

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Anforderungen und Prüfmethoden für
die Persönlichen Schutzausrüstungen
der Feuerwehreinsatzkräfte
im Brandeinsatz unter besonderer
Berücksichtigung des Atemschutzes
(Persönliche Schutzausrüstung - PSA)

168

Abschlussbericht

- Teilschritt 2 -

Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 168

Anforderungen und Prüfmethode für die Persönlichen Schutz-
ausrüstungen der Feuerwehreinsatzkräfte im Brandeinsatz
unter besonderer Berücksichtigung des Atemschutzes
(Persönliche Schutzausrüstung - PSA)

- Teilschritt 2 -

von

Dr. rer. nat. Horst Starke (Projektleiter),

M. Sc. Michael Neske

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt

Heyrothsberge

September 2013

FA-Nr.: 62 (4/2008)

ISSN 170-0060

Der projektbegleitende Ausschuss hat in seiner 7. Sitzung am 3. September 2013 auf Grundlage der im vorliegenden Bericht dargestellten Ergebnisse folgende Bewertung abgegeben:

- a) Die in den ersten beiden Versuchsserien verwendeten thermischen Belastungen decken die bei Bränden in aller Regel auftretenden Bedingungen des Feuerwehreinsatzes ab. Die in der Praxis beobachteten Schäden weisen darauf hin (vgl. Erhebung zu Unfällen und Beinaheunfällen, Bericht 161).
- b) Im Ergebnis kann daher festgestellt werden, dass unter den üblicherweise auf Atemschutzgeräteträger und Pressluftatmer im Einsatz einwirkenden thermischen Belastungen bei den untersuchten Geräteensembles und bei taktisch richtigem Vorgehen keine Bedenken für deren Verwendung im Feuerwehreinsatz bestehen.
- c) Die dritte und „härteste“ Versuchsserie hat die derzeitigen Grenzen der thermischen Belastbarkeit von Pressluftatmern aufgezeigt. Diese thermischen Belastungen treten offenbar aufgrund der bisher vorliegenden Erkenntnisse über Schäden an Pressluftatmern in aller Regel in der Feuerwehreinsatzpraxis nicht auf. Die Grenzen der thermischen Belastbarkeit in der Versuchsserie 3 waren, bei achtzehn geprüften Geräten, an drei Geräten durch funktionelle Ausfälle und an vier weiteren Geräten durch deutlich erhöhte Atemwiderstände an den Lungenautomaten gekennzeichnet.
- d) Die Hersteller können sich hinsichtlich der Versuchsergebnisse ihrer Produkte an das IdF LSA wenden, um die Versuchsergebnisse ihrer eigenen Geräte erfahren und die Erkenntnisse bei weiteren Geräteentwicklungen berücksichtigen zu können.
- e) Das Referat 8 der vfdb wird um Prüfung gebeten, ob die Forschungsergebnisse des Forschungsauftrages 168 Auswirkungen auf die DIN EN 137 haben können.

Auf der 33. Sitzung des Ausschusses "Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung" des Arbeitskreises V der Ständigen Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder (AFKzV) vom

17. / 18. September 2013 in Würzburg

wurde nach Vorlage des Abschlussberichtes zum Teilschritt 2 des PSA-Forschungsvorhabens nachfolgend dargestellter Beschluss gefasst.

1. Der AFKzV nimmt den Bericht des Vertreters von Baden-Württemberg sowie des Leiters des IdF LSA und den Entwurf des Forschungsberichts 168 zur Kenntnis.
2. Der AFKzV schließt sich der Bewertung des PbA - wie oben dargestellt - an und bittet das IdF LSA, diese Bewertung des PbA mit dem Hinweis auf die Beschlusslage des AFKzV in den Forschungsbericht auf einer gesonderten Seite einzufügen.
3. Der AFKzV gibt den vorgelegten Forschungsbericht zur Veröffentlichung frei.
4. Der AFKzV begrüßt es, wenn das IdF LSA die Gerätehersteller über die Ergebnisse der Belastungstests ihrer jeweiligen Geräteensembles informiert.
5. Der AFKzV dankt dem Institut der Feuerwehr des Landes Sachsen-Anhalt und der Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie für die Projektbearbeitung, den Mitgliedern des Projekt begleitenden Ausschusses für ihre konstruktive Mitarbeit und Unterstützung sowie dem BMI für die finanzielle Beteiligung am Forschungsvorhaben.
6. Der AFKzV bittet das Referat 8 der vfdb gemäß Punkt e) der Beschlusslage des PbA die Prüfung vorzunehmen und mit den Ländervertretern im Lenkungsausschuss im FNFV zu beraten.
7. Der AFKzV bittet die Mitglieder des PbA, auch den dritten Teil des Forschungsvorhabens zu begleiten.

BERICHTS-KENNBLETT

Nummer des Berichtes: 168		Titel des Berichtes Anforderungen und Prüfmethode für die Persönlichen Schutzausrüstungen der Feuerwehreinsatzkräfte im Brandeinsatz unter besonderer Berücksichtigung des Atemschutzes (Persönliche Schutzausrüstung - PSA) - Teilschritt 2 -		ISSN: 0170-0060	
Autoren: Dr. rer. nat. Horst Starke (Projektleiter) M. Sc. Michael Neske		durchführende Institution: Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt Biederitzer Straße 5 D-39175 Heyrothsberge Direktor: Dr. rer. nat. Horst Starke			
Nummer des Auftrages:		Auftrag gebende Institution: Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V – Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung			
Datum des Berichtes: 6. September 2013					
Seitenzahl: 96	Bilder: 72	Tabellen: 29	Literaturverweise: 12		
<p>Kurzfassung:</p> <p>Im Teilschritt 1 des Forschungsvorhabens wurden die maßgeblichen thermischen Belastungsprofile für Einsätze und Übungen ermittelt. Diese bildeten die Grundlage für die experimentellen Untersuchungen im Teilschritt 2. Es wurden drei Versuchsregime erarbeitet, die sich stufig aufsteigend an die Belastungsgrenze der Pressluftatmer und Masken annäherten. Die thermische Beaufschlagung erfolgte in einem eigens hierfür entworfenen Versuchsstand, dessen Herzstück ein Wärmeschrank bildet und die Versuchsobjekte während der Versuche konvektiv mit Wärme beaufschlagt. Im Rahmen der Versuchsserien 1 und 2, die auf der Basis der Versuchsregime 1 und 2 erfolgten, wurden insgesamt 27 Geräteensembles (je bestehend aus Pressluftatmer, Vollmaske und Lungenautomat) untersucht. Bei diesen Versuchen kam zusätzlich eine Wärmestrahlungsquelle zum Einsatz, die die im Wärmeschrank befindlichen Versuchsobjekte zusätzlich mit Wärme beaufschlagten. Die Versuchszeit betrug dabei 10 Minuten. Bei den Versuchen, die dem Versuchsregime 3 folgten, wurden 18 Geräteensembles untersucht. Die Wärmebeaufschlagung erfolgte über 15 Minuten im Wärmeschrank. Auf den Einsatz der Wärmestrahlungsquelle wurde verzichtet. Im Ergebnis der Versuchsserien 1 und 2 wurden unkritische oberflächliche Beschädigungen dokumentiert. Es kam zu keinen funktionellen Ausfällen. Im Rahmen der Versuchsserie 3 kam es zu drei funktionellen Ausfällen. Vom Projektbegleitenden Ausschuss wurde allerdings eingeschätzt, dass die dabei zugrunde gelegten thermischen Belastungen über die eines Einsatzes (Innenangriff) hinausgehen.</p>					
<p>Schlagwörter:</p> <p>Thermisches Belastungsprofil, Pressluftatmer, Vollmasken, Lungenautomaten, Wärmestrahlung, Konvektion, Wärmeschrank</p>					

Inhaltverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	5
Abbildungsverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis	11
Literaturverzeichnis	12
Danksagung	13
1 Einleitung.....	14
2 Zusammenfassung.....	16
2.1 Ausgangssituation im Teilschritt 1.....	16
2.2 Versuchsregime	16
2.3 Ergebnisdiskussion	17
3 Thermische Belastungsprofile	19
3.1 Motivation, Begründung und Festlegung der Versuchsregime	19
3.2 Versuchsregime	20
3.3 Versuchsdurchführung.....	22
4 Auswahl und Beschaffung von Pressluftatmern	25
5 Versuchsstand.....	27
5.1 Wärmeschrank.....	27
5.2 Künstliche Lunge	28
5.3 Sheffield-Prüfkopf.....	30
5.4 Porenstrahler.....	31
5.5 Halteplattform.....	33
6 Messkonzept	34
6.1 Messstellen	34
6.2 Instrumentierung	40
6.3 Probleme bei der Instrumentierung.....	42
7 Vorversuche	43
7.1 Berstversuche	43
7.1.1 Versuchsdurchführung	44
7.1.2 Ergebnisse	45
7.1.3 Berstversuch eines Stahl-Druckbehälters	45
7.1.4 Diskussion der Ergebnisse der Berstversuche.....	46
7.2 Tests zu verschiedenen Wärmestrahlungsintensitäten.....	47
7.3 Raumbrandversuche mit der Berufsfeuerwehr Magdeburg	48
7.4 Interpretation der Ergebnisse der Vorversuche im Hinblick auf die Hauptversuche.....	51

8	Experimentelle Untersuchungen nach thermischen Belastungsprofilen	52
8.1	Ergebnisse der Versuchsserie 1.....	53
8.2	Ergebnisse der Versuchsserie 2.....	64
8.3	Ergebnisse der Versuchsserie 3.....	77
9	Physiologische und arbeitsmedizinische Betrachtungen	94
10	Ausblick.....	96

Tabellenverzeichnis

Tabellen Nr.:	Bezeichnung	Seite
1.1	Mitglieder des PbA	15
3.1	Versuchsparameter des Versuchsregimes 1 und Gegenüberstellung mit Vorgaben des Teilschrittes 1	21
4.1	Beschaffte Normaldruck-Atemschutzgeräte	25
4.2	Beschaffte Überdruck-Atemschutzgeräte mit M45x3-Gewinde	25
4.3	Beschaffte Überdruck-Atemschutzgeräte mit ESA-Anschluss	26
5.1	Technische Daten des Wärmeschrankes	27
5.2	Technische Daten der künstlichen Lunge	29
5.3	Technische Daten des Heizfeldes	31
6.1	Verwendete Messstellen	35
6.2	Im Prüfadapter eingesetzte Thermoelemente	36
6.3	Eigenschaften des Kapton-Klebebandes	38
6.4	Glasseideummantelte Thermoelemente	38
6.5	Mantelthermoelemente zur Messung der Einatemtemperatur	39
6.6	Spezifikationen des Almemo-Messsystems	40
6.7	Spezifikationen des Graphtec Datenloggers	40
6.8	Arbeitsschritte zur Versuchsvorbereitung	41
7.1	Details der untersuchten CFK-Druckbehälter	44

Tabellen Nr.:	Bezeichnung	Seite
7.2	Messwerte aus Berstversuchen mit Pressluftflaschen	46
7.3	Maximalwerte für Temperatur und Wärmestrahlung bei Versuchen mit der BF Magdeburg	49
8.1	Übersicht zu den Versuchsbedingungen der VS_1 bis VS_3	53
8.2	Maximaltemperaturen bei VS_1	57
8.3	Ein- und Ausatemwiderstände der VS_1	60
8.4	Maximaltemperaturen der VS_2	67
8.5	Maximaltemperaturen im Inneren der Druckbehälter (VS_2)	70
8.6	Maximaltemperaturen der VS_3	80
8.7	Maximaltemperaturen im Inneren der Druckbehälter (VS_3)	82
8.8	Ausfallzeiten der untersuchten Geräte der VS_3	88
9.1	Zeit bis zum Erreichen von Schwellenwert-Temperaturen (V28 bis V36)	95
9.2	Zeit bis zum Erreichen von Schwellenwert-Temperaturen (V37 bis V45)	95

Abbildungsverzeichnis

Bild Nr.:	Bezeichnung	Seite
3.1	Wärmeschranktemperaturen bei den Versuchsserien (VS) 1 - 3	22
3.2	Gesamtaufnahme Kamera 1 während der Wärmestrahlungsbeaufschlagung	23
3.3	Detailaufnahme der Kamera 2	23
3.4	Ablaufschema der Versuchsserien 1 und 2	24
5.1	Wärmeschrank innen	28
5.2	Im Wärmeschrank verbaute Stroz-D-Kupplungen mit hitzebeständigen Viton-Dichtungen	28
5.3	Innenansicht der künstlichen Lunge	30
5.4	Frontansicht der künstlichen Lunge	30
5.5	Sheffield-Prüfkopf	30
5.6	Sheffield-Prüfkopf mit Maske	30
5.7	Heizfeld auf verfahrbarem Gestell	32
5.8	Schaltschrank	32
5.9	Flaschenbatterie	32
5.10	Verbrennungsluftventilator	32
5.11	Vom Heizfeld erzeugte Wärmestromdichten in Abhängigkeit vom Abstand	33
5.12	Halteplattform für die VS_1	33
5.13	Halteplattform für die VS_2 und VS_3	33

