

Praktische Möglichkeiten der Taktischen Ventilation mit tragbaren Lüftern bei Zugbränden in Bahntunneln

Bachelorarbeit im Studiengang Rettungsingenieurwesen

CHRISTINE KAISER

Matrikelnummer: 2099426

Fakultät Life Sciences

Department Medizintechnik

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

1. Gutachter: Prof. Dr. Frank Hörmann (HAW Hamburg)
2. Gutachter: Christian Brauner MSc (International Fire Academy)

Hamburg, den 25.09.2015

Abstract

In praktischen Versuchen, in stehenden Bahnwaggons, in einem Bahntunnel wurde gezeigt, dass das Prinzip der Taktischen Ventilation von Gebäuden grundsätzlich in die Situation eines Zugbrandes in einem Bahntunnel übertragen werden kann. Ob dies im konkreten Einsatz sinnvoll ist, hängt von zahlreichen Faktoren ab. Insbesondere müssen die Strömungsrichtungen der Luft im Bahntunnel und im Bahnwaggon aufeinander abgestimmt sein.

Vorwort

Tunnel gelten als die größten Bauwerke des Menschen. Vergleicht man ihre Eindringtiefen, d.h. die Weglängen vom Eingang bis zum Einsatzort mit denen von Wohngebäuden, so können diese bei UVAs bis zu mehreren hundert Metern betragen. Der Begriff UVA bedeutet Unterirdische Verkehrsanlagen und dient als Sammelbegriff für unterirdische Bauformen. Darunter versteht man nicht nur Straßen- oder Bahntunnel, sondern auch unterirdische Bahnhöfe, Shopping-Zentren, Einstellhallen und Tiefgaragen.

UVAs finden immer weitere Verbreitung, denn sie ermöglichen eine schnelle und effiziente Fortbewegung und bieten zusätzlich Platz an der Oberfläche. In der Schweiz wurde der längste Eisenbahntunnel der Welt in Betrieb genommen. Der Gotthard-Basistunnel wird mit 57 km Länge den gesamten Bahnverkehr zwischen Luzern und Mailand vereinfachen¹.

Einsätze in UVAs kann man nicht mit Brandeinsätzen in normalen Gebäuden gleichsetzen. Durch die hohen Eindringtiefen werden alle Einsatzabläufe gedehnt. Das heißt auch, dass die Feuerwehrkräfte sehr hohen körperlichen Belastungen ausgesetzt werden.

Hierfür hat die International Fire Academy in der Schweiz, die europaweit führende Feuerweherschule für Ausbildung und Training in unterirdischen Verkehrsanlagen, in den letzten Jahren eine einheitliche Taktik für Einsätze in Straßentunneln entwickelt.

Die Auslöser für die Gründung der International Fire Academy waren die folgenschweren Brände im Mont Blanc, sowie kurz danach im Tauern-Tunnel 1999 bei denen 39 Personen im Mont Blanc und 12 im Tauern-Tunnel ums Leben kamen. Das Projekt der International Fire Academy startete 2001 zufällig zeitgleich zum Brand im Gotthardtunnel. Dieser verdeutlichte noch einmal die Notwendigkeit der Gründung eines Didaktik-Teams und die Entwicklung einer speziellen Tunnelleinsatzlehre durch dieses.

¹ Alp Transit Gotthard AG (2011), S. 4

Brandeinsätze in Bahntunneln sind nicht mit denen in Straßentunneln zu vergleichen und erfordern eine spezielle Tunnel-Einsatztaktik. In einem ICE der Deutschen Bahn können bis zu 1.500 Personen befördert werden², die in einem Gefahrenfall zu evakuieren sind. Bahnwaggons und vor allem Lokomotiven bilden ganz andere Brandlasten, das heißt ganz andere Mengen an brennbaren Materialien wie im Vergleich zu LKWs in Straßentunneln. Aufgrund dieser Faktoren entwickelt das Didaktik- und Entwicklungsteam der International Fire Academy eine einheitliche Taktik bei Einsätzen in Bahntunneln.

Durch die oft hohe Personenkonzentration in Tunneln, dem schwierigen Ausstieg aus den Bahnwaggons und die schlechten Fortbewegungsmöglichkeiten aufgrund von Schotter oder nur schmalen Banketts entlang der Tunnelwände, gestaltet sich eine schnelle Evakuierung oft als sehr schwierig. Diese kann auch erst dann erfolgen, wenn die Strecke gesperrt ist. Zudem kann es erforderlich sein die Stromversorgung zu erden. Da diese Vorgänge Zeit in Anspruch nehmen und sich Rauch im Tunnel schneller ausbreiten kann als Menschen laufen können³ wurde die Taktik entwickelt, Personen im Zug zu belassen. Hierzu müsste allerdings gewährleistet sein, dass der entstehende Rauch beeinflusst werden kann und die Personen in den Bahnwaggons nicht zusätzlichen Gefahren ausgesetzt werden.

Die International Fire Academy entwickelt seit Mitte 2014 eine umfassende Bahntunnel-Einsatzlehre. Dabei wurde das Aufenthaltsprinzip als eine taktische Option diskutiert. Um diesen Ansatz zu vertiefen, erschien es der International Fire Academy wichtig zunächst zu klären, ob die Taktische Ventilation bei Zugbränden in Bahntunneln ähnlich genutzt werden kann wie in Gebäuden. Daraus ergab sich die in der vorliegenden Arbeit untersuchte Fragestellung.

² Meyer (2011)

³ Brauner (2014), S. 62

Danksagungen

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei den Personen bedanken, ohne deren Hilfe diese Arbeit nicht entstanden wäre.

Dies ist zum einen mein Betreuer der HAW Hamburg Prof. Dr. Frank Hörmann, der meine Rückfragen immer schnellstmöglich beantwortete.

Des Weiteren mein Betreuer der International Fire Academy Christian Brauner, der mir die Möglichkeit gab, dieses Thema bearbeiten zu dürfen und der mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand.

Mein besonderer Dank gilt der International Fire Academy für die Unterstützung während der Bachelorarbeit und für die Möglichkeit der Bearbeitung dieses Themas. Hierbei möchte ich besonders Markus Vogt und Marianne Wernli für die tatkräftige Unterstützung während der Versuche danken.

Ein weiterer Dank gilt der BLS AG für das Bereitstellen des Tunnels sowie der dafür benötigten Materialien. Hierbei möchte ich mich besonders bei Peter Luginbühl bedanken, der immer für Rückfragen zur Verfügung stand und ohne dessen Unterstützung die Versuche nicht möglich gewesen wären.

Dank gilt natürlich auch allen Freunden, Verwandten und Bekannten die sich bereit erklärt hatten, diese Arbeit Korrektur zu lesen.

Mein persönlicher Dank geht an meine Eltern und vor allem Maximilian Hackl, die während meiner Studienzeit immer für mich da waren.

Hamburg, den 25.09.2015

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	7
2. Theorie der Taktischen Ventilation	10
3. Versuche im Hondrichtunnel	14
3.1. Versuch 1	20
3.2. Versuch 2.....	22
3.3. Versuch 3.....	24
3.4. Versuch 4.....	26
3.5. Versuch 5.....	28
3.6. Versuch 6.....	30
4. Versuchsergebnisse	33
5. Diskussion.....	37
6. Reflexion	41
7. Ausblick	43
8. Zusammenfassung	44
9. Verzeichnisse	46
9.1. Quellenverzeichnis	46
9.2. Darstellungsverzeichnis.....	49
10. Anhang.....	53

Abkürzungsverzeichnis

BLS	Bern-Lötschberg-Simplonbahn
ICE	Inter City Express
RABT	Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
UVA	Unterirdische Verkehrsanlagen

1. Einleitung

Von den jährlich ca. 650 Brandtoten in Deutschland sind ca. 80% Rauchtote⁴. Dies liegt an den unterschiedlichen Wirkungsweisen von Rauch. Er narkotisiert, reizt, er wirkt sowohl thermisch als auch psychologisch und behindert die Sicht⁵. Rauch besteht aus einem hochkomplexen System von Brandgasen, Aerosolen und festen Partikeln, dessen Zusammensetzung von sehr vielen Parametern, vor allem aber dem verbrennenden Stoff und dem Brandverlauf abhängt⁶. Die gefährlichsten Bestandteile von Brandgasen für den Menschen sind Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Chlorwasserstoff und Blausäure⁷.

Das Einatmen des Brandrauches kann nicht nur zu einem Inhalationstrauma, also zum Verbrennen der oberen und unteren Atemwege durch das Einatmen von heißem Brandrauch, sondern auch zu komplexen Vorgängen im Körper führen. Durch das Einatmen von Chlorwasserstoff werden die Schleimhäute gereizt oder sogar verätzt. Kohlenstoffmonoxid verdrängt den vorhandenen Sauerstoff, da es schwerer als Luft ist. Dadurch wird es unmöglich, ausreichend Sauerstoff einzuatmen. Dies führt dazu, dass sich Kohlenstoffdioxid durch seine höhere Affinität leichter an die roten Blutkörperchen im Blut binden kann und die Bindungsstellen für Sauerstoff blockiert. Eine dadurch ausgelöste Rechtsverschiebung der Sauerstoffbindungskurve und die damit verbundene niedrige Sauerstoffsättigung, sowie ein niedriger Sauerstoffpartialdruck verhindern den Sauerstofftransport im Körper⁸. Blausäure verhindert zusätzlich durch Blockieren der Zellatmung den Gasaustausch zwischen Blut und Zellen. Dies lässt den Körper innerlich ersticken. Je mehr Rauch eingeatmet wurde, desto gravierender sind die gesundheitlichen Folgen.

⁴ Lessig (2002), S. 103

⁵ Gressmann (2005), S. 11

⁶ Gressmann (2005), S. 8

⁷ Basmer (2004), S. 8

⁸ Fehlberg (2014), S. 41

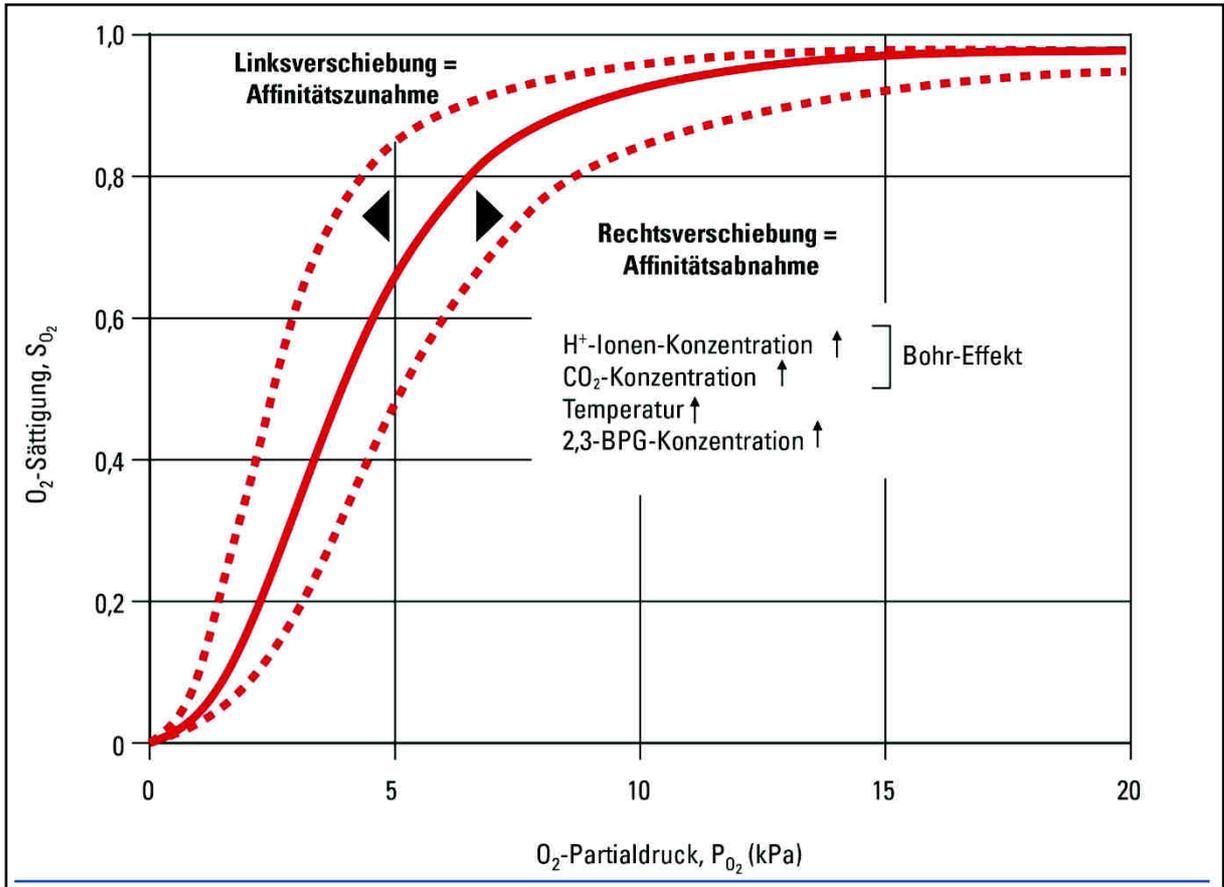


Abbildung 1: Rechts- und Linksverschiebung der Sauerstoffbindungskurve. (Grafik: Fehlberg (2014), S.42).

Um bei Zugbränden auf Strecken im Freien die Fahrgäste nicht dem Rauch auszusetzen, werden diese nach Sperrung der Strecke aus dem Gefahrenbereich ins Freie evakuiert. Bei Zugbränden im Tunnel ist dies nur eingeschränkt möglich, da es außerhalb des Zuges teilweise zu stärkeren Verrauchungen kommen kann. Somit würden die Fahrgäste von einem Gefahrenbereich in den nächsten evakuiert werden. Da sich Rauch schneller ausbreiten kann, als Personen laufen können, kam die Idee auf, dass es bei Bränden im Tunnel in gewissen Situationen sinnvoller wäre, die Fahrgäste im sicheren Bahnwagen zu belassen. An der International Fire Academy wird dies als Aufenthaltsprinzip⁹ bezeichnet.

