen zur Verhinderung des Rauchübertritts können nur bedingt verwendet werden, da diese auch den Personenverkehr behindern würden.

Eine Möglichkeit zur funktionalen Nachweisführung von Entrauchungsanlagen ist die Durchführung von Versuchen mit sog. kleinskaligen Modellen. Diese bilden eine Betrachtungsebene zwischen numerischen Simulationen und Realversuchen und können im Gegensatz zu Realversuchen auch gut für Parameteruntersuchungen genutzt werden. Hiermit wird die Rauchausbreitung im Brandfall unter Berücksichtigung objektspezifischer Anfangs- und Randbedingungen in einem Modell

untersucht, sodass sich der Einfluss einzelner baulicher oder strömungstechnischer Maßnahmen auf die Rauchausbreitung bewerten und optimieren lässt.

Modellversuche werden bereits seit den 1970er Jahren – damals insbesondere zur Ermittlung von Raumströmungszuständen klimatisierter Räume – durchgeführt (z. B. [12], [13], [14]). Sie basieren auf Ähnlichkeitstheoretischen Betrachtungen strömungsmechanischer Vorgänge. Hiernach sind die Strömungsvorgänge in einem Modell und dessen Original dann gleichartig, wenn neben der Geometrie auch andere physikalische Größen wie z. B. Wärme- oder Volumenströme in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen. Die Methode gestattet daher die Untersuchung von Strömungsvorgängen sowie die Untersuchung der Auswirkung lufttechnischer Maßnahmen auf diese Strömungsvorgänge in einem Raum, ohne dass aufwändige Versuche im Originalbaukörper durchgeführt werden müssen. Hinsichtlich der Übertragbarkeit der an Modellen ermittelten Untersuchungsergebnisse auf die entsprechenden Originale wurden in der Vergangenheit vielfache Nachweise geführt (siehe z. B. auch Bild 1.2).

Selbstverständlich lassen sich Raumströmungen – insbesondere auch Raumströmungen während eines Brandgeschehens – heute alternativ mit Hilfe numerischer Verfahren (CFD) untersuchen. Es ist jedoch festzustellen, dass experimentelle Verfahren bei verhältnismäßig komplexen Baukörpergeometrien und einer hohen Anzahl zu untersuchender Varianten nennenswerte zeitliche Vorteile in sich bergen, wenn der notwendige Modellbau abgeschlossen ist. In der Vergangenheit wurden unterirdische Bahnstationen in der Regel nicht mit Anlagen zur Rauchableitung ausgerüstet. Daher bestehen gegenwärtig keine grundlegenden Konzepte, die eine – zumindest in Teilen – standardisierte Auslegung derartiger Anlage ermöglichen.

1.4 Schutzrechte

Im Hinblick auf die Erarbeitung effizienter Konzepte zur Rauchableitung werden ggf. spezielle (Rauch-) Absaugelemente eingesetzt. Ein derartiges Element steht mit der sog. Drallabsaugung zur Verfügung, die durch das europäische Patent EP 0 998 986 B1 geschützt ist. Patentinhaber ist ROM Technik Ltd. & Co. KG.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes bestanden keine direkten Abhängigkeiten der anderen Projektpartner von den Ergebnissen der Arbeiten bei ROM Technik.

Es erfolgten regelmäßig Abstimmungen mit den Projektpartnern insbesondere im Arbeitspaket AP 2.1 bezüglich der Zielsetzungen und Grenzwerte. Hier ist insbesondere mit der BAM eine enge Abstimmung erfolgt, welche Brandszenarien bei der Entwicklung von Entrauchungskonzepten zugrunde zu legen sind [15].

1.6 Insolvenz der Imtech Deutschland GmbH & Co. KG

Der Forschungsantrag im Projekt Orpheus wurde ursprünglich durch die Fa. Imtech Deutschland gestellt und nach Genehmigung im Februar 2015 begonnen. Im Sommer 2015 befand sich das Unternehmen unerwartet in einer Schieflage und die Imtech Deutschland GmbH & Co. KG hat am 06. August 2015 beim zuständigen Amtsgericht Hamburg einen Antrag auf Eröffnung eines Insolvenzverfahrens gestellt. In Absprache mit dem Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem VDI Technologiezentrum GmbH wurde vereinbart, von einem sofortigen Widerruf des Zuwendungsbescheides zunächst abzusehen und das Vorhaben für Imtech bis zur Übernahme durch einen neuen Gesellschafter ruhen zu lassen. Für den Zeitraum des Ruhestatus wurde festgelegt, dass keine weiteren Arbeiten für das Forschungsvorhaben durchgeführt werden und infolge dessen keine Kosten gegenüber dem Forschungsträger geltend gemacht werden können.

Trotz dieser Maßgabe entschied sich die F&E nach Rücksprache mit allen Projektpartnern weiterhin am Informationsaustausch (Telefonkonferenzen) und eini-

gen Treffen der Verbundpartner auf eigene Kosten teilzunehmen, um die Kontinuität des Forschungsvorhabens bei einer Projektförderung zu gewährleisten.

Nach Abschluss des vorläufigen Insolvenzverfahrens wurde am 01. November 2015 durch das Amtsgericht Hamburg das Insolvenzverfahren über das Vermögen der Imtech Deutschland GmbH & Co. KG endgültig eröffnet.

Die Rud. Otto Meyer Technik Ltd. & Co. KG, ein Tochterunternehmen der in Bremen ansässigen Gustav Zech Stiftung, hat am 12. November 2015 rund 2.300 Mitarbeiter der insolventen Imtech Deutschland übernommen. Im Anschluss hat die ROM Technik am 12.02.2016 als neuer Verbundpartner die insolvente Imtech mit allen Rechten und Pflichten in Orpheus ersetzt und seine Arbeiten im Projekt fort geführt.

.

2 Zielsetzungen und Grenzwerte (AP 2.1)

Von Februar 2015 bis Juli 2015 (M1-M7) hat sich ROM Technik (seinerzeit noch Imtech) im Rahmen des Arbeitspaketes AP 2.1 an der Konkretisierung von Zielen und Grenzwerten beteiligt, die durch anlagentechnische Maßnahmen erreicht werden können.

Dazu erfolgte die allgemeine Einarbeitung in das Themengebiet durch Literaturrecherchen zu bauordnungsrechtlichen Anforderungen und bestehenden Schutzzielen im Hochbau bzw. in Personenverkehrsanlagen des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV).

Neben den üblichen Technischen Regeln zum baulichen und anlagentechnischen Brandschutz wie z.B. der Musterbauordnung (MBO), der VDI 2019 und der DIN 18232 zur Rauch- und Wärmefreihaltung wurden spezifische Regelwerke auf Hinweise bzgl. der zu definierenden Schutzziele und Grenzwerte insbesondere in unterirdischen Verkehrsanlagen durchsucht. Beispielhaft seien an dieser Stelle folgende Quellen genannt:

- Leitfaden für den Brandschutz in Personenverkehrsanlagen der Eisenbahnen des Bundes
Eisenbahn-Bundesamt, Januar 2001 mit Stand vom 01.03.2011
- Technische Regeln für Straßenbahnen, Brandschutz in unterirdischen Betriebsanlagen (TRStrab Brandschutz)
Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI),
Ausgabe 24. Juni 2014

Des Weiteren erfolgte eine enge Abstimmung mit den beteiligten Verbundpartnern. Vor Abschluss der Arbeiten in diesem Arbeitspaket trat Imtech aus den zuvor genannten Gründen in den Ruhestatus.

Einen ausführlichen Ergebnisbericht zum Thema „Schutzziele und Grenzwerte“ hat die BAM verfasst [16].

3 Entrauchungskonzepte für neue und existierende Anlagen (AP 2.3)

Das Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Erarbeitung lufttechnischer Maßnahmen zur Entrauchung einzelner Ebenen einer unterirdischen Bahnstation sowie zur sicheren Abschirmung der Treppenanlagen, die eine vertikale Rauchausbreitung innerhalb der Station verhindern sollen. Dazu werden an maßstäblich verkleinerten Modellen Versuche durchgeführt, die die Rauchausbreitung zeigen sowie die Entwicklung von Maßnahmen zur Rauchableitung ermöglichen.

Als typisches Bauwerk für eine unterirdische Bahnstation wird die Berliner U-Bahnstation „Osloer Straße“ ausgewählt, die als Vorlage für die Projekte aller beteiligten Partner dient. Vorteil dieses real existierenden Bauwerks ist es, dass neben den CFD-Simulationen und Modellversuchen auch Vor-Ort-Versuche und – Messungen durchgeführt werden können.

Die Durchführung der Untersuchungen bei ROM Technik erfolgt an zwei Modellbauten mit unterschiedlichen Maßstäben.

- Modellversuche zur Begrenzung der Rauchausbreitung innerhalb der von einem Brand betroffenen Ebene (Gesamtstationsmodell M 1:15)
- Modellversuche zur Verhinderung einer geschossübergreifenden Rauchausbreitung (Ausschnittmodell M 1:5)

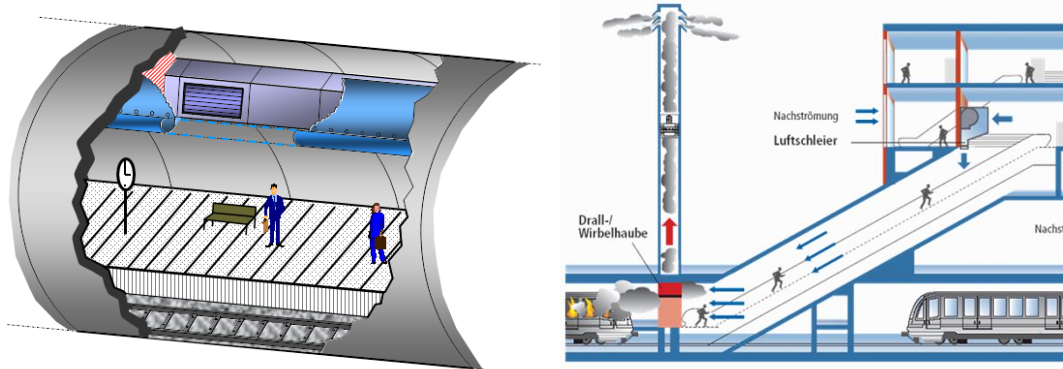


Bild 3.1: Prinzipdarstellungen: Begrenzung der Rauchausbreitung innerhalb der von einem Brand betroffenen Ebene (links); Verhinderung der geschossübergreifenden Rauchausbreitung (rechts)

3.1 Grundlagen: Modellgesetze / Ähnlichkeitskennzahlen

Die eine Strömung beschreibenden Differenzialgleichungen (erweiterte Navier-Stokes Gleichungen) sind bis auf wenige Ausnahmen nur durch aufwändige numerische Rechenverfahren lösbar. Die sich in komplexen geometrischen Gebilden einstellenden Strömungsverhältnisse sind jedoch auch in Modellversuchen mit vertretbarem Aufwand darzustellen.

Modellversuche im verkleinerten Maßstab setzen die Ähnlichkeit der Strömungen voraus. Zwei physikalische Vorgänge sind dann ähnlich, wenn sie physikalisch gleichartig sind und wenn alle Größen, die die betreffenden Vorgänge beeinflussen, also auch die Randbedingungen, ähnlich sind. Die Verhältnisse einander entsprechender Größen sind somit konstant und werden Ähnlichkeitskonstanten genannt.

Im Folgenden werden die Zusammenhänge der Ähnlichkeitskonstanten aufgezeigt. Nachstehend findet sich eine Erläuterung der verwendeten **Formelzeichen**

f	Ähnlichkeitskonstante (dimensionslos)
u	Geschwindigkeit in m/s
ρ	Dichte in kg/m ³
l	Länge in m
g	Erdbeschleunigung in m/s ²
T	Temperatur in K
T_{∞}	Umgebungstemperatur in K
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz in K
Δp	Druckdifferenz in Pa
η	dynamische Zähigkeit in kg/(ms)
ν	kinematische Zähigkeit in m ² /s
\dot{V}	Volumenstrom in m ³ /s
V	Volumen in m ³
A	Fläche in m ²
τ	Zeit in s

und **Indizes**

O	Original
M	Modell.

Grundlegende Fachaufsätze zur Durchführung von Modellversuchen finden sich z. B. in [12][13][14].

3.1.1 Geometrische Ähnlichkeit

In dem hier vorliegenden Aufbau wird die U-Bahnstation im Maßstab M 1:15 nachgebildet. Der Maßstabsfaktor f_l für die geometrische Ähnlichkeit lautet somit:

$$f_l = \frac{l_M}{l_O} = \frac{1}{15} = 0,0667 \quad (1)$$

3.1.2 Physikalische Ähnlichkeit

Werden die Ähnlichkeitskonstanten für Länge, Druck, Temperatur, Geschwindigkeit, usw. in die allgemeinen Bewegungsgleichungen eingesetzt, dann müssen, wenn die Systeme ähnlich sind, auch die Konstanten vor den einzelnen Gliedern gleich groß sein. Für eine freie turbulente Strömung ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\frac{f_\rho \cdot f_u^2}{f_l} = \frac{f_g \cdot f_\rho \cdot f_{\Delta T}}{f_{T_\infty}} = \frac{f_{\Delta p}}{f_l} = \frac{f_\eta \cdot f_u}{f_l^2} \quad (2)$$

I
II
III
IV

I Ähnlichkeitskonstante der Beschleunigungskräfte

II Ähnlichkeitskonstante der Massenkkräfte (Auftrieb)

III Ähnlichkeitskonstante der Druckkräfte

IV Ähnlichkeitskonstante der Reibungskräfte

Durch Gleichsetzen der Terme I und IV erhält man

$$\frac{f_\rho \cdot f_l \cdot f_u}{f_\eta} = 1 \quad (3)$$

bzw. die als *Reynoldszahl* bekannte Beziehung

$$Re = \frac{\rho u l}{\eta} = \frac{u l}{\nu} \quad (4)$$

Aus Term I und Term III folgt mit

$$\frac{f_{\Delta p}}{f_{\rho} \cdot f_u^2} = 1 \quad (5)$$

die *Eulerzahl*

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho u^2} \quad (6)$$

Schließlich ergibt sich durch Gleichsetzen der Terme I und II

$$\frac{f_g \cdot f_l \cdot f_{\Delta \vartheta}}{f_{T_{\infty}} \cdot f_u^2} = 1 \quad (7)$$

die *Archimedeszahl*

$$Ar = \frac{g l \Delta \vartheta}{T_{\infty} u^2} \quad (8)$$

Die Strömungsformen im zu betrachtenden Fall sind freier turbulenter Natur. Grundsatzuntersuchungen in der Strömungsmechanik zeigen, dass die Reynoldszahl in diesen Fällen ohne Einfluss auf die Ähnlichkeit des Strömungsverlaufes ist. Hieraus folgt direkt, dass es für die Ähnlichkeit der Strömungsvorgänge hinreichend ist, neben der geometrischen Übereinstimmung zwischen Original und Modell, die Gleichheit der Archimedeszahl und der Eulerzahl einzuhalten.

3.1.3 Maßstabsfaktoren zwischen Modell- und Hauptausführung

Die nachfolgend dargestellten Maßstabsfaktoren gelten für ein Brandszenario von $\dot{Q}_o = 22,2$ MW im Maßstab M 1:15¹.

¹ An dieser Stelle wird mit der Größe des Brandszenarios und dem gewählten Modellmaßstab späteren Ausführungen vorgegriffen (vgl. Kapitel 3.4.2).

Aus der Bedingung $Ar = \text{const}$ resultiert die Forderung

$$\frac{f_g \cdot f_l \cdot f_{\Delta\vartheta}}{f_{T_\infty} \cdot f_u^2} = 1 \quad (9)$$

Einige der in der Gleichung vorkommenden Maßstabsfaktoren können in gewissen Grenzen frei für das Modell gewählt werden, andere ergeben sich zwangsläufig.

Durch die Festlegung der Maßstäbe

$$f_g = \frac{g_M}{g_O} = 1,0 \quad (10)$$

$$f_{T_\infty} = \frac{T_{\infty M}}{T_{\infty O}} = 1,0 \quad (11)$$

und resultierend aus der Brandherdmodellierung

$$f_{\dot{Q}} = \frac{\dot{Q}_M}{\dot{Q}_O} = 6,76 \cdot 10^{-5}$$

kann mit der physikalischen Grundgleichung für den Wärmestrom

$$f_{\dot{Q}} = f_l^2 \cdot f_u \cdot f_\rho \cdot f_{c_p} \cdot f_{\Delta\vartheta} \quad (12)$$

der Geschwindigkeitsmaßstab f_u berechnet werden. Unter der Maßgabe, dass bei Verwendung des Mediums Luft die Maßstabsfaktoren im brandherdfernen Bereich für die Dichte $f_\rho \approx 1$ und die spezifische Wärmekapazität $f_{c_p} \approx 1$ sind, ergibt sich:

$$f_u = \sqrt[3]{\frac{f_{\dot{Q}}}{f_l}} = 0,1004. \quad (13)$$

Daraus kann eingesetzt in Gleichung (9) der Maßstabsfaktor für die Temperaturdifferenz bestimmt werden:

$$f_{\Delta\vartheta} = \frac{\Delta\vartheta_M}{\Delta\vartheta_O} = \frac{f_{\dot{Q}}}{f_u \cdot f_l^2} = 0,151. \quad (14)$$

Im Weiteren ergibt sich aus der Kontinuitätsgleichung

$$\dot{V} = A \cdot u \quad (15)$$

die Beziehung

$$f_{\dot{V}} = f_l^2 \cdot f_u = 4,46 \cdot 10^{-4} . \quad (16)$$

Zusammenfassend ergeben sich für das Brandszenario mit 22,2 MW die wesentlichen physikalischen Maßstabsfaktoren für die vorliegende Studie bei einem geometrischen Maßstab von M 1:15 wie folgt:

Geschwindigkeitsfaktor: $f_u = \frac{u_M}{u_o} = 0,1004 \quad (17)$

Längenmaßstab: $f_l = \frac{l_M}{l_o} = 0,067 \quad (18)$

Flächenfaktor: $f_A = \frac{A_M}{A_o} = \frac{l_M^2}{l_o^2} = 0,0044 \quad (19)$

Volumenfaktor: $f_V = \frac{V_M}{V_o} = \frac{l_M^3}{l_o^3} = 3 \cdot 10^{-4} \quad (20)$

Volumenstromfaktor: $f_{\dot{V}} = \frac{\dot{V}_M}{\dot{V}_o} = \frac{u_M \cdot l_M^2}{u_o \cdot l_o^2} = 4,46 \cdot 10^{-4} \quad (21)$

Wärmestromfaktor: $f_{\dot{Q}} = \frac{\dot{Q}_M}{\dot{Q}_o} = \frac{u_M \cdot l_M^2 \cdot \Delta\vartheta_M}{u_o \cdot l_o^2 \cdot \Delta\vartheta_o} = 6,76 \cdot 10^{-5} \quad (22)$

Zeitfaktor:
$$f_{\tau} = \frac{\tau_M}{\tau_O} = \frac{u_O \cdot l_M}{u_M \cdot l_O} = 0,664 \quad (23)$$

Für die Bewertung der Strömungsverhältnisse im Modell sei an dieser Stelle angemerkt, dass die strömungsmechanischen Vorgänge jeweils gegenüber dem Original um den entsprechenden Kehrwert des Zeitfaktors f_{τ} schneller ablaufen.

3.2 Grundlagen: Thermikvolumenstrom

Im Folgenden soll zunächst der grundlegende Mechanismus erläutert werden, mit dem Brandrauch in vertikaler Richtung über einem Brandherd nach oben gefördert wird.

Eigenbewegungen von Schadstoffen in der Raumluft können folgende Ursachen aufweisen:

- Dichteunterschiede (z. B. Warmluftströme),
- Druckunterschiede (z. B. Gasstrahl aus Behälteröffnung),
- äußere Kräfte (z. B. Impulsübertragung bei der Freisetzung) oder
- Diffusion infolge von Konzentrationsunterschieden.

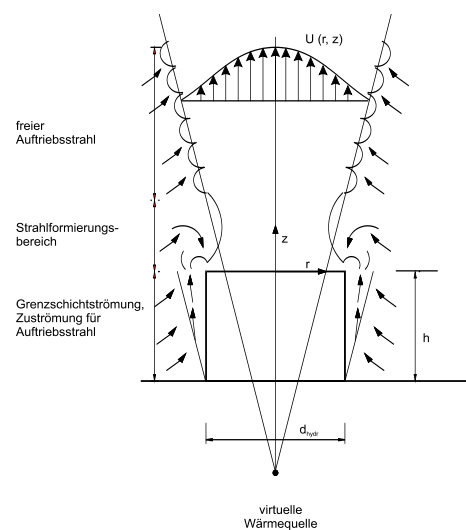


Bild 3.2: Thermikstrahl

Die Emission von Brandrauch und die durch hohe Temperaturen hervorgerufenen Dichteunterschiede an der Freisetzungsstelle bilden einen Thermikstrahl aus, innerhalb dessen die Verbrennungsprodukte nach oben transportiert werden. Dieser Strahl baut seine Geschwindigkeit analog dem Verhalten eines normalen Freistrahles ab, indem er Luft aus der Umgebung induziert. Damit nimmt das durch Schadstoffe belastete Luftvolumen mit der Lauflänge des Strahles zu. Warmluftstrahlen lassen sich nach der Strömungscharakteristik in den Strahlformierungsbereich und den Ähnlichkeitsbereich einteilen (vgl. Bild 3.2).

Im Strahlformierungsbereich löst sich die an einer horizontalen Fläche erwärmte Luft ab und bildet anschließend einen vertikalen Thermikstrahl aus. Das Ablösen geschieht ideal in der Mitte der horizontalen Fläche und real meist an mehreren unbestimmten Punkten. Die nach oben strömende Luft wird von der Seite durch Umgebungsluft ersetzt. Im Strahlformierungsbereich bilden sich viele Wirbel, wobei Strömungsrichtung und Luftgeschwindigkeit hier sehr stark schwanken. Hierfür liegen keine analytischen Berechnungsgleichungen vor.

Über dem Strahlformierungsbereich beginnt der Ähnlichkeitsbereich. Dieser Strahlbereich ist gekennzeichnet durch eine stetige Strahlverbreiterung und durch die Ähnlichkeit der Geschwindigkeits- und Temperaturprofile quer zur Strahlachse. Die Profile haben dabei die Form der sogenannten Gaußschen Glockenkurve. Bei Thermikströmungen tritt eine Überlagerung von Temperatur- und Konzentrationsunterschieden sowie ein Impuls- und Wärmeaustausch mit der Umgebungsluft ein. Thermik- und Konvektionsströmungen sind durch halbempirische Gleichungen einer Berechnung zugänglich und wurden in einer umfangreichen Arbeit untersucht [11].

3.3 Grundlagen: Erfassung von Schadgasen mit Hilfe von Drallströmungen

Eine Schwierigkeit bei der Erfassung von Schadgasen besteht in der geringen Tiefenwirkung von Saugströmungen. Bereits in geringer Entfernung von der Saugöffnung sinkt die Geschwindigkeit auf einen Bruchteil der Geschwindigkeit in der Öffnungsfläche. In Bild 3.3 ist beispielhaft ein Vergleich der Geschwindigkeiten im Nahbereich einer Saug- bzw. Zuluftöffnung dargestellt. Während auf der Saugseite die Geschwindigkeit in 100 mm Entfernung nur 0,5 m/s beträgt, beträgt sie auf der Abströmseite auf der Mittenachse in 1.000 mm Entfernung noch 3 m/s.

Bei **punktuellen Erfassungen** wirkt sich deren lokal begrenzte Wirksamkeit in unmittelbarer Nähe der Absaugöffnung ungünstig aus. Schadgase in gewisser Entfernung zur Absaugöffnung können nicht mehr erfasst werden und strömen an der Erfassung vorbei.

Besitzen die zu erfassenden Schadgase noch einen Eigenimpuls, z. B. aufgrund von Thermikbewegung, muss die erfassende Strömung möglichst ein ausgeprägtes Unterdruckfeld aufweisen. Günstig wirkt sich auch eine **linienförmige Erfassung** aus, die das nahe Vorbeiströmen an der Absaugöffnung verhindern kann.

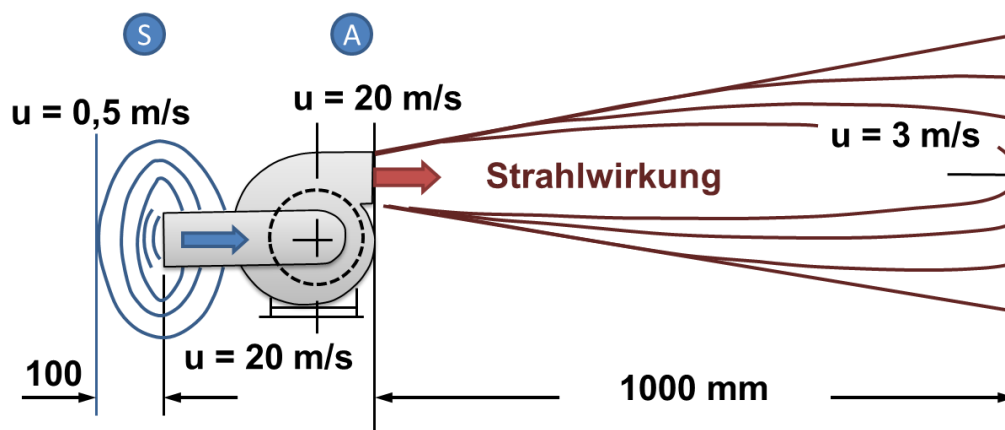


Bild 3.3: Geschwindigkeitsfeld auf der Saug- und Abströmseite eines Ventilators

Beide Forderungen werden von einer Strömungsform erreicht, die in der Natur bei Wirbelstürmen entsteht und als Drallströmung bezeichnet wird. Die Basis für ein derartig um ein Zentrum mit hoher Umfangsgeschwindigkeit rotierendes Strömungsfeld bildet die Überlagerung von Unterdruckgebieten, die technisch z. B. durch zyklische Anordnung von Strömungssenken realisiert werden. Der Grundkörper der Erfassungseinheit wird durch eine zylinderförmige Geometrie gebildet. Er ist so gestaltet, dass das abzusaugende Fluid (Schadgas-Luft-Gemisch) exzentrisch zur Achse des rotierenden Feldes in dieses Element einströmt. Dadurch wird die zu erzeugende Drallströmung angeregt und stabilisiert.

Durch die logarithmische Spiralen bildenden Stromlinien wird das Schadgas zum Drallzentrum geleitet und dort abgeführt. Die Umfangsgeschwindigkeiten des Rotationsfeldes um das Wirbelzentrum erreichen Werte von bis zu ca. 250 km/h. Damit verbunden sind Unterdrücke im Wirbelkern, die mehrere tausend Pascal betragen können.

Bild 3.4 zeigt die Drallströmung im Schnittbild. Es ist gut zu erkennen, wie innerhalb der Erfassungseinrichtung das Fluid auf spiralförmigen Bahnen zum Zentrum des Rotationsfeldes transportiert wird. Hierbei nimmt die Strömungsgeschwindigkeit

keit umgekehrt proportional zum Abstand vom Zentrum zu, wobei sich Maximalwerte ergeben, die die mittlere Geschwindigkeit innerhalb der Saugkanäle um ein Vielfaches überschreiten. Längs der Drehachse des Wirbels, der sich von Senke zu Senke erstreckt, bleiben die Druckverhältnisse vollständig konstant, sodass auch ein gleichförmiges, linienförmiges Absaugen über die Erfassungslänge im Erfassungssegment erreicht wird.