Bild Nr.:	Bezeichnung	Seite
6.1	Prüfadapter zur Messung der Temperatur im Druckbehälter	36
6.2	Messstellen (MST) gemäß Tabelle 6.1	37
6.3	Instrumentierter Lungenautomat	39
6.4	Almemo-Messsystem	40
6.5	Graphtec GL200 midiLOGGER	40
6.6	Bauformen von MDL	43
7.1	Instrumentierter Druckbehälter	44
7.2	Temperatur- und Druckverläufe Berstversuche; Kunststoff-Liner (links) Alu-Liner (rechts)	45
7.3	Temperatur- und Druckverlauf für Berstversuch mit Stahldruckbehälter	46
7.4	Vorversuch mit Wärmestrahlungsbeaufschlagung	48
7.5	Temperaturverläufe bei Realbrandübung 3 mit der BF Magdeburg	50
8.1	Temperaturverlauf des Versuches 4 (Stahl-Druckbehälter)	54
8.2	Temperaturverlauf des Versuches 8 (CFK-Druckbehälter)	54
8.3	Temperaturverlauf des Versuches 9 (CFK-Druckbehälter)	56
8.4	Temperaturverlauf des Versuches 2 (CFK-Druckbehälter)	57
8.5	Atemlufttemperatur bei Stahl-Druckbehältern der VS_1	58
8.6	Atemlufttemperatur bei CFK-Druckbehältern der VS_1	58

Bild Nr.:	Bezeichnung	Seite
8.7	Gemittelte Atemlufttemperaturen bei CFK- und Stahl- Druckbehältern der VS_1	59
8.8	Atemwiderstände im Versuch 3 (Überdruckgerät)	60
8.9	Atemwiderstände im Versuch 7 (Überdruckgerät)	61
8.10	Atemwiderstände im Versuch 1 (Normaldruckgerät)	62
8.11	Atemwiderstände im Versuch 4 (Normaldruckgerät)	62
8.12	Temperaturverlauf des Versuches 25 (Stahl-Druckbehälter)	64
8.13	Temperaturverlauf des Versuches 12 (CFK-Druckbehälter)	64
8.14	Temperaturverlauf des Versuches 14 (CFK-Druckbehälter)	65
8.15	Temperatur- und Druckverlauf des Versuches 23 (CFK- Druckbehälter)	66
8.16	Temperaturverläufe des Versuches 18 (CFK-Druckbehälter)	68
8.17	Temperatur- und Druckverlauf des Versuches 21 (Stahl- Druckbehälter)	69
8.18	Temperatur- und Druckverlauf des Versuches 22 (CFK- Druckbehälter)	69
8.19	Atemlufttemperatur bei Stahl-Druckbehältern der VS_2	71
8.20	Atemlufttemperatur bei CFK-Druckbehältern der VS_2	71
8.21	Gemittelte Atemlufttemperaturen bei CFK- und Stahl- Druckbehältern der VS_2	72
8.22	Atemwiderstände im Versuch 11 (Überdruckgerät)	73
8.23	Atemwiderstände im Versuch 18 (Überdruckgerät)	74
8.24	Atemwiderstände im Versuch 19 (Überdruckgerät)	74
8.25	Atemwiderstände im Versuch 10 (Normaldruckgerät)	75

Bild Nr.:	Bezeichnung	Seite
8.26	Atemwiderstände im Versuch 13 (Normaldruckgerät)	75
8.27	Atemwiderstände im Versuch 21 (Normaldruckgerät)	76
8.28	Temperaturverlauf des Versuches 32 (Stahl-Druckbehälter)	78
8.29	Temperaturverlauf des Versuches 34 (CFK-Druckbehälter)	78
8.30	Temperatur- und Druckverlauf des Versuches 39 (CFK-Druckbehälter)	81
8.31	Temperatur- und Druckverlauf des Versuches 41 (Stahl-Druckbehälter)	81
8.32	Temperatur- und Druckverlauf des Versuches 45 (CFK-Druckbehälter)	82
8.33	Atemlufttemperatur bei Stahl-Druckbehältern der VS_3	84
8.34	Atemlufttemperatur bei CFK-Druckbehältern der VS_3	84
8.35	Vergleich der Atemlufttemperaturen bei CFK- und Stahl-Druckbehältern der VS_3	86
8.36	Atemwiderstände im Versuch 30 (Überdruckgerät)	87
8.37	Atemwiderstände im Versuch 33 (Normaldruckgerät)	87
8.38	Atemwiderstände im Versuch 41 (Normaldruckgerät)	88
8.39	Atemwiderstände im Versuch 36 (Überdruckgerät)	89
8.40	Atemwiderstände im Versuch 38 (Überdruckgerät)	89
8.41	Atemwiderstände im Versuch 39 (Überdruckgerät)	90
8.42	Atemwiderstände im Versuch 45 (Überdruckgerät)	90
8.43	Atemwiderstände im Versuch 35 (Überdruckgerät)	91
8.44	Atemwiderstände im Versuch 37 (Normaldruckgerät)	92

Abkürzungsverzeichnis

AFKzV	Ausschuss "Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung" des Arbeitskreises V der Ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder
BAM	Bundesanstalt für Materialprüfung
BKS	Brandschutz- und Katastrophenschutzschule Heyrothsberge
CFK	Carbonfaser verstärkter Kunststoff
ESA	Einheitssteckanschluss
HBUEA	holzbeheizte Brandübungsanlagen
IBK	Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge
IdF LSA	Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt
IMK	Innenministerkonferenz
PbA	Projektbegleitender Ausschuss
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
Ref.	Referat
u.a.	unter anderem
vfdb	Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.
VR	Versuchsregime
VS	Versuchsserie