⁹ Brauner (2014), S.108

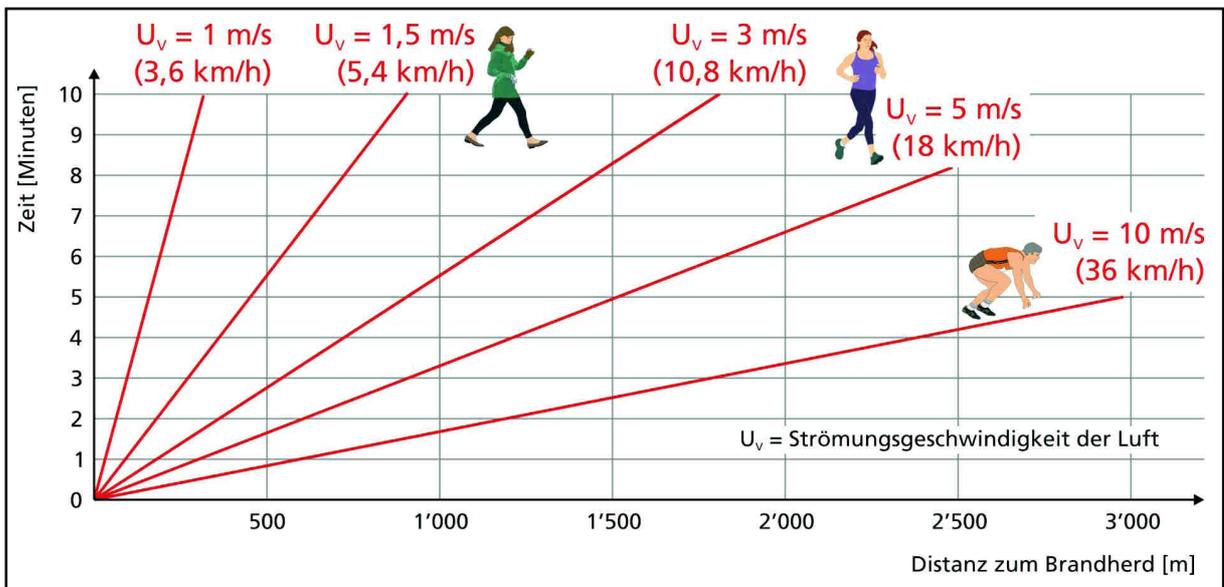


Abbildung 2: Rauchausbreitungsgeschwindigkeit im Vergleich zur Fortbewegungsgeschwindigkeit von Personen. (Grafik: Waigand-Brauner (2014), S. 63).

Das Aufenthaltsprinzip ist ein aktueller Diskussionspunkt bei der Entwicklung der einheitlichen Taktik beim Vorgehen von Zugbränden in Bahntunneln. So ist zu hinterfragen, ob es sinnvoll ist, Personen in bestimmten Situationen im Zug zu belassen. Des Weiteren stellt sich die Frage, in welchem Maß der Rauch und dessen Ausbreitung im Zug beeinflusst werden können. Dabei sollte auf die Einsatzbedingungen und das üblicherweise zur Verfügung stehende Material von Feuerwehren geachtet werden. Ein Beispiel hierfür sind tragbare Akkulüfter, die problemlos im Inneren des Zuges platziert werden können.

Lüfter gehören standardmäßig zur Beladung auf dem Löschgruppenfahrzeug oder auf der Drehleiter. Bei vielen Feuerwehren ist zu einem motorbetriebenen Lüfter auf dem Löschgruppenfahrzeug zusätzlich ein Elektro- oder Akkulüfter auf der Drehleiter verlastet.

Aufgrund der Diskussion an der International Fire Academy kommt folgende Fragestellung für diese Arbeit zustande: Ist es möglich mit tragbaren Akkulüftern den Rauch im Innenraum von Bahnwaggons zu beeinflussen?

2. Theorie der Taktischen Ventilation

In den letzten 50 Jahren haben sich die Brandverläufe und die Rauchproduktion stark verändert. Durch die moderne Lebensweise und den vermehrten Einsatz von Kunststoffen kommt es heutzutage bei Bränden acht mal schneller zu einer Rauchgasdurchzündung als früher¹⁰. Denn anders als Holz, setzen Kunststoffe das 12,5 fache an Rauch pro verbrannter Masse frei¹¹. Rauch wird somit vermehrt zur Hauptgefahr für alle Einsatzbeteiligten und eine frühzeitige taktische Ventilation immer wichtiger.

„Taktische Ventilation ist der Überbegriff für sämtliche taktischen Be- und Entlüftungsmöglichkeiten der Feuerwehr“ (Emrich 2012: 29). Im Brandeinsatz ist das Ziel der Taktischen Ventilation, Wärme und Rauch aus einem brennenden Raum abzuführen.¹² Dieses soll die konvektive Wärmeverfrachtung, das heißt eine Wärmeübertragung durch Wärmeströmung verhindern¹³. Das bedeutet gleichzeitig, dass durch den richtigen Einsatz ein Vollbrand verhindert bzw. zumindest verzögert werden kann. Ein weiterer positiver Effekt ist, dass bei einem Innenangriff durch bessere Sichtverhältnisse schneller und einfacher gelöscht, sowie die Brandausbreitung kontrolliert und vorgebeugt werden kann. Das bedeutet auch, dass Brandschäden durch ein Verhindern der Brandausbreitung verringert werden können¹⁴.

¹⁰ Kerber (2012 a), S. 5

¹¹ Kerber (2012 b), S. 5

¹² Müller (2012), S. 2

¹³ Brauner (2014), S.68

¹⁴ Emrich (2012), S. 33

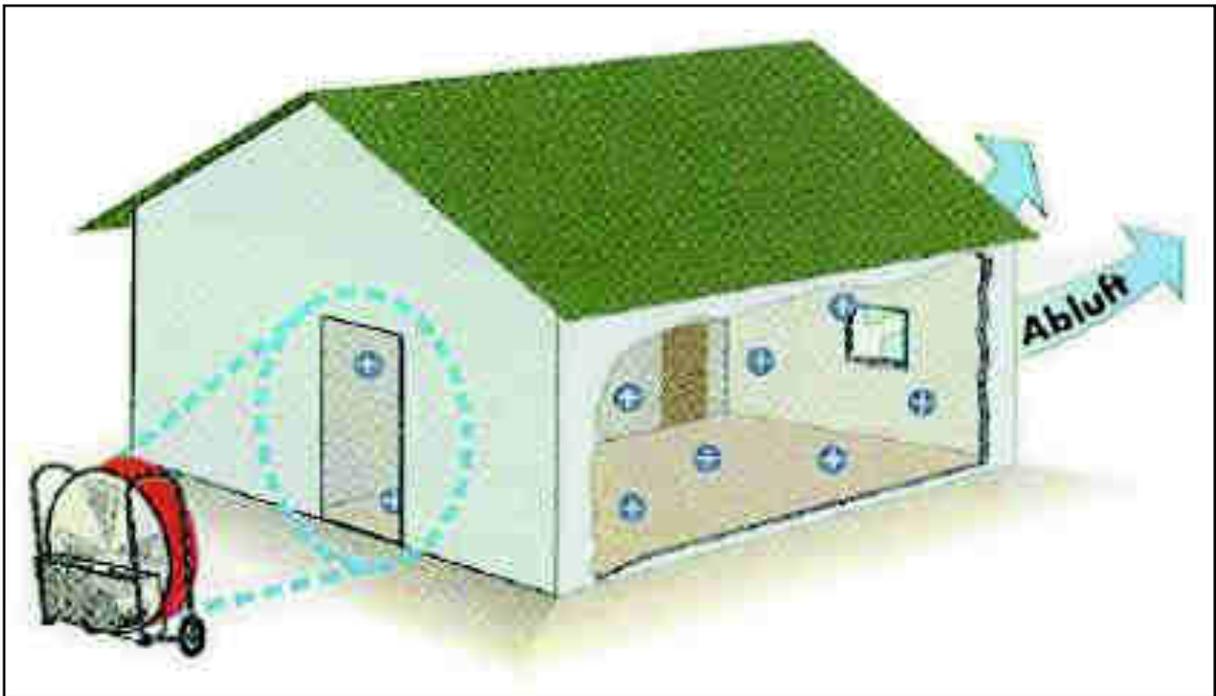


Abbildung 3: Anwendung der Taktischen Ventilation. (Grafik: <http://ff-mistlberg.at/atemschutz/>).

Wichtige Begriffe, um die Taktische Ventilation diskutieren und anwenden zu können sind die Zuluftöffnung und Abluftöffnung, der Ventilationskanal, die natürliche Ventilation, sowie die mechanische Ventilation.

Die Zuluftöffnung ist die Öffnung, zu der Frischluft einströmen bzw. Zuluft vom Lüfter angesaugt werden kann.

Die Abluftöffnung ist die Öffnung, zu der der Rauch zunächst hin und dann ausströmen kann.

Unter Ventilationskanal versteht man den Bereich, den der Luftstrom von der Zuluftöffnung zur Abluftöffnung durchströmen muss.

Natürliche Ventilation ist die natürliche Belüftung aufgrund der natürlichen Druckverhältnisse.

Mechanische Ventilation bezeichnet die Belüftung unter Einsatz von Ventilatoren¹⁵.

¹⁵ Emrich (2012), S. 29

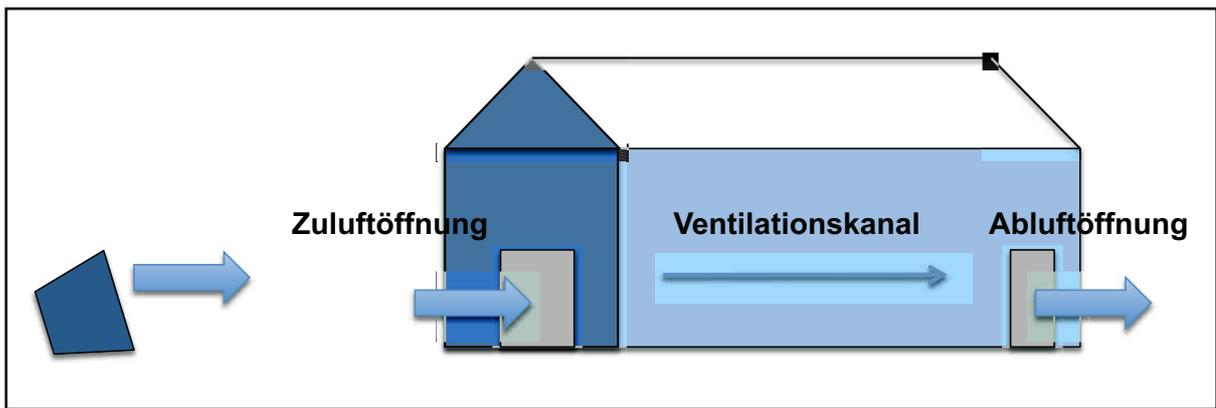


Abbildung 4: Erklärung der Begriffe zur Taktischen Ventilation. (Grafik: eigene Darstellung).

Das physikalische Grundprinzip der Taktischen Ventilation in Gebäuden ist, durch das aktive Ändern der Druckbedingungen, gezielt Rauch, Wärme und Brandgase abzuleiten. Ein Luftstrom bewegt sich immer von einem höheren zu einem niedrigeren Druck. Luftvolumen und Geschwindigkeit der Luftströmung werden durch die Differenz zwischen höherem und niedrigerem Druck bestimmt. Die Höhe der Druckdifferenz wird wiederum durch mehrere Faktoren, wie die Größe der Öffnungen zwischen den Räumen, die Größe des Brandes, die Windbedingungen und ein vorhandenes Lüftungssystem beeinflusst.

Infolge der Luftherhitzung und –ausdehnung bei einem Brand baut sich in geschlossenen Räumen ein Druck auf¹⁶. Heiße Gase steigen aufgrund ihrer im Vergleich zur Umgebungsluft niedrigeren Dichte nach oben. Dieser Effekt wird auch thermischer Auftrieb genannt. Er ist zusammen mit der Wärmeausdehnung Ursache dafür, dass Brandgase nach oben steigen und durch oben gelegene Öffnungen nach außen abströmen¹⁷. Mit der taktischen Ventilation wird ein Überdruck erzeugt, der den Rauch im Brandraum nach außen drücken soll¹⁸.

Je höher die Rauchgastemperaturen im Brandraum sind und je stärker die Wirkung der Entrauchung ausfällt umso größer muss die Abluftöffnung sein, um einen ausreichenden Effekt zu gewährleisten¹⁹.

¹⁶ Emrich (2012), S. 34-36

¹⁷ Emrich (2012), S. 37

¹⁸ Müller (2012), S. 2

¹⁹ Emrich (2012), S. 37

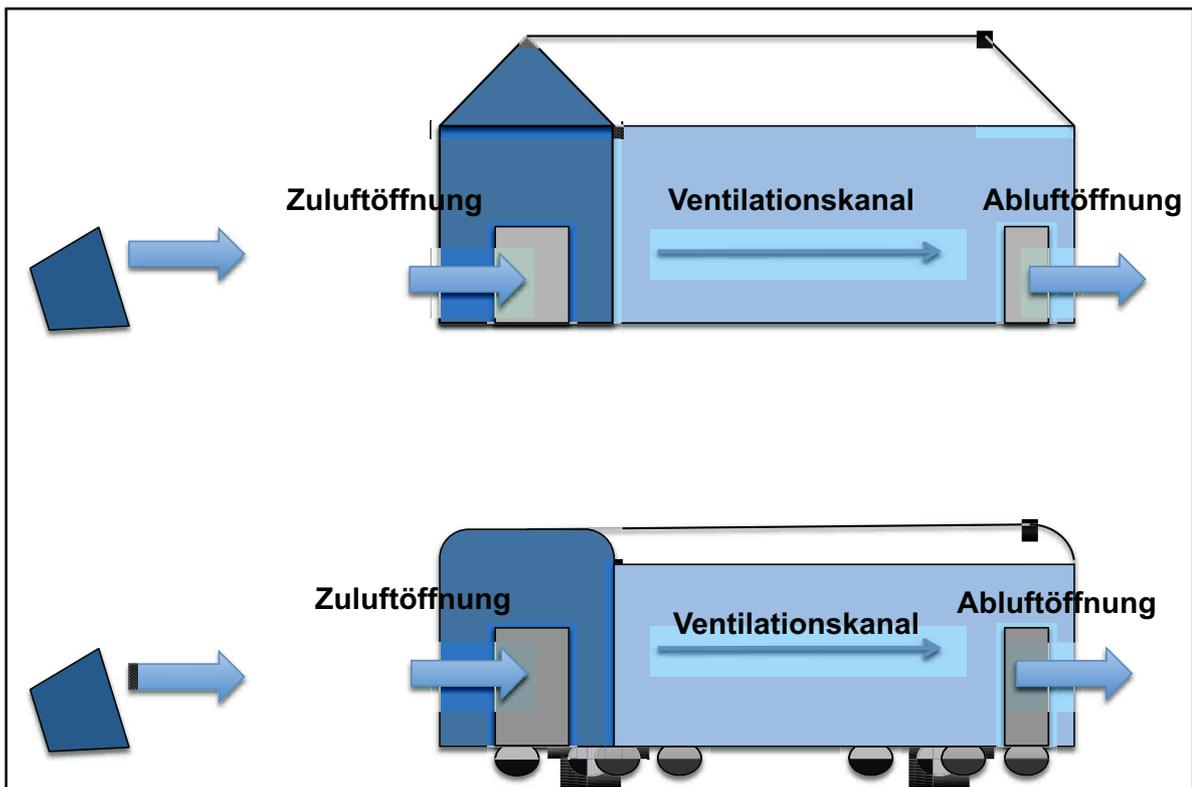


Abbildung 5: Vergleich Wohngebäude und Bahnwaggon. (Grafik: eigene Darstellung).

Der Aufbau von Bahnwaggons ist dem von Gebäuden sehr ähnlich. In Bahnwaggons müsste eine Ventilation theoretisch möglich sein, da alle Bedingungen, um eine Ventilation zu erzeugen, gegeben sind. Der Bahnwaggon ist ein geschlossener Raum, in dem problemlos ein Überdruck geschaffen werden kann. Durch die Türen an der einen Seite kann eine Zuluftöffnung und durch die Türen auf der anderen Seite eine Abluftöffnung geschaffen werden. Warmer Brandrauch wird mittels Ventilation nach draußen gedrückt, steigt zur Tunneldecke auf und wird durch die natürliche Belüftung des Tunnels abtransportiert.