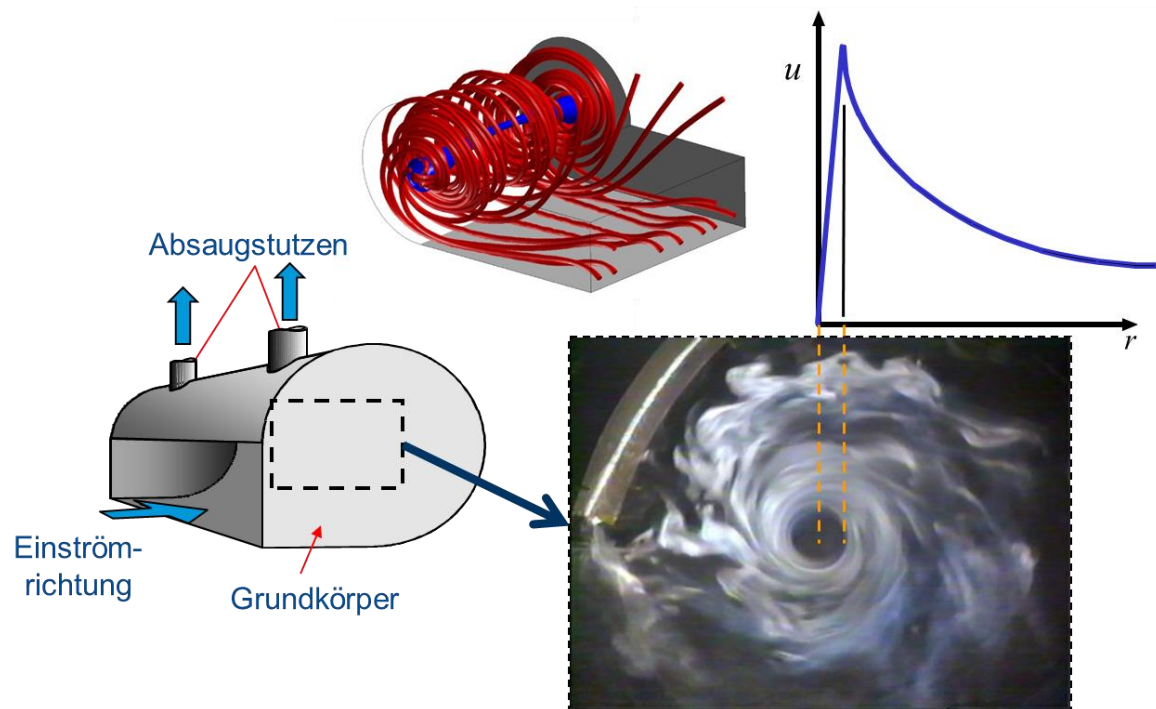


Bild 3.4: ROM-Drall[®]-Absaugung (Prinzipdarstellung)

Drallabsaugungen haben sich zur Schadstoffeffassung bei industriellen Produktionseinrichtungen sowie zur Erfassung von Brandrauch seit mehreren Jahren bestens bewährt und sind schon in vielen Großprojekten zum Einsatz gekommen.

3.4 Maßnahmen zur Begrenzung der Rauchausbreitung innerhalb der von einem Brand betroffenen Ebene

In diesem Kapitel wird die Entwicklung von Maßnahmen zur Begrenzung der Rauchausbreitung innerhalb der von einem Brand betroffenen Ebene dargestellt. Nach der Darstellung der Maßstabwahl und des Modellbaus wird die Brandherdmodellierung erläutert. Die an die Bahnstation anschließenden Tunnelbauwerke werden beim Modellaufbau nicht geometrisch nachgebildet, daher werden Überlegungen angestellt, wie die Tunnel für die strömungstechnische Betrachtung berücksichtigt werden können (Modellierung der Tunnelwiderstände).

3.4.1 Modellbau

Neben diversen 2D-Plänen der BVG (siehe Anhang Bild A.1 bis Bild A.3) stand auch ein 3D-CAD-Modell zur Verfügung, das von der RUB für die Projektpartner insbesondere zur Durchführung der Rechnersimulationen erstellt wurde. Um die Modellversuche auf der gleichen geometrischen Basis durchzuführen, wurde zur Erstellung der Modellbaupläne ebenfalls dieses 3D-Modell als Grundlage verwendet. Die CAD-Datei konnte allerdings nur als Vorlage für die Bauplanung verwendet werden. Für die Fertigung und den Zusammenbau des Modells musste sie so aufbereitet werden, dass daraus die entsprechenden Einzelzeichnungen generiert werden konnten.

Als Standort für den Modellaufbau wurde ein Bereich in der großen Versuchshalle des Labors der F&E gewählt. Bei der Wahl des Maßstabs musste sowohl dem verfügbaren Platz als auch den physikalischen Anforderungen nach einer ausreichenden Modellgröße Rechnung getragen werden, um z. B. Fehler durch Grenzschichteneinflüsse vernachlässigen zu können. Durch geschickte Positionierung konnte auf der zur Verfügung stehenden Fläche die U-Bahnstation im Maßstab M 1:15 errichtet werden. Erfahrungswerte aus zahlreichen Versuchsdurchführungen in den letzten 20 Jahren zeigen, dass der Maßstab in diesem Fall ausreichend ist, um die oben genannten Kriterien zu erfüllen.

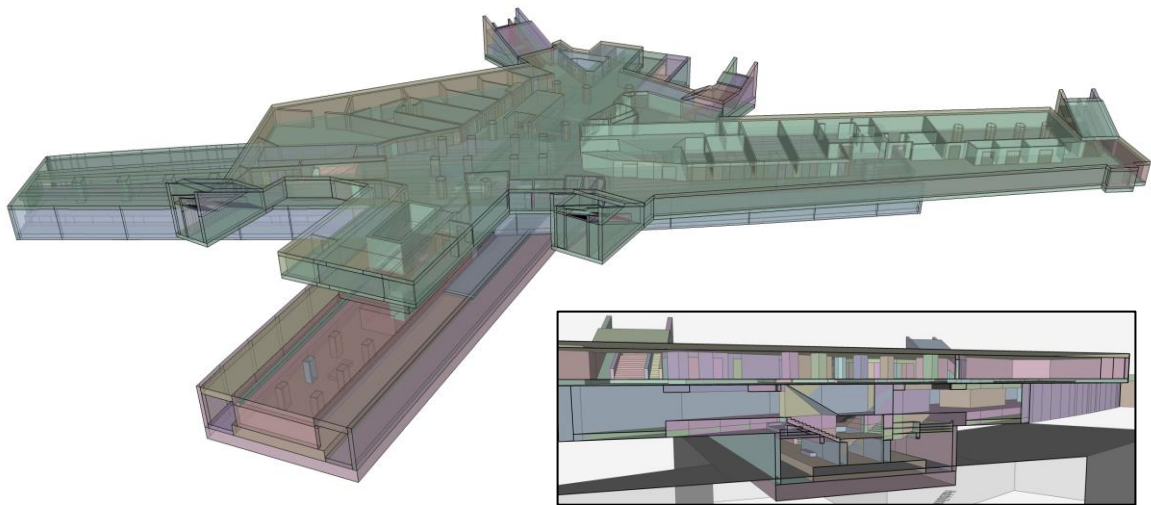


Bild 3.5: 3D-CAD-Modell der RUB in der Version 2.4.2 als Basis für die Modellbauplanung, rechts unten eine Schnittansicht

Der Modellbau begann mit der Errichtung eines Unterbaus, der die drei Ebenen der U-Bahnstation Osloer Straße trägt. Aus ca. 250 Fertigungszeichnungen entstand schrittweise der komplette Aufbau (Bild 3.6). Besonders aufwändig gestaltete sich die Modellbauplanung und der Modellbau durch die ineinander mit Treppenübergängen verbundenen Ebenen, die in ihrer Struktur komplex und verschachtelt sind.

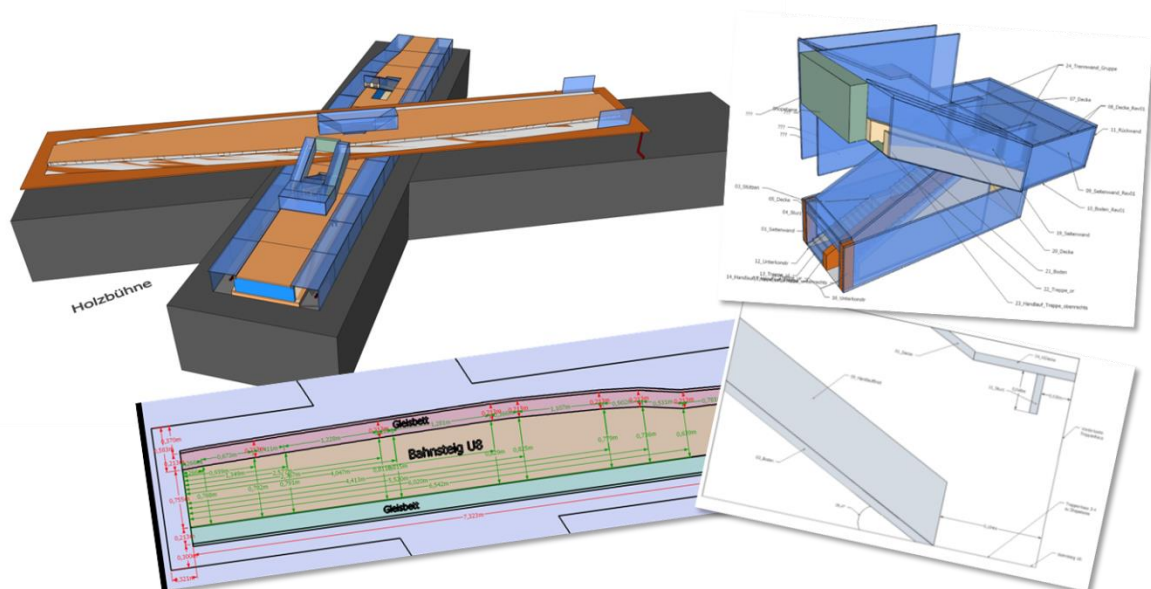


Bild 3.6: Typische Fertigungszeichnungen für den Aufbau

In Bild 3.7 sind die Aufbauarbeiten für den Bahnsteig und die Treppenaufgänge der U8 (unterste Stationsebene) dargestellt. In Bild 3.8 sind weitere Zwischenschritte des Aufbaus der einzelnen Ebenen bis zur Fertigstellung zu sehen.

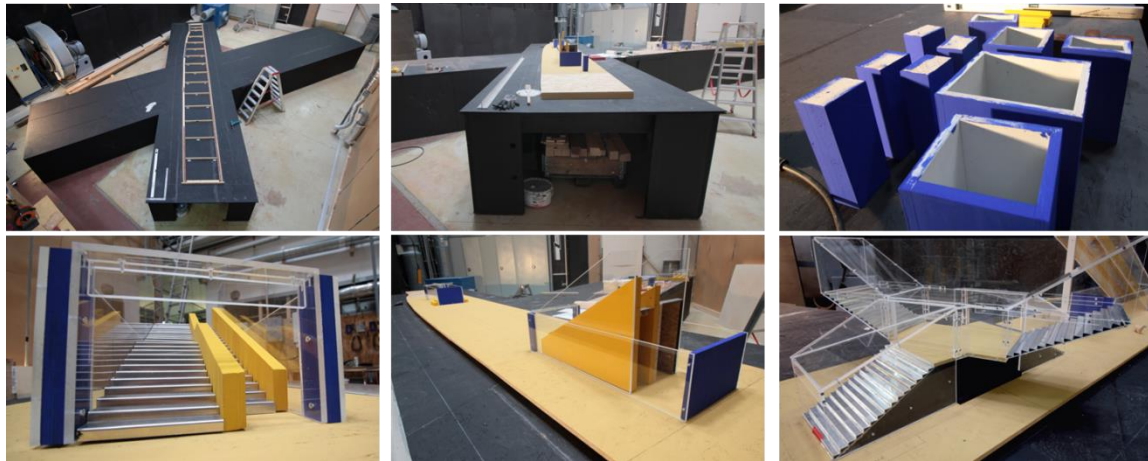


Bild 3.7: Aufbauarbeiten der U8-Ebene

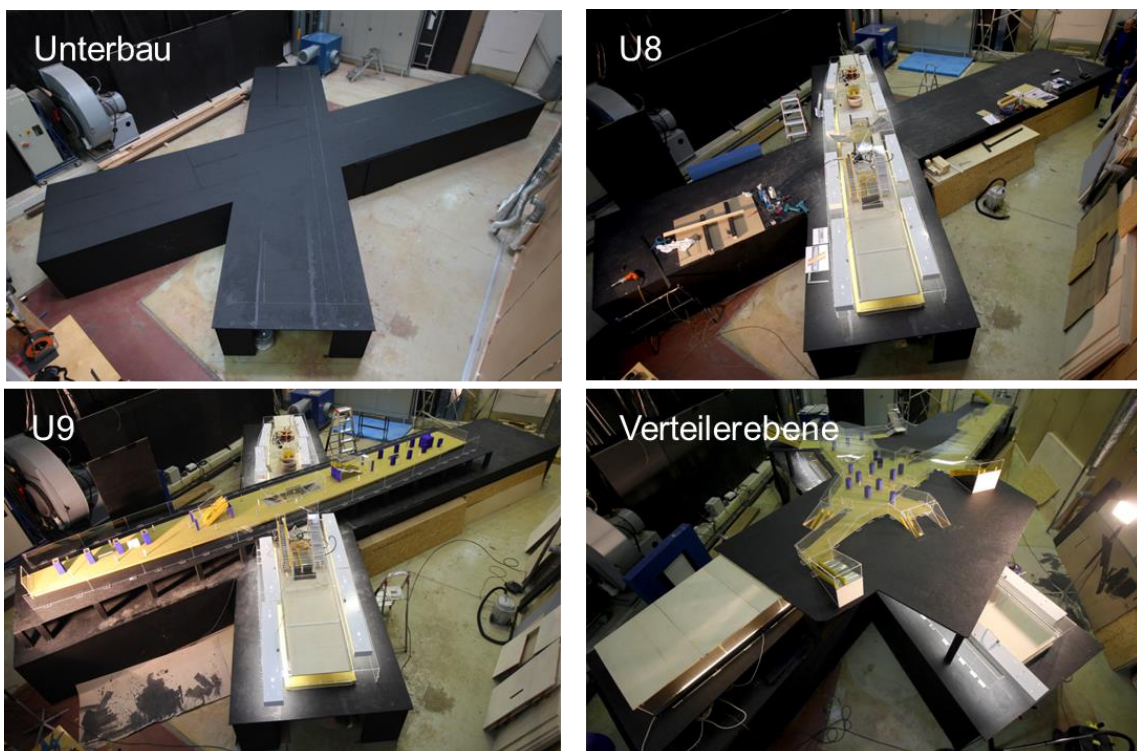


Bild 3.8: Aufbauschritte für die einzelnen Ebenen der U-Bahnstation Osloer Straße bis zur Fertigstellung

In Bild 3.9 ist das fertig gestellte Gesamtmodell der Station Osloer Straße mit den wichtigsten Bezeichnungen dargestellt:

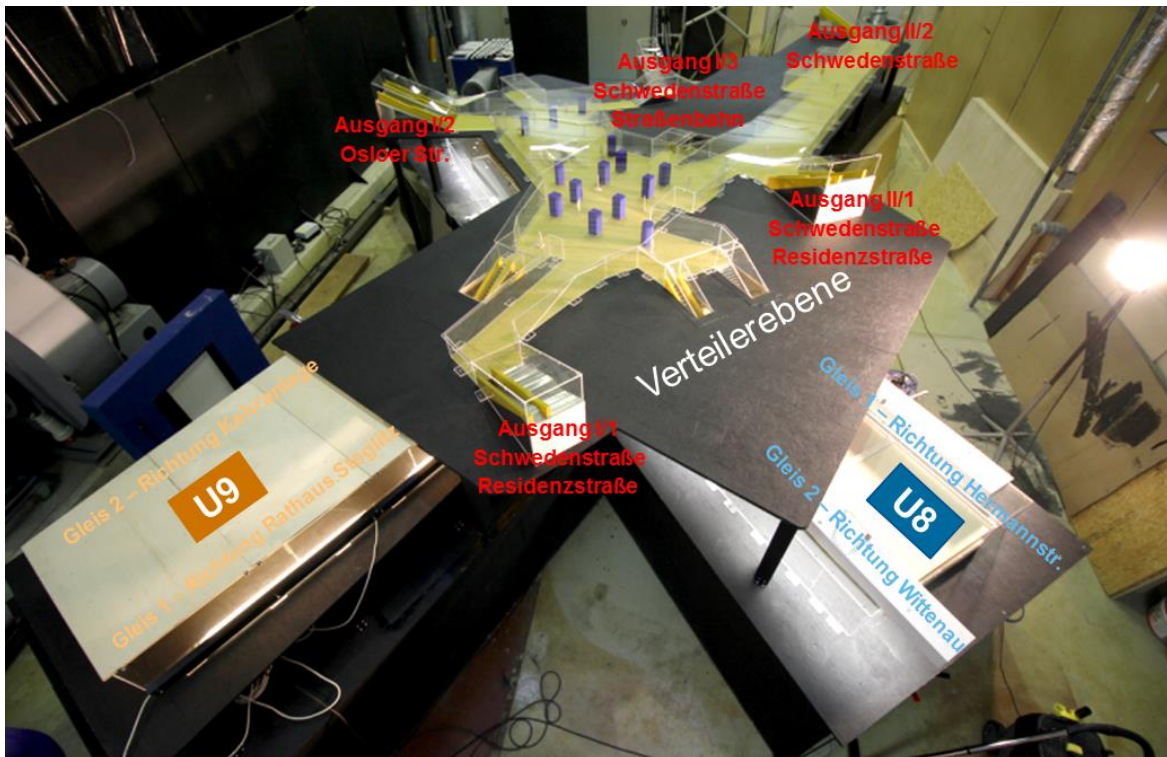


Bild 3.9: Gesamtmodell der Station Osloer Straße im Maßstab M 1:15

3.4.2 Brandherdmodellierung

Bei der Erarbeitung der Brandherddaten hat ROM im Arbeitspaket AP 1.1 intensiv mitgewirkt und sich an den Arbeiten zur Auswahl für die darzustellenden Brandszenarien beteiligt. Die Ergebnisse sind in dem Bericht der BAM zum Arbeitspaket AP 1.1 (Bericht Brandszenarien und Bemessungsbrände [15]) dargestellt. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurde das Brandherdmodell für die Darstellung des U-Bahnbrandes erstellt. In Bild 3.10 sind verschiedene ausgewählte Brandverlaufskurven dargestellt. In Abstimmung mit der BAM eignet sich für die Darstellung der Rauchausbreitung das Szenario für einen 16 m langen Bahnwagen nach den Angaben der TRStrab. Das Szenario für den 98 m langen Bahnwagen ist aus unserer Sicht dagegen eher zum Nachweis der Bauwerkssicherheit geeignet.

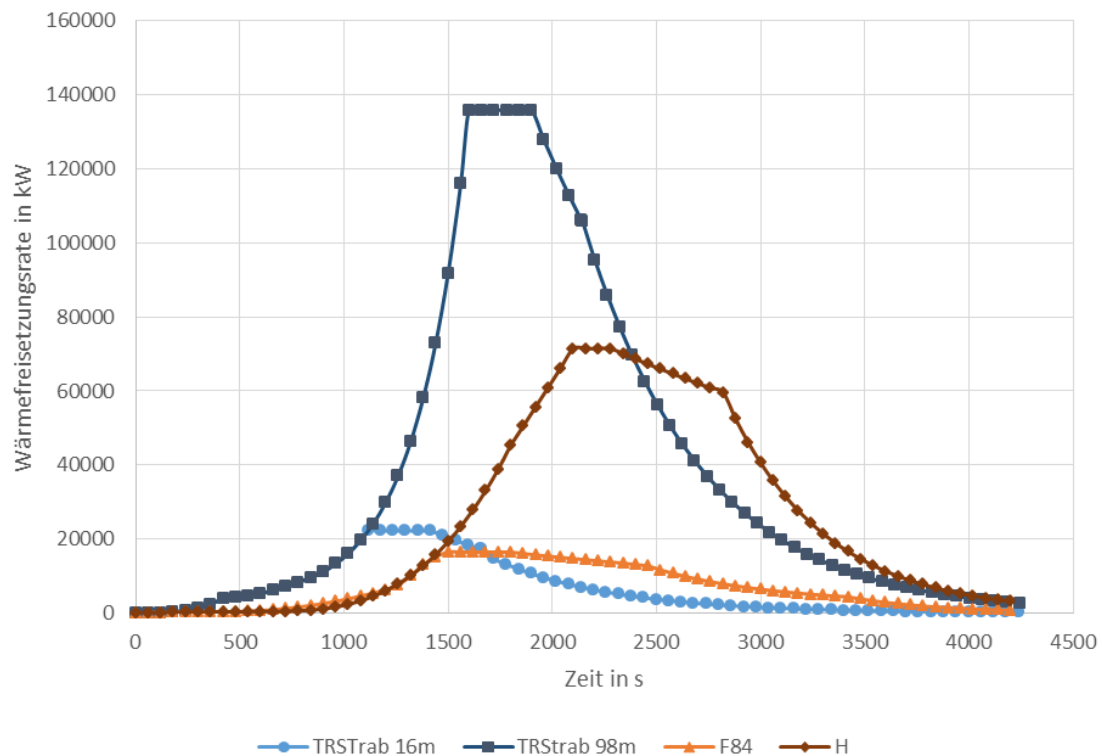


Bild 3.10: Typische Brandverlaufskurven hochenergetischer U-Bahnwagenbrände [BAM, Bericht zu AP 1.1 [15]]

Für die Geometrie des Brandherdmodells wird ein U-Bahnwagen der BVG vom Typ F84 vorgeschlagen, da dies eine verstärkt eingesetzte Bauart darstellt. In Abstimmung mit den für die Simulationen der BAM zugrunde gelegten Daten wird die Geometrie aus dem Typenbuch der BVG sowie den Angaben von der BAM zusammengeführt und daraus das Modell für die Laborversuche erstellt. In Bild 3.11 sind die Geometriedaten aus dem Typenbuch der BVG dargestellt und Bild 3.12 zeigt die Ansicht des Simulationsmodells der BAM, rot gekennzeichnet ist die Fläche des Brandherdes auf dem Boden des U-Bahnwagens.

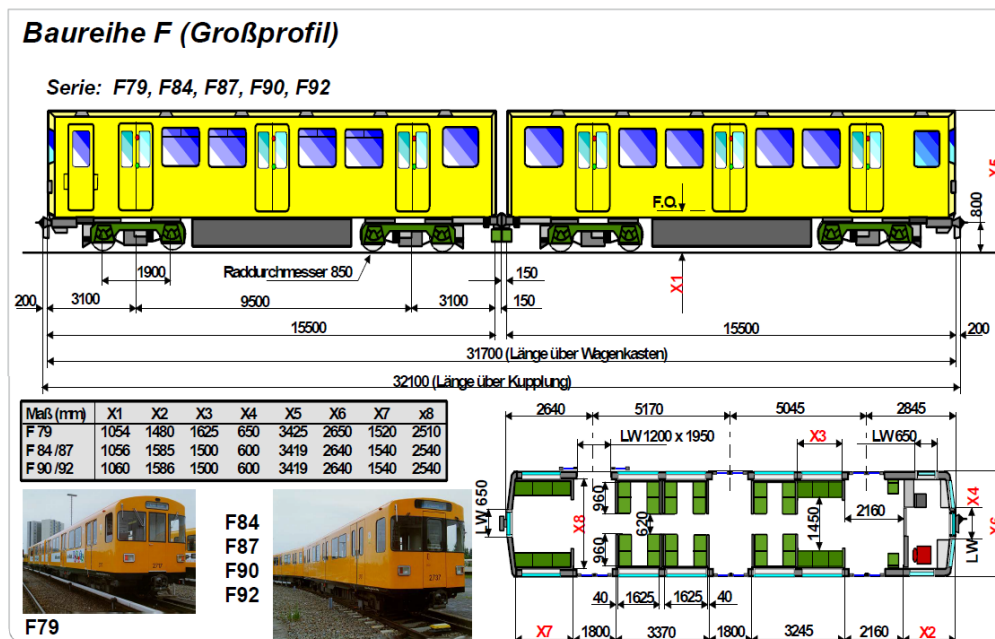


Bild 3.11: Geometrie des U-Bahnwagens der Baureihe F84 [17]

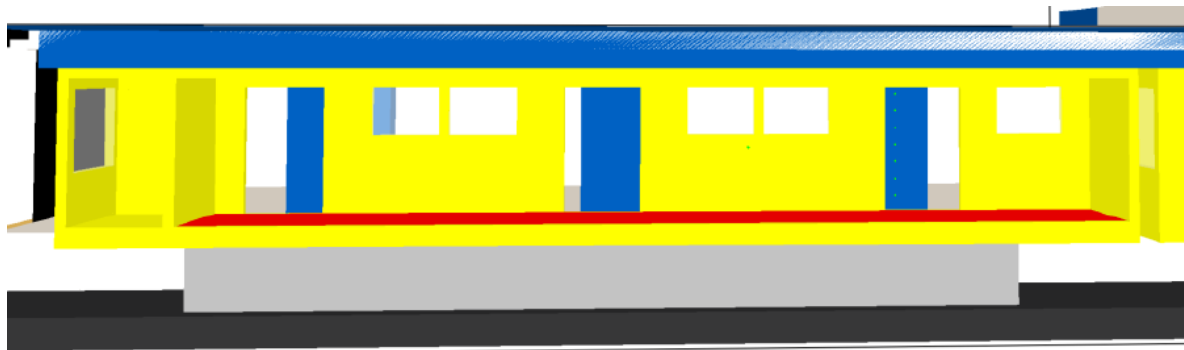


Bild 3.12: Simulationsmodell des U-Bahnwagens der BAM, rot gekennzeichnet: Brandherd auf dem Boden des U-Bahnwagens

Aus strömungstechnischer Sicht ist der Brandherd ein über einer Wärmequelle aufsteigender Thermikvolumenstrom, der die teilweise giftigen und sich trübenden Verbrennungsprodukte mit sich führt. Theoretisch kann der über der Höhe z aufsteigende Thermikmassenstrom im sogenannten Ähnlichkeitsbereich des Plumes nach folgender Formel von Hinkley und Heskestad beschrieben werden [18]:

$$\dot{m}_{pl} = 0,071 \dot{Q}_K^{1/3} (z - z_0)^{5/3}$$

mit \dot{m}_{pl} Rauchgasmassenstrom im Auftriebsstrahl
in der Höhe z in kg/s

In Bild 3.14 ist die Fertigungsskizze des Modells dargestellt und zeigt die Wicklung des Heizdrahtes für die Wärmefreisetzung in dem Modellbrandherd.

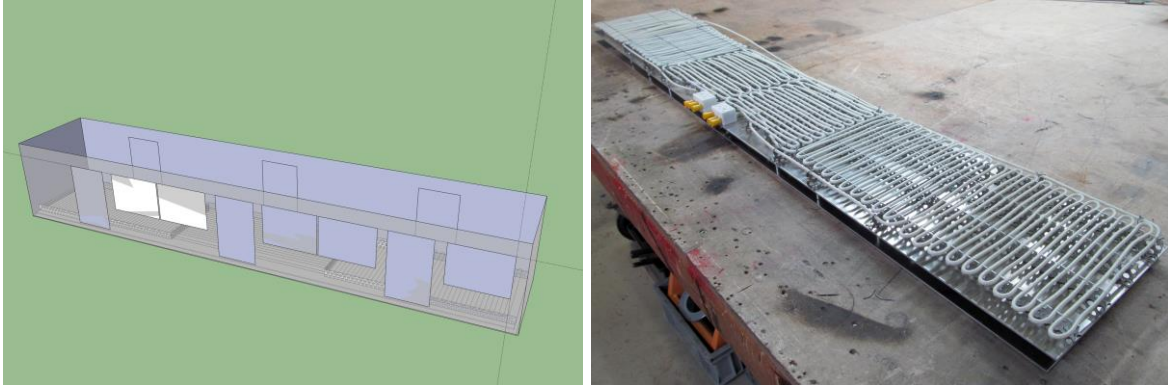


Bild 3.14: Skizze des Labormodells für den U-Bahnwagen; rechts: die Wicklungen des Heizdrahtes für die Wärmefreisetzung

Die Rauchzugabe erfolgt innerhalb des Wagenmodells oberhalb der Wärmequelle mit Hilfe einer Kupferrohrzuleitung, die gleichmäßig angeordnete Auslassbohrungen aufweist. Dabei wird sichergestellt, dass die Temperaturen in dem Modellbrand nicht so hoch werden, dass sich das Nebelfluid „auflöst“. Links in Bild 3.15 ist das Waggonmodell bei einem Rauchtest außerhalb des Modellaufbaus zu sehen. Rechts im Bild ist der Waggon in der Bahnsteigebene der U8 positioniert.