Literaturverzeichnis

- [1] Brein, D.; Grabski, R.; Kunkelmann, J.; Neske, M.; Pasch, U.; „Anforderungen und Prüfmethode für die Persönlichen Schutzausrüstungen der Feuerwehreinsatzkräfte im Brandeinsatz unter besonderer Berücksichtigung des Atemschutzes (Persönliche Schutzausrüstung - PSA) - Teilschritt 1 - “; Bericht Nr.: 161 des IMK-Brandschutzforschungsprogramms; Heyrothsberge/Karlsruhe; 2010
- [2] Prospekt der Firma G.Maier Elektrotechnik GmbH zu den vertriebenen Wärmeschranken
- [3] Bedienungsanleitung der künstlichen Lunge der Firma INSPEC International Limited
- [4] Produktinformation der Firma INSPEC International Limited zum Sheffield Prüfkopf
- [5] Produktinformation der Firma Goch GmbH & Co. KG zum Heizfeld bestehend auf vier Porenstrahlern
- [6] Produktinformation der Firma TC Direct zu PFA-ummantelten Thermoelementen
- [7] Produktinformation der Firma 3M zum Kapton Klebeband
- [8] Produktinformation der Firma Temperaturmesselemente Hettstedt GmbH
- [9] Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, ALMEMO Handbuch, 5. überarbeitete Auflage, Holzkirchen 2004
- [10] GRAPHTEC corporation/ALTHEN GmbH Meß- und Sensortechnik, GL200, Benutzerhandbuch, Dezember 2007
- [11] Purser, David A.; SFPE Handbook of Fire Protection Engineering; 4. Auflage; Kapitel 6-2; S. 143 – 144, Society of Fire Protection Engineers 2008
- [12] Bradel, J.; Siebrecht, M.; Gutachterliche Untersuchung der DEKRA EXAM GmbH zu thermisch beaufschlagten Atemschutzgeräten des IMK-PSA-2010 Projektes; Essen Juni 2013, nicht öffentlich

Danksagung

An dieser Stelle möchten sich die Autoren des Berichtes bei der Berliner Feuerwehr und der Feuerwehr Frankfurt für ihr Engagement bei der Beschaffung der im Teilschritt 2 des PSA-Forschungsvorhabens untersuchten Pressluftatmer, Masken und Lungenautomaten bedanken. Besonderer Dank gilt ebenfalls den Kolleginnen und Kollegen des Institutes für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge (IBK, früher BKS Heyrothsberge) für die Unterstützung bei der Beschaffung der untersuchten Atemschutzgeräte sowie deren Prüfung bei Erstinbetriebnahme. Auch die Unterstützung weiterer Berufsfeuerwehren und Landesfeuerweherschulen für das Übersenden ausgemusterter Atemschutzgeräte für Voruntersuchungen sei an dieser Stelle erwähnt. Weiterhin gebührt den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses (PbA), insbesondere für das große Engagement, das Forschungsprojekt fachlich und inhaltlich zu unterstützen, besonderer Dank.

1 Einleitung

Der nachfolgende Bericht zu den Ergebnissen des Teilschrittes 2 fußt auf den Ergebnissen des Teilschrittes 1 des PSA-Forschungsvorhabens, die im Forschungsbericht Nr. 161 der IMK-Brandschutzforschung im Sommer 2010 mit dem Titel „Anforderungen und Prüfmethoden für die Persönlichen Schutzausrüstungen der Feuerwehreinsatzkräfte im Brandeinsatz unter besonderer Berücksichtigung des Atemschutzes (Persönliche Schutzausrüstung - PSA)“ veröffentlicht wurden. Während die Untersuchungen des Teilschrittes 1 überwiegend das Ziel verfolgten, den aktuellen Wissensstand zu PSA-Komponenten, die im Innenangriff getragen werden darzustellen, wurden im Teilschritt 2 konkrete Experimente mit 45 Geräteensembles (9 Gerätetypen je in 5-facher Ausführung), bestehend aus je einem Pressluftatmer (inklusive Druckbehälter), Lungenautomaten und Vollmaske, in einem später im Bericht beschriebenen neu entwickeltem Versuchstand durchgeführt. Im Fokus stand dabei nicht, einen „Sieger“ oder einen „Verlierer“ herauszustellen. Es sollte vielmehr der Ist-Zustand der thermischen Belastbarkeit der Versuchsobjekte wissenschaftlich und reproduzierbar untersucht werden.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass im Verlauf der Untersuchungen im Teilschritt 2 des Forschungsvorhabens Ergebnisse des Teilschrittes 1 weiter konkretisiert wurden. Dies hatte jedoch zur Folge, dass das im Teilschritt 1 formulierte thermische Belastungsprofil modifiziert werden musste. Insbesondere in den Kapiteln 3.1 und 3.2 wird hierzu näher eingegangen.

Wie auch im Teilschritt 1 des Projektes, wurde bei der Sitzung des Ausschusses „Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung“ (AFKzV) des Arbeitskreises V der Ständigen Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder auf seiner Frühjahrssitzung 2010 festgelegt, dass auch im Teilschritt 2 des PSA-Forschungsvorhabens der „Projektbegleitende Ausschuss“ (PbA) in seiner personellen Besetzung bestehen bleibt.

Tabelle 1.1: Mitglieder des PbA

Mitglied	Entsendende Institution
LBD Hermann Schröder (Vorsitzender)	Innenministerium Baden-Württemberg
RBrD Dr. Thomas Skrzek (Stellvertreter)	Institut der Feuerwehr NRW
Dr. Dirk Hageböling	Vorsitzender Referat 8 der vfdb, Feuerwehr Bochum
BrOAR Reiner Wirth	Feuerwehr Essen
BrD Bernd Dietschke	Berliner Feuerwehr
Dr. Gisbert Rodewald	Vorsitzender der PG FwDV Institut der Feuerwehr NRW
Ltd. BD Hubert Lux	Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge
Dr. Roland Demke	Staatliche Feuerwehrschnule Würzburg
Tobias Bleyer	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Dr. Stephan Aris	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Dr. Georg W. Mair	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Matthias Drobig	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
Detlef Garz	FUK Mitte, Sachgebiet „Feuerwehren und Hilfeleistungsorganisationen“ der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV)
Tim Pelzl	DGUV
Michael Siebrecht	DEKRA EXAM GmbH
Stephan Finger	DEKRA EXAM GmbH
Dieter Brein	Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

2 Zusammenfassung

2.1 Ausgangssituation im Teilschritt 1

Das Ziel der Untersuchungen im Teilschritt 1 war die Ermittlung der tatsächlich im Einsatz und bei Übungen vorliegenden thermischen Bedingungen, ohne dabei den „Worst Case“ zu betrachten. Die Ermittlung dieser Konditionen für Übungsszenarien gestaltete sich Erfolg versprechend. Im ersten Schritt wurden Messungen in holzbefeuerten Brandübungsanlagen (HBUEA) und gasbetriebenen Feuerwehrübungshäusern durchgeführt, wobei die dort vorherrschenden Bedingungen messtechnisch erfasst wurden. Komplizierter erwies sich dagegen die Ermittlung der thermischen Verhältnisse bei Einsätzen. Während Übungsanlagen durch den Bediener/Trainer der entsprechenden Anlage hinsichtlich der vorherrschenden Bedingungen gesteuert werden können und zumeist standardisierte Übungsszenarien eingestellt werden, folgen Einsätze keinem solchen Schema. Auch die messtechnische Erfassung ist nicht möglich. Insofern wurde bei der Erstellung dieses thermischen Belastungsprofils davon ausgegangen, dass limitierend für die Länge eines Einsatzes der Atemluftvorrat ist. Aus durchgeführten Berechnungen und Vorgaben in Feuerwehrdienstvorschriften wurde geschlussfolgert, dass die maßgebliche thermische Beaufschlagung der Feuerwehreinsatzkraft über einen Zeitraum von ca. 10 min stattfindet und durch die Überlagerung von Konvektion und Wärmestrahlung gekennzeichnet ist [1].