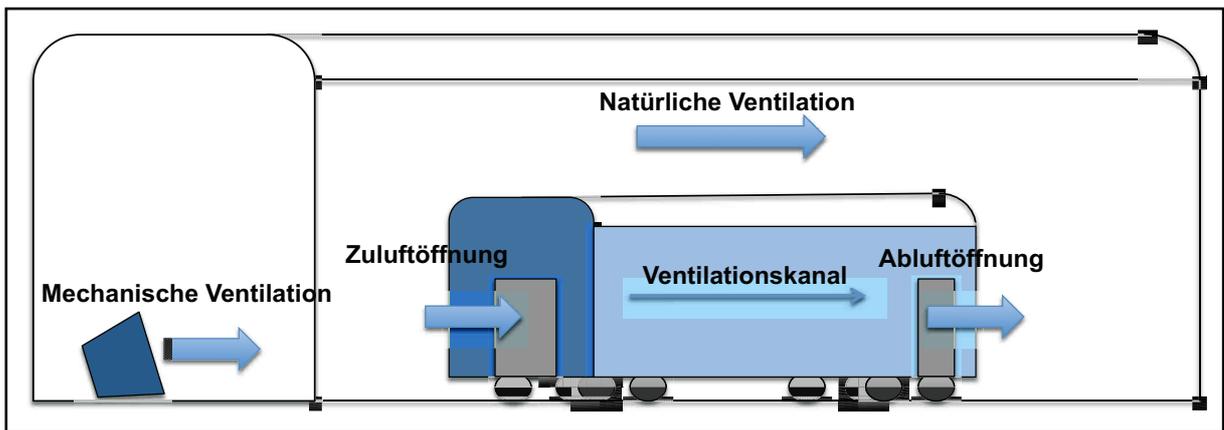


Abbildung 6: Taktische Ventilation eines Bahnwaggons im Tunnel. (Grafik: eigene Darstellung).

3. Versuche im Hondrichtunnel

Da der Aufbau von Bahnwaggons vergleichbar mit dem von Gebäuden ist, kann angenommen werden, dass die Ventilation auf dieselbe Weise funktioniert und das Prinzip übertragen werden kann. Um zu zeigen, dass die Ventilation funktioniert, wird auf zwei verschiedene Weisen vorgegangen. Nach der qualitativen Vorgehensweise wird versucht, eine Luftströmung zu messen, während mit der quantitativen Vorgehensweise die sechs verschiedenen Versuche verglichen werden und gezeigt wird, in welchem Versuch die Luftströmung schwächer und in welchem sie stärker ausfällt.

Um die Versuche unter möglichst realistischen Bedingungen durchführen zu können, wurden zwei intakte Bahnwaggons vom Typ EW I B in einem stillgelegten Tunnel postiert. Damit ein Brand im Innenraum des einen Bahnwaggons nachgestellt werden konnte, wurde einer von beiden Bahnwaggons mit der Rauchmaschine Firefog 2.400 verrauchert und beide Schiebetüren des Abteils verschlossen. Die Zeitmessung begann mit dem Einschalten des Akkulüfters Blowhard Compact Ventilator. Eine Luftströmungsmessung erfolgte an der Abluftöffnung mit dem Multifunktions-Messgerät testo 435.

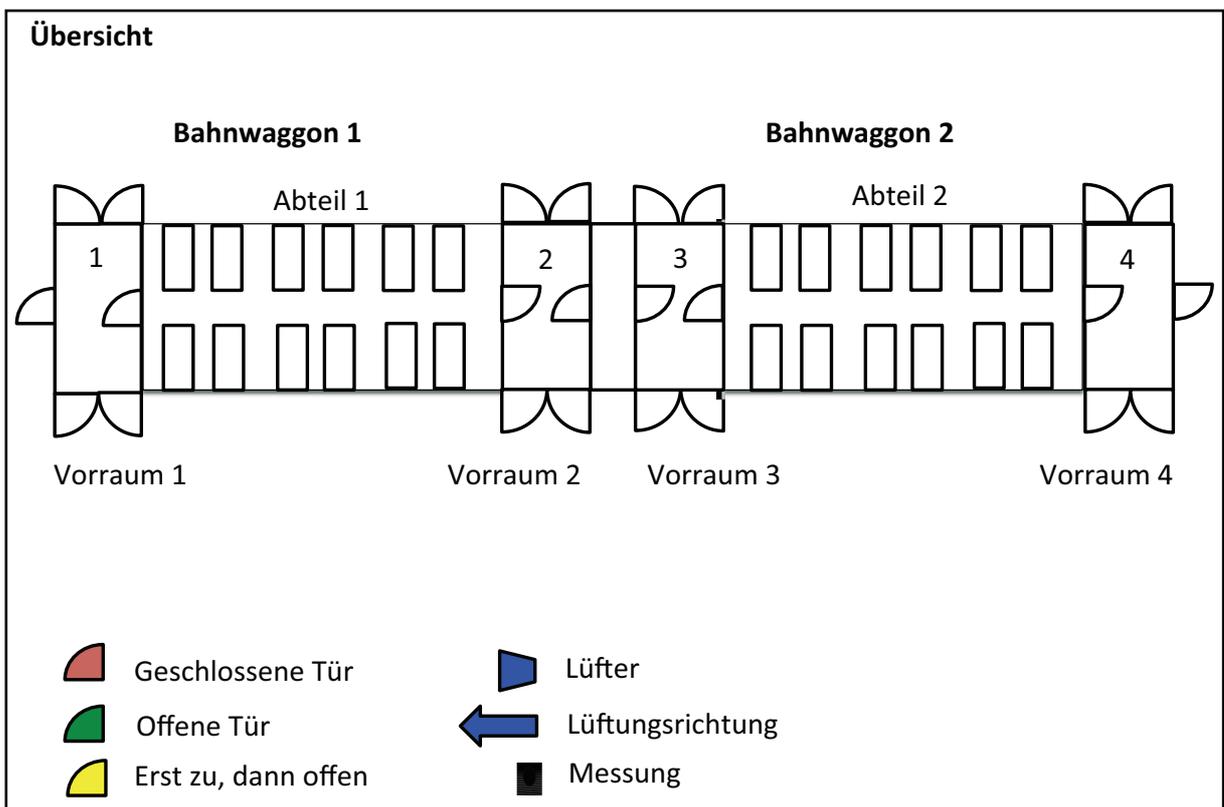


Abbildung 7: Übersicht Versuchsanordnung. (Grafik: eigene Darstellung).

Die Versuche wurden im Alten Hondrichtunnel, einem stillgelegten Übungsstollen der BLS AG, durchgeführt. Die BLS AG ist der Betreiber der Bern-Lötschberg-Simplonbahn und hat ihren Sitz in Frutigen im Kanton Bern.

Im frühen 20. Jahrhundert diente der Alte Hondrichtunnel als Verbindung zwischen Spiez und Frutigen. Durch Einführung des Taktfahrplans musste er doppelspurig ausgebaut werden. Es wurde eine parallele, zweite Röhre und durch die vorherrschenden schlechten Gesteinsverhältnisse eine neue erste Röhre, die in der Mitte an den Alten Hondrichtunnel anschliesst, gebaut. Somit wird heutzutage die erste Hälfte der ersten Röhre, heute Hondrich 1 genannt, zusammen mit der neuen zweiten Hälfte, dem Hondrich 2, als Tunnelröhre genutzt. Die 200 m lange zweite alte Hälfte schliesst noch mit einer Türe an den neuen Tunnel an und ist zu der Portalseite hin offen. Mit 4,25 m Breite und 4,84 m Höhe wird die Hälfte von der BLS AG als Übungsstollen oder Lokremise genutzt.



Abbildung 8: Portal Alter Hondrichtunnel. (Grafik: <http://verkehrsrelikte.uue.org/bahn/tunnel/tunnel-schweiz.htm>).

Es wurden zwei aneinander gekoppelte Bahnwaggons vom Typ EW I B ca. 5 m vom Portal entfernt im Tunnel abgestellt. Ein Waggon vom Typ EW I B ist 23,7 m lang, 3,1 m breit und 3,9 m hoch. Das Abteil mit 80 Sitzplätzen wird von beiden Seiten mit Schiebetüren vom Aus- und Einsteigebereich abgetrennt. Auch der Zwischenbereich der beiden Waggons ist nochmal durch zwei Schiebetüren separiert²⁰.

²⁰ BLS (2015)



Abbildung 9: Bahnwaggon EW I B. (Grafik: BLS (2015)).

Mittels der elektrischen Rauch-/ Verdampfungsmaschine Firefog 2.400 wurden nach dem Flüssigkeitsverdampfungsprinzip mit einer Leistung von 1.350 Watt²¹ ca. 10.000 m³ Rauch pro Stunde produziert. Dabei handelte es sich um kalten Übungsrauch, der sich ohne Überdruck im gesamten Raum verteilte²².



Abbildung 10: Rauchmaschine Firefog 2.400. (Grafik: Brauner (2015), eigene Darstellung).

²¹ Firefog technology (2014), S. 10

²² Luginbühl (2012), S. 4

Um die Möglichkeiten der taktischen Ventilation auszuprobieren, wurde ein transportabler Akkulüfter Blowhard Compact Ventilator Typ BH 20 von der Firma Vogt verwendet. Dieser besitzt eine Lüftungsleistung von ca. 25.000 m³ pro Stunde, eine Akkulaufzeit von 20 bis 60 Minuten und ist mit ca. 25 kg auch problemlos im Inneren von Bahnwaggons einsetzbar²³.



Abbildung 11: Akkulüfter Blowhard Compact Ventilator. (Grafik: Brauner (2015), eigene Darstellung).

Um die Möglichkeiten der taktischen Ventilation ohne Akkulüfter zu testen, wurde ein Elektrolüfter Power Blower Tempest EV 27-3,0 Low Noise eingesetzt. Dieser besitzt eine Lüftungsleistung von ca. 33.000 m³ pro Stunde, einen Lüftungsquerschnitt von 27“ und einen 230 Volt Anschluss²⁴.

²³ Vogt AG (2013)

²⁴ Tempest Power Blowers (2010), S.24



Abbildung 12: Elektrolüfter Power Blower Tempest EV 27-3,0. (Grafik: Brauner (2015), eigene Darstellung).

Das Multifunktionsmessgerät wurde mittels einer Hitzdrahtsonde zur Strömungsgeschwindigkeitsmessung ausgestattet. Es konnte somit Strömungen in einem Messbereich von 0 bis + 20 m/s messen²⁵.



Abbildung 13: Multifunktionsmessgerät testo 435 mit Hitzdrahtsonde. (Grafik: Brauner (2015), eigene Darstellung).

²⁵ testo AG (2015)

3.1. Versuch 1

Im ersten Versuch wurde das Abteil des Bahnwaggon 1 verrauchert. Der Akkulüfter wurde direkt in den Zwischenraum 2 ungefähr 1 m vor die geschlossene Schiebetüre zum Abteil 1 positioniert. Diese blieb zunächst verschlossen, um eine Rauchausbreitung in das Abteil 2 zu vermeiden. Um genug Frischluft für den Akkulüfter zu erhalten, wurden die Seitentüren vom Zwischenraum 3 und die Schiebtüren zum Durchgang zum Vorraum 2 geöffnet. Die Seitentüren des Vorraums 2 blieben verschlossen. Für die Abluftöffnung wurden die Seitentüren des Vorraums 1 geöffnet. Mit dem Einschalten des Akkulüfters wurde auch die Schiebetüre zum verraucherten Abteil geöffnet. Es wurde versucht, eine Luftströmung an dem Messpunkt zwischen der Schiebetüre vom verraucherten Abteil zum Vorraum 1 zu messen.

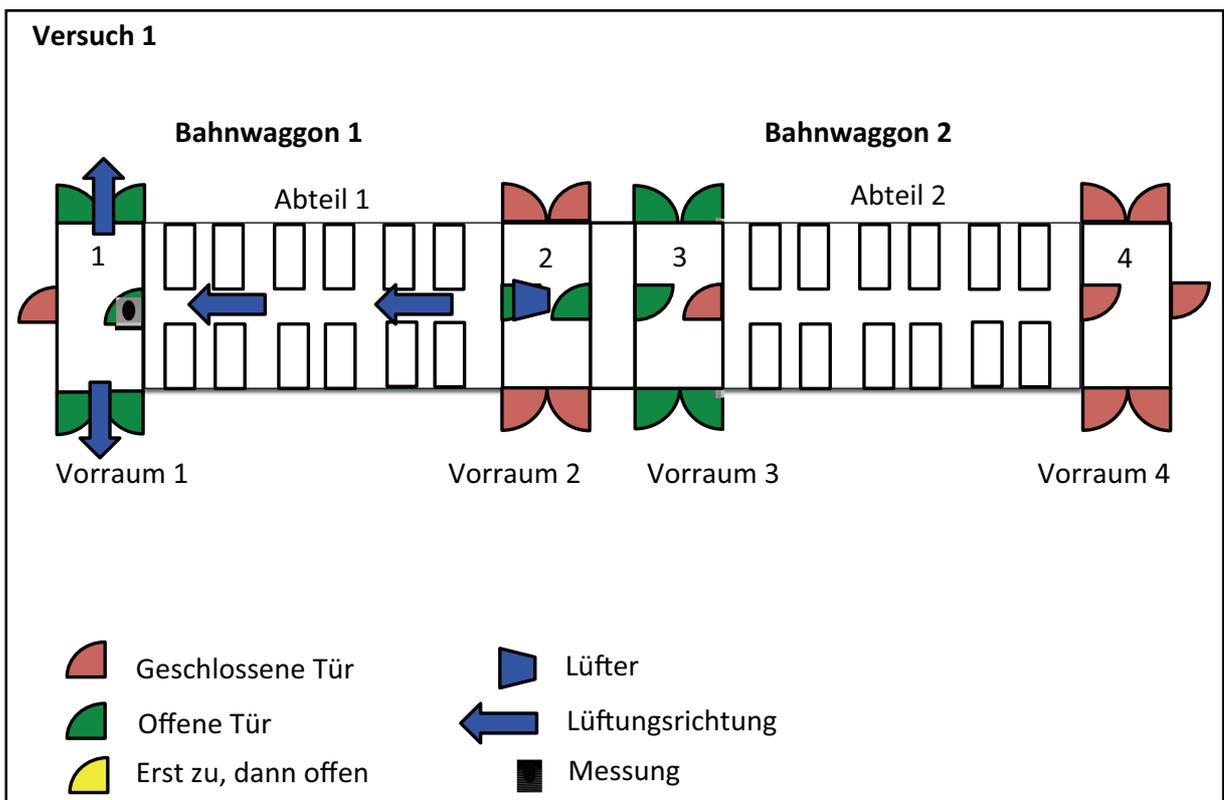


Abbildung 14: Versuchsanordnung Versuch 1. (Grafik: eigene Darstellung).