Bild 3.15: Brandherdmodell U-Bahn F84 im Maßstab M 1:15 (links: Test außerhalb des Modells; rechts: Waggon im Modell)

Die maximale Wärmefreisetzung des zugrunde gelegten Brandszenarios beträgt im Original 22,2 MW (siehe Bild 3.10). Die Wärmefreisetzung im Modell beträgt maximal 1,5 kW.

3.4.3 Modellierung der Tunnelwiderstände

Bei einem Brand in der U8-Ebene gelangt die nachströmende Luft über die Treppenaufgänge von der U9- und der Verteilerebene sowie über die Tunnelöffnungen in die U8-Ebene.

Die Modellgrenzen der nachgebauten U-Bahnstation Osloer Straße sind so definiert, dass die an den jeweiligen Tunneleingängen anschließenden Tunnelschächte in der U8- und U9-Ebene aufgrund der geometrischen Ausdehnung und der Komplexität des hydraulischen Tunnelsystems nicht Teil des Aufbaus sind. Für den Versuchsaufbau ergibt sich dadurch die Aufgabenstellung, dass zusätzliche Maßnahmen notwendig sind, um realistische Druckverluste aufgrund der Tunnelwiderstände zu erzielen und so die hydraulischen Randbedingungen des Stationsgebäudes herzustellen.

Die Tunnelwiderstände sind jedoch unbekannt und von vielen Faktoren abhängig. Aus diesem Grund wird zunächst ein Vergleichswert benötigt, mit dem die Tunnelwiderstände ins Verhältnis gesetzt werden können. Als Vergleichsgröße soll der Druckverlust der ausschließlich über die Treppenaufgänge nachströmenden Luft dienen. Hierzu wird eine Druckverlust-Volumenstrom-Kennlinie aufgezeichnet, aus der sich der charakteristische Druckverlust des durchströmten Bauwerkskörpers ergibt.

3.4.3.1 Druckverlust-Volumenstrom-Messung über den Bauwerkskörper

Die Tunnelöffnungen in der U8-Ebene sind bei diesen Messungen immer verschlossen, sodass die Luft ausschließlich über die Treppenaufgänge aus der U9- bzw. der Verteilerebene nachströmen kann. Über die zwei Absaugpositionen in U8 wird ein definierter Volumenstrom abgeführt und der Differenzdruck zwischen der Messposition (mittig auf Gleis 2, U8-Ebene) und der Umgebung bestimmt (Bild 3.16). Es werden die Kennlinien für folgende drei Varianten bestimmt:

- a) U9-Tunnelöffnungen geschlossen,
- b) Ausgänge Verteilerebene geschlossen und

c) U9-Tunnelöffnungen und Ausgänge Verteilerebene geöffnet.

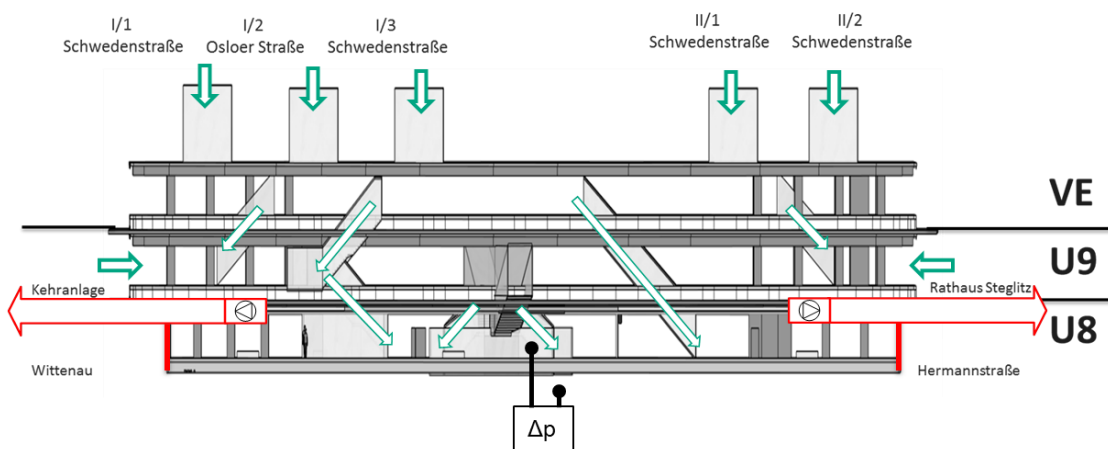


Bild 3.16: Skizze des Messaufbaus

	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Berechnung	
	U9 geschlossen	VE geschlossen	U9 und VE geöffnet	Nachströmvolumenstrom bezogen auf die Tunnelöffnungsfläche in U8 $c = \frac{\dot{V}}{A_{Tunnel,U8}}$	
Volumenstrom in m ³ /h	Druckdifferenz Δp in Pa	Druckdifferenz Δp in Pa	Druckdifferenz Δp in Pa	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit c in m/s	Druckverlustbeiwert* ζ
559	4,2	3,7	3,2	0,60	14,9
612	4,9	4,2	3,9	0,66	15,1
661	5,8	5,0	4,4	0,71	14,6
707	6,7	5,7	5,1	0,76	14,8
750	7,3	6,4	5,9	0,80	15,2
*Druckverluste gemäß Messung 3					ζ = 14,9

Tabelle 1: Druckverluste und Druckverlustbeiwert

Sollen z. B. an den Tunnelöffnungen der U8-Ebene bei gleich großem Volumenstrom dieselben Druckverluste erreicht werden, wie bei der Nachströmung über die U9- und Verteilerebene, müssen vor den Tunnelöffnungen Widerstände mit dem entsprechenden Druckverlustbeiwert installiert werden.

Zur Berechnung des äquivalenten Druckverlustbeiwertes ζ wird dieser auf die Querschnittsfläche der U8-Tunnelöffnungen bezogen [19]:

$$\zeta = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} c^2} = \zeta = \frac{\Delta p A_{Tunnel}}{\frac{\rho}{2} \dot{V}}$$

mit	Δp	Druckdifferenz in Pa
	ρ	Luftdichte in kg/m ³
	c	Luftgeschwindigkeit im Bezugsquerschnitt A in m/s
	A_{Tunnel}	Bezugsquerschnitt in m ²
	\dot{V}	Luftvolumenstrom im Bezugsquerschnitt in m ³ /h

Daraus folgt ein zu realisierender Druckverlustbeiwert von $\zeta=14,9$.

3.4.3.2 Nachbildung der Tunnelwiderstände mit Lochblechen

Die Tunnelwiderstände können über Lochbleche mit definiertem Druckverlustbeiwert ζ simuliert werden. Dieser berechnet sich mit dem freien Querschnittsanteil \bar{f} zu [20]:

$$\zeta = \left[0,707 * (1 - \bar{f})^{0,375} + 1 - \bar{f} \right]^2 * \frac{1}{\bar{f}^2}$$

$$\text{mit } \bar{f} = \frac{A_0}{A_1}.$$

Ein Lochblech mit einem freien Querschnitt von 32,7 % erzeugt an den Tunnelöffnungen einen Widerstand von $\zeta=15,4$.

3.4.3.3 Variation der Tunnelwiderstände

In der Realität unterscheiden sich Tunnelwiderstände, in Abhängigkeit verschiedener Faktoren, deutlich voneinander. Es spielen Faktoren wie z. B. Tunnellänge und dessen Formgebung oder das Vorhandensein bzw. die Lage und Geometrie von Druckausgleichschächten eine große Rolle.

In Rahmen einer Versuchsreihe soll der Einfluss verschiedener Tunnelwiderstände an den Tunnelöffnungen untersucht werden. Neben dem Lochblech mit einem freien Querschnitt von 32,7 % werden entsprechend der in der Tabelle 2 dargestellten Kombinationen Lochbleche mit 51,0 % ($\zeta=4,1$) und 22,7 % ($\zeta=37,6$) an den Tunnelöffnungen der U8- und U9-Ebene untersucht.

Die Versuchsreihe wird mit den Randbedingungen der punktuellen Entrauchung (vgl. Kapitel 3.4.4.2) zum einen mit einem Entrauchungsvolumenstrom von $2 \times 100.000 \text{ m}^3/\text{h}$ und zum anderen mit $2 \times 200.000 \text{ m}^3/\text{h}$ durchgeführt.

Tunnelöffnungen	
U8	U9
offen	offen
$\zeta \rightarrow 0$	$\zeta \rightarrow 0$
Lochbl. 1	Lochbl. 1
$\zeta = 4,1$	$\zeta = 4,1$
Lochbl. 3	Lochbl. 3
$\zeta = 15,4$	$\zeta = 15,4$
Lochbl. 4	Lochbl. 4
$\zeta = 37,6$	$\zeta = 37,6$
Lochbl. 4	Lochbl. 1
$\zeta = 37,6$	$\zeta = 4,1$
zu	Lochbl. 1
$\zeta \rightarrow \infty$	$\zeta = 4,1$
zu	zu
$\zeta \rightarrow \infty$	$\zeta \rightarrow \infty$

Tabelle 2: Kombinationen verschiedener Tunnelwiderstände

3.4.3.4 Ergebnisse der Versuchsreihe „Variation der Tunnelwiderstände“

In der Ergebnismatrix der folgenden Tabellen sind die beschriebenen Kombinationen in den linken Spalten aufgelistet und rechts daneben zu jedem Versuch die typischen Strömungssituationen an prägnanten Stellen bewertet. Die Bewertungsskala reicht von schlecht „--“ bis sehr gut „++“. An den Tunnelöffnungen und Ausgängen bedeutet ein „+“ zudem, dass dort Luft ein- bzw. nachströmt. Ein eingeklammelter Wert, z. B. „(-)“ bedeutet, dass Luft über diesen Ausgang aus der Station abströmt, aber keinen Rauch mit sich führt. Bei den Treppenaufgängen ist mit der Pfeilangabe jeweils eine Strömungsrichtung vorgegeben, z. B. U9 \rightarrow VE. Bei positiver Bewertung strömt die Luft bzw. der Rauch in diese Richtung, bei negativer entgegen dieser Richtung. Positive Werte in Klammern sollen verdeutlichen, dass die vorgegebene Strömungsrichtung zwar eingehalten wird, die Luft aber Rauch mit sich führt und der Treppenaufgang und die anschließende Ebene ver Raucht werden.

2 x 100.000 m³/h		Ebenen							Treppenaufgänge					Ausgänge				
Tunnelöffnungen		U8			U9			Verteiler- ebene	VE -> U8	VE -> U8	U9 -> U8	VE -> U9	VE -> U9	I/1	I/2	I/3	II/1	II/2
U8	U9	Ebene	Wittanau	Hermannstr.	Ebene	RH Steglitz	Kehranlage		Wittanau	Hermannstr.	RH Steglitz	Kehranlage						
offen ζ-->0	offen ζ-->0	--	+	+	-	+	-	--	--	(+)	+	(+)	(++)	-	(-)	+	-	(-)
Lochbl. 1 ζ= 4,1	Lochbl. 1 ζ= 4,1	--	+	+	+	+	0	--	-	(+)	+	+	0	0	+	-	+	
Lochbl. 3 ζ= 15,4	Lochbl. 3 ζ= 15,4	--	+	+	-	+	+	--	--	(+)	+	(+)	(+)	--	+	+	-	+
Lochbl. 4 ζ= 37,6	Lochbl. 4 ζ= 37,6	--	+	+	0/-	0/+	0/+	-	-	++	++	+	(+)	+	+	+	+	
Lochbl. 4 ζ= 37,6	Lochbl. 1 ζ= 4,1	--	+	+	+	+	+	-	-	(+)	++	(-)	(-)	-	+	+	(-)	+
zu ζ-->∞	Lochbl. 1 ζ= 4,1	--	0	0	+	+	+	++	+	+	++	+	(0/-)	+	+	+	+	0
zu ζ-->∞	zu ζ-->∞	--	0	0	+	0	0	++	+	+	++	+	+	+	+	+	+	+

Tabelle 3: Ergebnismatrix Variation der Tunnelwiderstände mit Entrauchungsvolumenstrom
2 x 100.000 m³/h

2 x 200.000 m³/h		Ebenen							Treppenaufgänge					Ausgänge				
Tunnelöffnungen		U8			U9			Verteiler- ebene	VE -> U8	VE -> U8	U9 -> U8	VE -> U9	VE -> U9	I/1	I/2	I/3	II/1	II/2
U8	U9	Ebene	Wittanau	Hermannstr.	Ebene	RH Steglitz	Kehranlage		Wittanau	Hermannstr.	RH Steglitz	Kehranlage						
offen ζ-->0	offen ζ-->0	--	++	++	+	+	(-)	--	--	0/-	+	(-)	(-)	--	-	+	--	0/+
Lochbl. 1 ζ= 4,1	Lochbl. 1 ζ= 4,1	--	++	++	+	+	+	-	-	(+)	+	(-)	(-)	0/-	0	+	(-)	+
Lochbl. 3 ζ= 15,4	Lochbl. 3 ζ= 15,4	--	+	+	+	+	+	++	0	+	+	(-)	(-)	+	+	+	+	+
Lochbl. 4 ζ= 37,6	Lochbl. 4 ζ= 37,6	--	+	+	+	+	+	++	+	+	+	(-)	(-)	+	+	+	+	+
Lochbl. 4 ζ= 37,6	Lochbl. 1 ζ= 4,1	--	+	+	+	+	+	++	+	+	+	(-)	(-)	+	+	++	+	+
zu ζ-->∞	Lochbl. 1 ζ= 4,1	--	0	0	+	+	+	++	+	+	+	(-)	(-)	+	+	+	+	+
zu ζ-->∞	zu ζ-->∞	--	0	0	+	0	0	++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Tabelle 4: Ergebnismatrix Variation der Tunnelwiderstände mit Entrauchungsvolumenstrom
2 x 200.000 m³/h

Bei allen Versuchsvarianten wird die U8-Ebene deutlich verraucht. Bei den Varianten mit geringem Entrauchungsvolumenstrom (2 x 100.000 m³/h) kann ein Rauchübertritt in die anderen Ebenen nur verhindert werden, indem die Tunnelöffnungen der U8-Ebene komplett geschlossen werden. Bei höherem Entrauchungsvolumenstrom (2 x 200.000 m³/h) strömt ab einem Tunnelwiderstand von ζ=15,4 die Luft mit einer so hohen Geschwindigkeit in den Treppenaufgängen nach, dass der Rauch nicht in die anderen Ebenen aufsteigen kann. Liegt ein geringerer Tunnelwiderstand vor, so strömt der Rauch überwiegend über den Treppenaufgang VE->U8 auf der Bahnsteigseite Richtung Wittanau über.

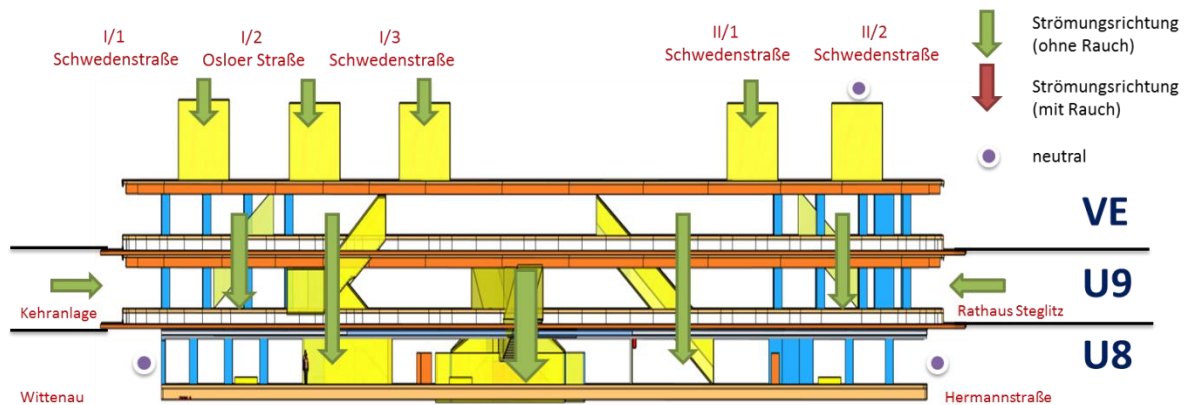


Bild 3.17: Schematische Seitenansicht – punktueller Entrauchung mit $2 \times 100.000 \text{ m}^3/\text{h}$; Tunnel U8: zu, U9: Lochblech 1

Die Ergebnisse zeigen, dass die Entrauchungsqualität stark von den hydraulischen Verhältnissen innerhalb der U-Bahnstation sowie den Tunnelwiderständen abhängen. In Bild 3.18 sind für einen Entrauchungsfall zwei verschiedene Randbedingungen an den Tunneleingängen gesetzt worden. Im linken Bildteil wird ein Tunnelwiderstand mit $\zeta = 37,6$ gesetzt und im rechten Bildteil sind die Tunneleingänge „offen“, d.h. $\zeta \rightarrow 0$.

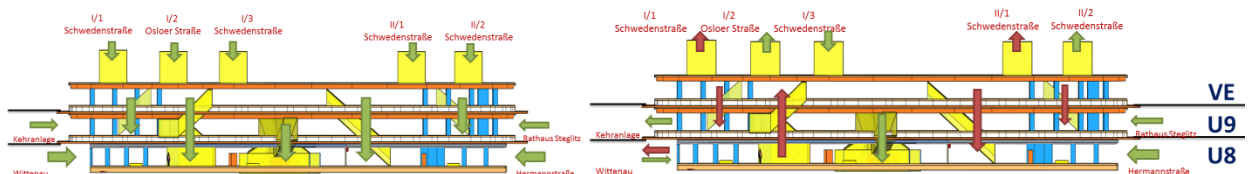


Bild 3.18: Entrauchung in der U8-Ebene bei unterschiedlichen Tunnelwiderständen (links: $\zeta = 37,6$, rechts: „offen“)

Es zeigt sich, dass im Falle des geringen Tunnelwiderstandes ein Großteil der nachströmenden Luft direkt aus den Tunneln kommt und damit der Rauch über das Stationsgebäude nach oben strömen kann. Während im Falle des größeren Tunnelwiderstandes die nachströmende Luft auch über das Gebäude von oben nachströmt und so eine „Sperrwirkung“ erreicht werden kann. Durch Schließen der Tunnelröhren (Tore, Rauchschürzen) könnte eine definierte Nachströmung von oben und somit eine Rauchfreihaltung der nicht vom Brand betroffenen Ebenen erreicht werden.

3.4.3.5 Vergleichsgröße der Tunnelwiderstände

Wird angenommen, dass es sich um einen einfachen Tunnel mit einem Querschnitt von 4 m x 4 m und glattem Mauerwerk ($\lambda = 0,03$) handelt, so entspräche nach Wieghardt [21] ein Tunnelwiderstand von $\zeta = 15,4$ einer Tunnellänge von 1875 m.

$$\xi_{Tunnel} = \xi_{Ein} + \xi_{Aus} + \lambda * U_T * \frac{L_T}{4 F_T}$$

mit	ξ_{Ein}	Widerstandbeiwert für den Tunneleintritt
	ξ_{Aus}	Widerstandbeiwert für den Tunnelaustritt
	λ	Wandreibungswert des Tunnels
	U_T	Umfang des Tunnelquerschnitts in m
	L_T	Tunnellänge in m
	F_T	Querschnittsfläche des Tunnels in m ²

Tunnellänge (4x4 m ²)	Druckverlustbeiwert
440 m	4,1
1875 m	15,4
4900 m	37,6

Tabelle 5: Tunnellängen und Druckverlustbeiwerte

Die Voruntersuchungen haben ergeben, dass im vorliegenden Fall der Druckverlustbeiwert von Tunnellängen zwischen 1500 m und 2000 m in einer dem Gebäudekörper ähnlichen Größenordnung liegt (Kapitel 3.4.3.1). Das führt zu vergleichbaren Nachströmvolumenströmen über die Luftwege Tunnel/Stationsbauwerk.

3.4.4 Entrauchungskonzepte für die Rauchbegrenzung innerhalb eines Bahnsteigs

Das Ziel der Versuche ist zum einen die Vermeidung eines Rauchübertrags auf andere nicht vom Brand betroffene Ebenen des Stationsgebäudes sowie die Begrenzung der Rauchausbreitung innerhalb der Stationsebene. Es wird der Brand eines einzelnen U-Bahn-Waggons der Berliner Baureihe F84 angenommen, dessen Brandleistung 22,2 MW beträgt.

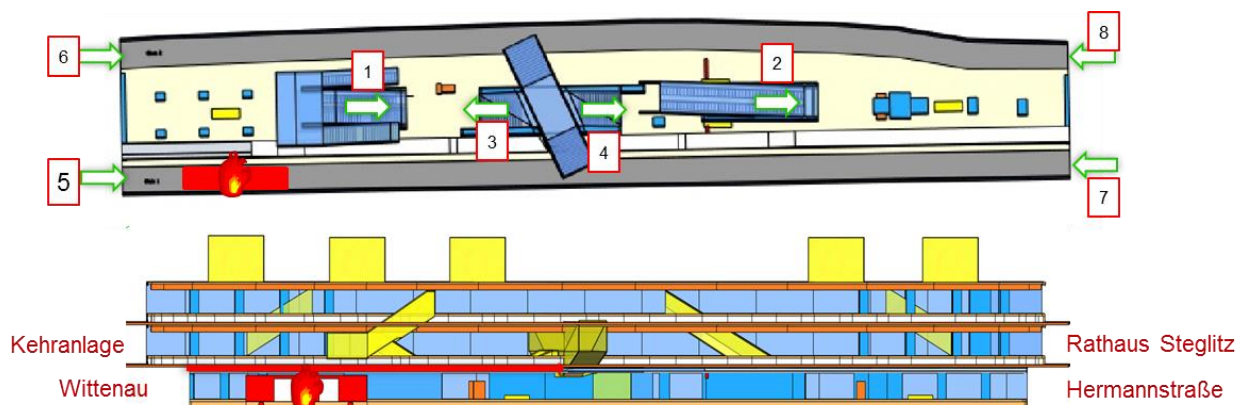


Bild 3.19: Position des U-Bahnbrandes in der U8-Ebene

Als Brandposition für den U-Bahnbrand wird in Abstimmung mit den Projektpartnern die unterste Stationsebene (U8) als kritische Position festgelegt (Bild 3.19). Die Nachströmung erfolgt über die Treppenaufgänge (1 bis 4) und die U-Bahn-Tunnel (5 bis 8).

Die nachfolgend dargestellten Untersuchungen werden an den Tunnelöffnungen des Modells in den Ebenen der U8 und U9 mit Strömungswiderständen durchgeführt, die analog der Tunnellänge von 1800 m entsprechen (Lochblech mit $\xi = 15$, vgl. Kapitel 3.4.3.5).

3.4.4.1 U-Bahnbrand ohne maschinelle Entrauchung

Die Untersuchungen beginnen mit der Darstellung eines U-Bahnbrandes ohne Entrauchungsmaßnahmen und ohne Aufprägung externer Einflüsse.

Der freigesetzte Rauch des brennenden U-Bahn-Wagens strömt in der U8-Ebene ungehindert über die Treppenaufgänge in die Verteiler- und die U9-Ebene. Alle Ebenen werden großflächig verraucht, lediglich der Bereich in der Verteilerebene vor Ausgang II/2 Schwedenstr. bleibt raucharm. Der Rauch strömt aus allen Tunnelöffnungen und Ausgängen aus. In Bild 3.20 sind typische Situationen der Rauchausbreitung dargestellt (Video: 01_UB1_oE_stat_01.mp4). In der schematischen Seitenansicht in Bild 3.21 sind die Strömungsvorgänge an den Ausgängen, Treppenaufgängen und Tunnelöffnungen dargestellt.



Bild 3.20: U9-Ebene deutlich verraucht; rechts: U8-Ebene stark verraucht

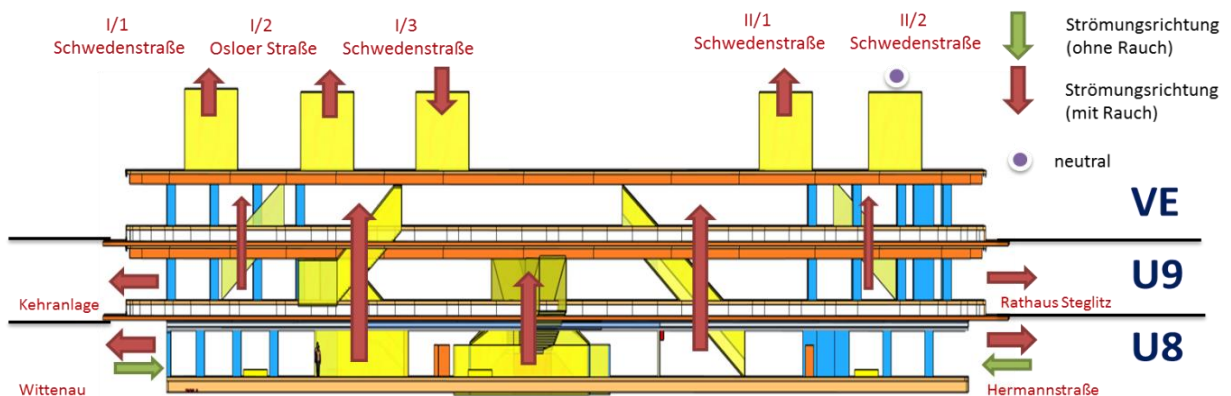


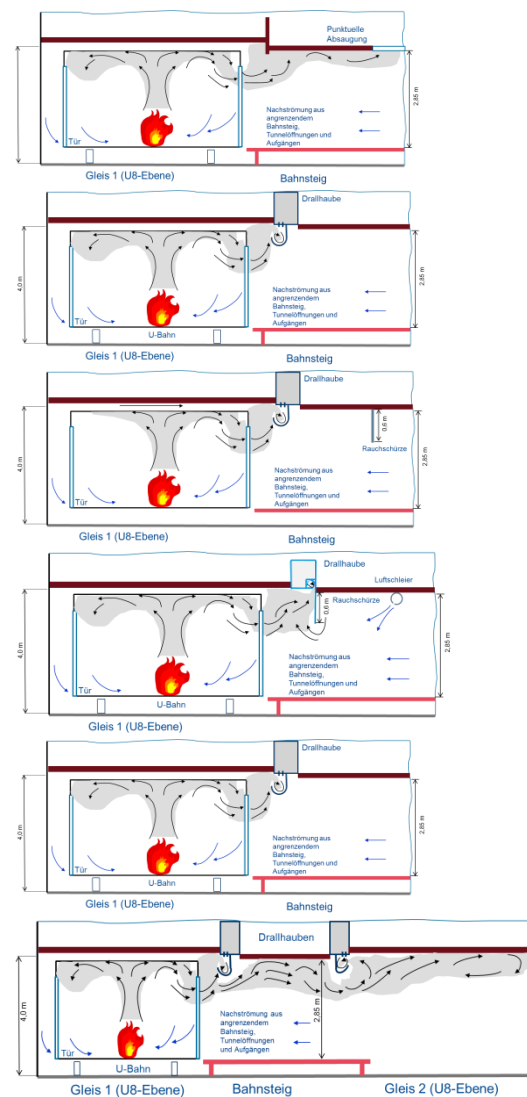
Bild 3.21: Schematische Seitenansicht der U-Bahnstation Osloer Straße – Versuch ohne maschinelle Entrauchung

Ohne die Rauchausbreitung begrenzende Maßnahmen erfolgt innerhalb kurzer Zeit die Verrauchung sämtlicher Ebenen, sodass sowohl die Selbstrettung von Personen als auch Einsätze der Rettungskräfte stark erschwert – wenn nicht sogar unmöglich – sind.

Untersuchte Entrauchungsmaßnahmen

Die Entwicklung des optimalen Entrauchungskonzeptes erfolgt in iterativen Schritten. Zunächst wird mit einer vergleichsweise einfachen Anordnung versucht, das gegebene Ziel zu erreichen. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die weiteren Schritte ein und führen schließlich zu einem Konzept, das die Kriterien der Aufgabenstellung erfüllt. Folgende Maßnahmen wurden untersucht:

- Punktuelle Entrauchung
- Drallentrauchung über die gesamte Länge des betroffenen Bahnsteigs
 - Unterstützung durch Rauchschürze
 - Unterstützung durch Luftschleier
- Drallentrauchung über die halbe Länge des betroffenen Bahnsteigs
- Drallentrauchung über die halbe Länge auf beiden Bahnsteigseiten



Dabei werden in Zwischenschritten z. B. verschiedene Entrauchungsvolumenströme, Rauchschürzenlängen oder Anordnungen der Luftschleier getestet, um zu einer Konzeptlösung zu gelangen. An dieser Stelle werden im Folgenden nur die zum Verständnis relevanten Ergebnisse dargestellt.