2.2 Versuchsregime

Um die ermittelten thermischen Bedingungen im Experiment umsetzen zu können, wurde im Teilschritt 1 ein Versuchsregime vorgeschlagen, das bei den Untersuchungen im Teilschritt 2 angewandt werden sollte [1]. Im Verlauf der Bearbeitung und der Auswertung von Vorversuchen im Teilschritt 2, die am Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt (IdF LSA) durchgeführt wurden, stellte sich heraus, dass die gewählten thermischen Bedingungen zu hart gewählt waren und über die praktischen Bedingungen hinaus gingen. Es wurden unter Einbeziehung des PbA drei Versuchsregime erarbeitet, die sich stufig aufsteigend an die Belastungsgrenze der Pressluftatmer und Masken näherten. Im Rahmen der 27 Versuche, die den Versuchsregimen 1 und 2 folgten, betrug die Versuchszeit 10 min. Bei diesen Versuchen wurde je ein Geräteensemble, bestehend aus Pressluftatmer und Maske, im Wärmeschrank konvektiv wärmebeaufschlagt. 3-mal gleichverteilt über die Versuchszeit von 10 min kam eine Hochleistungswärmestrahlungsquelle zum Einsatz und beaufschlagte die Geräte zusätzlich. Um realistische Bedingungen eines Einsatzes

zu simulieren, wurden die Geräte während des gesamten Versuches mittels einer künstlichen Lunge beatmet. Die Versuchszeit im 3. Versuchsregime betrug 15 min. Auf den Einsatz der Wärmestrahlungsquelle wurde bei diesen Versuchen verzichtet. Bei allen 18 Versuchen, die auf der Basis der Bedingungen des Versuchsregimes 3 durchgeführt wurden, kam ebenfalls die künstliche Lunge zum Einsatz (ausführliche Darstellung in den Kapiteln 3 und 5).

2.3 Ergebnisdiskussion

Im Teilschritt 2 wurden von den Herstellern Dräger, Interspiro und MSA Auer je drei Gerätetypen, bestehend aus Trageplatte (mit Manometer), Druckbehälter, Lungenautomat und Vollmaske experimentell untersucht. Jeder dieser neun Gerätetypen wurde in 5-facher Ausführung beschafft. In drei Versuchsregimen mit aufsteigender Intensität der Wärmebeaufschlagung wurde die thermische Belastbarkeit dieser Geräte untersucht.

Im Rahmen der Versuchsserie 1, die unter Zugrundelegung des Versuchsregimes 1 durchgeführt wurde, wurde ein Geräteensemble je Gerätetyp untersucht. Hierbei kam es zu keinen funktionellen Ausfällen. Gleichwohl wurden die Geräte überwiegend durch die zum Einsatz gekommene Wärmestrahlungsquelle verursacht, äußerlich beschädigt. Hiervon betroffen waren vorrangig Lungenautomaten, Flaschenbänder, Druckbehälter (unkritische leichte Beschädigungen auf der Oberfläche), Manometer und Hochdruckleitungen. Masken wurden seltener und nur geringfügig beschädigt. Die Beschädigungen sind insgesamt als unkritisch zu werten, da diese nur äußerlich auftraten.

Die thermischen Randbedingungen der Versuchsserie 2 entsprachen den Vorgaben des Versuchsregimes 2. Hierbei wurden zwei Geräteensembles je Gerätetyp untersucht. Wie bei den Versuchen der Versuchsserie 1 kam es zu keinen funktionellen Ausfällen, wenngleich äußerliche Beschädigungen an den Komponenten auftraten. Es wurden die gleichen Komponenten wie in der Versuchsserie 1 beschädigt, obgleich das Ausmaß der Beschädigungen aufgrund der stärkeren Wärmebeaufschlagung etwas höher war. Auch bei diesen Experimenten wurden Masken seltener und nur geringfügig beschädigt. Es lässt sich auch hier festhalten, dass die Beschädigungen insgesamt als unkritisch zu werten sind.

Bei der Anwendung des Versuchsregimes 3 kam es in der Versuchsserie 3 zu drei funktionellen Ausfällen. Es fielen zwei Normaldruckgeräte (Stahl-Druckbehälter) und ein Überdruckgerät (CFK-Druckbehälter) aus. Gekennzeichnet waren diese Ausfälle durch kontinuierlich steigende Einatemwiderstände. Im weiteren Verlauf stiegen die Einatemwiderstände weiter an, bis es zum Blockieren der Lungenautomaten kam. Die Lungenautomaten bliesen in der Folge ab.

Zusätzlich wurden bei vier weiteren Geräteensembles Atemwiderstände registriert, die vom IdF LSA als untersuchungsbedürftig eingestuft wurden. Auch bei diesen Geräten wurden stetig steigende Einatemwiderstände gemessen. Ausfälle wurden jedoch nicht beobachtet, da sie bei Versuchsende auftraten und anschließend die Versuche regulär beendet wurden.

Die sieben eben genannten Geräteensembles wurden einer weitergehenden Untersuchung der DEKRA EXAM GmbH überstellt. Bei der Untersuchung der drei funktionell ausgefallenen Geräte wurde festgestellt, dass diese Ausfallerscheinungen darin begründet waren, dass Beschädigungen im Bereich der Membranen der Lungenautomaten während der thermischen Beaufschlagung aufgetreten waren (siehe auch Abschnitt 8.3). Bei den weiteren vier vom IdF LSA als untersuchungsbedürftig eingestuften Geräteensembles wurde bei drei Geräten festgestellt, dass die Ursache des Ausfallens ebenfalls Beschädigungen im Bereich der Membranen der Lungenautomaten waren. Das vierte vom IdF LSA als untersuchungsbedürftig eingestufte Geräteensemble funktionierte bei den durchgeführten Nachuntersuchungen der DEKRA EXAM GmbH einwandfrei, wobei keine Grenzwertüberschreitungen dokumentiert wurden.