Schon nach wenigen Sekunden waren direkt vor dem Akkulüfter Verwirbelungen zu erkennen. Er war zu nah an der Schiebetüre postiert worden und konnte nicht die ganze Türe abdecken. So wurde entweder im unteren Bereich der offenen Schiebetüre oder im oberen Bereich der offenen Schiebetüre der Rauch verwirbelt und in den Vorraum 2 gedrückt. Dessen ungeachtet konnte am Messpunkt zwischen der Schiebetüre zum Vorraum 1 eine geringe Luftströmung von 0,02 m/s gemessen werden.



Abbildung 15: Position des Lüfters in Versuch 1. (Grafik: Brauner (2015), eigene Darstellung).

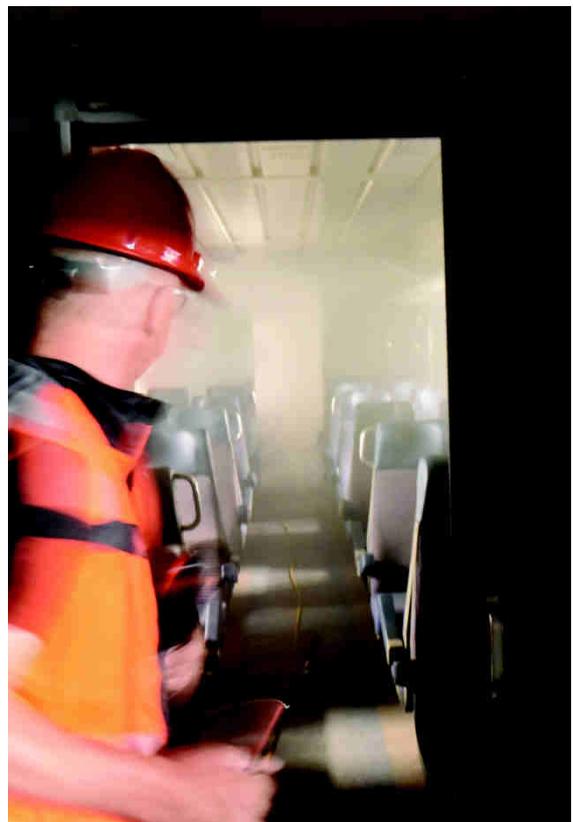


Abbildung 16: Messung der Luftströmung in Versuch 1. (Grafik: Brauner (2015), eigene Darstellung).

3.2. Versuch 2

Im zweiten Versuch wurde erneut das Abteil des Bahnwaggon 1 verraucht. Diesmal wurde der Akkulüfter in den Vorraum 3 vor die Schiebetüre zum Zwischenraum zu Vorraum 2 positioniert. Für eine ausreichende Zuluftöffnung wurden die Seitentüren des Zwischenraums 3 geöffnet. Die Ablüftöffnung wurde durch das Öffnen der Seitentüren im Vorraum 1 geschaffen. Mit dem Einschalten des Akkulüfters wurde die Schiebetüre zum verrauchten Abteil in Vorraum 2 geöffnet, um eine Rauchausbreitung in das zweite Abteil zu vermeiden.

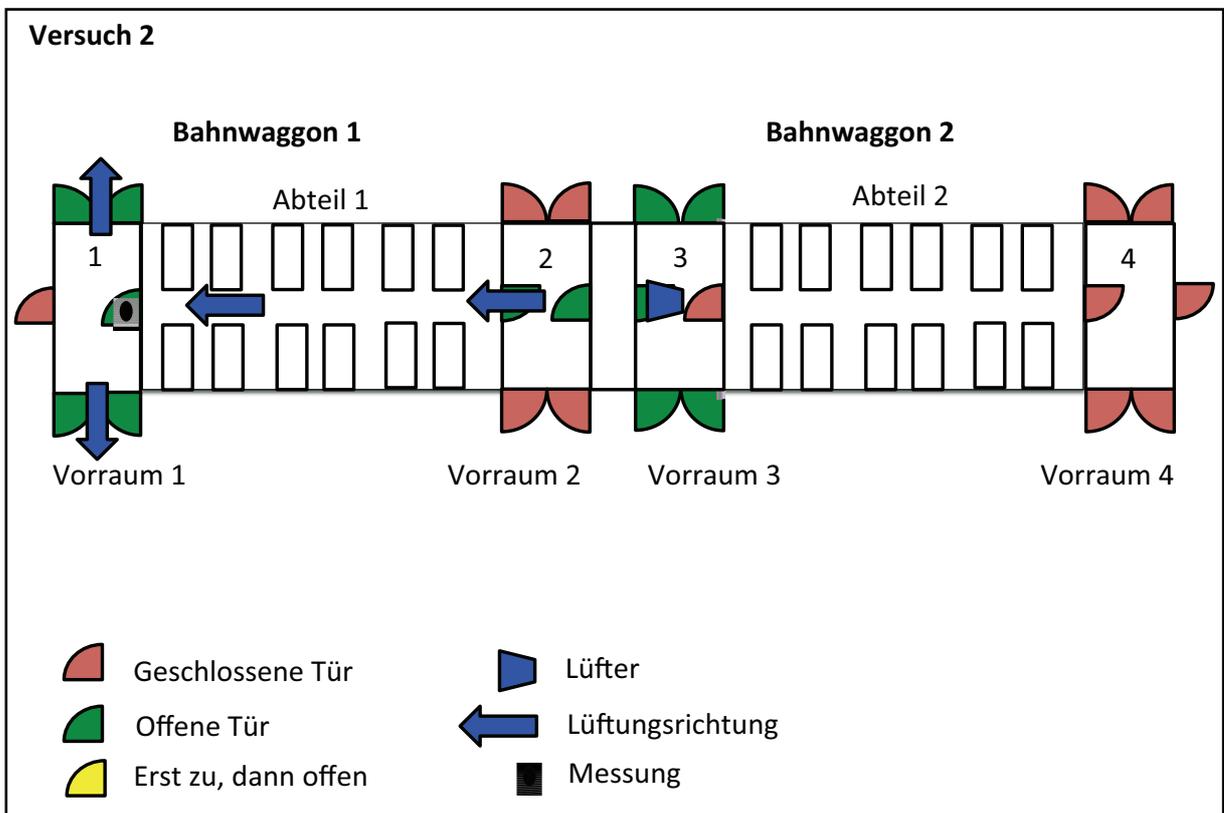


Abbildung 15: Versuchsanordnung Versuch 2. (Grafik: eigene Darstellung).

Auch hier waren schon nach wenigen Sekunden Verwirbelungen vor der Schiebetüre zum verrauchten Abteil zu erkennen. Diese waren allerdings nicht so groß wie in Versuch 1. Der Luftstrahl des Akkulüfter konnte fast die komplette Schiebetüre

abdecken. Im Abteil selbst konnte eine leichte Rauchverdrängung festgestellt werden. Allerdings blieb Rauch in den Ecken vor der Schiebetüre im Zwischenraum und hinter der Schiebetüre im Abteil. Es konnte am Messpunkt eine Luftströmung von ca. 1,9 m/s zwischen der Schiebetüre zum Vorraum 1 gemessen werden.



Abbildung 16: Position des Lüfters in Versuch 2. (Grafik: Brauner (2015), eigene Darstellung).



Abbildung 17: Blick in das verrauchte Abteil von Vorraum 1. (Grafik: Brauner (2015), eigene Darstellung).

3.3. Versuch 3

Auch im dritten Versuch wurde das Abteil des Bahnwaggon 1 verraucht. Um weitere Verwirbelungen vor der Schiebetüre in Vorraum 2 zu vermeiden, wurde der Abstand des Akkulüfters zu dieser noch weiter vergrößert. Deshalb wurde er im Vorraum 4 vor die Schiebetüre zu Abteil 2 positioniert. Für die Zuluftöffnung wurden die Seitentüren des Vorraums 4 geöffnet. Die Abluftöffnung kam durch das Öffnen der Seitentüren im Vorraum 1 zustande. Alle weiteren Seitentüren wurden geschlossen. Die Schiebetüren in beiden Bahnwaggonen wurden bis auf die Schiebetüre im Vorraum 2 zum verrauchten Abteil geöffnet. Diese Schiebetüre wurde erst mit Einschalten des Akkulüfters geöffnet, um eine Rauchausbreitung in das andere Abteil zu vermeiden.

Es wurde erneut versucht, eine Luftströmung am Messpunkt zwischen der Schiebetüre vom verrauchten Abteil zum Vorraum 1 zu messen.

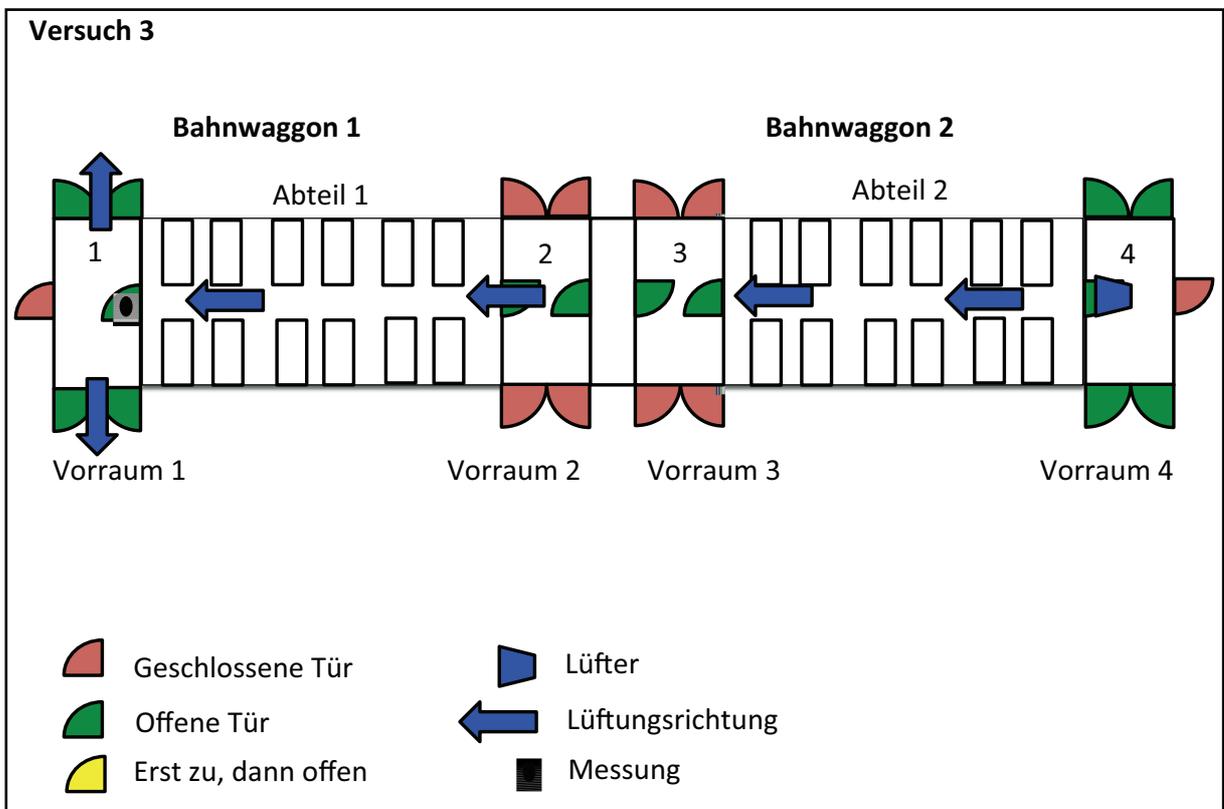


Abbildung 18: Versuchsanordnung Versuch 3. (Grafik: eigene Darstellung).

Es waren keine Verwirbelungen vor der Schiebetüre zum verrauchten Abteil zu erkennen. Der Akkulüfter war weit genug von der Schiebetüre entfernt postiert worden, um die vorhandene Luft im nicht verrauchten Abteil Richtung verrauchtes Abteil zu bewegen. Somit waren auch keine Verwirbelungen in den Ecken vor und hinter der Schiebetüre zum verrauchten Abteil zu erkennen. Es konnte eine schnellere Rauchverdrängung aus dem Abteil als zuvor beobachtet werden. Am Messpunkt zwischen der Schiebetüre zum Vorraum 1 konnten Luftströmungen bis zu 1,3 m/s gemessen werden.



Abbildung 19: Position des Lüfters in Versuch 3. (Grafik: Brauner (2015), eigene Darstellung).



Abbildung 20: Messung der Luftströmung in Versuch 3. (Grafik: Brauner (2015), eigene Darstellung).

3.4. Versuch 4

Die Versuchsanordnung im vierten Versuch hatte zum Ziel, eine Rauchzirkulation von außen zu verzögern, indem Zuluft- und Abluftöffnung diagonal voneinander lagen. Der Akkulüfter blieb im Vorraum 4 vor der Schiebetüre zu Abteil 2 positioniert. Die Zuluftöffnung wurde durch eine offene Seitentüre im Vorraum 4 sichergestellt. Die Abluftöffnung wurde verkleinert, indem die diagonal zur Zuluftöffnung gelegene Seitentüre geöffnet und die andere Seitentüre im Vorraum 1 geschlossen wurde. Alle Schiebetüren, bis auf die Schiebetüre im Vorraum 2 zum verrauchten Abteil, blieben offen.

Mit Einschalten des Akkulüfters blieb die Schiebetüre weiterhin geschlossen. Durch Einschalten des Akkulüfters auf Halblast wurde getestet, ob der Rauch hinter der geschlossenen Schiebetüre gehalten werden konnte.

Durch das Einschalten des Akkulüfters auf Vollast sollte vor der geschlossenen Schiebetüre Druck aufgebaut werden, bevor diese langsam geöffnet wurde und die Entrauchung schneller funktionieren sollte. Auch hier wurde versucht, eine Luftströmung am Messpunkt zwischen der Schiebetüre zwischen Abteil 1 und Vorraum 1 zu messen.