3.4.4.2 Konzept mit punktueller Entrauchung

Für diese Entrauchungsvariante werden zwei Absaugpositionen in der U8-Ebene vorgesehen. An den Enden der Bahnsteige ist jeweils ein Abluftstutzen im Deckenbereich angebracht, über den 100.000 m³/h bzw. 200.000 m³/h abgesaugt werden.

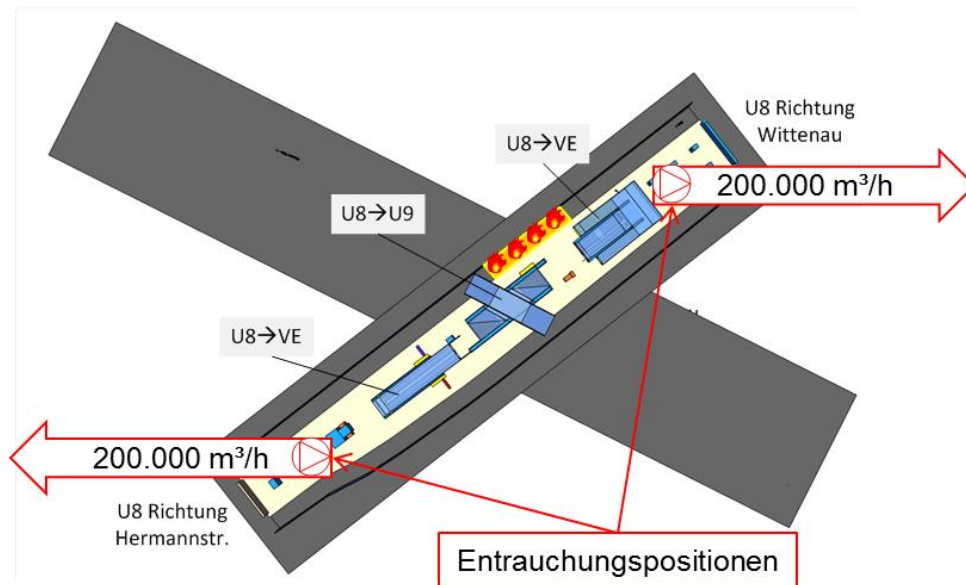


Bild 3.22: Entrauchungspositionen in der U8-Ebene

In Bild 3.23 ist ein schematischer Schnitt zur Darstellung der Entrauchungsposition sowie die typische Rauchausbreitung in der U8-Ebene für diese Situation dargestellt.

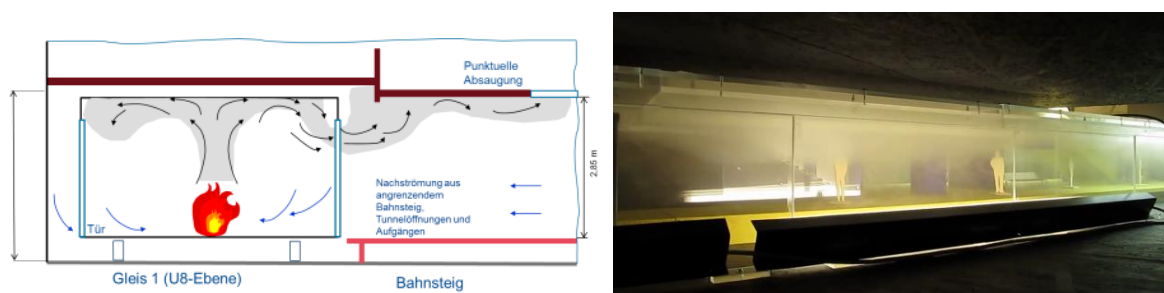


Bild 3.23: Punktueller Entrauchung (links: Prinzipskizze; rechts: Rauchausbreitung in der U8- Ebene)

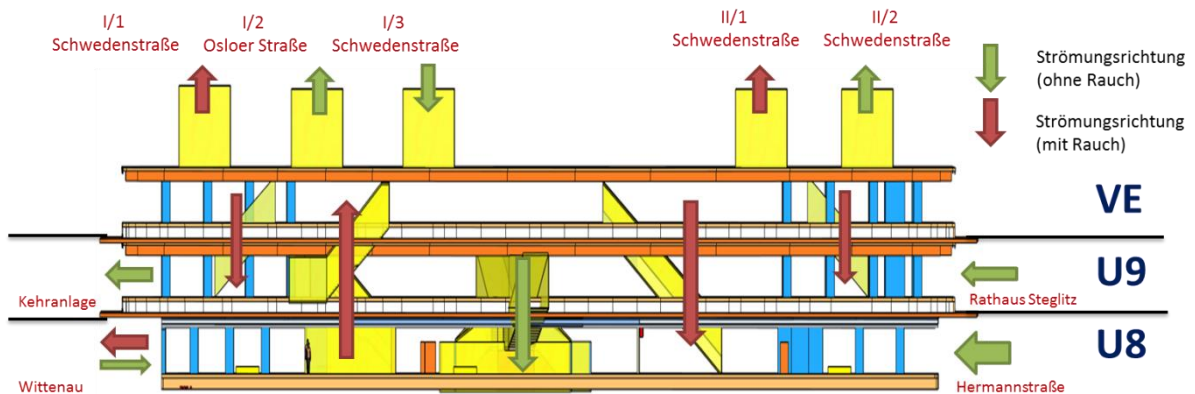


Bild 3.24: Schematische Seitenansicht – punktuelle Entrauchung mit $2 \times 100.000 \text{ m}^3/\text{h}$

Bei beiden Varianten wird die U8-Ebene stark verraucht. Über den Treppenaufgang auf der Seite U8 Richtung Wittenau strömt der Rauch in die Verteilerebene. Bei einem Entrauchungsvolumenstrom von $2 \times 100.000 \text{ m}^3/\text{h}$ wird der Rauch aus der Verteilerebene über die Treppenaufgänge in die U9-Ebene eingetragen, sodass auch diese Ebene verraucht. Aus den Ausgängen I/1 und II/1 tritt Rauch aus.

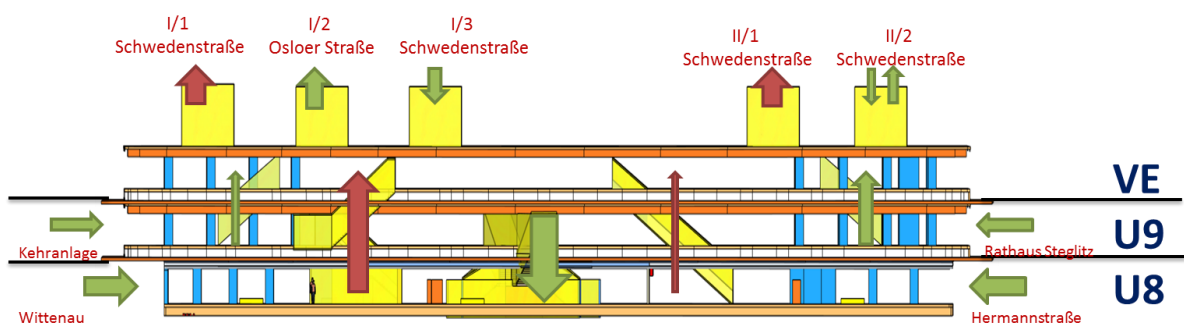


Bild 3.25: Schematische Seitenansicht – punktuelle Entrauchung mit $2 \times 200.000 \text{ m}^3/\text{h}$

Bei einem höheren Entrauchungsvolumenstrom von $2 \times 200.000 \text{ m}^3/\text{h}$ wird die Verteilerebene weniger großflächig verraucht, sodass kaum Rauch in die U9-Ebene eingetragen werden kann (siehe Bild 3.25 und Bild 3.26). Auch bei dieser Variante strömt viel Rauch aus den Ausgängen I/1 und II/1.



Keine Raucheinträge in U9-Ebene



U8-Ebene stark ver Raucht



U8-Ebene ver Raucht



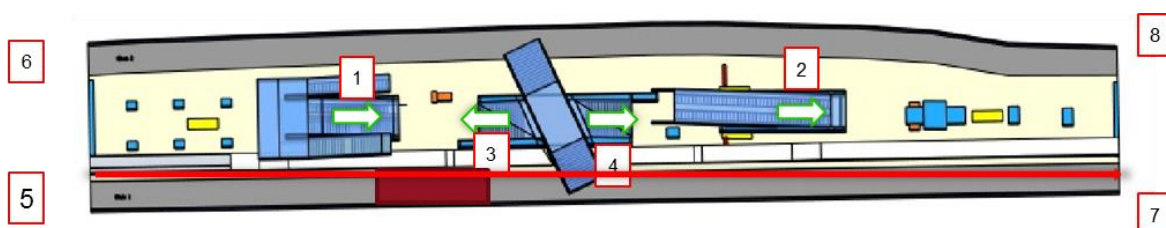
Raucheinträge in Verteilerebene

Bild 3.26: Rauchausbreitung bei punktueller Entrauchung in der U8-Ebene mit $2 \times 200.000 \text{ m}^3/\text{h}$

Die Ergebnisse der punktuellen Entrauchung zeigen, dass bei einem Entrauchungsvolumenstrom von $2 \times 200.000 \text{ m}^3/\text{h}$ zwar das Überströmen in andere Ebenen verhindert werden kann, aber innerhalb der Bahnsteigebene die Rauchausbreitung nicht zu verhindern ist (Bild 3.26 und Video 02_UB1_pE_stat_200_z15.mp4).

3.4.4.3 Konzepte mit linienförmiger Entrauchung

Drallentrauchung über die gesamte Länge des Bahnsteigs


Bild 3.27: Anordnung der linienförmigen Entrauchung mit Drallhaube auf der vom Brand betroffenen Bahnsteigseite

Um die Rauchausbreitung innerhalb der Bahnsteigebene zu begrenzen, wird im nächsten Schritt eine linienförmige Entrauchung mit Hilfe einer über der gesamten Länge der Bahnsteigkante angeordneten Drallhaube installiert (Bild 3.27).

In Bild 3.28 ist ein schematischer Schnitt zur Darstellung der Entrauchungsposition sowie die typische Rauchausbreitung in der U8-Ebene für diese Situation dargestellt (Video: 03_UB2_Drall_stat_100.2_z15.mp4).

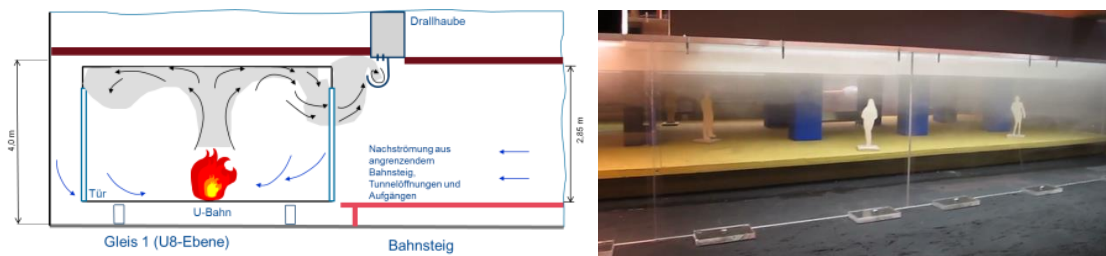


Bild 3.28: Linienförmige Entrauchung mit Drallhaube (links: Prinzipskizze; rechts: Rauchausbreitung in der U8-Ebene)

Über einen Großteil der U8-Ebene erfolgt keine Schichtung des Rauches. Durch dessen großflächige Ausbreitung und die Nachströmung aus den Treppenbereichen wird der Rauch relativ gleichmäßig über die Höhe verteilt. Es können zwar deutlich bessere Sichtverhältnisse gegenüber der punktuellen Entrauchung erreicht werden, jedoch wird das Ziel der Rauchbegrenzung sowie einer raucharmen Schicht innerhalb der Ebene noch nicht erreicht.

In Bild 3.28 ist der Versuch mit einem Volumenstrom von 200.000 m³/h dargestellt, Versuche mit höheren Volumenströmen (bis 400.000 m³/h) führen eher zu einer stärkeren Rauchausbreitung innerhalb des Bahnsteigs. Rauchüberträge in die U9 und die Verteilerebene können nicht verhindert werden.

Drallentrauchung mit Unterstützung von Rauchschürzen

In einem weiteren Entwicklungsschritt wird mit Unterstützung von Rauchschürzen versucht, die Ausbreitung des Rauches auf das gegenüberliegende Gleis zu verhindern. Um den Weg für flüchtende Personen nicht zu behindern, ist die Höhe der Rauchschürze begrenzt. Insgesamt kann bei den gegebenen Umständen kein positiver Effekt festgestellt werden, der Rauch wird eher in den Aufenthaltsbereich umgelenkt (Bild 3.29, Video: UB2_Drall_Rs.1_stat_200.2.mp4). Es wurden Rauchschürzenlängen zwischen 40 und 80 cm in Abständen von ca. 1 bis 2 m von

der Bahnsteigkante und Entrauchungsvolumenströmen zwischen 200.000 m³/h und 400.000 m³/h untersucht.

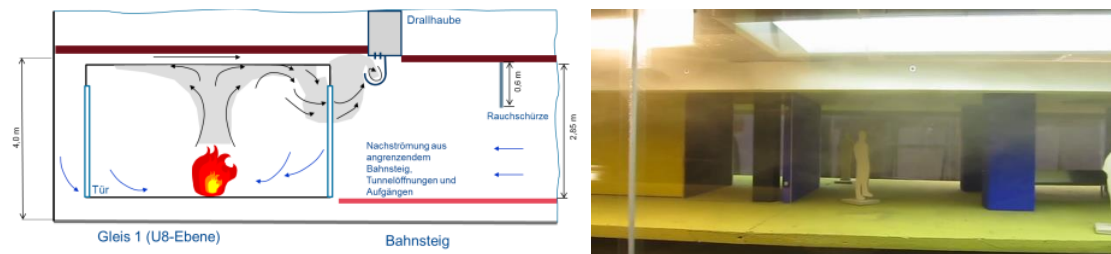


Bild 3.29: Draalhaube in Kombination mit Rauchschrürze (links: Prinzipskizze; rechts: Rauchausbreitung in der U8-Ebene)

Draallentrauchung mit Unterstützung von Rauchschrürzen und Luftschleier

Um das Übertreten des Rauches an der Rauchschrürze zu unterbinden, wird zusätzlich dahinter ein Luftschleier angeordnet. Verschiedene Ausblasgeschwindigkeiten und Anstellwinkel führen nicht zu einer befriedigenden Lösung. Kleine Geschwindigkeiten können den Rauch nicht am Übertritt in Richtung Gleis 2 bremsen, höhere Geschwindigkeiten führen zu stärkerer Induktion des Brandrauchs in den Luftschleier. Letztlich kann die Induktion des Rauches in den Luftschleier nicht unterbunden werden und führt zu einem Rauchübertrag in den benachbarten Teil des Bahnsteigs (Bild 3.30, Video: 05_UB2_Draall_Schl.22.2_Rs.40.mp4).

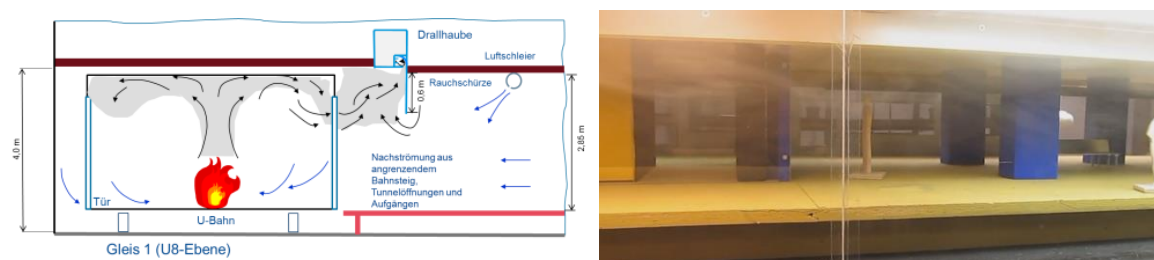


Bild 3.30: Draalhaube in Kombination mit Rauchschrürze und Luftschleier (links: Prinzipskizze; rechts: Rauchausbreitung in der U8-Ebene)

Insgesamt herrschen bessere Sichtverhältnisse als bei der punktuellen Entrauchung erreicht werden, jedoch wird das Ziel der Rauchbegrenzung sowie einer raucharmen Schicht innerhalb der Ebene auch hier noch nicht erreicht.

Abschnittsweise Drallentrauchung

Das letztlich zielführende Konzept besteht in der Entrauchung über Drallhauben auf beiden Bahnsteigseiten mit $2 \times 184.000 \text{ m}^3/\text{h}$ (entsprechend $3.860 \text{ m}^3/(\text{h m}_{\text{fkd}})$), jeweils aber nur über die halbe Länge des Bahnsteigs (siehe Position im Grundriss in Bild 3.31). Die Nachströmung zum aktiven Entrauchungsabschnitt erfolgt über die U-Bahn-Tunnel sowie die Treppenaufgänge zur U9 bzw. Verteilerebene.

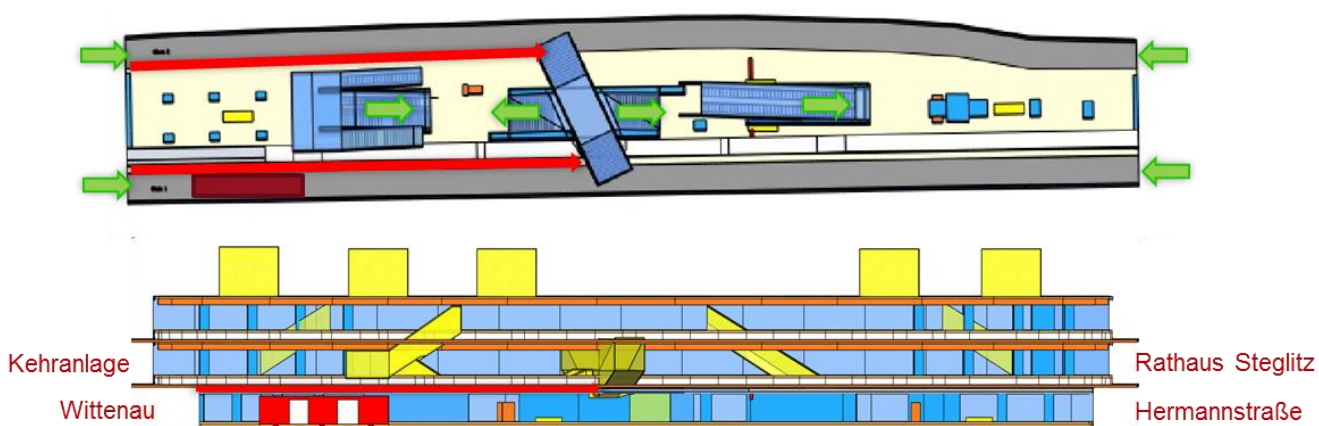


Bild 3.31: Drallhaube beidseitig des Bahnsteigs aktiviert

In Bild 3.32 ist ein schematischer Schnitt zur Darstellung der Entrauchungsposition sowie die typische Rauchausbreitung in der U8-Ebene für diese Situation dargestellt.

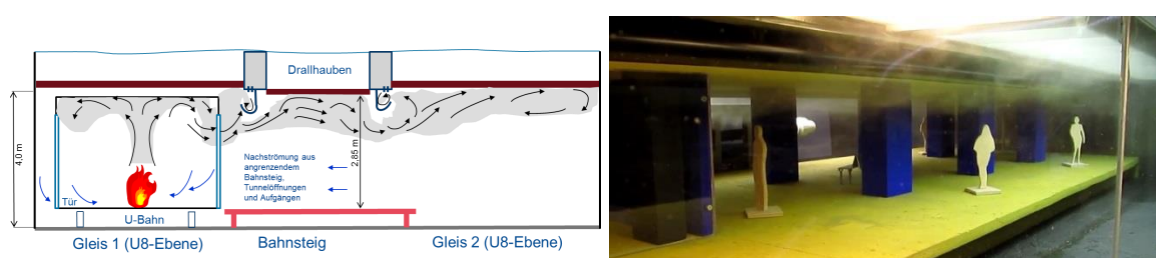


Bild 3.32: Drallhaube beidseitig des Bahnsteigs (links: Prinzipskizze; rechts: Rauchausbreitung in der U8-Ebene)

In Bild 3.33 sind in der schematischen Seitenansicht die Richtungen der Nachströmung dargestellt. Bei beidseitiger Drallentrauchung erfolgt keine Rauchausbreitung über die Treppenaufgänge nach oben.

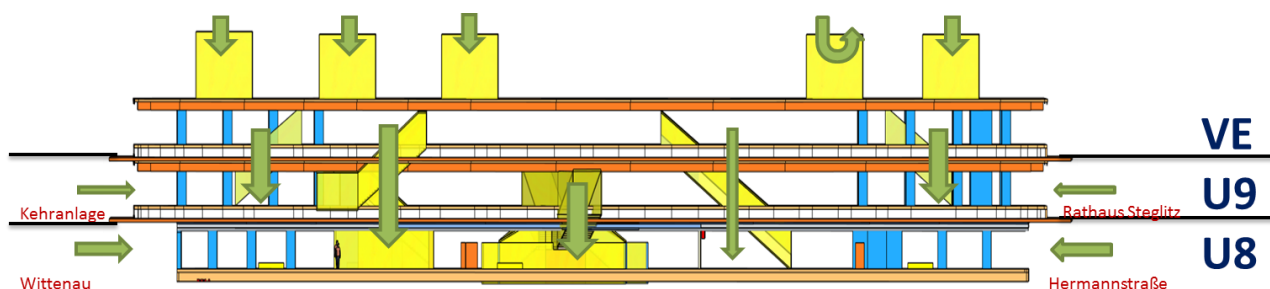


Bild 3.33: Schematische Seitenansicht – beidseitige Drallentrauchung mit $2 \times 184.000 \text{ m}^3/\text{h}$

Die Ausbreitung des Rauches kann so auf den Bereich der Brandherdquelle begrenzt werden und eine ca. 2 m hohe raucharme Schicht erreicht werden (Bild 3.34, Video: 06_UB2_Drall.2_stat_200.1_z15.mp4). Der Raucheintrag auf das gegenüberliegende Gleis 2 wird deutlich verringert und durch die dort aktive Drallhaube abgeführt. Der Rauchübertritt in benachbarte Ebenen wird unterbunden.



Bild 3.34: Rauchausbreitung bei beidseitiger Drallentrauchung in der U8-Ebene mit $2 \times 184.000 \text{ m}^3/\text{h}$

Die Konzeptidee besteht darin, dass die Entrauchungselemente über die gesamte Länge des Bahnsteigs installiert werden, aber abhängig von der Position des brennenden Waggons abschnittsweise über eine Länge von 50 m aktiviert werden.

In Bild 3.35 ist diese Idee dargestellt, bei der drei aktivierbare, sich überlappende, Entrauchungsabschnitte jeweils in Abhängigkeit des brennenden Waggons geschaltet werden können. Der mögliche Brandherd würde somit immer mit seiner gesamten Länge innerhalb des aktiven Rauchabschnittes platziert sein. Wenn der Brandherd im Übergangsbereich von zwei Abschnitten detektiert wird, ist es aus unserer Sicht sinnvoll, vorzugsweise den äußeren Abschnitt zu aktivieren, damit der Rauch nicht unnötig in Richtung der Treppenaufgangsbereiche strömt.

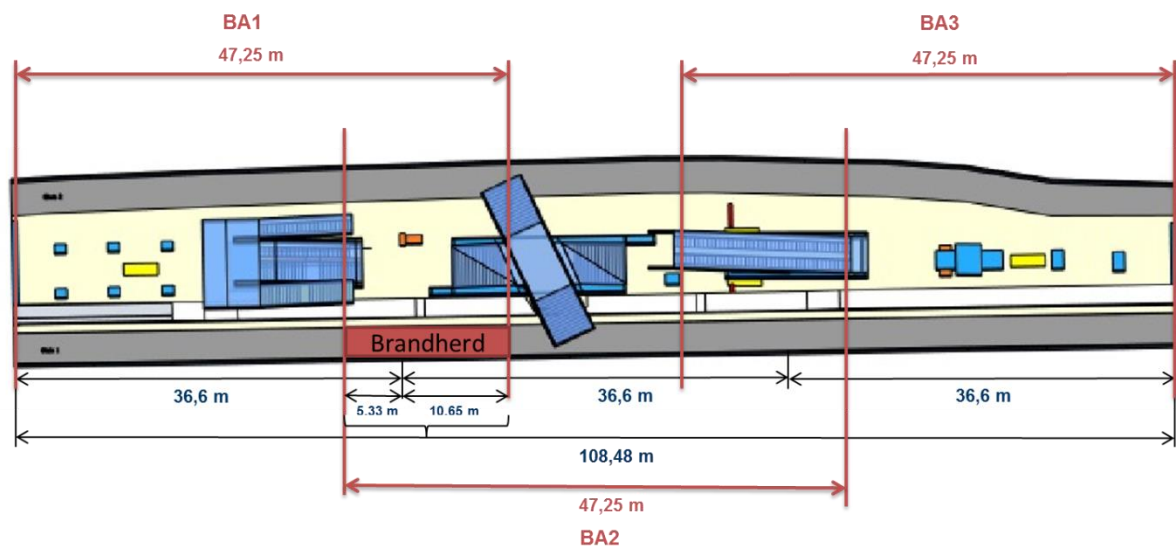


Bild 3.35: Unterteilung des Bahnsteiges in überlappende Rauchabschnitte

3.4.5 Entrauchungskonzepte für die Rauchbegrenzung in der Verteilerebene

In der Verteilerebene werden zwei typische Brandszenarien untersucht und für die jeweilige Situation Entrauchungskonzepte entwickelt:

- **Geschäftsbrand** in der Verteilerebene (Brandleistung 6,9 MW):
Ziel ist die Begrenzung der Rauchausbreitung auf den Geschäftsbereich
- **Gepäckstück- bzw. Kinderwagenbrand** im Wegebereich der Verteilerebene (Brandleistung 0,83 MW):
Ziel ist die Begrenzung der Rauchausbreitung auf einen Teilbereich der Verteilerebene, sodass Fluchtwege nach draußen erhalten bleiben.

3.4.5.1 Geschäftsbrand in der Verteilerebene

Brandherdposition

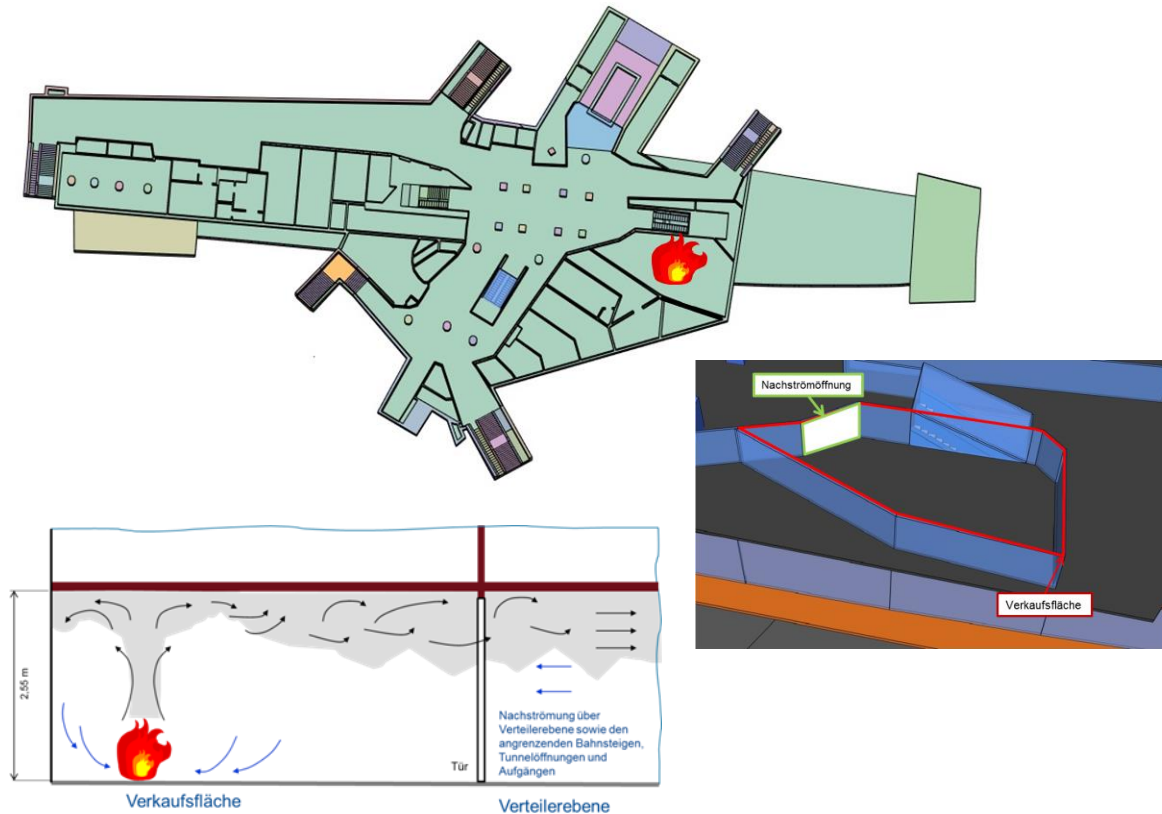


Bild 3.36: Position des Geschäftsbrandes im Grundriss der Verteilerebene

Die ausgewählte Verkaufsfläche hat eine Ausdehnung von ca. 76 m². Die Nachströmung erfolgt bei Entrauchung über die raumhohe Eingangsöffnung, die hier mit einer Größe von 7,8 m² angenommen wird.