3 Thermische Belastungsprofile

3.1 Motivation, Begründung und Festlegung der Versuchsregime

Im Abschnitt 4.3 des Forschungsberichtes zum Teilschritt 1 wurden die maßgeblichen thermischen Belastungsprofile für holzbefeuerte Brandübungsanlagen (HBUEA) und den Feuerwehreinsatz ermittelt. In den durchgeführten Untersuchungen im HBUEA der Berufsfeuerwehr Karlsruhe wurde festgestellt, dass auf den Oberflächen der Komponenten der Atemschutztechnik Temperaturen von mehr als 100 °C vorlagen und kurzfristige, von einwirkender Wärmestrahlung verursacht, Temperaturspitzen von bis zu 168 °C auftraten. Es wurde als realistisch eingeschätzt, dass bei Einsätzen und Übungen regelmäßig Temperaturen in diesem Intervall auftreten können. Diese Werte wurden bei der Erstellung der thermischen Belastungsprofile berücksichtigt [1].

Es wurde festgelegt, dass im Rahmen von Experimenten an der Oberfläche der zu untersuchenden PSA-Komponenten durch konvektive Wärmebeaufschlagung eine „Dauertemperatur“ von 100 °C erzeugt werden soll. Ergänzt werden sollten diese Experimente durch das Zuschalten einer Wärmestrahlungsquelle, um kurzzeitige Spitzenwerte an der Oberfläche der zu untersuchenden PSA-Komponenten von mindestens 150 °C zu erreichen. Im Bezug auf die thermischen Bedingungen wurde zwischen thermischen Belastungsprofilen für HBUEA und Einsätzen unterschieden. Während das Belastungsprofil für HBUEA neben der konvektiven Wärmebeaufschlagung mit 250 °C heißer Luft die Wärmestrahlungsbeaufschlagung mit einer Wärmestromdichte von 20 kW/m² vorsah, sollte im Belastungsprofil des Innenangriffes eine Wärmestromdichte von 60 kW/m² angelegt werden. Um realistische Bedingung darzustellen, wurde die Beatmung der untersuchten Atemschutzgeräte mittels einer künstlichen Lunge vorgesehen [1].

Durch den PbA wurde am Ende des Teilschrittes 1 das thermische Belastungsprofil für die Versuche des Teilschrittes 2 nach intensiver Diskussion vorgelegt. Es wurde die Ansicht im PbA vertreten, dass bei der Brandbekämpfung im Innenangriff Einsatzszenarien vorliegen können, bei denen es zur Überlagerung von konvektiver Wärmebeaufschlagung und erhöhter Wärmestrahlung kommt [1].

Als praktisches Beispiel hierfür wurde die „Türöffnungsprozedur“ genannt, bei der beim Öffnen der Tür Flammen aus einem brennenden Raum im Bereich der oberen Türzarge heraustreten und einer der knieenden Feuerwehreinsatzkräfte zur Kühlung der heißen Rauchgasschicht Sprühstöße in den Raum abgibt. Einsatztaktisch bedingt kann und wird diese Prozedur in Abhängigkeit vom Ausmaß des Brandes wiederholt

werden. Unabhängig von diesem Szenario kommt es im Innenangriff zwangsläufig zu weiteren Situationen, bei denen sich die Wärmeübertragungsarten Konvektion und Wärmestrahlung überlagern.

Zu Beginn des Teilschrittes 2 wurden ausgewählte Vorversuche am IdF LSA durchgeführt (siehe Abschnitt 7). Es stellte sich heraus, dass sowohl die gewählte Lufttemperatur im Wärmeschrank als auch die Intensität der Wärmestrahlungsquelle im Teilschritt 1 zu hoch angesetzt wurden. Die bei diesen Vorversuchen untersuchten gebrauchten aber noch funktionsfähigen Geräte wiesen nach den Experimenten in der Praxis (Erhebung zu Unfällen und Beinaheunfällen im Teilschritt 1) bisher nicht beobachtete hohe Beschädigungsgrade auf, so dass in Abstimmung mit dem PbA die im thermischen Belastungsprofil formulierten thermischen Bedingungen reduziert wurden. Gestützt wurde diese Maßnahme durch Ergebnisse einer 3-tägigen Übung der Berufsfeuerwehr Magdeburg, bei der in einem kurz vor dem Abriss stehenden 6-stöckigen Mehrfamilienhaus Raumbrandversuche messtechnisch begleitet wurden. Details zu diesen Messungen können im Abschnitt 7.1 nachgelesen werden.

3.2 Versuchsregime

Die im Abschnitt 3.1 erläuterten Versuchsbedingungen mussten durch das IdF LSA im Teilschritt 2 weiter konkretisiert werden. Für den Versuchsbetrieb, in dem reproduzierbare Ergebnisse zu generieren sind, musste ein Versuchs- bzw. Messkonzept erarbeitet werden, das die in der Theorie im Teilschritt 1 ermittelten thermischen Anforderungen widerspiegelt und gleichzeitig neue Erkenntnisse berücksichtigt. Darin enthalten war einerseits die praktische Umsetzung durch die Auslösung von Beschaffungen und andererseits die Durchführung von Vorversuchen. Im Ergebnis dieser Voruntersuchungen wurde dann das erste Versuchsregime erarbeitet, das, wie beschrieben, jedoch im Vergleich zu den Vorgaben des Teilschrittes 1 in einigen Punkten verändert werden musste. Während der Versuchszeit von 10 min, in der die Prüfobjekte bei einer Temperatur von ca. 140 bis 150 °C im Wärmeschrank ausgesetzt waren, wurden sie während dieser Zeit 3-mal gleichverteilt für jeweils 15 s mittels Infrarotwärmestrahlung beaufschlagt. Je eines der neun Geräteensembles wurde bei diesen Bedingungen untersucht. Es sei darauf hingewiesen, dass der Wärmeschrank unter anderem unter Zuhilfenahme eines Ventilators betrieben wird, der starke Konvektion erzeugt, die über die Praxis hinaus geht (vergleichbar mit einem umluftbetriebenen Backofen). Die Tabelle 3.1 zeigt eine Übersicht zu den Veränderungen.

Tabelle 3.1: Versuchsparameter des Versuchsregimes 1 und Gegenüberstellung mit Vorgaben des Teilschrittes 1 [1]

	Versuchsparameter gemäß	
	Vorgaben Teilschritt 1	neuen Erkenntnissen im Teilschritt 2 (Versuchsregime 1)
Versuchszeit	10 Minuten	10 Minuten
Wärmeschranktemperatur	250 °C	siehe Bild 3.1
Wärmestromdichte (3-maliges Zuschalten für 15 s gleichverteilt über der Versuchszeit)	60 kW/m ²	30 kW/m ²

In Abstimmung mit dem PbA wurde ein weiteres Versuchsregime erstellt, welches sich nur durch die Erhöhung der Lufttemperatur im Wärmeschrank um ca. 20 °C gegenüber dem Versuchsregime 1 unterscheidet. Im Rahmen dieser Versuche wurden dann je Gerätetyp zwei Geräteensembles experimentell untersucht.