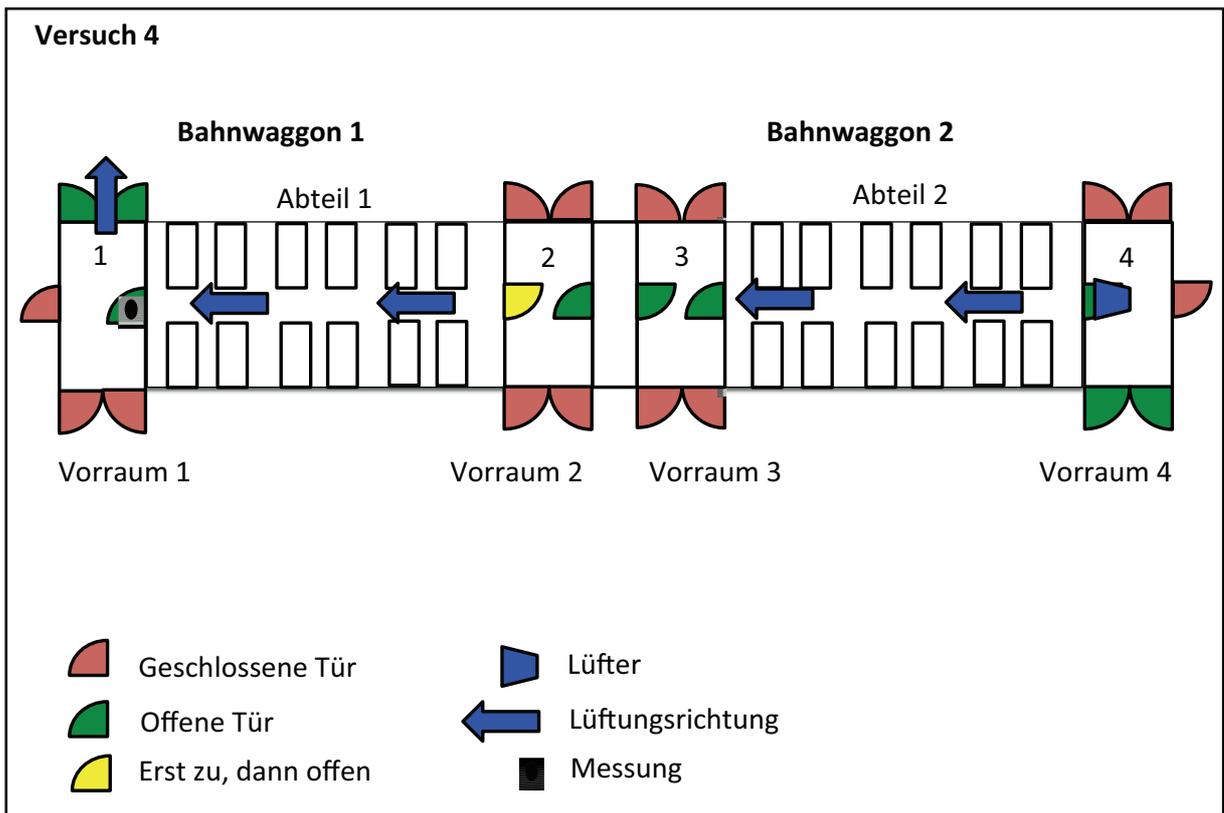


Abbildung 21: Versuchsanordnung Versuch 4. (Grafik: eigene Darstellung).

Auch mit Halblast des Akkulüfters konnte der Rauch hinter der geschlossenen Schiebetüre im verrauchten Abteil gehalten werden. Mit dem Einschalten auf Volllast und dem langsamen Öffnen der Schiebetüre war eine noch schnellere Rauchverdrängung als in Versuch 3 möglich. Es konnte erneut eine Luftströmung am Messpunkt zwischen der Schiebetüre zu Vorraum 1 gemessen werden. Durch das Verringern der Abluftöffnung betrug diese sogar 1,4 m/s.



Abbildung 22: Position des Lüfters in Versuch 4. (Grafik: Brauner (2015), eigene Darstellung).

3.5. Versuch 5

Im fünften Versuch wurde die Taktische Ventilation des verrauchten Bahnwaggons mittels eines Elektrolüfters durchgeführt. Dies wurde für den Fall getestet, dass kein Akkulüfter vorhanden ist. Hierbei wurde die Versuchsanordnung zu den anderen Versuchen etwas verändert, nur das verrauchte Abteil im Bahnwaggon 1 blieb gleich. Der Elektrolüfter wurde aufgrund seines Gewichtes und seiner Größe direkt vor die Seitentüre des Vorraums 4 außerhalb des Bahnwaggons positioniert. Die gegenüberliegende Türe im Vorraum 4 wurde geschlossen. Die Schiebetüre zum Abteil blieb offen. Die Abluftöffnung wurde wieder im Vorraum 1 geschaffen, allerdings blieb hier die Seitentüre auf der Seite des Lüfters geschlossen. Die gegenüberliegende Seitentüre wurde geöffnet.

Auch hier blieb mit Einschalten des Elektrolüfters die Schiebetüre zum verrauchten Abteil zunächst geschlossen, um zu sehen, ob der Rauch hinter der geschlossenen Schiebetüre gehalten werden konnte. Der Lüfterwinkel war zunächst so eingestellt worden, dass nur $\frac{1}{4}$ des Lüfterquerschnitts in den Bahnwaggon bliesen. Als sich Sekunden später genug Druck aufgebaut hatte, wurde die Schiebetüre langsam

geöffnet. Es wurde wieder versucht, eine Luftströmung am Messpunkt zwischen der Schiebetüre im Vorraum 1 zum verrauchten Abteil zu messen. Um eine stärkere Luftströmung messen zu können, wurde der Lüfterwinkel so eingestellt, dass $\frac{1}{2}$ des Lüfterquerschnitts den Bahnwaggon ventilierten.

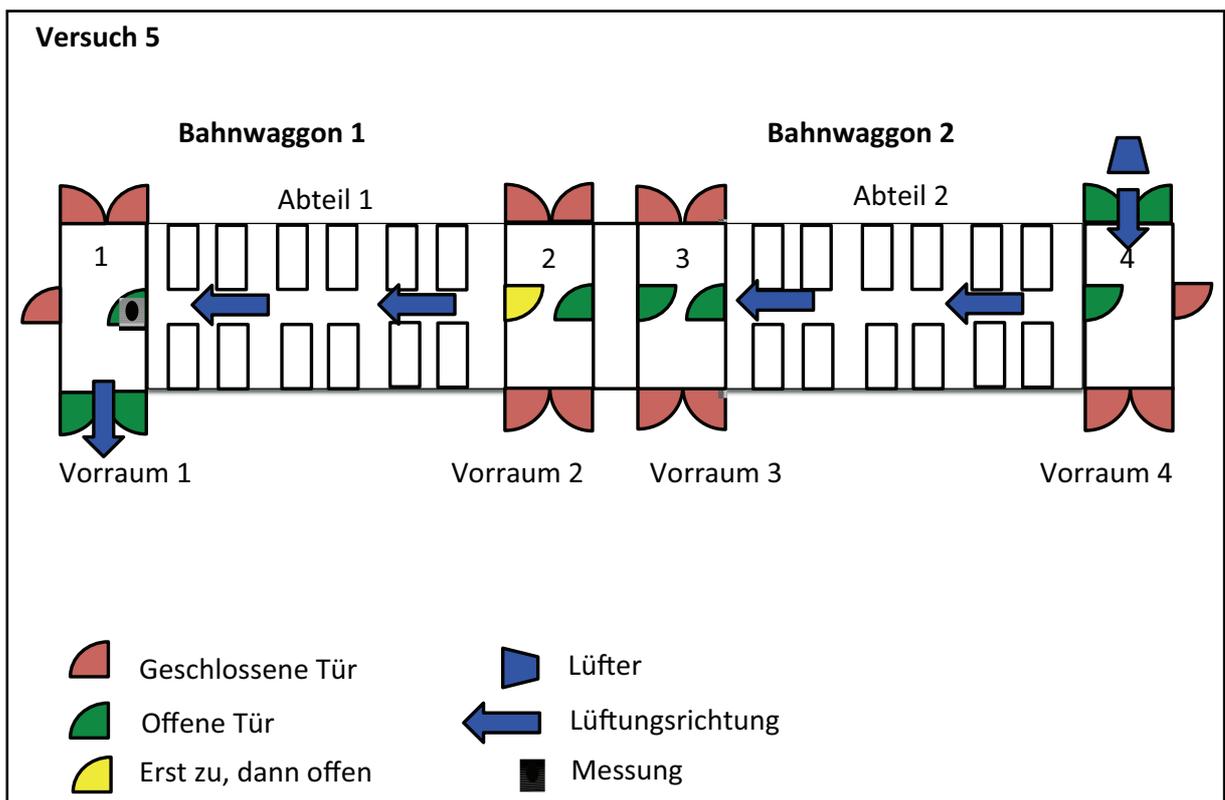


Abbildung 23: Versuchsanordnung Versuch 5. (Grafik: eigene Darstellung).

Zunächst konnte auch mit $\frac{1}{4}$ des Lüfterquerschnitts der Rauch hinter der Schiebetüre zum verrauchten Abteil gehalten werden. Nach langsamen Öffnen der Schiebetüre konnte eine Luftströmung von 0,6 m/s am Messpunkt zwischen der Schiebetüre zum Vorraum 1 gemessen werden. Die Rauchverdrängung war langsamer als in den Versuchen 3 und 4. Mit verstellen des Lüfterwinkels konnte eine stärkere Luftströmung von 1,0 m/s gemessen werden.

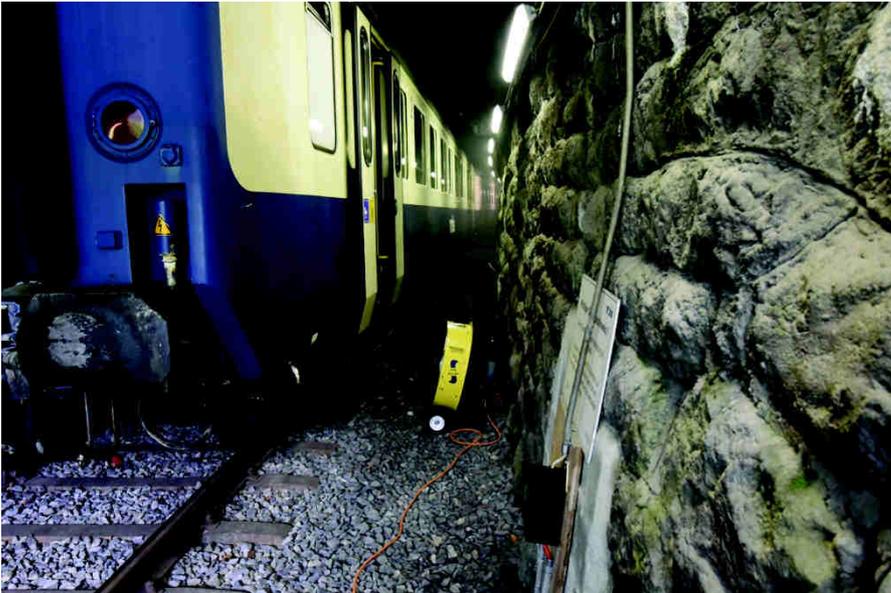


Abbildung 24: Position des Lüfters in Versuch 5. (Grafik: Brauner (2015), eigene Darstellung).

3.6. Versuch 6

Im sechsten Versuch wurde mit zwei Lüftern gearbeitet, um den Rauch im verrauchten Abteil trotz offener Türen halten zu können. Hierbei wurden beide Lüfter außerhalb der beiden Bahnwaggons jeweils an der Kopfseite der Bahnwaggons positioniert. Der Akkulüfter wurde vor Bahnwaggon 1 positioniert, da er im geringeren Abstand zum verrauchten Abteil stand. Der leistungsstärkere Elektrolüfter wurde an der Kopfseite des Bahnwaggons 4 positioniert, da er durch den rauchfreien Bahnwaggon 2 eine längere Distanz zum verrauchten Abteil überwinden musste. Das verrauchte Abteil im Bahnwaggon 1 blieb unverändert. Die Schiebetüren an den Kopfseiten der Waggons ins Freie hin wurden geöffnet. Die Seitentüren der Vorräume 1 und 4 wurden verschlossen. Beide Schiebetüren zum verrauchten Abteil hin blieben zunächst verschlossen, bis sich nach gleichzeitigem Einschalten der beiden Lüfter auf beiden Seiten genug Druck aufgebaut hatte. Auf Kommando wurden beide Schiebetüren gleichzeitig langsam geöffnet.

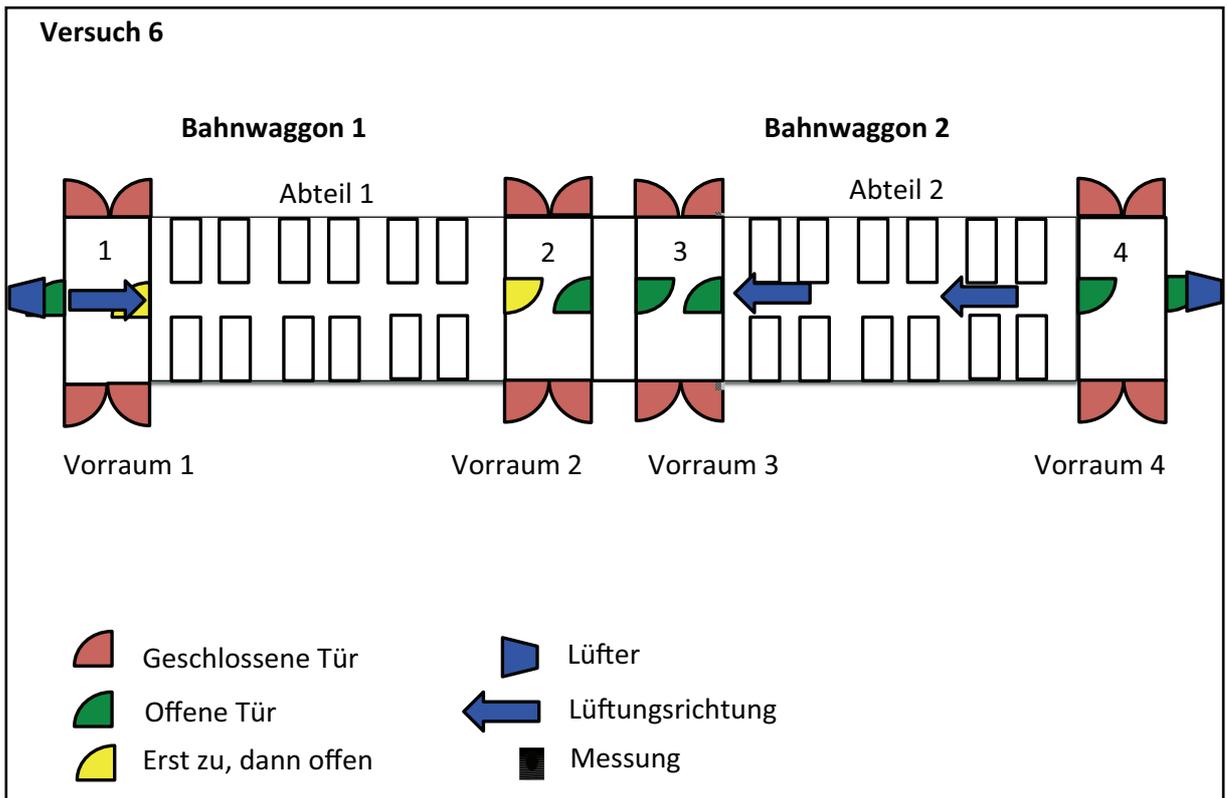


Abbildung 25: Versuchsanordnung Versuch 6. (Grafik: eigene Darstellung).

Schon wenige Sekunden später wurde der Rauch in das nicht verrauchte Abteil gedrückt. Das zunächst verrauchte Abteil konnte nicht komplett entrauchet werden, sodass keiner von beiden Bahnwaggonen am Schluss rauchfrei war. Da schon nach den ersten Sekunden ein negativer Effekt zu beobachten war, wurde auf die Strömungsmessungen verzichtet.



Abbildung 26: Position des Akkulüfters vor Vorraum 1. (Grafik: Brauner (2015), eigene Darstellung).