Brandherdmodellierung

Für den Brand in einer Gewerbeeinheit wurden von der BAM vier unterschiedliche Bemessungsbrände untersucht (Bild 3.37 [15]). Davon wurde als das zugrunde zu legende Szenario für den Verkaufsflächenbrand das Ereignis mit max. 6,9 MW Wärmefreisetzung ausgewählt (Supermarkt bzw. Internetcafé).

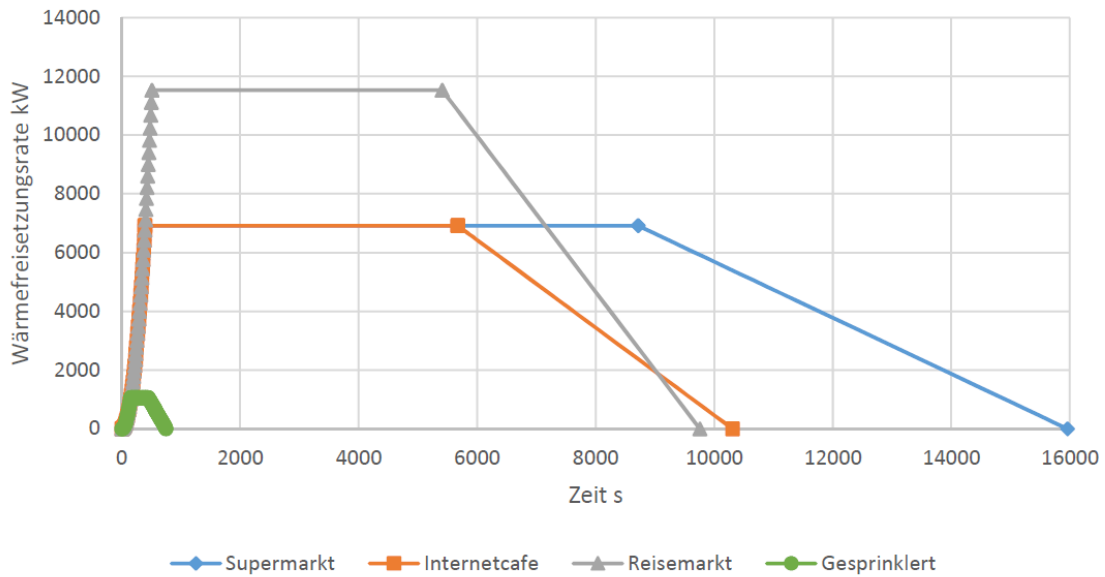


Bild 3.37: Typische Brandverlaufskurven für den Brand in einer Gewerbeeinheit [BAM, Bericht zu AP 1.1 [15]]

Wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, dient auch hier als Brandherd in den Modellversuchen eine Wärmequelle, die hier als spiralförmige Windung eines Heizdrahtes hergestellt wird (Bild 3.38).

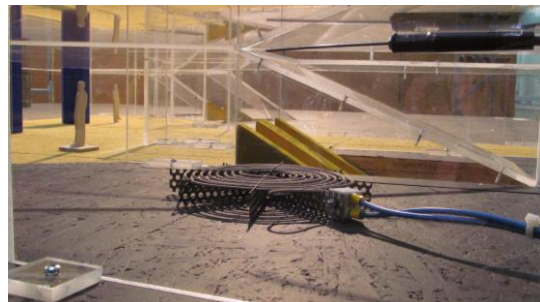


Bild 3.38: Brandherdmodell

Rauchausbreitung ohne Entrauchung

Als „Nullversuch“ wird zunächst die Rauchausbreitung in der Situation dargestellt, dass keine Entrauchungsmaßnahmen vorgenommen werden. Die Verkaufsfläche ist innerhalb kurzer Zeit komplett verraucht. Die Türen der Verkaufsfläche sind geöffnet, sodass der vom Brandherd freigesetzte Rauch über diese Öffnung in die Verteilerebene abströmen kann und sich dort ungehindert ausbreitet und zu einer großflächigen Verrauchung führt. Das Abströmen des Rauches erfolgt hauptsächlich über die Aufgänge I/1 und II/1 nach Draußen (Bild 3.39, Video: 07_VE.S.1_oE_stat_01.mp4).

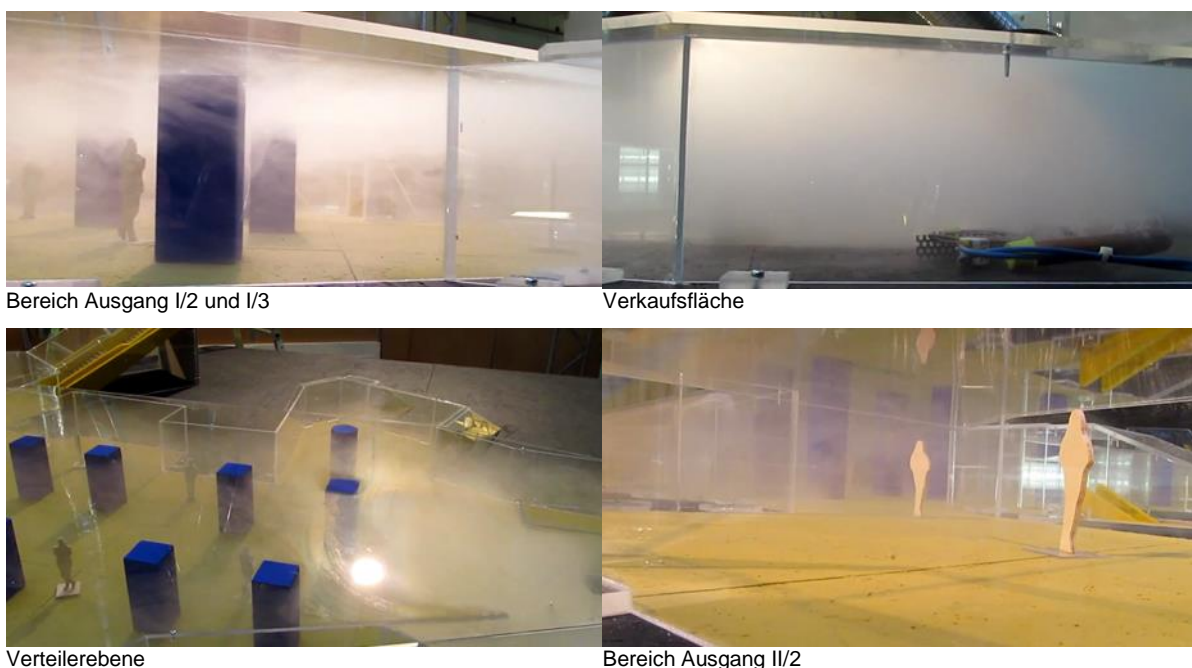


Bild 3.39: Rauchausbreitung ohne Entrauchung der Verkaufsfläche

Entrauchungskonzept Verkaufsfläche

Für die Entrauchung des Geschäftsbrandes wird eine einfache punktuelle Entrauchung vorgesehen. Ziel ist lediglich die Begrenzung der Rauchausbreitung auf die Shopfläche. Der notwendige Entrauchungsvolumenstrom wird bei dem jeweiligen Brandszenario so ermittelt, indem er bei der max. Wärmefreisetzungsrate des betrachteten Szenarios soweit gesteigert wird, bis kein Überströmen mehr über die geöffnete Türfläche erfolgt.

Um das Überströmen zu vermeiden, ist für den Brandfall ohne Sprinkleranlage (6,9 MW) ein Entrauchungsvolumenstrom von 75.000 m³/h vorzusehen.

Bei Sprinklerung des Brandes erreicht die Brandleistung maximal 1,06 MW (Bild 3.37) und es genügt ein Entrauch-

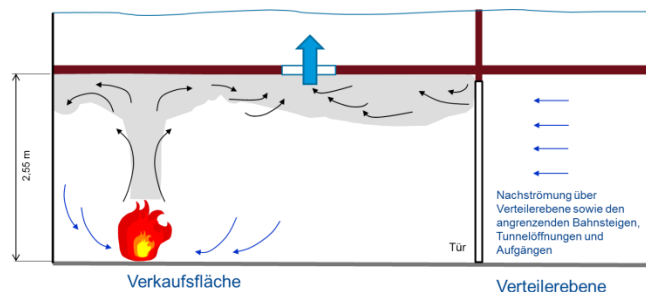


Bild 3.40: Prinzipskizze punktuelle Entrauchung

chungsvolumenstrom von $17.500 \text{ m}^3/\text{h}$. In Bild 3.41 links wird die Rauchausbreitung in den Wegebereich der Verteilerebene ohne und rechts mit Entrauchung des Shops dargestellt.

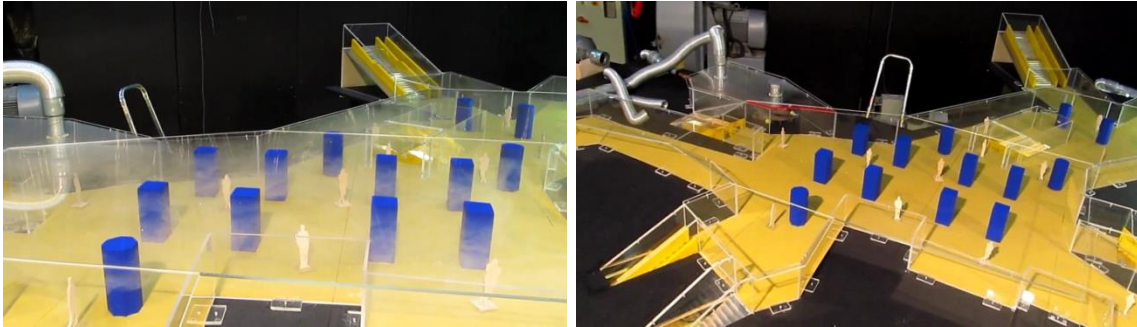


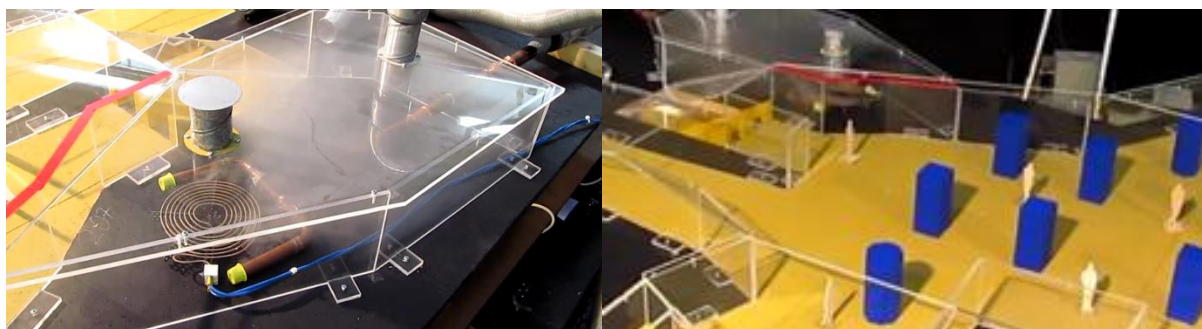
Bild 3.41: Rauchausbreitung in der Verteilerebene (links: ohne Entrauchung; rechts: punktueller Entrauchung im Shop mit $75.000 \text{ m}^3/\text{h}$)

Der notwendige Entrauchungsvolumenstrom ist neben der Wärmefreisetzungsrate und der Größe der Türfläche auch von der Gestaltung der Türfläche abhängig. So wirkt z. B. ein Türsturz wie eine „Rauchschürze“ und kann den notwendigen Volumenstrom senken. Die Anordnung der punktuellen Entrauchungsposition im hinteren Teil der Verkaufsfläche hat sich am günstigsten erwiesen.



Rauchfreisetzung am Brandherd (zu Beginn)

Rauchverteilung in der Verkaufsfläche



Blick von oben auf die Verkaufsfläche

kein Überströmen in die Verteilerebene

Bild 3.42: Rauchausbreitung mit punktueller Entrauchung der Verkaufsfläche

In Bild 3.42 ist die Situation der Rauchausbreitung bei punktueller Entrauchung mit 75.000 m³/h in der Verkaufsfläche und der Verteilerebene dargestellt. Die Rauchausbreitung erfolgt ausschließlich innerhalb der Verkaufsfläche, es gibt keinen Eintrag in die Verteilerebene (Video: 08_VE.S.2_pE.2_stat_75.1.mp4).

3.4.5.2 Gepäck- bzw. Kinderwagenbrand in der Verteilerebene

Brandherdposition

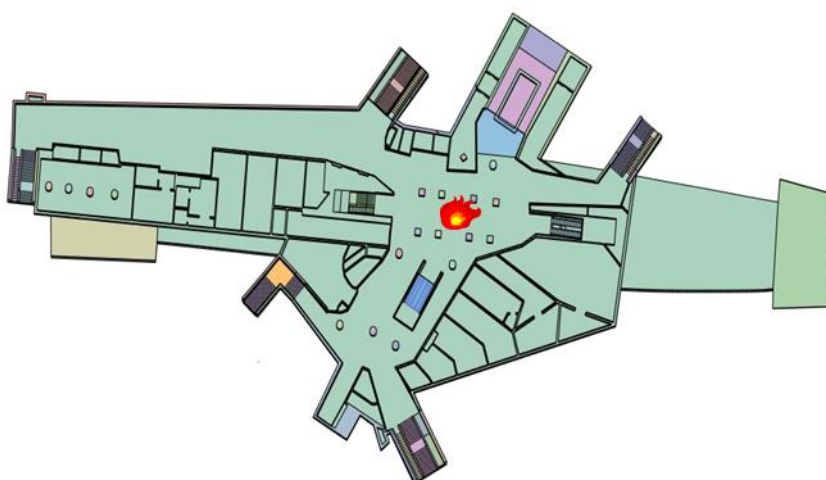


Bild 3.43: Position des Gepäckbrandes im Grundriss der Verteilerebene

In der Verteilerebene münden alle Aufgänge von den Bahnsteigen. Von dieser Ebene gelangt man über Treppenaufgänge an die Straßenoberfläche. Somit hat die Verteilerebene eine zentrale Funktion beim Zugang sowie dem Verlassen des Stationsbauwerks. Die ungünstigste Position für einen möglichen Brandherd ist daher mittig gelegen in der Verteilerebene zwischen den Aufgängen zu den Bahnsteigen (Bild 3.43).

Brandherdmodellierung

Für die Bemessungsbrände von Gepäckstücken werden in dem Bericht der BAM vier verschiedene Brände dargestellt (Bild 3.44 [15]). Für den Brand in der Verteilerebene wird hier ein Kinderwagenbrand gewählt, der wegen des schnellen An-

stiegs der Wärmefreisetzung auf max. 830 kW in den ersten Minuten einen kritischen Brand darstellt.

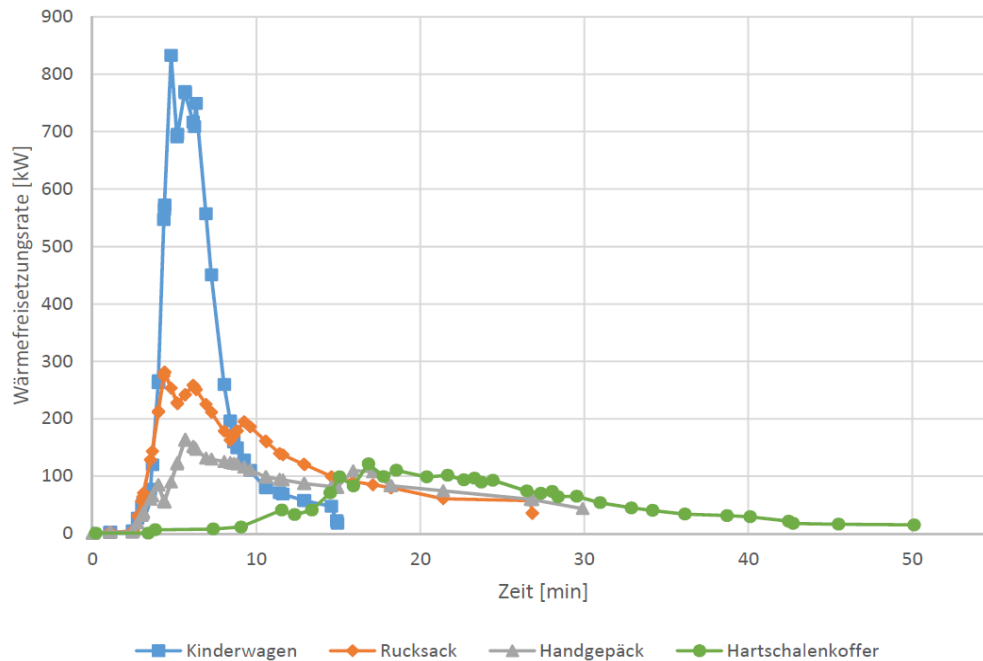


Bild 3.44: Typische Brandverlaufskurven für Gepäckstücke [BAM, Bericht zu AP 1.1 [15]]

Wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, dient auch hier als Brandherd in den Modellversuchen eine Wärmequelle, die hier als spiralförmige Windung eines Heizdrahtes hergestellt wird (Bild 3.45).

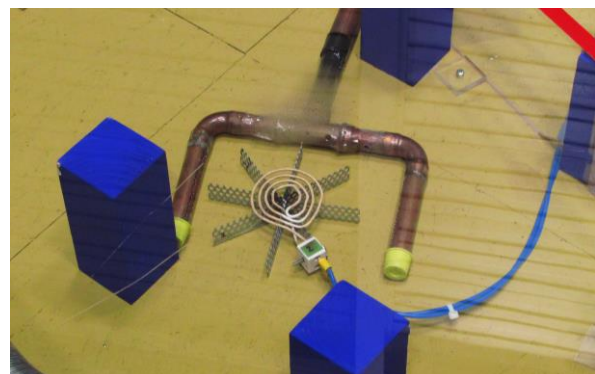
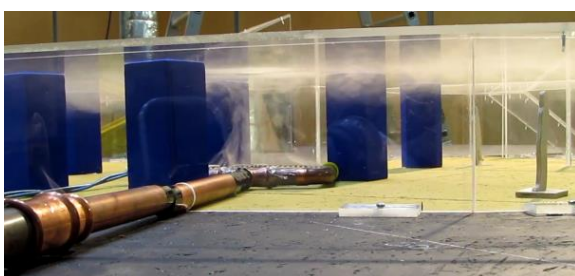


Bild 3.45: Brandherdmodell für den Gepäckbrand in der Verteilerebene

Rauchausbreitung ohne Entrauchung

Als „Nullversuch“ wird zunächst die Rauchausbreitung in der Situation dargestellt, dass keine Entrauchungsmaßnahmen vorgenommen werden. Die Verteilerebene ist innerhalb kurzer Zeit komplett verraucht. Die flache großflächige Geometrie der Verteilerebene unterstützt die ungehinderte Ausbreitung des Rauches in alle Richtungen. Das Abströmen des Rauches erfolgt hauptsächlich über die Aufgänge I/1 und I/3 und II/1 nach Draußen. Es erfolgt kein Überströmen in die unteren Ebenen (Bild 3.46, Video: 09_VE.KW.1_oE_stat_01.mp4).



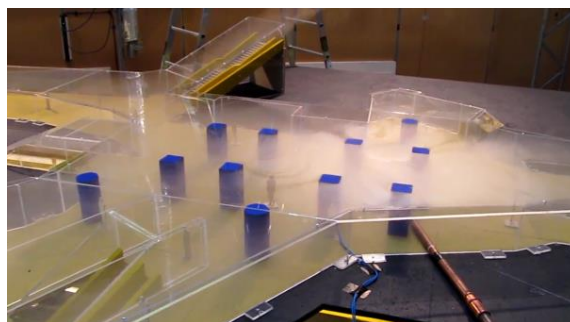
Rauchausbreitung am Brandherd zu Beginn



Rauchverteilung Übergang U8 Hermannstr.



Rauchaustritt Ausgang I/1



Rauchverteilung Verteilerebene

Bild 3.46: Rauchausbreitung ohne Entrauchung der Verteilerebene

Entrauchungskonzept Gepäckstückbrand in der Verteilerebene

Um bei einem Brand in der Verteilerebene den Personen in den unteren U-Bahnebenen die Flucht zu ermöglichen, ist es unabdingbar, dass der Wegebereich der Verteilerebene in Rauchabschnitte unterteilt wird. Die Unterteilung erfolgt in der Weise, dass von den Aufgängen aus den unteren Bahnsteigen immer jeweils ein Ausgang in einen rauchfreien Bereich führt (Bild 3.47). Die Entrauchung wird jeweils in dem Abschnitt aktiviert, in dem der Brandherd detektiert wird.

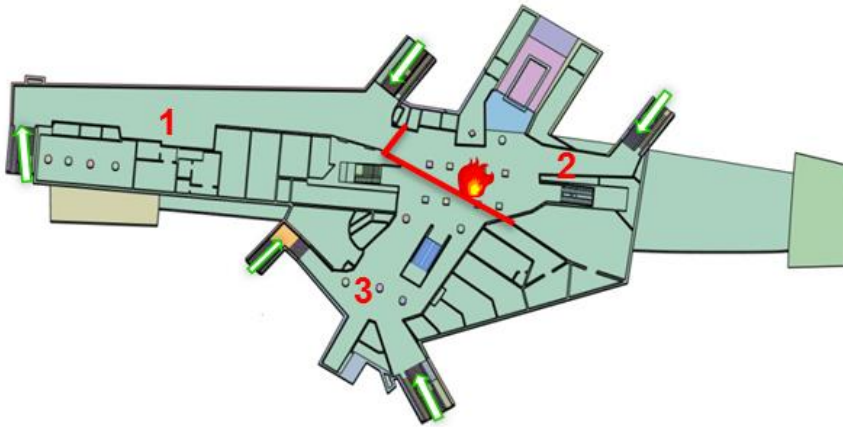
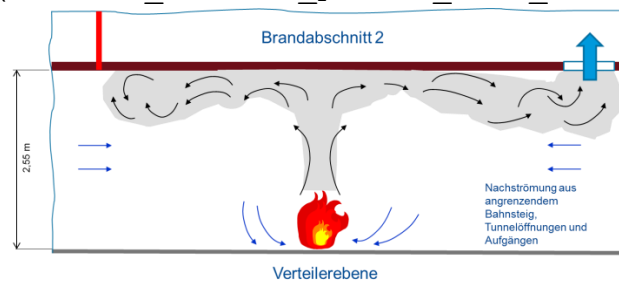


Bild 3.47: Unterteilung der Verteilerebene in drei Rauchabschnitte

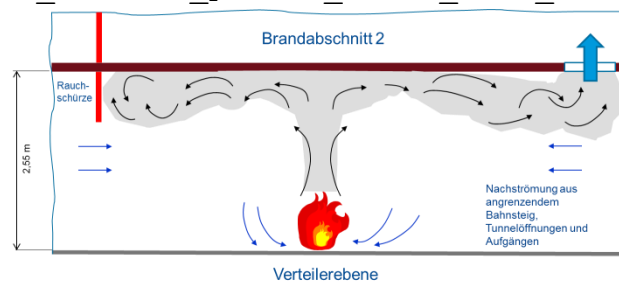
In den Versuchen zur Konzeptentwicklung wird in iterativen Schritten der notwendige Entrauchungsvolumenstrom ermittelt, um das Ziel der Abschnittsbildung in Abhängigkeit durch unterschiedliche unterstützende (bauliche) Maßnahmen zu erreichen:

- **Variante A:** Abschnittsbildung **ohne Maßnahmen**, nur durch punktuelle Absaugung (Video: 10_VE.KW.1_pE.1+2_stat_300.2.mp4)



→ 300.000 m³/h Absaugvolumenstrom notwendig

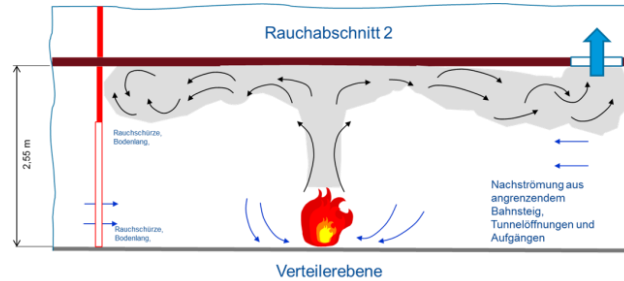
- **Variante B:** Abschnittsbildung mit Hilfe von **70 cm langen Rauchschrüzen** (Video: 11_VE.KW.1_pE.1+2_Rs.70_stat_200.2.mp4)



→ 200.000 m³/h Absaugvolumenstrom notwendig

- **Variante C: Abschnittsbildung mit bodenlangen Rauchschrzen u. Fluchtöffnungen**

(Video: 12_VE.KW.1_pE.1+2_Rs.b.27_stat_50.2.mp4)

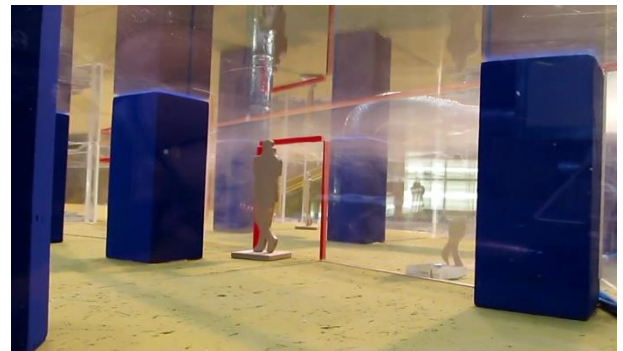


→ 50.000 m³/h Absaugvolumenstrom notwendig

Die beste Abschirmung des Rauchübertritts kann mit der Variante C erreicht werden. In den bodenlangen Rauchschrzen sind Fluchtöffnungen in Richtung der beiden angrenzenden Rauchabschnitte vorhanden. Die Gesamtöffnungsfläche der Fluchtöffnungen beträgt 18,8 m², das entspricht 27% der Querschnittsfläche entlang der Abschnittstrennung. In Bild 3.48 ist die Situation der Rauchausbreitung und der Abschnittstrennung im Versuch dargestellt.



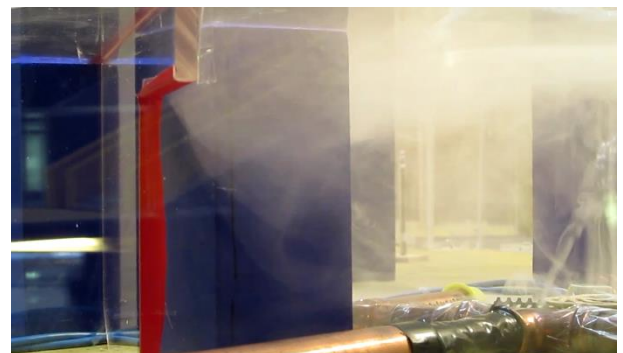
Rauchausbreitung im Bereich des Brandherdes, keine Rauchübertritt an der Fluchtöffnung



Kein Überströmen am Übergang von Brandabschnitt 2 → 3.