Anschließend wurde ein drittes Versuchsregime erarbeitet, welches sich jedoch grundsätzlich von den beiden zuvor genannten unterscheidet, denn auf den Einsatz der Wärmestrahlungsquelle wurde verzichtet. Zusätzlich wurde die Versuchszeit auf 15 min erhöht. Die Temperatur im Wärmeschrank lag im Temperaturbereich von ca. 170 °C bis 190 °C. Untersucht wurden je Gerätetyp 2 Geräteensembles. Bild 3.1 zeigt beispielhaft einen Vergleich dreier Temperaturverläufe im Wärmeschrank der Versuchsserien 1 – 3, die auf der Basis der Versuchsregime 1 – 3 entstanden (siehe auch Kapitel 8).

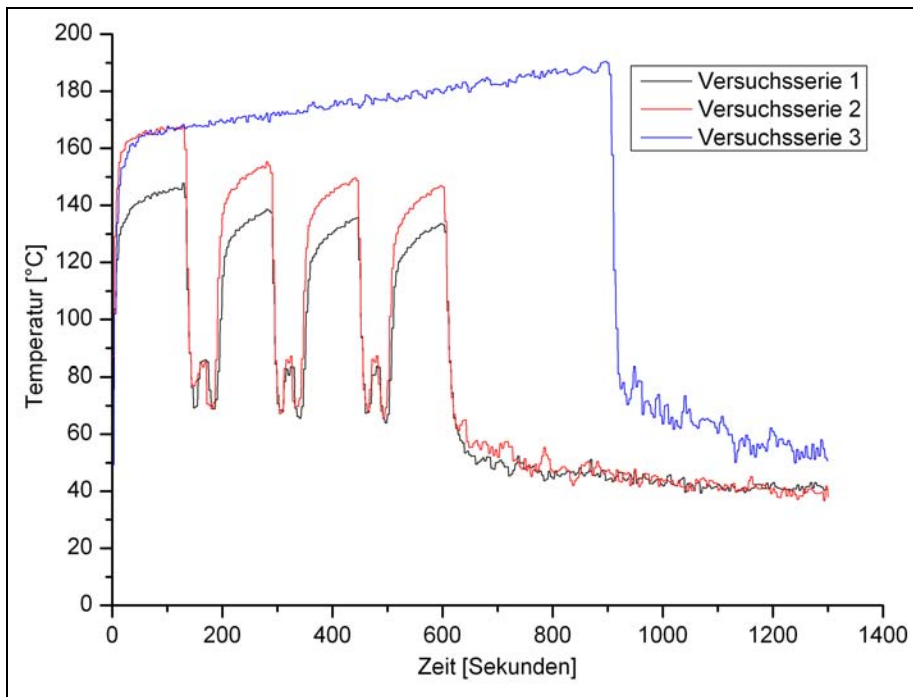


Bild 3.1: Wärmeschranktemperaturen bei den Versuchsserien (VS) 1 - 3

3.3 Versuchsdurchführung

Vor Beginn des Versuches wurden folgende Verfahrensschritte durchgeführt:

1. Lagerung der Versuchsobjekte bei Umgebungstemperatur,
2. Aufheizen des Wärmeschrankes (ca. 5 h) bis die Temperatur in der Schamottsteinschicht $T_{\text{Schamotte}} = 240 \text{ °C}$ betrug (siehe hierzu Abschnitt 5.1 – Wärmeschrank),
3. Druckentlastung des Druckbehälters auf 200 bar (bevor Einsatzkräfte in der Praxis hitzeexponierte Bereiche erreichen, ist der Atemluftvorrat etwa bis zu diesem Niveau gesunken),
4. Anbringen der Messstellen am Versuchsobjekt,
5. Fotodokumentation der Messstellen und
6. Öffnen des Wärmeschrankes und Beschickung mit dem Versuchsobjekt.

Die Versuche der VS_1 und VS_2 wurden mittels zweier Videokameras aufgezeichnet. Die Aufnahmen der Kamera 1 dienten dazu, den Gesamt Ablauf jedes einzelnen Versuches aufzuzeichnen. Kamera 2 war auf dem verfahrbaren Wärmestrahler montiert und zeichnete Detailaufnahmen der Versuchsobjekte während der Wärmestrahlungsbeaufschlagung auf. Hierdurch konnte der Beschädigungsverlauf verfolgt werden.



Bild 3.2: Gesamtaufnahme Kamera 1 während der Wärmestrahlungsbeaufschlagung



Bild 3.3: Detailaufnahme der Kamera 2

Bei den Versuchen der VS_3 kam aufgrund des Fehlens der Wärmestrahlungsbeaufschlagung nur die Kamera 1 zum Einsatz.

Nach Beendigung des Versuches wurden die nachfolgend dargestellten Arbeitsschritte ausgeführt:

1. Öffnen der Wärmeschranktüren und Abschalten des Wärmeschrankes,
2. Weitere Veratmung der Versuchsobjekte im Wärmeschrank bis zum Restdruckwarnniveau,
3. Entnahme und Abkühlen der Versuchsobjekte und
4. Fotodokumentation der Messstellen und der Beschädigungen.

Zusammenfassend ist im Bild 3.4 eine schematische Darstellung des Versuchsablaufs der Versuchsserien 1 und 2 dargestellt.