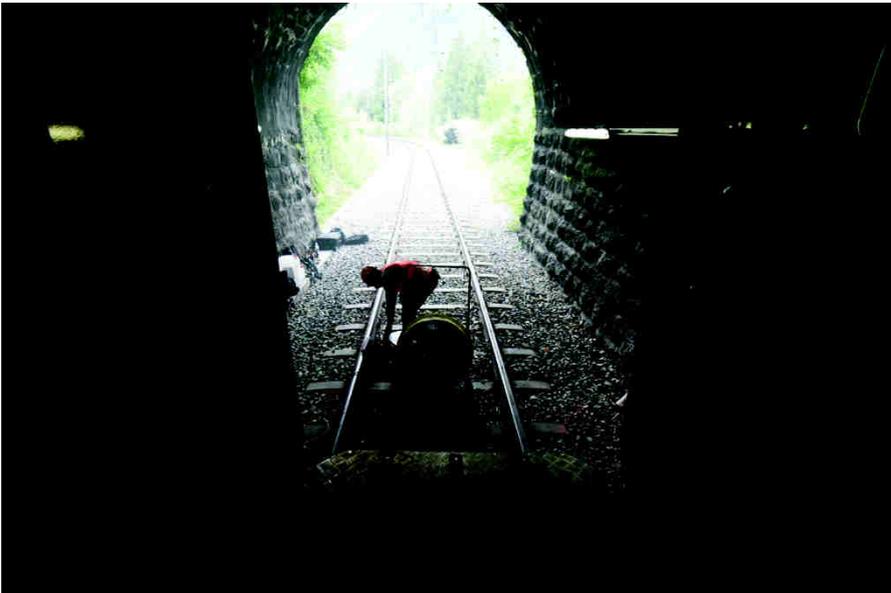


Abbildung 27: Position des Elektrolüfters vor Vorraum 4. (Grafik: Brauner (2015), eigene Darstellung).

4. Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Rauch gezielt beeinflusst werden kann. In den Versuchen 1-5 konnte als quantitatives Ergebnis eine Luftströmung gemessen werden. Als qualitatives Ergebnis erhielten wir von Versuch zu Versuch unterschiedlich starke Luftströmungen. In folgender Tabelle ist zu sehen, bei welchem Versuch welche Luftströmung vorherrschte.

Tabelle 1: Gemessene Luftströmung und Art der Rauchverdrängung. (Tabelle: eigene Darstellung).

Versuch	Luftströmung	Gemessene Luftströmung	Art der Rauchverdrängung
Versuch 1	Ja	0,02 m/s	Schlechte Entrauchung
Versuch 2	Ja	1,9 m/s	Rauch in den Ecken
Versuch 3	Ja	1,3 m/s	Gute Entrauchung
Versuch 4	Ja	1,4 m/s	Schnelle Entrauchung
Versuch 5	Ja	0,6 m/s // 1,0 m/s	Langsame Entrauchung

Versuch 6 wird in der Tabelle nicht aufgeführt, da schon nach wenigen Sekunden ein negativer Effekt zu beobachten war und dadurch auf eine Messung verzichtet werden konnte. Bei Betrachten der restlichen Versuche kann nicht davon ausgegangen werden, dass bei hoher Luftströmung die Entrauchung schneller erfolgt.

In Versuch 2 wurde eine Luftströmung von 1,9 m/s gemessen, jedoch wurde eine schlechte Rauchverdrängung beobachtet. Durch eine falsche Lüfterposition blieb der Rauch in den Ecken. In Versuch 3 konnte mit einer gemessenen Luftströmung von 1,3 m/s eine gute Entrauchung erzielt werden, allerdings ist die Entrauchung in Versuch 4 mit einer Luftströmung von 1,4 m/s um einiges schneller.

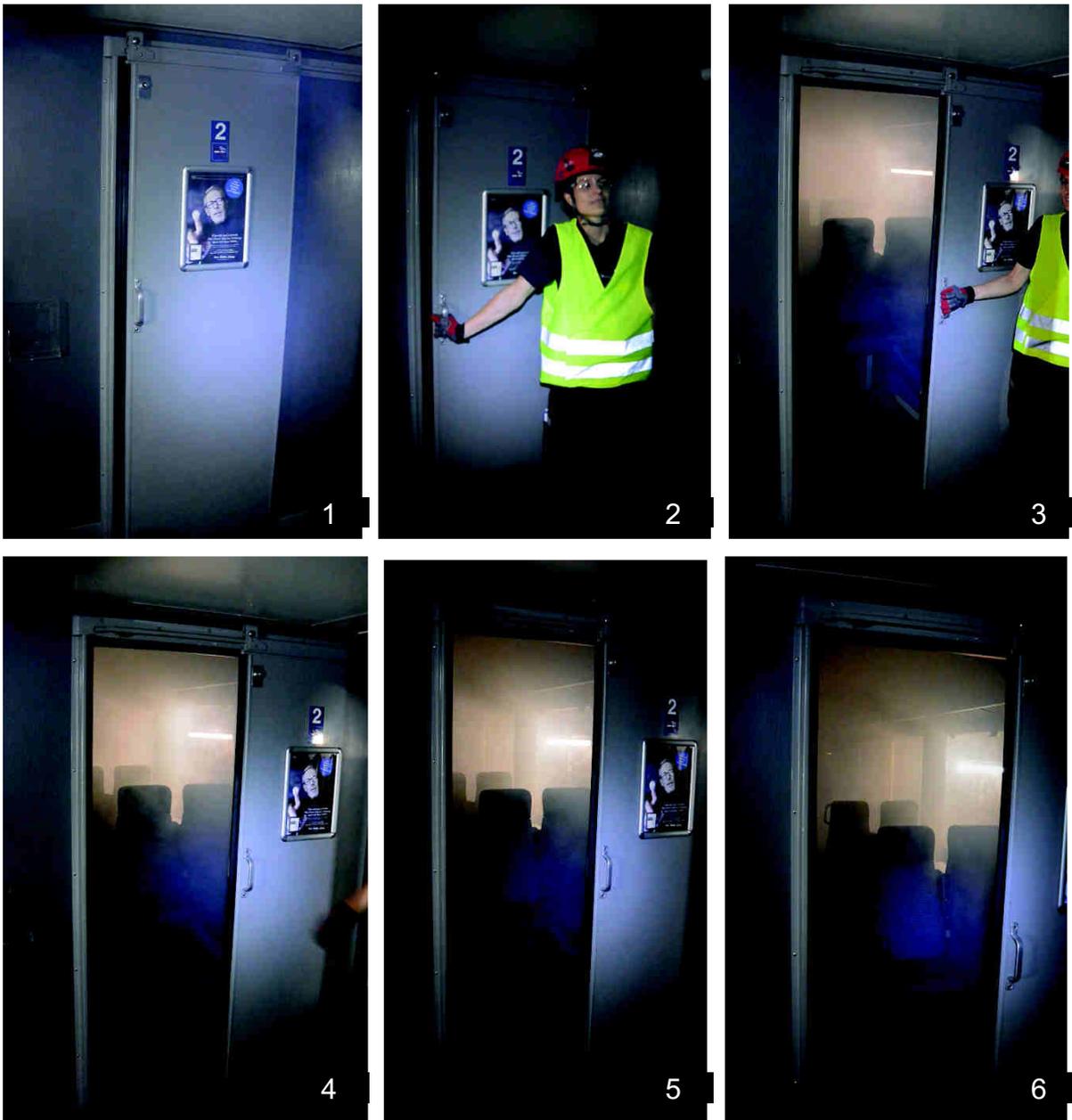


Abbildung 28: Öffnen der Schiebetüre zum verrauchten Abteil in Versuch 4. (Grafik: Vogt (2015), eigene Darstellung).

In Versuch 5 kam mit dem Elektrolüfter bei Halblast und bei Volllast eine Entrauchung zustande. Bei Luftströmungen von 0,6 m/s bei Halblast und 1,0 m/s bei Volllast war die Entrauchung effektiv, aber langsamer als in den Versuchen 3 und 4.

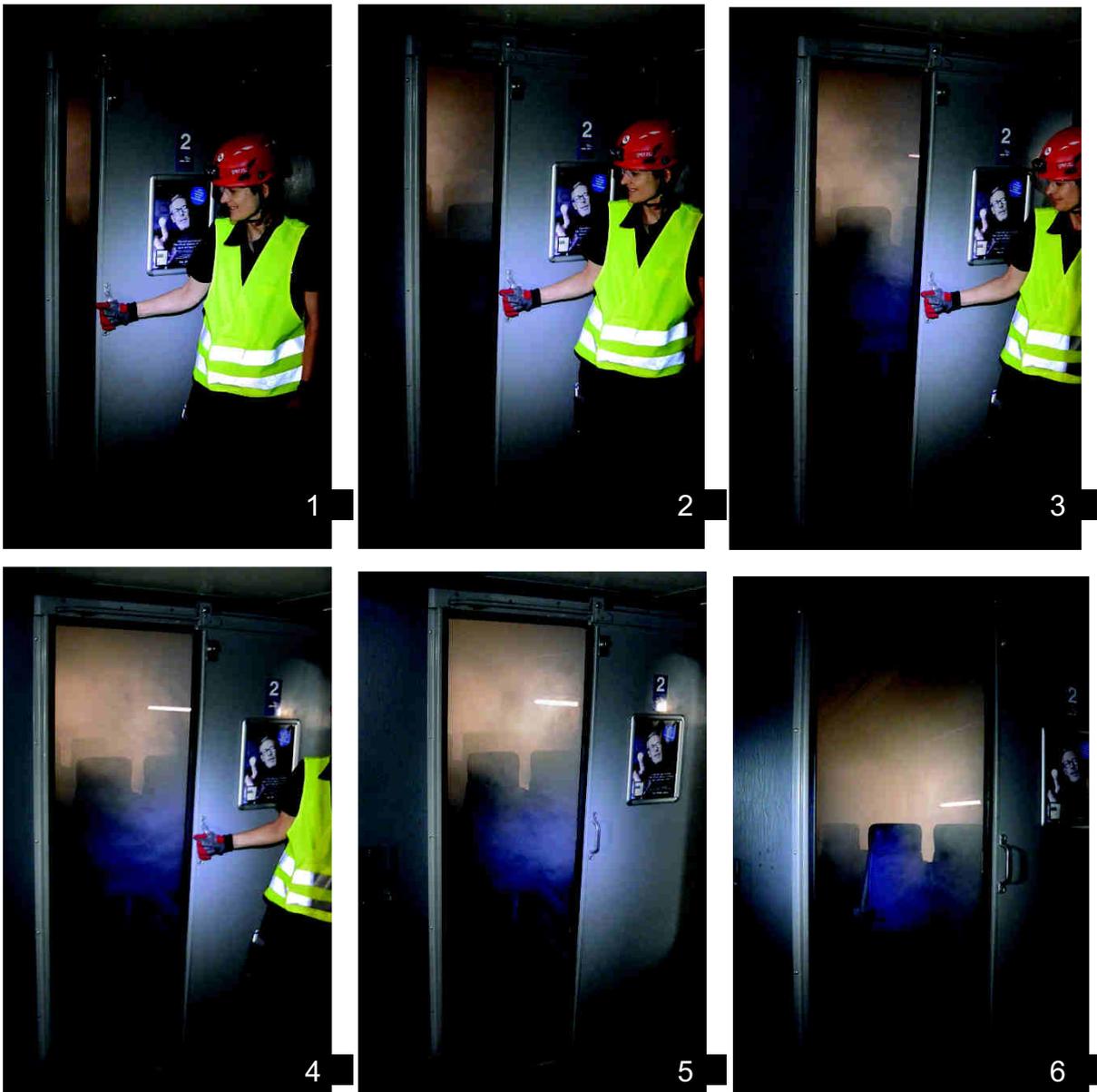


Abbildung 29: Öffnen der Schiebetüre zum verrauchten Abteil in Versuch 5. (Grafik: Vogt (2015), eigene Darstellung).

Zu erwähnen ist, dass es sich bei den gemessenen Werten um keine absoluten Werte handelt. Die gemessenen Werte gehen aus dem Waggon dieser Bauart und den gegebenen Bedingungen hervor. Bei Wiederholung der Versuche wird man auf die gleichen Effekte stoßen, aber nicht auf die gleichen Werte. Somit wären bei weiteren Untersuchungen des Themas genauere Messungen notwendig. Die Versuchsanordnung weist allerdings auch Grenzen auf. Da im Versuchsaufbau kalter Übungsrauch verwendet wurde, stieg dieser bei Verlassen des Bahnwaggons

nicht nach oben, sondern verbrauchte den Tunnel gleichmäßig. Des Weiteren hatte der Übungstunnel aufgrund seines Aufbaus keine konstante natürliche Ventilation der Luft. Durch vorbeifahrende Züge in der angeschlossenen zweiten Tunnelhälfte wechselte die Strömungsrichtung der natürlichen Ventilation hin und her. In der Realität würde der heiße Rauch aus dem Inneren des Bahnwaggons an die Tunneldecke aufsteigen und dort von der natürlichen Ventilation des Tunnels abtransportiert werden. Er würde erst nach unten sinken, nachdem er sich abgekühlt hat.



Abbildung 30: Auflösung der Rauchgasschichtung bei Absinken der abgekühlten Rauchgase in einem Tunnel ohne Luftströmung und ohne Ventilation. (Grafik: FKS (n.v.), S. 29).

Im hier vorhandenen Versuchsaufbau wurde der Rauch nach außen gedrückt und verbrauchte den kompletten Tunnel. Somit kam es in allen Versuchen irgendwann zu einer Rauchzirkulation. Der Rauch, der auf der einen Seite des Bahnwaggons heraus gedrückt wurde, verbrauchte den kompletten Tunnel und wurde nach einiger Zeit durch den Lüfter wieder in den Bahnwaggon ventiliert. Somit müssten bei weiteren Untersuchungen die Messungen mit echtem Rauch, in einem Tunnel mit zwei Portalen und natürlicher Ventilation durchgeführt werden.

5. Diskussion

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass durch Taktische Ventilation Rauch im Innenraum von Bahnwaggons gezielt beeinflusst werden kann. Somit kann die unter Punkt 1 formulierte Fragestellung eindeutig mit Ja beantwortet werden. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Prinzip der Taktischen Ventilation von Gebäuden auf Bahnwaggons übertragen werden kann.

Die Versuchsergebnisse der Versuche 1 und 2 brachten unter den vorhandenen Versuchsbedingungen keine ausreichend klaren Ergebnisse. Versuch 6 verschlechterte die Gesamtsituation und sollte daher im Einsatzfall unter keinen Umständen angewendet werden. Die Versuche 3 und 4 erzielten die besten Ergebnisse. Die eigentliche Entrauchung erfolgte schnell und effektiv. Es konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass der Rauch hinter der geschlossenen Schiebetüre gehalten werden kann. Da es bei einem Vollbrand in einem Gebäude mit mehreren Räumen meist besser ist die benachbarten, noch nicht betroffenen Räume mittels Taktischer Ventilation zu schützen²⁶, wurde hiermit gezeigt, dass dieses Prinzip auch in Bahnwaggons möglich ist. Ebenso wurde mit Versuch 5 auf die Möglichkeiten der Taktischen Ventilation mittels eines Elektrolüfters von außen eingegangen. Falls kein mobiler Akkulüfter zur Verfügung steht, kann die Taktische Ventilation auch mittels Elektrolüfter durchgeführt werden. Auch hier war ein Halten des Rauchs hinter der geschlossenen Schiebetüre möglich.