Rauchausbreitung in Brandabschnitt 2



Strömungsverhalten am Übergang von Brandabschnitt 2 → 3

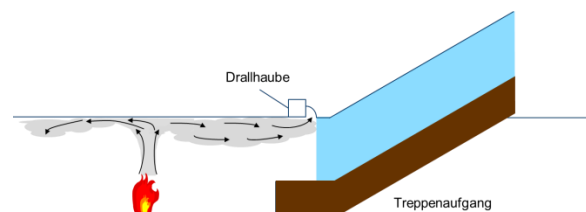
Bild 3.48: Abschnittstrennung der Verteilerebene mit bodenlangen Rauchschrzen und punktueller Entrauchung mit 50.000 m³/h

3.5 Maßnahmen zur Verhinderung einer geschossübergreifenden Rauchausbreitung

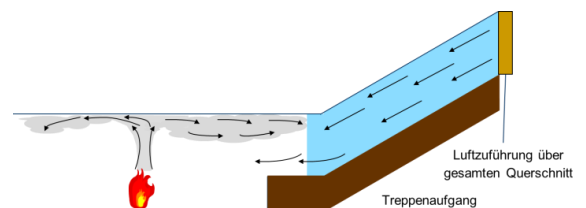
Das Ziel der Versuche ist die Rauchfreihaltung des Treppenaufgangs in andere Ebenen sowie die Verhinderung des Rauchübertritts in darüber liegende Geschosse.

Um die Rauchströmung über das Treppenhaus auf andere Ebenen zu verhindern, werden verschiedene Maßnahmen einzeln oder in Kombination in deren Wirkung untersucht:

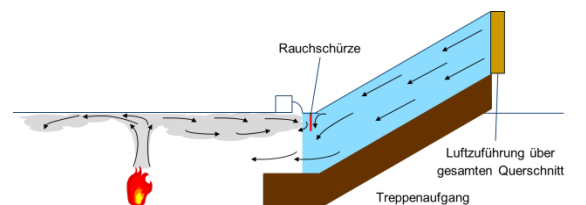
- Linien- bzw. Drallabsaugung an der Eingangsfläche zum Treppenaufgang



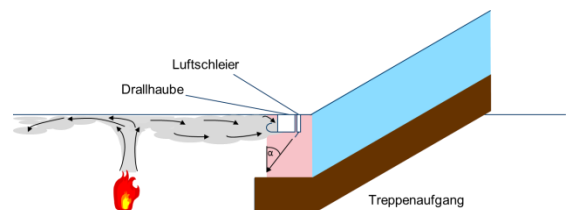
- Aufbau einer Sperrströmung



- Rauchschräge



- Luftschleier



Vor Beginn des Modellbaus werden im Hamburger Verkehrsnetz typische Aufgangsbreiten von Treppenaufgängen in unterirdischen Stationen bestimmt, um die Geometrie für den Aufbau festzulegen.

3.5.1 Untersuchung von typischen Aufgangsbreiten

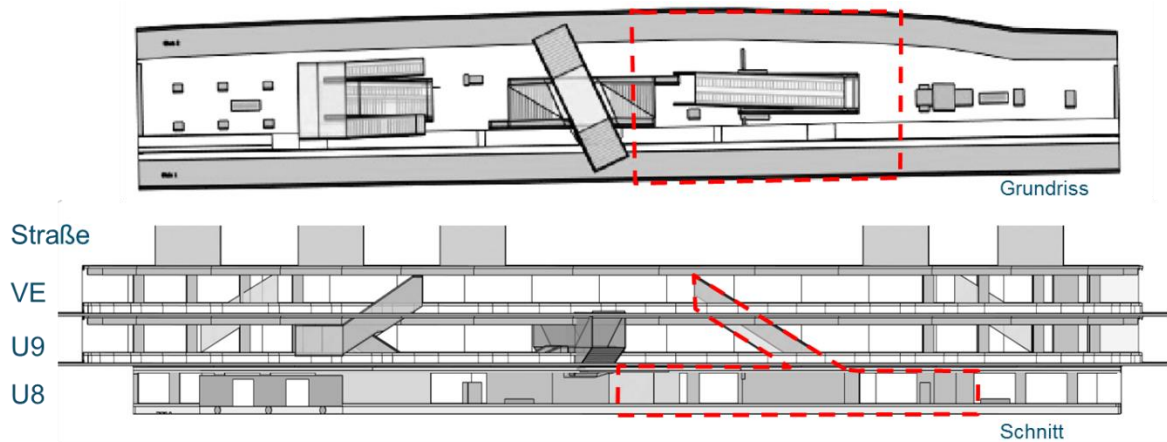


Bild 3.49: Bereich des Ausschnittmodells M 1:5 rot markiert (Treppenaufgang von U8 nach Verteilerebene, ohne benachbarte Aufgänge)

Für das Ausschnittmodell wird ein kritischer Bereich der Osloer StraÙe ausgewählt (siehe Bild 3.49). Dieser Treppbereich hat innerhalb der Station den groÙten Höhenunterschied zu überwinden.

Bezüglich der darzustellenden Treppenbreite werden im Vorfeld verschiedene Stationen im Verkehrsnetz Hamburg auf typische Werte hin untersucht (Tabelle 6 und Bild A.4). Es sind Aufgangsbreiten im Bereich von 2 m bis zu 8 m anzutreffen (Bild 3.50). Die durchschnittliche Breite liegt bei ca. 4 m. Daher wird für das Ausschnittmodell eine Aufgangsbreite von 4 m zugrunde gelegt, um an dem Modell eine typische Situation zu untersuchen.



Bild 3.50: Aufgangsbreiten von Treppenaufgängen im Hamburger Verkehrsnetz

Station	Breite in m	Höhe in m	Länge in m	Fläche in m ²	Umfang in m
Barmbek	3,50	3,27	7,20	11,45	13,54
Jungfernstieg	3,15	6,00	12,00	18,90	18,30
Jungfernstieg	4,50	4,33	2,50	19,49	17,66
Rathaus	4,78	3,20	20,00	15,30	15,96
Rathaus	2,00	2,20	11,00	4,40	8,40
Rathaus	3,60	2,30	7,40	8,28	11,80
Schlump	3,00	2,60	7,50	7,80	11,20
Alter Teichweg	3,50	6,00	11,12	21,00	19,00
Alter Teichweg	2,39	2,42	10,83	5,78	9,62
Straßburger Straße	6,31	3,13	10,48	19,75	18,88
Straßburger Straße	2,22	2,45	13,60	5,44	9,34
Straßburger Straße	2,46	2,44	12,18	6,00	9,80
Wandsbeker Chaussee	8,06	5,23	11,95	42,15	26,58
Wandsbeker Chaussee	2,31	2,34	11,39	5,41	9,30
Wandsbeker Chaussee	3,54	2,33	11,41	8,25	11,74
Ritterstraße	4,11	3,72	12,43	15,29	15,66
Ritterstraße	3,66	2,46	14,09	9,00	12,24
Ritterstraße	2,41	2,56	12,03	6,17	9,94
Wartenau	4,13	2,77	9,20	11,44	13,80
Wartenau	2,41	2,41	18,08	5,81	9,64
Wartenau	1,96	2,27	10,91	4,45	8,46
Lübecker Straße	4,70	3,58	12,68	16,83	16,56
Lübecker Straße	2,38	2,27	10,35	5,40	9,30
Lübecker Straße	5,13	2,80	10,61	14,36	15,86
Lohmühlenstraße	4,81	2,77	10,45	13,32	15,16
Lohmühlenstraße	2,95	2,13	12,09	6,28	10,16
Steinstraße	4,90	6,14	9,27	30,09	22,08
Steinstraße	5,00	2,41	21,00	12,05	14,82
Steinstraße	2,97	2,20	10,82	6,53	10,34
Meßberg	4,09	2,76	10,29	11,29	13,70
Meßberg	3,99	2,25	12,42	8,98	12,48
Meßberg	2,40	2,28	12,37	5,47	9,36
Gänsemarkt	6,57	4,73	32,49	31,08	22,60
Gänsemarkt	8,04	5,57	10,15	44,78	27,22
Gänsemarkt	4,14	2,39	15,20	9,89	13,06
Messehallen	5,70	5,07	83,83	28,90	21,54
Messehallen	4,17	2,46	9,88	10,26	13,26
Christuskirche	2,39	2,77	10,86	6,62	10,32
Emilienstrasse	3,62	2,77	10,23	10,03	12,78
Osterstrasse	3,55	2,50	14,38	8,88	12,10
Osterstrasse	4,15	2,57	10,23	10,67	13,44
Osterstrasse	2,50	2,57	12,53	6,43	10,14
Lutterothstraße	4,15	2,66	18,96	11,04	13,62
Mittelwert	3,87	3,12	13,92	13,04	13,97

Tabelle 6: Messwerte zur Geometrie der Treppenaufgänge Hamburger Hochbahn (eigene Messungen)

3.5.2 Modellbau und Brandherdmodellierung

Das Ausschnittmodell wird im Maßstab M 1:5 erstellt, um die Maßnahmen zur Abschirmung des Rauchübertritts in andere Ebenen der Bahnstation zu untersuchen. Ausgewählt wird ein typischer kritischer Bereich, wie er in Bild 3.49 dargestellt ist.

In Bild 3.51 sind die Modellbauarbeiten fortschreitender Aufbauphasen dokumentiert und unten ist schließlich das fertiggestellte Ausschnittmodell zu sehen.

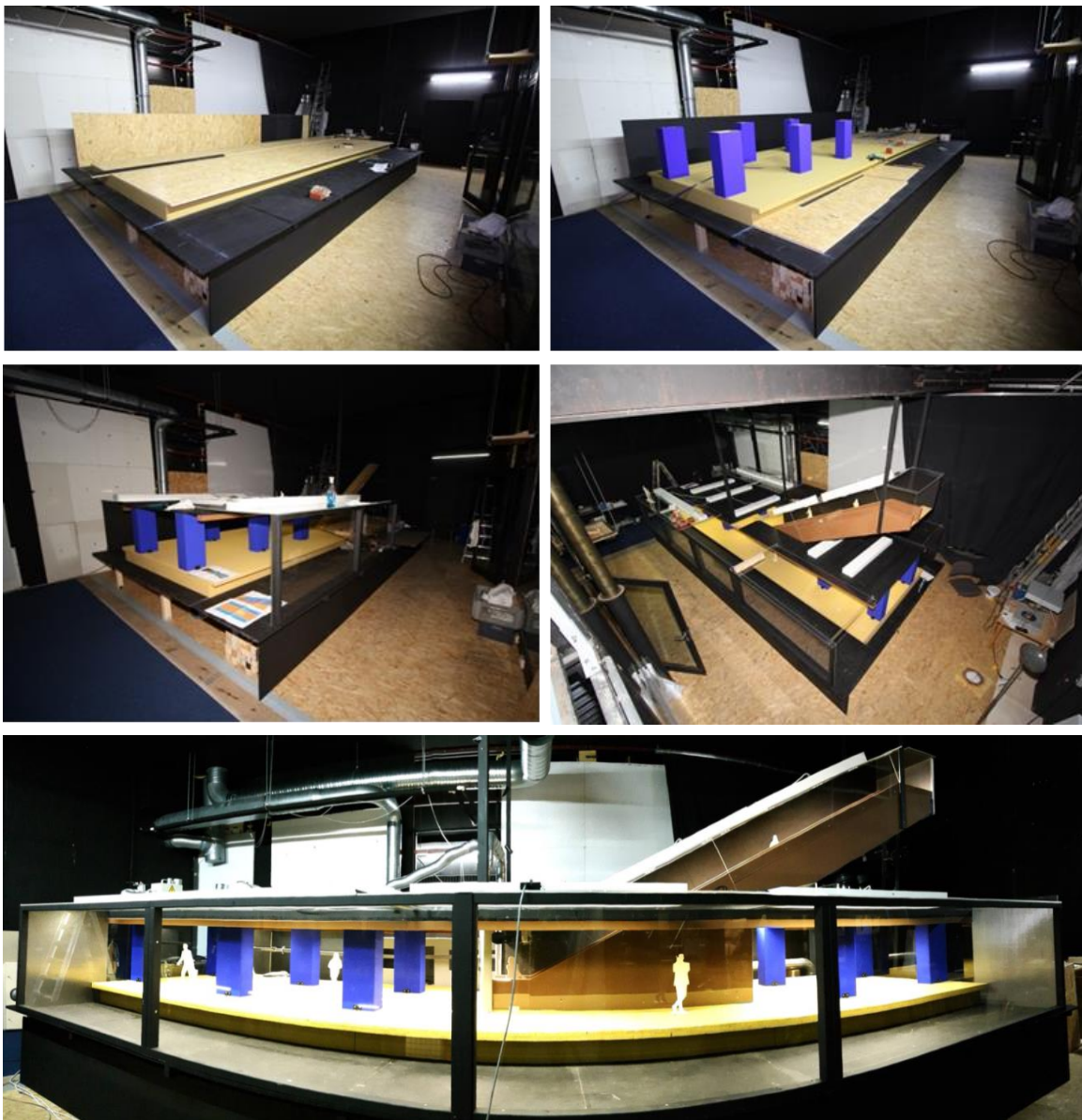


Bild 3.51: Aufbauarbeiten des Ausschnittmodells im Maßstab M 1:5, ganz unten: das fertige Modell in der Seitenansicht (Panoramafoto, Ansicht verzerrt)

Brandherdmodellierung

Für das Ausschnittsmodell wird analog zum Gesamtmodell Aufbau ein U-Bahnwaggon-Brandherd erstellt. Als geometrische Vorlage dient auch hier ein Waggon der Baureihe F84 mit einem Brandszenario eines 16 m langen Wagens nach TRStrab (s. o.). Die flächige Wärmefreisetzung innerhalb des Waggons wird im Modell über 18 Herdplatten erzeugt. Unterhalb der Herdplatten ist der Waggon mit OHA-Plan-Isolierplatten und Mineralwolle zur thermischen Entkopplung isoliert.

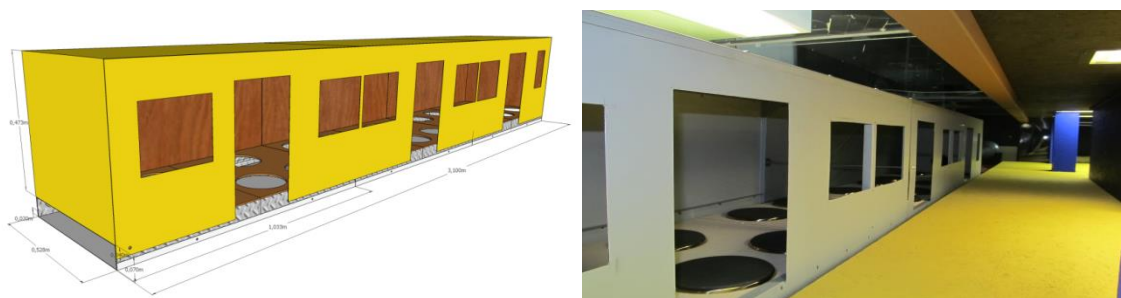
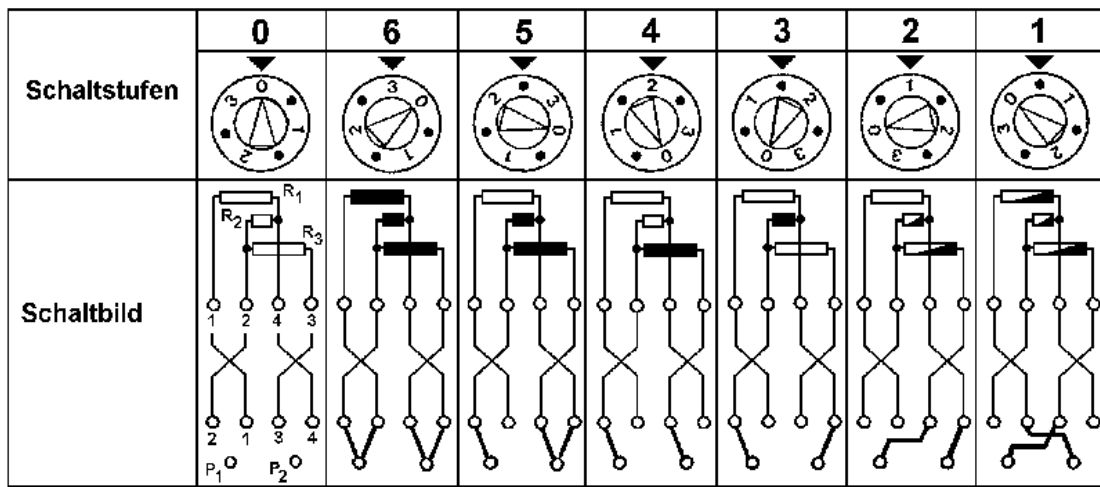


Bild 3.52: Brandherdmodell U-Bahn-Waggon im Maßstab M 1:5 (links: Konstruktionsskizze, rechts: im Modellaufbau)



Bild 3.53: Herdplatte 180 mm, max. 1500 W

Bild 3.53 zeigt eine einzelne Herdplatte in der Drauf- und Unteransicht. Die maximale Wärmefreisetzung der einzelnen Herdplatte kann je nach Schaltung begrenzt werden. Die Leistungssteuerung erfolgt in zwei Stufen. Die Auswahl der maximalen Leistung wird durch Schaltung der Anschlüsse erreicht (Bild 3.54). Anstatt der Schalter werden hier entsprechend schaltbare Sicherungen verwendet. Die Feineinstellung erfolgt durch Veränderung des Abgriffs an einem 3-phasigen Stelltransformator.



Schaltstellungen der 7-Takt-Kochplatten

145 mm Plattendurchmesser	1000 W	760 W	520 W	240 W	165 W	105 W
180 mm Plattendurchmesser	1500 W	1100 W	800 W	320 W	220 W	140 W
220 mm Plattendurchmesser	2000 W	1400 W	950 W	450 W	305 W	200 W

Bild 3.54: Anschlussplan für die Schaltstufen

Zur Reduzierung der Brandgefahr im Modell und zur Vermeidung zu hoher Temperaturen für das zugesetzte Nebelfluid wird die Leistung des Brandherdes so begrenzt, dass die Temperatur im Inneren des Waggon 100 °C nicht überschreitet. In Bild 3.55 ist das Schaltbild für diese Anordnung dargestellt.

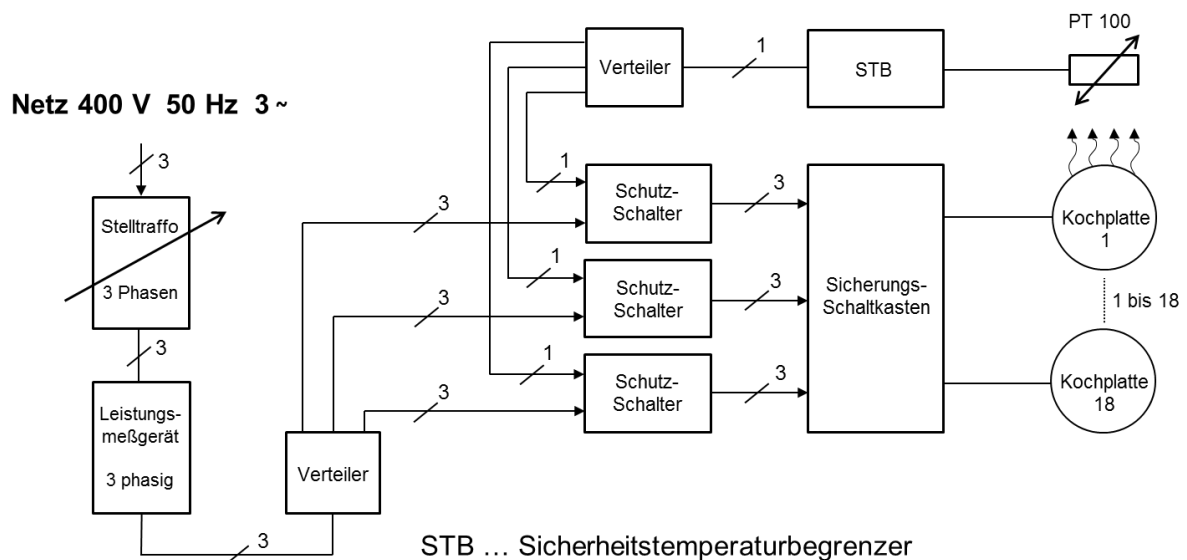
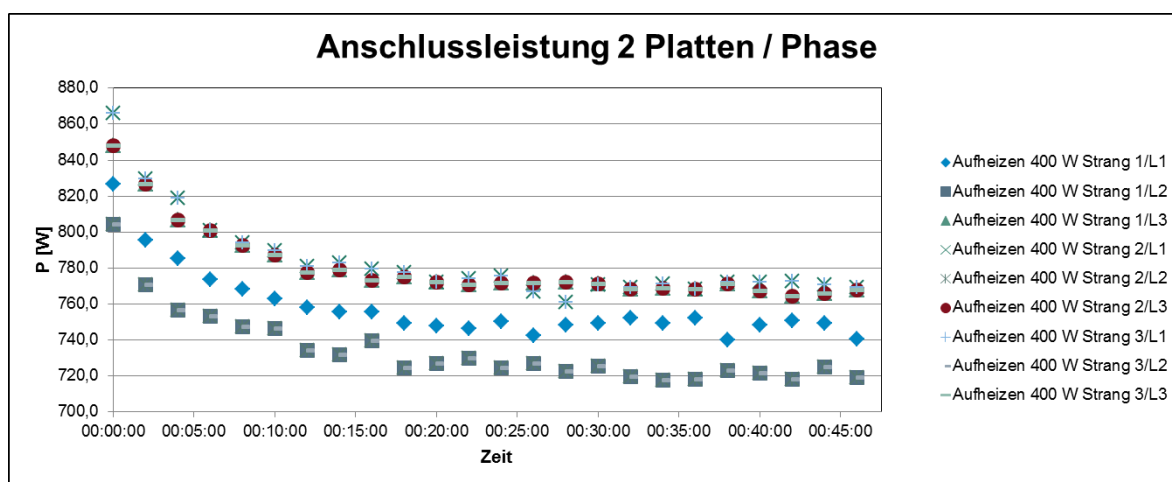


Bild 3.55: Elektrisches Blockschaltbild für den Modellbrandherd

Aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Leitwertes der Heizleiter geht mit steigender Temperatur des Brandherdes ein Absinken der Anschlussleistung einher. Dieser Effekt ist in Bild 3.56 dargestellt. Ab ca. 18 Minuten Betriebszeit ist erkennbar, dass die Leistung nicht mehr sinkt. Somit ergibt sich umgerechnet auf die Leistung aller angeschlossenen Platten eine Leistung von 6,8 kW.



Legende: Leistung pro Platte; Angaben Ordinate: Leistung pro Phase

Bild 3.56: Zeitlicher Verlauf der Anschlussleistung

3.5.3 Massstabsfaktoren

Die anzusetzenden Massstabsfaktoren errechnen sich entsprechend Kapitel 3.1.3. Mit dem geometrischen Massstab M 1:5 sowie einer Wärmefreisetzung von 6,8 kW für den Brandherd im Modell ergeben sich die Faktoren wie folgt:

Kennzahl	Ar = const.
Geometrischer Faktor	0,2
Wärmestromfaktor	$3,06 \cdot 10^{-4}$
Geschwindigkeitsfaktor	0,1153
Volumenstromfaktor	$4,611 \cdot 10^{-3}$
Temperaturdifferenzfaktor	0,0665
Zeitfaktor	1,73

Tabelle 7: Massstabsfaktoren für das Ausschnittmodell M 1:5

Das bedeutet, dass die Strömungsvorgänge im Modell um den Faktor 1,7 langsamer ablaufen als im Original.

3.5.4 „Nullversuch“

Den Untersuchungen zur Abschirmung des Rauchübertritts wird ein „Nullversuch“ ohne jegliche Installation einer Maßnahme vorangestellt, um die Auswirkung der jeweiligen Maßnahme besser beurteilen zu können. Die Brandherdposition sowie ein schematischer Schnitt sind in dem folgenden Bild dargestellt.

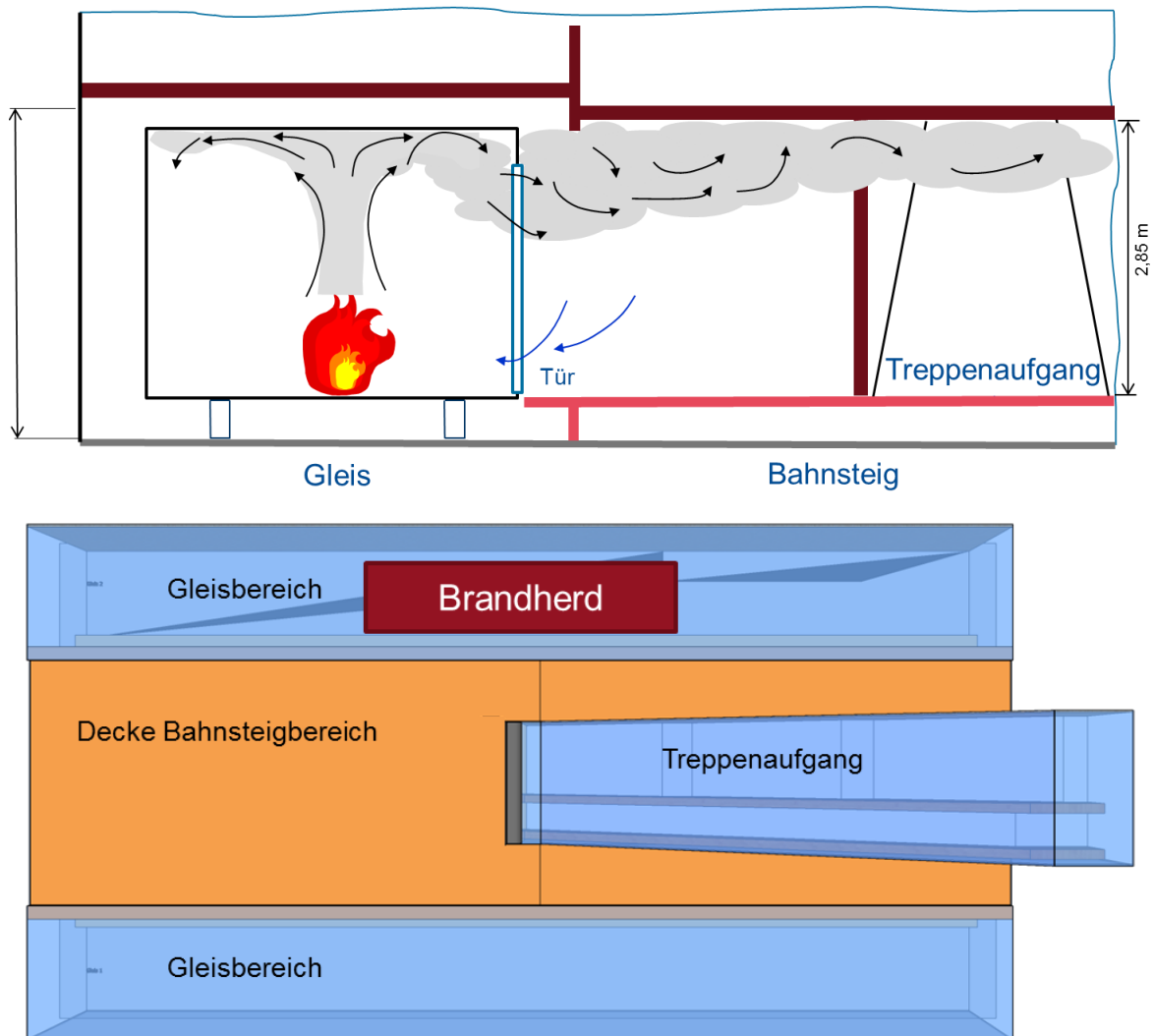


Bild 3.57: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus im Schnitt und Brandposition im Grundriss (unten)

Der Rauch führt zu einer starken, dichten Verrauchung des Treppenaufgangs und strömt in die darüber liegende Ebene (Bild 3.58, Video: 13_Mod1-5_Var1.mp4). Der Treppenaufgang wirkt aufgrund der hohen Thermik des Brandrauchs wie ein „Kamin“ und es ist im Treppenaufgang eine schnelle Rauchströmung zu beobachten.

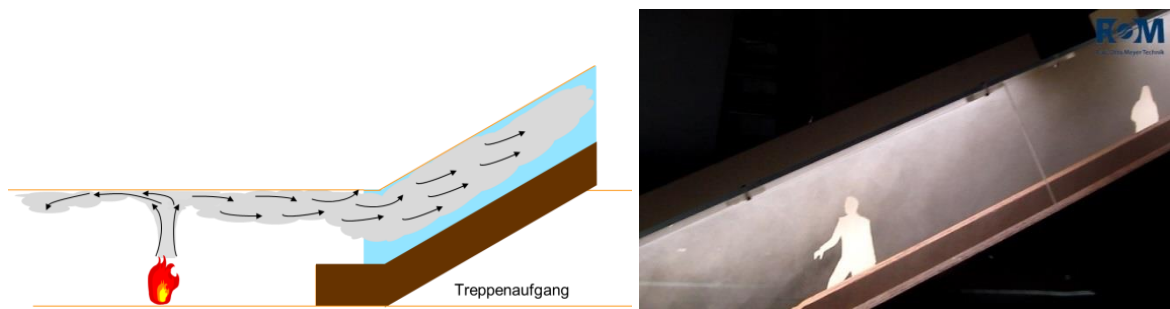


Bild 3.58: Rauchübertritt im Treppenaufgang ohne Maßnahmen (links: Prinzipskizze; rechts: Versuchsfoto)

3.5.5 Linienabsaugung

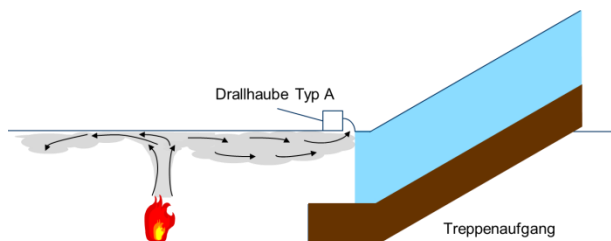


Bild 3.59: Prinzipskizze Linienabsaugung

An der Deckenkante zum Treppenaufgang wird über die gesamte Breite eine Linienabsaugung in Form einer Drallhaube installiert (Bild 3.60). Selbst bei sehr hoher Steigerung des Absaugvolumenstromes ist immer noch ein sehr starker Rauchübertritt in den Aufgang zu beobachten. Die hohe Thermik und der Eigenimpuls der Rauchgase sowie der Kamineffekt des Aufgangs führen zu dem Übertritt in den Aufgang. In Bild 3.60 ist ein typisches Strömungsbild der Versuchssituation im Treppenaufgang bei einer Absaugung mit 32.000 m³/h dargestellt (Video: 14_Mod1-5_Var6.mp4).

Die Rauchfreiheit ist offenbar durch alleinige Absaugung realistisch nicht zu erreichen. Im folgenden Schritt werden daher Untersuchungen zunächst nur mit einer Sperrströmung aus dem Treppenhaus durchgeführt.


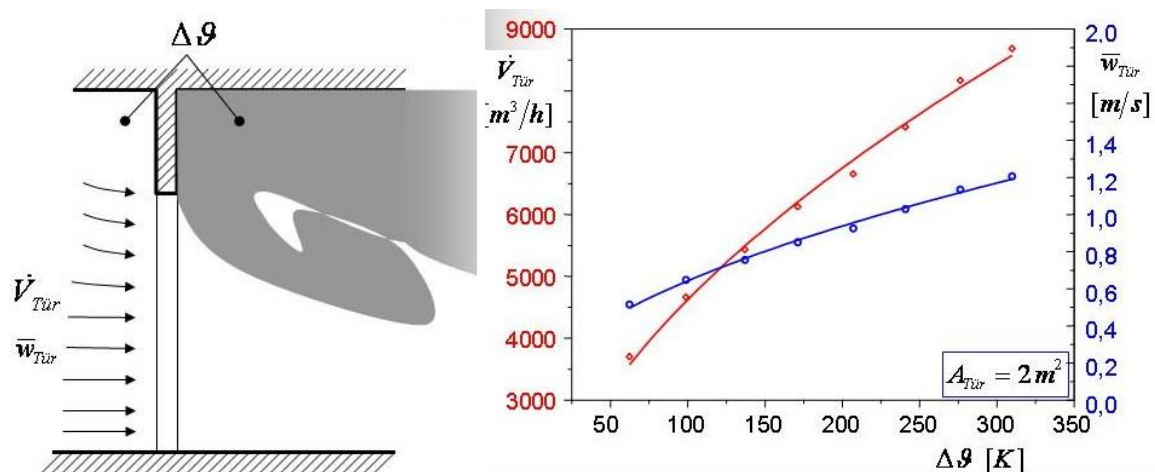
Kurzbeschreibung der Variante	Typisches Strömungsbild
Var. 6: $\dot{V}_{\text{Absaugung}} = 32.000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $\dot{V}_{\text{zu, Treppenhaus}} = 0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $\zeta_{\text{Tunnel}} = 15,4$, $\zeta_{\text{Treppenhaus}} = 8,2$ Ergebnis: <ul style="list-style-type: none"> - starke, dichte Verrauchung des Treppenhauses - Rauch strömt in darüber liegende Ebene - Rauchaustritt aus Tunnelenden - hohe Strömungsgeschwindigkeiten im Treppenhaus 	

Bild 3.60: Linienabsaugung mit 32.000 m³/h

3.5.6 Sperrströmung

Bei der Auslegung von Treppenhausdruckbelüftungsanlagen wird zur Rauchfreihaltung des Treppenhauses von einer Überströmgeschwindigkeit von 2 m/s ausgegangen. In eigenen Untersuchungen im ROM Labor wurden für eine 2 m² Öffnungsfläche der notwendige Volumenstrom ermittelt, der in Abhängigkeit von der Rauchgastemperatur notwendig ist, um die Abschirmung gegen Rauchübertritt herzustellen (Bild 3.61).


Bild 3.61: Mindestluftgeschwindigkeit zur Rauchabschirmung einer Tür

Im Ausschnittsmodell wird die Zuluftströmung aus dem oberen Bereich des Treppenaufgangs über einen Luftdurchlass dem Modell aufgeprägt. In Bild 3.62 ist eine Prinzipskizze der Versuchsanordnung im Ausschnittsmodell dargestellt.

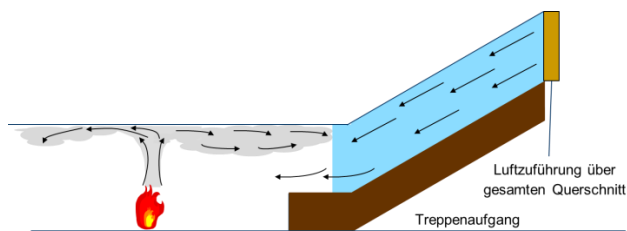


Bild 3.62: Prinzipskizze Sperrströmung

Bei Luftzuführung von 72.000 m³/h aus dem oberen Bereich des Treppenaufgangs kann der Rauchübertritt in die Nachbarebene unterbunden werden. Über den Querschnitt entspricht das einer Geschwindigkeit von 2 m/s für die notwendige Sperrströmung. Der Rauch dringt dann nur zu ca. 1/3 des Treppenaufgangs ein, der nachfolgende Bereich verbleibt rauchfrei (Bild 3.63, Video: 15_Mod1-5_Var9.mp4).

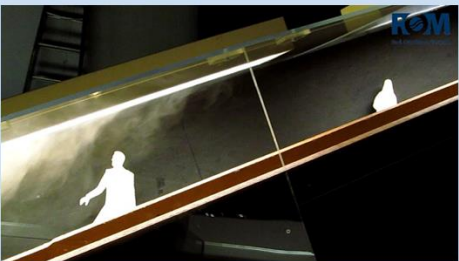
Kurzbeschreibung der Variante	Typisches Strömungsbild
<p>Var. 9: $\dot{V}_{\text{Absaugung}} = 0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $\dot{V}_{\text{zu, Treppenhaus}} = 72.000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $\zeta_{\text{Tunnel}} = 15,4$, $\zeta_{\text{Treppenhaus}} = 0$, Treppenhausbelüftung durch Luftkasten an Treppenhausende</p> <p>Ergebnis: - Rauch dringt nur teilweise ins Treppenhaus ein - Verrauchung eines Abschnitts von ca. 1/3 des Treppenhauses - restliches Treppenhaus komplett rauchfrei</p>	

Bild 3.63: Aufbau einer Sperrströmung mit 72.000 m³/h

Gegenüber der o.g. Untersuchung „fehlt“ hier zunächst der Türsturz, der für eine abschirmende Wirkung förderlich ist, wie dies in der folgenden Variante dargestellt wird.

3.5.7 Sperrströmung in Kombination mit einer Rauchschräge

Bei dieser Versuchsanordnung wird zusätzlich zur Sperrströmung eine Rauchschräge an dem Eintritt zum Treppenaufgang angeordnet. In Bild 3.64 ist eine Prinzipskizze zur Versuchsanordnung dargestellt. Unter der Rauchschräge verbleibt eine Durchgangshöhe von 2 m.

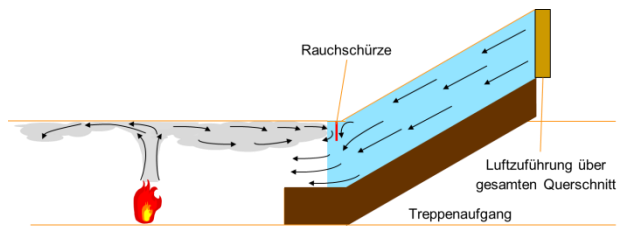


Bild 3.64: Prinzipskizze Sperrströmung und Rauchschürze

Durch die Rauchschürze kann der Sperrvolumenstrom auf $57.600 \text{ m}^3/\text{h}$ reduziert werden, ohne dass ein Rauchübertritt in das Treppenhaus erfolgt (Bild 3.65, Video: 16_Mod1-5_Var15.mp4).


Kurzbeschreibung der Variante	Typisches Strömungsbild
<p>Var. 15: $\dot{V}_{\text{Absaugung}} = 0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $\dot{V}_{\text{zu, Treppenhaus}} = 57.600 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $\zeta_{\text{Tunnel}} = 15,4$, $\zeta_{\text{Treppenhaus}} = \infty$, Treppenhausbelüftung durch Luftkasten an Treppenhausende, Rauchschürze mit 2,00 m Durchgangshöhe im Treppenhaus</p> <p>Ergebnis: Vollständige Rauchfreihaltung des Treppenhauses, keinerlei Rauchübertritt in das Treppenhaus, starke Verrauchung des Bahnsteiges</p>	

Bild 3.65: Sperrströmung mit $52.600 \text{ m}^3/\text{h}$ und Rauchschürze

3.5.8 Linienabsaugung und Sperrströmung

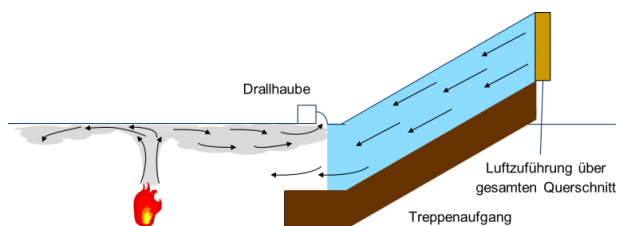


Bild 3.66: Prinzipskizze Kombination Linienabsaugung u. Sperrströmung

Bei dieser Versuchsanordnung soll mit einer Kombination aus Sperrströmung und Linienabsaugung der Rauchübertritt in das Treppenhaus verhindert werden. Dazu wird am oberen Ende des Treppenaufgangs ein Luftkasten installiert, der über den gesamten Querschnitt abströmt. Die Linienabsaugung wird mit einer über die gesamten Breite des Aufgangs installierten Drallabsaugung umgesetzt.

Mit dieser beschriebenen Kombination kann der Sperrvolumenstrom auf 18.000 m³/h reduziert werden. Bei einem Absaugvolumenstrom von 32.000 m³/h erfolgt nur noch ein geringer Raucheintrag im Wesentlichen in Deckennähe des Aufgangsbereiches (Bild 3.67, Video: 17_Mod1-5_Var8.mp4).


Kurzbeschreibung der Variante	Typisches Strömungsbild
<p>Var. 8: $\dot{V}_{\text{Absaugung}} = 32.000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $\dot{V}_{\text{zu, Treppenhaus}} = 18.000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $\zeta_{\text{Tunnel}} = 15,4$, $\zeta_{\text{Treppenhaus}} = \infty$, Treppenhaus- belüftung durch Luftkasten an Treppenhausende</p> <p>Ergebnis: deutlich geringere Verrauchung des Treppenhauses, Rauch strömt hauptsächlich entlang der Decke, Rauchaustritt aus Tunnelenden, in Deckennähe relativ hohe Strömungsgeschwindigkeiten</p>	

Bild 3.67: Linienabsaugung 32.000 m³/h u. Sperrströmung mit 18.000 m³/h

3.5.9 Kombination Linienabsaugung und Luftschleier

Mit der Anordnung von Luftschleiern im Deckenbereich sowie an den Seiten des Treppenaufgangs wird in mehreren Versuchsreihen getestet, ob eine wirksame Abschirmung gelingen kann. In mehreren Vorversuchen hat sich gezeigt, dass eine alleinige Abschirmung mit Luftschleiern nicht wirksam genug ist, um den Eigenimpuls der Rauchströmung unter der Decke zu bremsen und am Überströmen in den Treppenaufgang zu hindern. Im Bahnsteigbereich ist außerdem eine deutliche Verschlechterung durch Induktionsströmungen zu beobachten.

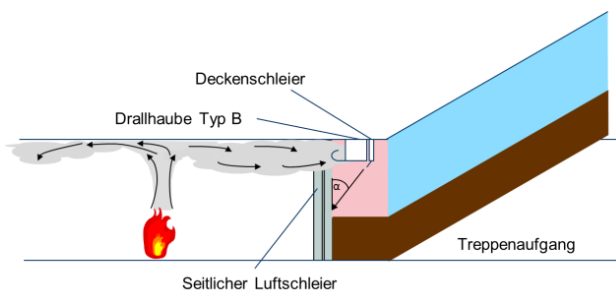


Bild 3.68: Prinzipdarstellung Kombination Linienabsaugung u. Luftschleier

Nur in Kombination mit einer Linienabsaugung kann erreicht werden, dass ein Großteil des Rauchübertrags vermieden wird. Die besten Ergebnisse unter Nutzung von Luftschleiern hat eine Kombination aus Linienabsaugung, seitlichem Schleier und Deckenschleier erzielt (Bild 3.68).

Die vollständige Rauchfreihaltung des Treppenaufgangs ist jedoch nicht möglich, es verbleibt ein kleiner Anteil, der durch Induktion und die Verwirbelungen der Luftschleier den Rauch in den Treppenaufgang fördert, der dann bis in die darüber liegende Ebene gelangt (Bild 3.69, Video: 18_Mod1-5_Var37.mp4).


Kurzbeschreibung der Variante	Typisches Strömungsbild
<p>Var. 37: $\dot{V}_{\text{Absaugung}} = 16.000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $\dot{V}_{\text{zu,Schleier}} = 14.580 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $\zeta_{\text{Tunnel}} = 15,4$, $\zeta_{\text{Treppenhaus}} = 8,2$, Drallhaube Typ B, Durchgangshöhe 2,15 m, Treppenhaus um 1.250 mm verlängert, Deckenschleier (Auslasshöhe 15 mm, $\alpha = 30^\circ$) Seitlicher Luftschleier (Auslasshöhe 15 mm, $\alpha = 32^\circ$, Länge = 2.500 mm)</p> <p>Ergebnis: geringe, ungleichmäßige Verrauchung des Treppenhauses, Rauch strömt in darüber liegende Ebene, niedrige Strömungsgeschwindigkeiten, Raucheintrag verursacht durch Induktion und Verwirbelungen</p>	

Bild 3.69: Linienabsaugung 16.000 m³/h u. Luftschleier mit 14.580 m³/h

3.5.10 Fazit

Der Rauchübertrag in den Treppenaufgang kann am wirksamsten mit der entsprechenden Kombination aus Sperrströmung, Rauchschürze und Linienabsaugung unterbunden werden. Dennoch sind sehr hohe Luftvolumenströme notwendig und die Sperrströmung muss technisch so umgesetzt werden, dass sie in Richtung des verrauchten Bereiches ausgerichtet ist. Es ist auch zu berücksichtigen, dass es von einem Bahnsteig mehrere Treppenaufgänge geben kann, d.h. die aufzuwendenden Luftvolumenströme zur Abschirmung vervielfachen sich.

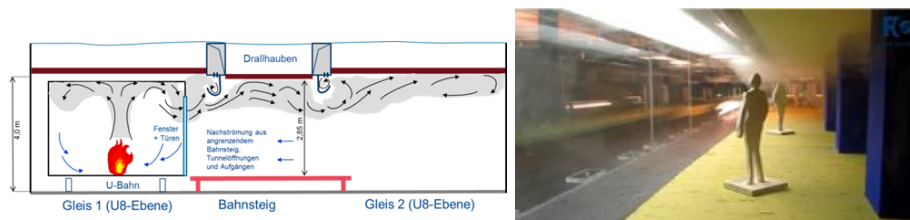
Der Einsatz von Luftschleiern kann eine Verringerung der erforderlichen Volumenströme bewirken, hat aber auch eine stärkere Verrauchung des Bahnsteiges zur Folge. Die Effizienz der Schleier hängt stark von den strömungsmechanischen Randbedingungen ab (Ausblaswinkel, Austrittsgeschwindigkeit, Induktionsverhal-

ten etc.). Die Luftschleier können helfen, eine deutliche Reduzierung des Rauchübertritts zu erreichen, die vollständige Rauchfreihaltung des Treppenaufgangs ist mit dieser Maßnahme nicht zielführend, da durch Rauchinduktion in den Luftschleierstrahl und Verwirbelungen die Rückströmung der vermischten Luft in das Treppenhaus erfolgt.

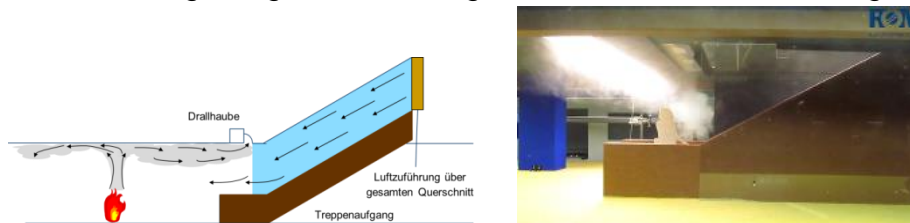
4 Übertragbarkeit auf andere Infrastrukturen (AP 2.6)

Die in den Versuchen entwickelten Konzepte zur Entrauchung sind ohne Überlagerung von Grundströmungen in den Tunneln bzw. im Stationsgebäude dargestellt worden:

- Begrenzung der Rauchausbreitung innerhalb der von einem Brand betroffenen Ebene



(1) Verhinderung der geschossübergreifenden Rauchausbreitung



In den vorgestellten Konzepten sind definiert gerichtete (Nach-)Strömungen wesentlicher Bestandteil der Funktionalität. In realen unterirdischen Verkehrsstationen bilden sich jedoch instationäre klimatisch (Wind, Temperaturunterschiede zur Umgebung etc.) und nutzungsbedingte (ein- und ausfahrende U-Bahnzüge) Grundströmungen in den Tunnelsystemen und in dem Stationsgebäude aus. Sie sind abhängig von den zuvor beschriebenen Randbedingungen und variieren aufgrund dessen sowohl in ihrer Intensität als auch in ihrer Strömungsrichtung. Eine negative Einflussnahme dieser Grundströmungen auf die Entrauchungsqualität kann nur verhindert werden, indem entweder ein flexibles Entrauchungssystem auf die z. B. messtechnisch ermittelten Randbedingungen (s. Projektbericht der RUB) reagiert oder durch zusätzliche technische Einrichtungen, wie z. B. Rauchschürzen, Schleusen oder Brandschutztore, die die überlagerten Grundströmungen auf ein Minimum reduzieren. Letzterer Ansatz scheint derzeit zielführend, da

durch diese Maßnahmen ebenfalls ein definierteres hydraulisches System (Tunnelnetz und Station) hergestellt wird.

Die Übertragbarkeit auf andere Infrastrukturen ist durch die variierenden Randbedingungen immer individuell zu betrachten. Bei der konkreten Implementierung der Entrauchungskonzepte müssen diese aber zwingend berücksichtigt werden.

Erfolgt keine hydraulische Entkopplung der U-Bahnstation vom Tunnelnetz, stellt sich eine Nachströmung des zu entrauchenden Bahnsteigs sowohl über das direkt anliegende Stationsbauwerk als auch über das Tunnelnetz, Druckentlastungsschächte und angrenzende Bahnhöfe ein (Bild 4.1).

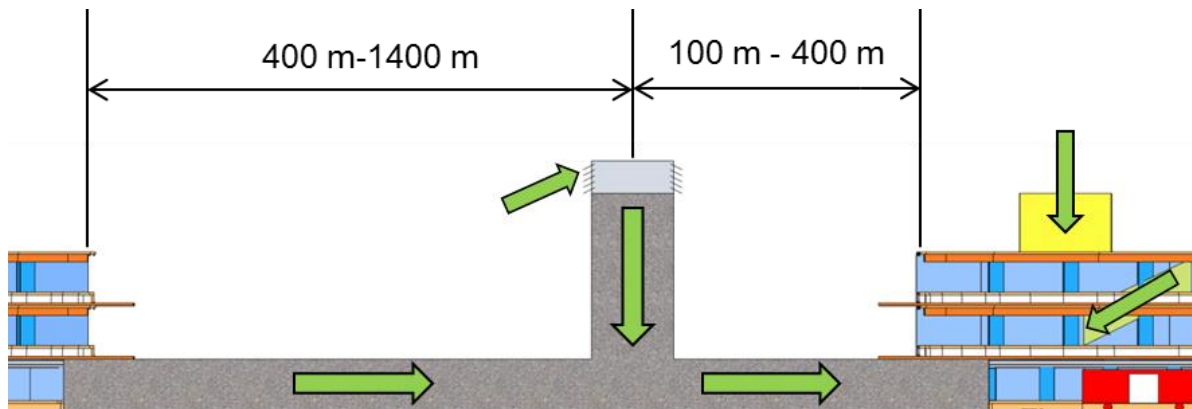


Bild 4.1: Komplexes hydraulisches System

Jede Untergrundstation stellt daher eine individuelle Konstellation von Randbedingungen dar und es ist in jedem Fall eine strömungstechnische Analyse des jeweiligen Tunnelnetzes notwendig:

- (2) individuelle Stationsbaukörper
- (3) unterschiedliche Tunnellängen
- (4) Anordnung und Geometrie der Schachtbauwerke
- (5) variierende Grundströmungen

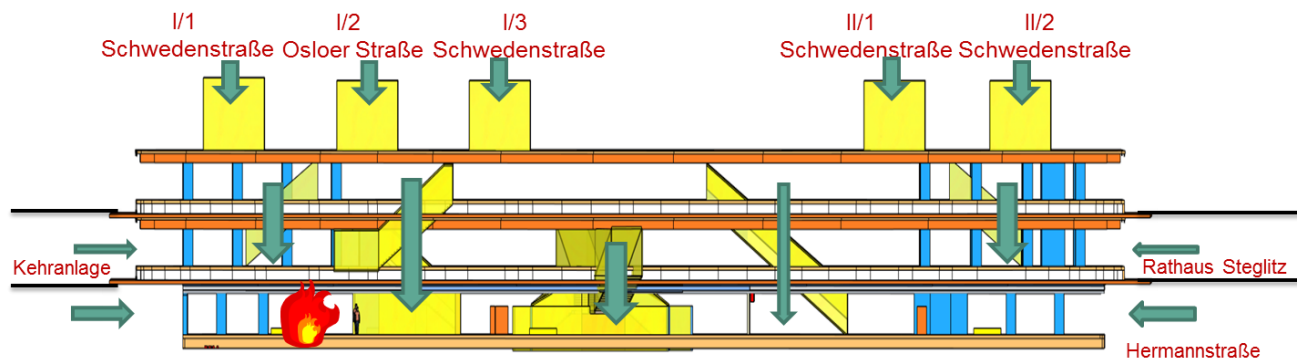


Bild 4.2: Kontrollierte Strömungsrichtung innerhalb des Stationsbauwerkes

Die grundsätzlichen Untersuchungen zur Aufteilung der Nachströmung bei unterschiedlichen Tunnellängen (siehe Kapitel 3.4.3) haben einen großen Einfluss auf die Entrauchungsqualität gezeigt.

Zur Erreichung einer definierten Rauchbegrenzung ist eine kontrollierte Strömungsrichtung innerhalb des Stationsbauwerkes notwendig. In Bild 4.2 ist dieses Prinzip anhand von Strömungsrichtungspfeilen schematisch verdeutlicht.

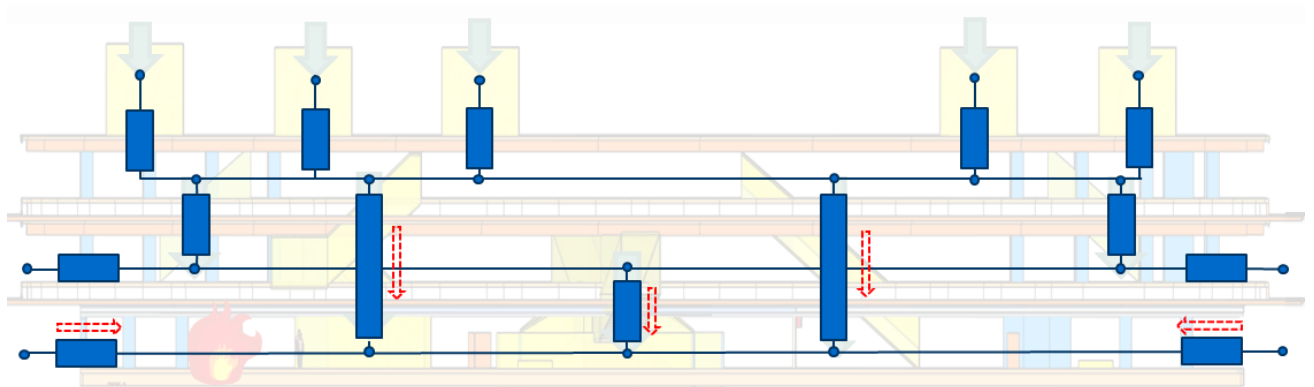
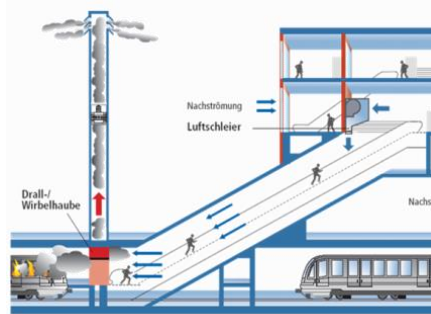


Bild 4.3: Schaltbild der Strömungswiderstände

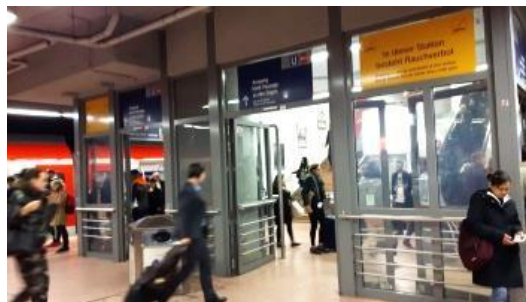
In Bild 4.3 sind in Analogie die komplexen hydraulischen Verhältnisse vereinfacht in einem vernetzten Schaltbild der Strömungswiderstände dargestellt. Mit zusätzlichen Maßnahmen kann die Größe dieser Widerstände so gestaltet werden, dass sich die notwendige kontrollierte Strömungsrichtung in Richtung des aktiven Rauchabschnittes möglichst unabhängig von äußeren Einflüsse herstellen lässt.