²⁶ Emrich (2012), S. 34

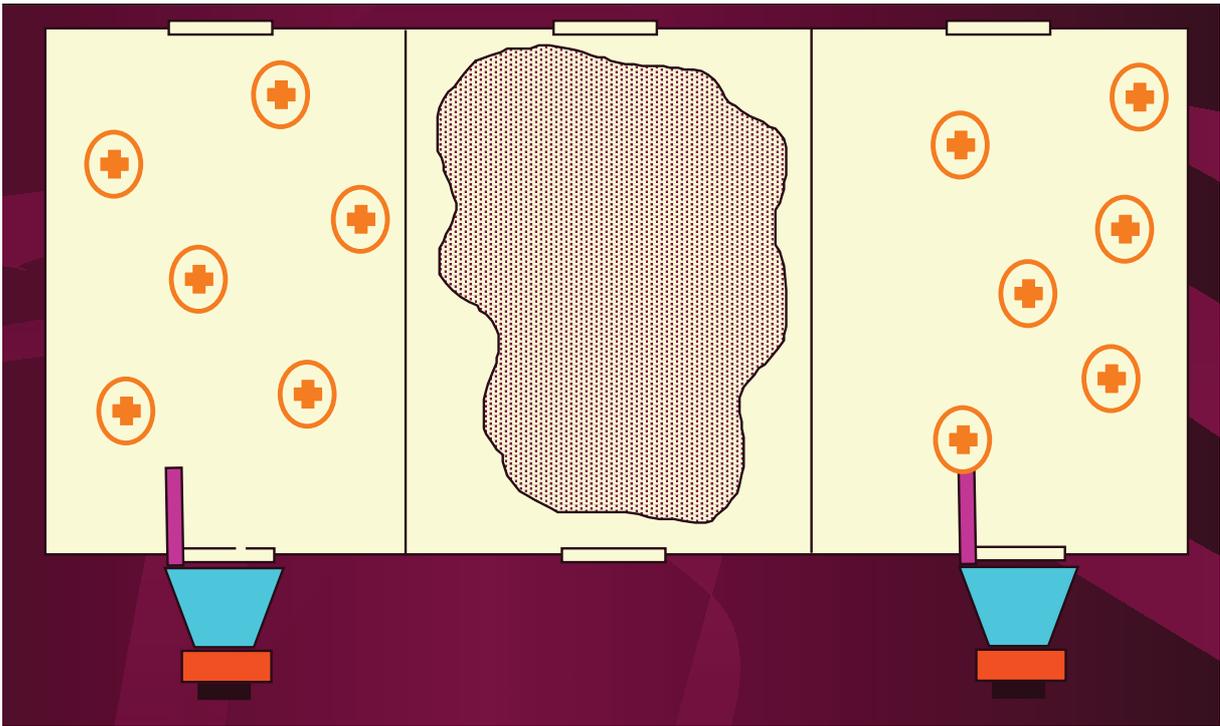


Abbildung 31: Halten des Rauches im Brandraum. (Grafik: Grimwood (n.v.)).

Somit wäre es theoretisch möglich, Personen aus einem betroffenen Bahnwagon, der zum Beispiel durch ein ausgebrochenes Feuer verrauchet wird, in den nächst gelegenen, noch nicht verrauchten Bahnwagon zu evakuieren und den sicheren Bereich durch Taktische Ventilation vor dem sich ausbreitenden Brandrauch zu schützen. Die Passagiere wären schnell aus dem Gefahrenbereich und könnten im „sicheren“ Bahnwagon von Einsatzkräften betreut und versorgt werden. Zudem wäre auch eine langsame Evakuierung der Passagiere durch den gesamten Zug möglich.

Eine frühzeitige Taktische Ventilation bringt noch viele weitere Vorteile. Durch eine schnelle Rauchverdrängung und gleichzeitig verbesserte Sichtverhältnisse ist ein schnelleres Absuchen von Räumen nach vermissten Personen möglich. Auch das Freihalten von Rettungswegen erhöht die Überlebenschance vermisster Personen und macht es Einsatzkräften leichter vorzudringen. Ebenso wird die Brandbekämpfung durch bessere Sichtverhältnisse und Abtransport der Wärme positiv beeinflusst.

Allerdings ist das Aufenthaltsprinzip nur unter folgenden Bedingungen sinnvoll: Die Luftströmung im Tunnel muss bekannt sein, um die Luftströmung im Bahnwagen daran anzupassen. Andersherum müsste die Luftströmung des Bahntunnels angepasst werden, falls die Luftströmung im Bahnwagen nur in eine Richtung möglich ist. Im Freien spielt die Luftströmungsrichtung im Bahnwagen keine Rolle und kann so eingesetzt werden, dass keine Personen gefährdet werden. Natürlich ist dies immer abhängig vom Brandort. Im Tunnel stehen nur begrenzte Möglichkeiten zur Verfügung. Wird das komplette System betrachtet, also Bahnwagen im Bahntunnel, so kann es mit einem Gebäude im Gebäude verglichen werden. Ist die Luftströmung im Bahntunnel entgegengesetzt zur Luftströmung im Bahnwagen, kommt es schnell zu einer Rauchzirkulation. Da für die Taktische Ventilation frische Luft benötigt wird und somit die Türe hinter dem Lüfter als Zuluftöffnung geöffnet sein muss, wird der Rauch durch diese in den Bahnwagen hineingezogen. Um zu vermeiden, dass dadurch der Rauch im Kreis ventiliert wird, müssen für eine effektive Ventilation die Luftströmung des Bahntunnels und die Luftströmung des Bahnwagons in dieselbe Richtung führen.

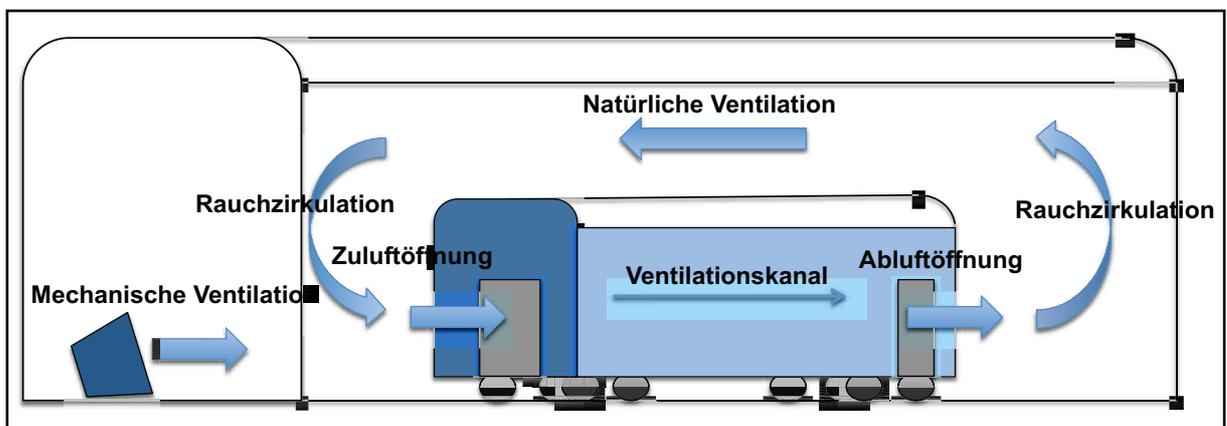


Abbildung 32: Rauchzirkulation im Tunnel. (Grafik: eigene Darstellung).

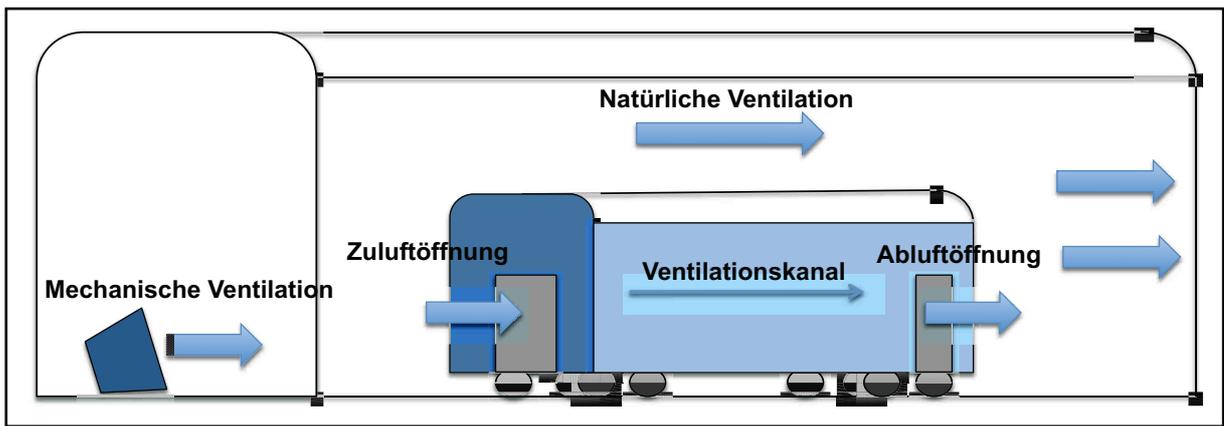


Abbildung 33: Strömungsrichtung der natürlichen und der mechanischen Ventilation sind aufeinander abgestimmt. (Grafik: eigene Darstellung).

Wird die Taktische Ventilation falsch angewandt und es kommt zu einer Rauchausbreitung in weitere Bahnwaggons, wie zum Beispiel in Versuch 6, so würde der Einsatz ein undenkbares Schadensausmaß verursachen. Schon wenige Atemzüge im Brandrauch reichen, um bewusstlos zu werden. Das würde in einem vollbesetzten ICE zu einem Massenanfall von bis zu 1.500 Verletzten führen.

Auch die Anwendung einer falschen Taktischen Ventilation des Brandraumes kann nicht nur das Leben vermisster Personen, sondern auch der Einsatzkräfte gefährden. Das schlimmste mögliche Szenario, das durch falsche Taktische Ventilation ausgelöst werden kann, ist eine Rauchgasexplosion²⁷.

Diese kann aber durch das Errichten einer ausreichend großen Abluftöffnung verhindert werden. Da bei Zügen Zu- und Abluftöffnung am einfachsten durch das Öffnen der Seitentüren geschaffen werden kann, besteht hier nicht die Gefahr, dass eine der beiden Öffnungen zu klein ausfällt. Somit ist das Risiko eher gering, eine Rauchgasexplosion durch Taktische Ventilation auszulösen.

Allerdings gibt es auch Nachteile beim Einsatz von Lüftern. Die Akkulaufzeit des Akkulüfters beträgt maximal 60 Minuten und kann mit Strom weiter aufrechterhalten werden. Der Transport von Elektrolüftern ist im steinigen Gleisbett nicht gerade einfach und der Platz zum Stellen zwischen Zug und Tunnelwand sehr eng. Auch

²⁷ Emrich (2012), S. 34

hier wird eine Stromversorgung benötigt. Beim Einsatz der Lüfter im Waggoninnenraum funktioniert die Entrauchung umso langsamer je mehr Bahnwaggons die Luft durchqueren muss. Wie viele Bahnwaggons mit einem Lüfter entraucht werden können, muss in weiteren Versuchen herausgefunden werden.

Stellt man nun Vor- und Nachteile gegenüber, so überwiegen bei weitem die Vorteile. Die Akkulaufzeit des Akkulüfters von 60 min ist ausreichend, um den Lüfter schnell in Einsatz zu bringen und anschließend eine Stromversorgung einzurichten. Die aufgeführten Nachteile lassen sich durch den richtigen Einsatz der Taktischen Ventilation verhindern. Dies ist allerdings nur durch eine umfangreiche Ausbildung der Einsatzkräfte und regelmäßige Übungen umzusetzen. Wie durch die Versuche gezeigt wurde, lässt sich Rauch mit sehr einfachen Mitteln beeinflussen, die jede Feuerwehr zur Verfügung hat. So sollte jede Feuerwehr die Tunnel in ihrem Einsatzgebiet kennen und durch regelmäßige Übungen mit dem Einsatz der vorhandenen Materialien fit für den Ernstfall bleiben.

6. Reflexion

Die anfängliche Aufgabe bestand darin, die Versuche durchzuführen, um einen Erkenntnisgewinn zu erzielen. Entsprechend der Erwartungen und Beobachtungen kann der Rauch gezielt beeinflusst werden. Dennoch müssten bei nochmaliger Versuchsdurchführung noch weitere Faktoren gemessen werden.

Zunächst müsste geprüft werden, wie sich der Rauch im Freien verhält. Dazu sollten die Versuche noch einmal im Freien wiederholt werden. Ebenfalls unklar ist, wie sich Echtrauch, das heißt Rauch mit hoher Partikelfracht, bei Taktischer Ventilation im Bahnwaggon verhält. Zudem handelt es sich bei den hier durchgeführten Versuchen um keinen durchgehenden Tunnel, sondern um einen Stollen, der auf der einen Seite durch eine Türe verschlossen ist. Somit gab es keine konstante Luftströmung im Tunnel, die auch nicht beeinflusst werden konnte. Die Taktische Ventilation ist nur effektiv, wenn die Interaktion zwischen der Luftströmung im Bahnwaggoninneren und

der Luftströmung außen im Tunnel aufeinander abgestimmt ist. Die Versuche wurden nur mit zwei Bahnwaggons durchgeführt und sollten mit einem ganzen Zug wiederholt werden.

Der subjektive Eindruck von mir und fachkundigen Personen, die bei der Durchführung der Versuche geholfen haben, ließ die Rauchverdrängung besser als in Wohngebäuden erscheinen. Dies lässt sich auf einen einfacheren Grundriss der Bahnwaggons, auf nur ein Stockwerk und auf nur einen zu ventilierenden Raum mit wenig Verwinkelungen zurückführen. Trotz allem handelt es sich hier um keine exakten Messungen, die auch nicht mit geeichten Messgeräten durchgeführt wurden.

Des Weiteren gibt es auch einige Einschränkungen für die Gültigkeit der Versuchsergebnisse. Das heißt die Versuchsergebnisse sind nur gültig unter den gegebenen Bedingungen, wie dem spezifischen Tunnel, den Bahnwaggons, demselben Wetter und Luftdrücken etc. Vor allem aber wurden die Versuche an stehenden Bahnwaggons durchgeführt und können somit nicht auf fahrende Züge übertragen werden. So können bei erneutem Wiederholen der Versuche die gleichen Effekte beobachtet, aber nicht die gleichen Messwerte gemessen werden. Die Versuche sind allerdings verallgemeinerbar, da mehrere Versuche im Bahnwaggon durchgeführt wurden. Diese brachten qualitative Versuchsergebnisse, die zeigten, dass die Rauchausbreitung im Zug mit geringem Aufwand gezielt beeinflussbar ist. Vor allem konnte schon bei den ersten Versuchen die gewünschte Wirkung erzielt werden.

Dennoch sind die Versuchsergebnisse nicht für alle Bahnwaggons gültig. Die Ausnahme bilden alte, nicht hinreichend druckdichte Bahnwaggons, wie zum Beispiel Museumszüge und Doppelstockwagen.