Möglichkeiten, um dieses zu erreichen, sind z. B.:

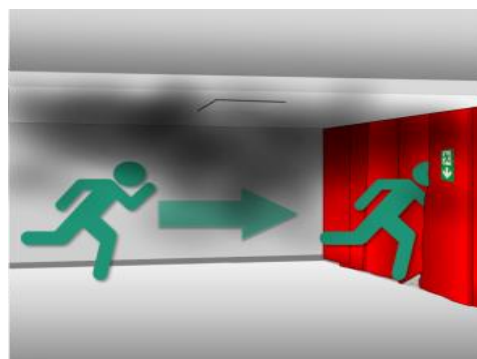
- (1) Abschirmung von Treppenaufgängen mit lufttechnischen Maßnahmen
(z. B. Absaugung mit Drallhauben, Sperrströmung):



- (2) lufttechnische Trennung mithilfe von baulichen Maßnahmen
(z. B. Einhausung mit Türen):



- (3) passierbare Rauchschürzen zur hydraulischen Trennung



Der Aufbau einer kontrollierten gerichteten Nachströmung gestaltet sich aber in der Praxis angesichts der komplexen hydraulischen Gesamtsituation als schwierig. Hier könnte versucht werden eine gerichtete Strömung durch bauliche Maßnahmen (2, 3) zu unterstützen und/oder die Luft über induzierende „Treibstrahlen“ in den Öffnungs- und Übergangsbereichen gerichtet zu transportieren.

Durch die zusätzlichen baulichen Maßnahmen (2, 3) kann das hydraulische Netz derart beeinflusst werden, dass die Nachströmung für die Entrauchungsanlage bzw. die Sperrströmungen aus den nicht vom Brand betroffenen Bereichen erfolgt. Hierzu müsste aber das hydraulische Netz (s. Bild 4.3) bekannt sein und abhängig vom Brandszenario und unter Berücksichtigung der erforderlichen Fluchtwegöffnungen im Evakuierungsfall variabel zu gestalten sein. Hierzu wäre eine sowohl aufwendige Dimensionierung als auch eine komplexe Brandsteuermatrix erforderlich.

Beim Einsatz zusätzlicher induzierender „Treibstrahlen“ müsste bei mehrgeschossigen Stationen die Wirkrichtung abhängig vom Brandszenario variierbar und an allen Treppenaufgängen und ggf. Tunnelöffnungen vorhanden sein. Hierbei ist auszuschließen, durch deren Betrieb eine Rauchverschleppung durch Induktionsvorgänge über nicht aktive Aufgänge und Öffnungen erfolgt.

5 Zusammenfassung

Ziel des beantragten Projektes war die Erforschung von Konzepten zur Verbesserung der Personensicherheit im Brandfall in unterirdischen Verkehrsanlagen. Dazu wurden verschiedene Entrauchungskonzepte in zwei Versuchsmodellen (Gesamtmodell und Ausschnittmodell) der U-Bahnstation Osloer Straße in Berlin Wedding entwickelt, untersucht und bewertet. Die Konzepte wurden anschließend hinsichtlich ihrer Effektivität bzgl. der Schutzzielerreichung und der technischen Umsetzbarkeit in der Praxis geprüft.

Am sinnvollsten ist die Rauchausbreitung schon möglichst in der Nähe der Brandquelle zu verhindern. Dazu wurde ein Konzept entwickelt, abschnittsweise innerhalb der Bahnsteigebene die Rauchausbreitung zu begrenzen. Dazu ist aus dem aktivierten Abschnitt ein Entrauchungsvolumenstrom von $2 \times 184.000 \text{ m}^3/\text{h}$ abzuführen. Das bedeutet, dass dieser Volumenstrom aber auch für alle anderen Entrauchungsabschnitte einzuplanen ist und entsprechende Kanalquerschnitte sowie Ventilatorenleistungen vorzusehen sind.

Die zweite Konzeptidee ist es, die Rauchausbreitung auf dem vom Brand betroffenen Bahnsteig zuzulassen und für diesen Fall den Rauchübertritt in benachbarte Ebenen zu unterbinden. Der Rauchübertrag in benachbarte Ebenen kann am wirksamsten mit der entsprechenden Kombination aus Sperrströmung, Rauchschürze und Linienabsaugung unterbunden werden. Dennoch sind sehr hohe Luftvolumenströme notwendig und die Sperrströmung muss technisch so umgesetzt werden, dass sie in Richtung des verrauchten Bereiches ausgerichtet ist. Für einen betroffenen Bahnsteig bedeutet dies aber auch, dass diese technische Lösung gleichzeitig an mehreren Aufgängen aktiviert werden muss und die entsprechende Luftleistung zur Verfügung stehen muss.

Allgemein gültige Konzepte und Volumenstromangaben können aus dem Ergebnis nicht abgeleitet werden, da für jedes Stationsbauwerk individuelle hydraulische Verhältnisse ermittelt und berücksichtigt werden müssen. Jedoch resultieren aus den durchgeführten Untersuchungen Entrauchungs- und Sperrströmungsvolumenströme für die jeweiligen Entrauchungskonzepte, die eine erste projektspezifi-

sche Machbarkeitsstudie und deren planerische Umsetzung unter Berücksichtigung der zuvor genannten Einflussgrößen erlauben.

6 Veröffentlichung der Ergebnisse

Das Projekt, seine Ziele und die Forschungsergebnisse wurden in einer Abschlussveranstaltung des Verbundprojektes am 18.01.2018 in Berlin der Öffentlichkeit präsentiert. Des Weiteren haben alle Verbundpartner diverse Veröffentlichung geschrieben und/oder Teilergebnisse auf Kongressen präsentiert sowie Interviews für Zeitungsartikel gegeben. Als Projektabschluss wird der Fachöffentlichkeit ein zentrales Dokument mit den wichtigsten Ergebnissen und Hinweisen zu den weitergehenden Veröffentlichungen zur Verfügung gestellt werden.

ROM Technik Deutschland nutzt die Projektinhalte seit Projektbeginn, um insbesondere Kunden aus Ländern, Städten und Kommunen in Präsentationen auf die Möglichkeiten und Voraussetzungen der Entrauchung von unterirdischen Verkehrsanlagen aufmerksam zu machen und für neue Projekte zu interessieren.

Veröffentlichungen des ORPHEUS-Konsortiums

Online-Artikel. L. Arnold und S. Arnold
Multi-Factorial Analysis of the Smoke Layer Height
SFPE Europe, Q4 2017 Issue 8, 2017
<https://www.sfpe.org/page/Issue8Feature4?>

Zeitschriftenbeitrag. L. Arnold
Experimente und Simulationen für eine sichere Evakuierung von U-Bahnstationen im Brandfall
Crisis Prevention, 4/2017, 2017
<https://cdn.flipsnack.com/widget/flipsnackwidget.html?hash=fdui4jpu6>

Zeitschriftenbeitrag. A. Busch
Sicherheit unterirdischer Verkehrsanlagen im Brandfall. Interview mit Sebastian Festag.
bauplaner, 2017/11, 2017

Dissertation. B. Schröder
Multivariate Methods for Life Safety Analysis in Case of Fire
Bergische Universität Wuppertal, 2017
<http://user.fz-juelich.de/record/838011>

Zeitschriftenbeitrag. L. Künzer und A.-L. Mews

Wer rein kommt, kommt auch raus?

Barrierefrei planen & bauen, 1 (2), 2017

https://www.bfb-barrierefrei-bauen.de/wp-content/barrierefrei-planen-bauen-2-2017/page_29.html**Konferenzbeitrag.** M. Dietrich, C. Knaust, M. Brüne, L. Arnold und S. Festag

Buoyancy driven flow in an underground metro station for different climate conditions – experimental and numerical investigation

16th International Conference on Automatic Fire Detection & Suppression, Detection and Signaling Research and Applications Conference, 2017

Konferenzbeitrag. M. Brüne, A. Gomell, W. Furian, B. Horbach und A. Pflitsch

OFDR-Temperature Sensing using existing Fiber-Optic Communication Cables – An application for automatic fire detection?

16th International Conference on Automatic Fire Detection & Suppression, Detection and Signaling Research and Applications Conference, 2017

Posterbeitrag. M. Fehling, J. Boltersdorf und L. Arnold

Towards smoke and fire simulation with grid adaptive FEM: Verification of the flow solver.

12th International Symposium on Fire Safety Science, 2017

Posterbeitrag. L. Arnold

The ORPHEUS project - Life safety in underground stations

12th International Symposium on Fire Safety Science, 2017

Konferenzbeitrag. A. Küsters, S. Wienke und L. Arnold

Performance Portability Analysis for Real-Time Simulations of Smoke Propagation using OpenACC

2nd International Workshop on Performance Portable Programming Models for Accelerators, 2017

Konferenzvortrag. L. Arnold

Multivariate Analysis with FDS

Ochrona Przeciwpożarowa – Zakopane, 2017

Konferenzbeitrag. C. Knaust, S. Festag, M. Brüne, M. Dietrich, S. Amecke, B. Konrath & L. Arnold

Modellierung eines Brandes in einer U-Bahn-Station: Validierung von Rechenmodellen auf der Grundlage von Feldversuchen

Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag, 2017

Zeitschriftenartikel. L. Künzer & G. Hofinger

Das Verhalten von Menschen in Rauch

Feuertrutz, 2016

Konferenzbeitrag. G. Hofinger, R. Zinke, L. Künzer, B. Schröder & E. Andresen
Human Factors in Pedestrian Simulation: Field Studies in Underground Stations
Conference of Pedestrian and Evacuation Dynamics, 2016

Konferenzbeitrag. E. Andresen, R. Zinke, G. Hofinger, M. Chraibi & A. Seyfried
The Impact of Perception and Wayfinding on Pedestrian Movements
Conference of Pedestrian and Evacuation Dynamics, 2016

Konferenzbeitrag. B. Schröder, L. Arnold, A. Meunders & S. Schmidt
Smoke and Heat Extraction in Underground Stations
Interflam, 2016

Konferenzbeitrag. M. Chraibi & L. Arnold
Modellierung des menschlichen Verhaltens in Personenstromsimulationen
GfS-Symposium, Der digitale Mensch: Nutzen und Gefahren personenbezogener
Kenngrößen, 2016

Konferenzbeitrag. K. Drzycimski & L. Arnold
Smoke and Fire Simulations with Adaptive FEM
27th International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics, 2015

Konferenzbeitrag. B. Schröder, D. Haensel, M. Chraibi, L. Arnold, A. Seyfried, E.
Andresen
Knowledge- and Perception-Based Route Choice Modelling in Case of Fire
Human Behaviour in Fire, 2015

Zeitschriftenartikel. L. Arnold
ORPHEUS – Fire Safety in the Underground
inside, 2015

*Beiträge Anderer über das ORPHEUS-Projekt***Online-Artikel.** F. Roeder

Sicherheit in der U-Bahn

helmholtz.de, **2017**https://www.helmholtz.de/luftfahrt_raumfahrt_und_verkehr/auf-dem-alex-redeten-wir-mit-soldaten/**Zeitungsbeitrag.** M. Völklein

In der U-Bahn ist die Hölle los

Süddeutsche Zeitung, Nr. 65, Samstag / Sonntag, 18. / 19. März 2017, **2017**<http://www.sueddeutsche.de/auto/sicherheit-in-der-u-bahn-ist-die-hoelle-los-1.3420240>**Online-Artikel.** R. Krauter

Mit Theaternebel zu mehr Sicherheit

deutschlandfunk.de, **2017**https://www.deutschlandfunk.de/technik-gegen-terror-mit-theaternebel-zu-mehr-sicherheit.676.de.html?dram:article_id=379841**Online-Artikel.** J. Schmidt

U-Bahnhöfe sicher verlassen

bundesregierung.de, **2016**<https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2016/11/2016-11-22-hts-orpheus.html>

7 Literatur

- [1] INGASON, HAUKUR; KUMM, M.; NILSSON, D.; ET AL.
The Metro Project. Final Report, Hg. v. Mälardalen University Press. Mälardalen University, 2012
- [2] <https://www.sifo.de/de/orgamir-organisationsuebergreifende-gefahrenabwehr-zum-schutz-von-menschen-und-kritischen-1827.html>, Stand 14.06.2018
- [3] <https://www.sifo.de/de/orgamir-plus-organisationsuebergreifende-gefahrenabwehr-zum-schutz-von-menschen-und-1828.html>, Stand 14.06.2018
- [4] FÜCHSEL, KATJA; KURPJUWEIT, KLAUS
U-Bahn-Brand: Unglaubliches Glück: In einer "Luftblase" überlebt. In: Der Tagesspiegel, 09.07.2000. Online verfügbar unter <http://www.tagesspiegel.de/berlin/u-bahn-brand-unglaubliches-glueck-in-einer-luftblase-ueberlebt/152668.html>, zuletzt geprüft am 14.06.2018
- [5] LEMHÖFER, ANNE; LEPPERT, GEORG; SCHLEPPER, BORIS
Rauch in U-Bahn legt Pendlerverkehr lahm. In: Frankfurter Rundschau, 12.08.2010. Online verfügbar unter <http://www.fr-online.de/frankfurt/brand-in-frankfurt-rauch-in-u-bahn-legt-pendlerverkehr-lahm,1472798,4552914.html>, zuletzt geprüft am 14.06.2018
- [6] KURPJUWEIT, KLAUS
Brand offenbart Schwachstellen bei der U-Bahn-Sicherheit. In: Der Tagesspiegel, 17.10.2011. Online verfügbar unter <http://www.tagesspiegel.de/berlin/verkehr/linie-u-7-brand-offenbart-schwachstellen-bei-der-u-bahn-sicherheit-/5126338.html>, zuletzt geprüft am 14.06.2018
- [7] ALFRED HAACK
Real fires and design fires, Fire in Tunnels, Technical University of Barcelona, Catalunya, 2011
- [8] <http://www.rom-technik.de/forschung-entwicklung/ueberblick/> , zuletzt geprüft am 14.06.2018
- [9] <http://www.rom-technik.de/referenzen/entwicklung-eines-entrauchungskonzeptes/> , zuletzt geprüft am 14.06.2018
- [10] <https://www.ihks-fachjournal.de/tornado-rettet-menschenleben/> , zuletzt geprüft am 14.06.2018
- [11] T. WINKLER
Beitrag zum Schichtungsverhalten von Brandrauch
Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 4, Nr. 217
Düsseldorf 2011
- [12] H. BACH
Ähnlichkeitskriterien bei Raumströmungen
KI Nr. 9/1973, Teil 6, S. 69 ff.
- [13] M. ROLLOOS
Möglichkeiten der Vorausbestimmung von Strömungs- und Temperaturfeldern in großen Räumen
HLH, Nr. 8/1978, S. 302 ff.

- [14] K.H. PRESSER
Experimentelle Untersuchung der isothermen und anisothermen Raumströmung an geometrisch ähnlichen verkleinerten Raummodellen
gi, Nr. 6/1989, S. 286 ff.
- [15] M. DIETRICH, F. BERCHTHOLD, S. AMECKE-MÖNNINGHOFF
Bericht Brandszenarien und Bemessungsbrände, AP-Nr. 1.1
im Forschungsvorhaben ORPHEUS, 2016
Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin
- [16] S. GERBER, M. DIETRICH, F. BERCHTHOLD
Bericht Schutzziele und Grenzwerte, AP-Nr. 2.1
im Forschungsvorhaben ORPHEUS, 2016
Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin
- [17] Typenbuch U-Bahn / Fahrzeuge für den Fahrgastverkehr,
interne Unterlage der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG), BU-KBT,
Ausgabe 2007
- [18] HESKESTAD, G.
Fire Plumes, Flame Height and Air Entrainment,
Kap. 2-1 in SFPE, Handbook of Fire Protection Engineering, 3. Auflage 2002
- [19] W. WAGNER
Strömung und Druckverlust,
Vogel Buchverlag, Würzburg, 7. Auflage, 2012
- [20] I.E. IDELCHIK
Handbook of hydraulic resistance,
Begell house, 3. Auflage, 1994
- [21] K. WIEGHARDT
Belüftungsprobleme in U-Bahn- und Autotunnels,
Institut für Schiffbau TUHH, 1962

- [22] R. DETZER
Mechanische Entrauchung von Sondergebäuden im Brandfall
HLH, Nr. 10/2000, S. 28 ff.
- [23] Technischer Bericht vfdb TB 04/01
Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes
Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes,
Mai 2006
- [24] VDI 6019 Blatt 1
Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden
Beuth Verlag, Mai 2006, S. 8 ff.
- [25] DIN 18232 Teil 2
Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen
(NRA); Bemessung, Anforderungen und Einbau
November 2007
- [26] DIN 18232 Teil 5
Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 5: Maschinelle Rauchabzugsanlagen
(MRA), Anforderungen, Bemessung
April 2003
- [27] VDI 2262 Blatt 2

Luftbeschaffenheit am Arbeitsplatz – Minderung der Exposition durch luftfremde Stoffe; Lufttechnische Maßnahmen

Beuth Verlag, Juni 2011

[28]VDI 2262 Blatt 3

Luftbeschaffenheit am Arbeitsplatz – Minderung der Exposition durch luftfremde Stoffe; Verfahrenstechnische und organisatorische Maßnahmen

Beuth Verlag, November 2012

[29]VDI 2262 Blatt 4

Luftbeschaffenheit am Arbeitsplatz – Minderung der Exposition durch luftfremde Stoffe; Erfassen luftfremder Stoffe

Beuth Verlag, März 2006

[30]RECKNAGEL, SPRENGER, SCHRAMEK

Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2011/2012

75. Auflage, Oldenbourg Industrieverlag München, 2011

Videoverzeichnis

Entrauchungskonzepte für die Rauchbegrenzung innerhalb eines Bahnsteigs

01_UB1_oE_stat_01.mp4	ohne Entrauchung, „Nullvariante“, Kapitel 3.4.4.1
02_UB1_pE_stat_200_z15.mp4	mit punktueller Entrauchung, Kapitel 3.4.4.2
03_UB2_Drall_stat_100.2_z15.mp4	Drallentrauchung, Kapitel 3.4.4.3, S. 47
04_UB2_Drall_Rs.1_stat_200.2.mp4	Drallentrauchung mit Rauchschürze, Kapitel 3.4.4.3, S. 47
05_UB2_Drall_Schl.22.2_Rs.40.mp4	Drallentrauchung mit Rauchschürze und Luftschleier, Kapitel 3.4.4.3, S. 48
06_UB2_Drall.2_stat_200.1_z15.mp4	abschnittsweise Drallentrauchung beidseitig, Kapitel 3.4.4.3, S. 50

Entrauchungskonzepte für die Rauchbegrenzung in der Verteilerebene

Geschäftsbrand

07_VE.S.1_oE_stat_01.mp4	ohne Entrauchungsmaßnahmen, „Nullvariante“, Kapitel 3.4.5.1, S. 54
08_VE.S.2_pE.2_stat_75.1.mp4	punktueller Entrauchung der Verkaufsfläche, Kapitel 3.4.5.1, S. 55

Gepäckstückbrand

09_VE.KW.1_oE_stat_01.mp4	ohne Entrauchungsmaßnahmen, „Nullvariante“, Kapitel 3.4.5.2, S. 58
10_VE.KW.1_pE.1+2_stat_300.2.mp4	nur punktueller Entrauchung, Kapitel 3.4.5.2, S. 59
11_VE.KW.1_pE.1+2_Rs.70_stat_200.2.mp4	punktueller Entrauchung und RS 70cm, Kapitel 3.4.5.2, S. 59
12_VE.KW.1_pE.1+2_Rs.b.27_stat_50.2.mp4	punktueller Entrauchung und RS bodenlang, Kapitel 3.4.5.2, S. 60

Maßnahmen zur Verhinderung einer geschossübergreifenden Rauchausbreitung

13_Mod1-5_Var1.mp4	ohne Entrauchung, „Nullvariante“, Kapitel 3.5.4, S. 69
14_Mod1-5_Var6.mp4	Linienabsaugung, Kapitel 3.5.5, S. 69
15_Mod1-5_Var9.mp4	Sperrströmung, Kapitel 3.5.6, S. 70
16_Mod1-5_Var15.mp4	Sperrströmung und Rauchschürze, Kapitel 3.5.7, S. 71
17_Mod1-5_Var8.mp4	Linienabsaugung und Sperrströmung, Kapitel 3.5.8, S. 72
18_Mod1-5_Var37.mp4	Linienabsaugung und Luftschleier, Kapitel 3.5.9, S. 73

Abbildungsanhang



Bild A.1: Umgebungsplan Station Osloer Straße (Quelle: BVG)

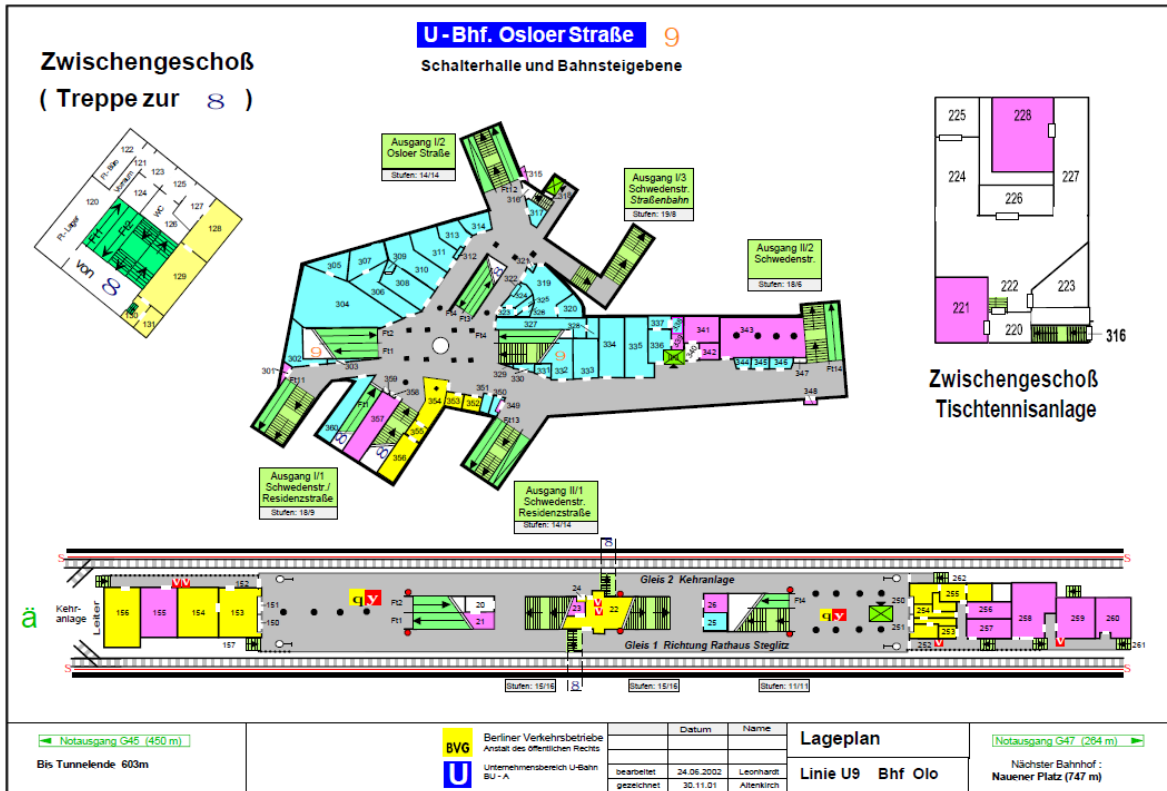


Bild A.2: Umgebungsplan Station Osloer Straße (Quelle: BVG)

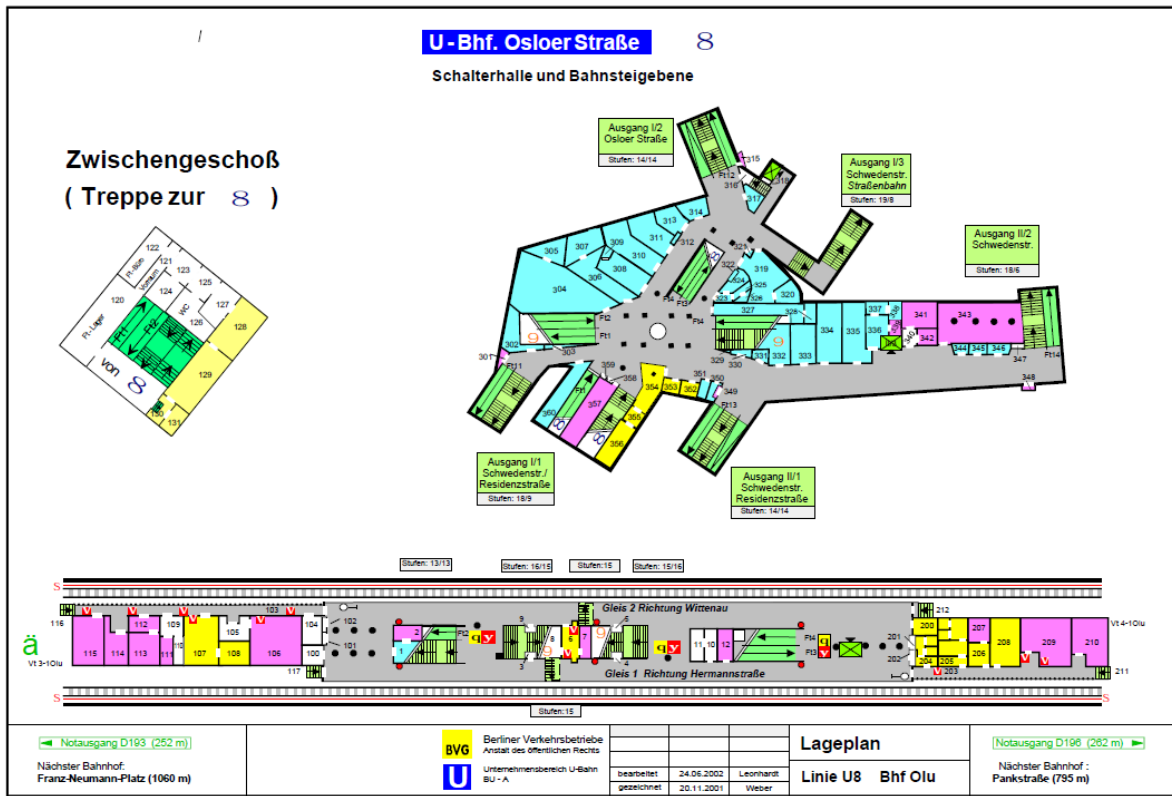


Bild A.3: Umgebungsplan Station Osloer Straße (Quelle: BVG)

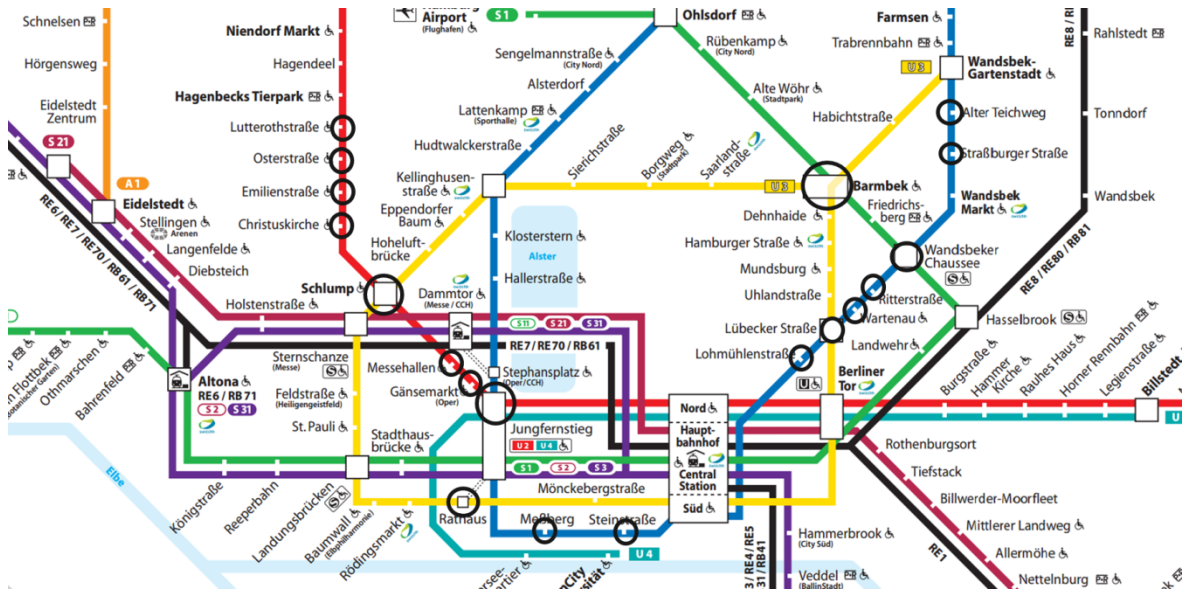


Bild A.4: Untersuchte Stationen im Hamburger Verkehrsnetz