7. Ausblick

Aufgrund der Versuchsergebnissen allein kann noch keine Empfehlung zur Einsatztaktik der Taktischen Ventilation bei Zugbränden in Bahntunneln ausgesprochen werden. Allerdings ist zu empfehlen, den Einsatz von Lüftern und die Taktische Ventilation in die Einsatzvorbereitung mit aufzunehmen. Dazu müsste geprüft werden, unter welchen Bedingungen die Taktische Ventilation im Einsatz eingesetzt werden kann. Hierbei würde es sich lohnen, weitere Erfahrungen zu gewinnen, indem die Taktische Ventilation in Übungen eingesetzt wird. Dazu würde das Ausprobieren der Taktischen Ventilation bei vielen verschiedenen Modellen von Bahnwaggons, wie zum Beispiel ICE mit Großraum und Abteilwagen oder Doppelstockwagen gehören. Des Weiteren muss heraus gefunden werden, wo sich in unterschiedlichen Zügen die besten Standorte für Lüfter befinden, ob es beim Einsatz von Lüftern verschiedener Hersteller zu Unterschieden kommt und wie bei Tunneln mit unterschiedlichen Luftströmungen vorgegangen werden kann. Darunter fallen zum Beispiel Bahntunnel, in denen gezielt die Luftströmung beeinflusst werden kann.

Bei Straßentunneln mit mehr als 400 m Länge muss nach RABT, der Richtlinie für Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln, eine stationäre Belüftung vorhanden sein, mit der die Luftströmung gezielt beeinflusst werden kann. Für Bahntunnel im Fernverkehr besteht solch eine Vorschrift nicht. Auch mit mobilen Großlüftern ist es schwierig, die Luftströmung in Bahntunneln von Fernstrecken zu beeinflussen. Hinzu kommt die Schwierigkeit des Transports von Lüftern bis zum Ereignisort, der durch die langen Wegstrecken erschwert wird.

Anders ist dies bei Bahnhöfen und U-Bahntunneln. Diese besitzen ebenfalls eine stationäre Belüftung, mit der die Luftströmung beeinflusst werden kann. Hinzu kommen hierbei relativ kurze Abstände zwischen den verschiedenen Notausgängen, die das schnelle Intervenieren der Feuerwehr ermöglichen. Somit ist am vielversprechendsten die Taktische Ventilation in der Einsatzplanung bei Tunneln mit bestehenden Ventilationskonzepten, wie zum Beispiel U-Bahntunnel, zu berücksichtigen und auszuprobieren.

8. Zusammenfassung

Anknüpfend an die in der Einleitung gestellte Fragestellung, ob es möglich ist mit tragbaren Akkulüftern den Rauch im Innenraum von Bahnwaggon zu beeinflussen, brachten die hier durchgeführten Versuche eine eindeutige Antwort darauf. In 5 von 6 Versuchen war es möglich, eine Luftströmung messen zu können und den Rauch im Bahnwaggon gezielt zu beeinflussen. Der Versuch, in dem der Bahnwaggon mit zwei entgegengesetzten Lüftern von zwei Seiten ventiliert wurde, verschlechterte die Gesamtsituation und brachte eine Rauchausbreitung in den zweiten Bahnwaggon. Die anderen fünf Versuche brachten alle unterschiedliche, positive Ergebnisse mit verschiedenen Luftströmungen.

Als effektivsten Versuch stellte sich der Versuch heraus, bei dem der Akkulüfter mit dem größten Abstand zum verrauchten Abteil positioniert wurde und somit die komplette Schiebetüre zum verrauchten Abteil abdeckte. Eine noch schnellere Entrauchung konnte erreicht werden, indem die Schiebetüre zum verrauchten Abteil mit Einschalten des Akkulüfters zunächst geschlossen blieb und erst, nachdem sich Druck davor aufgebaut hatte, langsam geöffnet wurde.

Für den Fall, dass kein Akkulüfter vorhanden ist, wurde ein Versuch mit einem Elektrolüfter durchgeführt. Dieser wurde seitlich auf dem Bankett im rechten Winkel zum Bahnwaggon positioniert und konnte daher nur mit einem Teil seines Lüfterquerschnitts zum Lüften beitragen. Dennoch konnte eine Luftströmung gemessen und eine Rauchverdrängung bewirkt werden. Auch hier konnte die Entrauchung beschleunigt werden, indem vor dem Öffnen der Schiebetüre zunächst Druck aufgebaut wurde.

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass das Prinzip der Taktischen Ventilation von Gebäuden auf Bahnwaggon übertragen werden kann. Somit können auch die vielen Vorteile übertragen werden. Durch eine schnelle Rauchverdrängung und gleichzeitig verbesserte Sichtverhältnisse ist ein schnelleres Absuchen von Räumen nach vermissten Personen möglich. Auch das Freihalten von Rettungswegen erhöht die Überlebenschance vermisster Personen und macht es Einsatzkräften leichter vorzudringen. Ebenso wird die Brandbekämpfung durch bessere Sichtverhältnisse und Abtransport der Wärme positiv beeinflusst.

Es konnte zusätzlich die Erkenntnis gewonnen werden, dass der Rauch hinter der geschlossenen Schiebetüre gehalten werden kann. So ist eine langsame Evakuierung der Passagiere durch den gesamten Zug möglich.

Allerdings ist das Aufenthaltsprinzip nur sinnvoll, wenn die Luftströmung im Bahntunnel und die Luftströmung im Bahnwaggon in dieselbe Richtung führen. Das heißt die Luftströmung im Tunnel muss bekannt sein, um die Luftströmung im Bahnwaggon daran anzupassen. Andersherum müsste die Luftströmung des Bahntunnels angepasst werden, falls die Luftströmung im Bahnwaggon nur in eine Richtung möglich ist. Ist die Luftströmung im Bahntunnel entgegengesetzt zur Luftströmung im Bahnwaggon, kommt es schnell zu einer Rauchzirkulation. Das heißt, durch die offene Zuluftöffnung im Bahnwaggon wird Rauch in den Bahnwaggon gezogen und im Kreis ventiliert.

Aufgrund dessen ist das Prinzip der Taktischen Ventilation besonders interessant für Tunnel mit stationärer Belüftung, wie zum Beispiel U-Bahntunnel, die den Luftstrom im Tunnel beeinflussen können.

9. Verzeichnisse

9.1. Quellenverzeichnis

9.1.1. Literatur

Alp Transit

Gotthard AG (2011)

Alp Transit Gotthard AG: Neue Verkehrswege durch das Herz der Schweiz. Stans: Engelberger Druck (2011).

Basmer (2004)

Basmer, Peter; Zwick, Gerhard: Messung des Giftgascocktails bei Bränden, Forschungsstelle für Brandschutztechnik. Karlsruhe: (2004).

BLS (2015)

BLS: EW I (Internes Dokument). Frutigen: (2015).
Siehe Anhang 1

Brauner (2014)

Brauner, Christian et al. (2014): Brandeinsätze in Strassentunneln. In: International Fire Academy (Hg.): Intervention in unterirdischen Verkehrsanlagen. Balsthal: Kehsler Verlag (2014).

Emrich (2012)

Emrich, Christian; Cmolino, Ulrich; Svensson, Stefan: Taktische Ventilation. Be- und Entlüftungssysteme im Einsatz. In: Einsatzpraxis. Heidelberg: ecomed SICHERHEIT (2012).

Fehlberg (2014)

Fehlberg, Sebastian: Physiologie 4. Atmung und Säure- Basen-Haushalt, 6. Auflage. Marburg: MEDILEARN Verlag GbR (2014).

- Firefog technology (2014)** **Firefog technology:** Firefog-Rauchproduktionstechnik. Bad Völsau (2014), S. 10
- Gressmann (2005)** **Gressmann, Hans-Joachim:** Abwehrender und Anlagentechnischer Brandschutz. Renningen: Expert Verlag (2005).
- Kerber (2012 a)** **Kerber, Stephen:** Analysis of Changing Residential Fire Dynamics and Its Implications on Firefighter Operational Timeframer. Northbrook: Underwriters Laboratories (2012).
- Kerber (2012 b)** **Kerber, Stephen:** Modern Residential Fires. In: Nex. Fire Safety Journal. Northbrook: UL Firefighter Safety Research Institute (2012).
- Kruse (2003)** **Kruse, Klaus:** Brand- und Katastrophenschutz in Eisenbahntunneln. Frankfurt: Deutsche Bahn AG Notfallmanagement/ Brandschutz (2003).
- Lessig (2002)** **Lessig, Rüdiger et al.:** Die Belastung des Menschen durch Brandrauch. In: Tagungsband der Jahrestagung 2002 des vfdb, Vereinigung zur Förderung des Brandschutzes e.V. Aachen: Druckerei und Verlagshaus. Mainz (2002).
- Luginbühl (2012)** **Luginbühl, Peter; Stettler, Michael:** Bericht. Rauchversuche mit Fahrzeugen. Frutigen: bls Interventionszentrum (2012).
- Müller (2012)** **Müller, Fabian:** Einsatztaktik für die Feuerwehr. Hinweise zur Ventilation bei Brandeinsätzen. Bruchsal: Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg (2012).

9.1.2. Internet

Meyer (2011)

Meyer, Sascha (2011): Wie viele Passagiere in einen ICE hineinpassen. In: Die Welt vom 26.04.2011. Online im Internet unter:

<http://www.welt.de/reise/nah/article13271085/Wie-viele-Passagiere-in-einen-ICE-hineinpassen.html> (Zugriff am 07.06.2015 17:35 Uhr).

Tempest Power Blowers (2010)

Tempest Power Blowers; Big Fire & Ventilation: Hochleistungslüfter. Einfache Handhabung, effektive Belüftung. Bachhagel: (2010). Online im Internet unter:

http://www.big-tempest.de/downloads/de/hl/BIG_Tempest_Hochleistungsluefter (Zugriff am 17.09.15 18:25).

testo AG (2015)

testo AG: Produktbroschüre testo 435. Lenzkirch: (2015). Online im Internet unter:

http://www.testo.de/resources/media/global_media/produkte/testo_435/testo-435-0980-9611-de.pdf (Zugriff am 17.09.15 18:37 Uhr).

Vogt AG (2013)

Vogt AG: Prospekt blowhard BH 20. Oberdiessbach: (2013). Online im Internet unter:

http://www.vogtag.ch/uploads/downloads/Prospekt_BlowHard_BH_20_d.pdf (Zugriff am 17.09.15 18:12 Uhr).

9.2. Darstellungsverzeichnis

9.2.1. Abbildungen

- Abbildung 1: Rechts- und Linksverschiebung der Sauerstoffbindungskurve.... 8**
Fehlberg, Sebastian (2014): Physiologie 4. Atmung und Säure-Basen-Haushalt, 6. Auflage. Marburg: MEDI-LEARN Verlag GbR.
- Abbildung 2: Rauchausbreitungsgeschwindigkeit im Vergleich zur Fortbewegungsgeschwindigkeit von Personen..... 9**
Waigand-Brauner, Melanie (2014): Illustrationen. In: Brandeinsätze in Strassentunneln. In: International Fire Academy (Hg.): Intervention in unterirdischen Verkehrsanlagen. Balsthal: Kehsler Verlag.
- Abbildung 3: Anwendung der Taktischen Ventilation 11**
FF Mistlberg (2015): Online im Internet unter:
<http://ff-mistlberg.at/atemschutz/> (Zugriff am 14.09.15 12:01 Uhr).
- Abbildung 4: Erklärung der Begriffe zur Taktischen Ventilation 12**
Kaiser, Christine (2015): Eigene Darstellung.
- Abbildung 5: Vergleich Wohngebäude und Bahnwaggon. 13**
Kaiser, Christine (2015): Eigene Darstellung.
- Abbildung 6: Taktische Ventilation eines Bahnwaggons im Tunnel..... 14**
Kaiser, Christine (2015): Eigene Darstellung.
- Abbildung 7: Übersicht Versuchsanordnung..... 15**
Kaiser, Christine (2015): Eigene Darstellung.
- Abbildung 8: Portal Alter Hondrichtunnel..... 16**
Online im Internet unter:
<http://verkehrsrelikte.uue.org/bahn/tunnel/tunnel-schweiz.htm>
(Zugriff am 14.09.15 22:35 Uhr).

Abbildung 9: Bahnwaggon EW I B	17
BLS (2015): EW I Internes Dokument. Frutigen.	
Abbildung 10: Rauchmaschine Firefog 2.400	17
Brauner, Christian (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 11: Akkulüfter Blowhard Compact Ventilator	18
Brauner, Christian (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 12: Elektrolüfter Power Blower Tempest EV 27-3,0	19
Brauner, Christian (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 13: Multifunktionsmessgerät testo 435 mit Hitzdrahtsonde	19
Brauner, Christian (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 14: Versuchsanordnung Versuch 1	20
Kaiser, Christine (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 15: Messung der Luftströmung in Versuch 1	21
Brauner, Christian (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 16: Position des Lüfters in Versuch 1	21
Brauner, Christian (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 17: Versuchsanordnung Versuch 2	22
Kaiser, Christine (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 18: Position des Lüfters in Versuch 2	23
Brauner, Christian (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 19: Blick in das verrauchte Abteil von Vorraum 1	23
Brauner, Christian (2015): Eigene Darstellung.	

Abbildung 20: Versuchsanordnung Versuch 3	24
Kaiser, Christine (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 21: Position des Lüfters in Versuch 3.....	25
Brauner, Christian (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 22: Messung der Luftströmung in Versuch 3.....	26
Brauner, Christian (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 23: Versuchsanordnung Versuch 4	27
Kaiser, Christine (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 24: Position des Lüfters in Versuch 4.....	28
Brauner, Christian (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 25: Versuchsanordnung Versuch 5	29
Kaiser, Christine (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 26: Position des Lüfters in Versuch 5.....	30
Brauner, Christian (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 27: Versuchsanordnung Versuch 6	31
Kaiser, Christine (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 28: Position des Akkulüfters vor Vorraum 1	32
Brauner, Christian (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 29: Position des Elektrolüfters vor Vorraum 4.....	32
Brauner, Christian (2015): Eigene Darstellung.	
Abbildung 30: Öffnen der Schiebetüre zum verrauchten Abteil in Versuch 4... 	34
Vogt, Markus (2015): Eigene Darstellung.	

Abbildung 31: Öffnen der Schiebetüre zum verrauchten Abteil in Versuch 5... 35

Vogt, Markus (2015): Eigene Darstellung.

Abbildung 32: Auflösung der Rauchgasschichtung bei Absinken der abgekühlten Rauchgase in einem Tunnel ohne Luftströmung und ohne Ventilation 36

Feuerwehr Koordination Schweiz (n.v.): Technische Wegleitung für die Intervention bei Bränden in Strassentunneln, Anhang 1 Tunnelbrand.

Abbildung 33: Halten des Rauches im Brandraum 38

Grimwood, Paul (n.v.): Taktische Ventilation. Online im Internet unter: <http://slideplayer.org/slide/873533/> (Zugriff am 14.09.15 22:33 Uhr).

Abbildung 34: Rauchzirkulation im Tunnel..... 39

Kaiser, Christine (2015): Eigene Darstellung.

Abbildung 35: Strömungsrichtung der natürlichen und der mechanischen Ventilation sind aufeinander abgestimmt.....40

Kaiser, Christine (2015): Eigene Darstellung.

9.2.2. Tabellen

Tabelle 1: Gemessene Luftströmung und Art der Rauchverdrängung..... 33

Kaiser, Christine (2015): Eigene Darstellung.

10. Anhang

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem auf dem Deckblatt formulierten Thema ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, den 25.09.15

Christine Kaiser