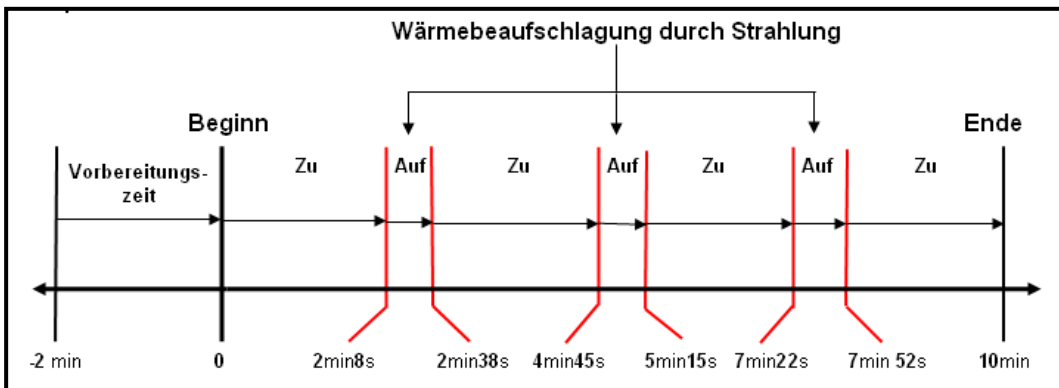


Bild 3.4: Ablaufschema der Versuchsserien 1 und 2

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass während der im Bild 3.4 ausgewiesenen Vorbereitungszeit der Wärmeschrank beschickt wurde. Zusätzlich wurden die Prüflinge mit der künstlichen Lunge verbunden und Thermoelemente an die Messwerterfassung angeschlossen. Die im Bild 3.4 angegebenen Versuchszeiten 2 min 8 s, 4 min 45 s und 7 min 22 s markieren die Zeitpunkte, bei denen die Wärmeschranktüren geöffnet wurden, um die 15 s dauernde Wärmestrahlungsbeaufschlagung zu bewerkstelligen. Die Versuchszeiten 2 min 38 s, 5 min 15 s und 7 min 52 s markieren hingegen die Zeitpunkte, bei denen die Türen wieder geschlossen waren, um die konvektive Wärmebeaufschlagung fortzuführen.

Bei Experimenten der Versuchsserie 3 kam wie erwähnt keine Wärmestrahlungsquelle zum Einsatz. Aber auch hier wurde die im Bild 3.4 dargestellte Vorbereitungszeit dazu genutzt, den Wärmeschrank zu beschicken sowie die künstliche Lunge mit den Versuchsobjekten zu verbinden und die Thermoelemente an die Datenlogger anzuschließen.

4 Auswahl und Beschaffung von Pressluftatmern

Die im Rahmen der Versuche untersuchten Atemschutzgeräte-Typen wurden bereits im Teilschritt 1 durch das vfdb-Referat 8 vorgeschlagen. Bis zur tatsächlichen Beschaffung der Geräte im Teilschritt 2 kam es zu marginalen Änderungen bezüglich der Gerätetypen. Nachfolgend dargestellt sind in drei Tabellen die untersuchten Atemschutzgerätetypen.

Tabelle 4.1: Beschaffte Normaldruck-Atemschutzgeräte

Normaldruck mit Rundgewindeanschluss		
Interspiro	Dräger	MSA Auer
- Spiromatic QS EU ST Kevlar	- PSS90 mit Manometer	- AirGo Pro B-LG-R-D-SL
- Lungenautomat S N M	- PSS Lungenautomat – N	- LA AutoMaXX N
- Vollmaske S N NR schwarz	- Panorama Nova RA PC	- Vollmaske Ultra Elite
- Stahl-Druckbehälter 6L / 300 bar IS Zyl.	- Stahl-Druckbehälter 6 L / 300 bar (Ventil V11111 G 5/8“ gerade, AS)	- Stahl-Druckbehälter 6L / 300 bar

Tabelle 4.2: Beschaffte Überdruck-Atemschutzgeräte mit M45x3-Gewinde

Überdruck mit M45x3-Gewinde		
Interspiro	Dräger	MSA Auer
- Spiromatic QS EU L Kevlar	- PSS100 mit Manometer	- Grundgerät AirGo EXX-SW-B-ST-R-D-SL
- Lungenautomat S PE M	- PSS Lungenautomat–AE	- Lungenautomat AutoMaXX-AE
- Vollmaske S PE NR schwarz	- FPS 7000 PE Maske	- Vollmaske 3S-PF
- CFK-Druckbehälter 6,7L / 300 bar Spirolite MFA (Kunststoffliner)	- CFK-Druckbehälter 6.8L / 300 bar (Aluliner)	- CFK-Druckbehälter 6,8L / 300 bar (Kunststoffliner)

Tabelle 4.3: Beschaffte Überdruck-Atemschutzgeräte mit ESA-Anschluss

Überdruck mit Einheitssteckanschluss (ESA)		
Interspiro	Dräger	MSA Auer
- Spiromatic QS EU ST Y-Stück Kevlar	- PSS7000 mit Manometer	- Grundgerät AirMaXX SL
- Lungenautomat S ESA	- PSS Lungenautomat ESA	- LA AutoMaXX-ESA- Short
- Vollmaske S ESA	- FPS 7000 ESA Maske	- Vollmaske Ultra Elite PF-ESA
- CFK-Druckbehälter 6,8L / 300 bar G-NLL EFV (Alu-Liner)	- CFK-Druckbehälter 6.8L / 300 bar (Alu-Liner)	- CFK-Druckbehälter 6,9L / 300 bar (Alu-Liner)

Für die Beschaffung wurde vom PbA festgelegt, dass das IdF LSA zu keiner Zeit als Beschaffer auftritt. Es sollte damit verhindert werden, dass für die Hersteller die Zweckbestimmung ersichtlich ist. Daher wurde in Kooperation mit verschiedenen Institutionen, die offiziell als Käufer auftraten, der Kauf bewerkstelligt.

In der Atemschutzwerkstatt des IBK erfolgte dann vor den jeweiligen Versuchen die „Prüfung bei Erstinbetriebnahme“ und die Aufnahme in die Atemschutzgeräte-Datenbank.

Vor Beginn der experimentellen Untersuchungen wurden den Geräteherstellern per Los einer der Kennbuchstaben „A“, „B“ oder „C“ zugeordnet. Des weiteren wird im Kapitel 8 (Experimentelle Untersuchungen nach thermischen Belastungsprofilen) bei CFK-Druckbehältern darauf verzichtet, Angaben zum Material des Liners zu geben, da von der Firma Dräger nur Druckbehälter mit Aluminium-Linern für Experimente zur Verfügung standen.

5 Versuchsstand

Durch die im Teilschritt 1 definierten und im Teilschritt 2 konkretisierten Versuchsbedingungen musste vom IdF LSA ein Versuchsstand entworfen werden, der alle Belange der beabsichtigten Experimente vereint und damit ein Unikat darstellt. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Komponenten und deren Details erläutert.

5.1 Wärmeschrank

Das Herzstück des Versuchsstandes bildet ein Wärmeschrank der Firma *G. MAIER Elektrotechnik GmbH*.

Tabelle 5.1: Technische Daten des Wärmeschrankes [2]

Typenbezeichnung:	AE_8
Breite (innen):	1,0 m
Höhe (innen):	1,2 m
Tiefe (innen):	0,6 m
Volumen (innen):	0,749 m ³
Leistungsaufnahme:	4,8 kW
Sonstige Funktionen:	$T_{\max} = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$
	USB-Schnittstelle
	Programmierbare Rampen

Der Wärmeschrank musste nach den Bedürfnissen der Versuchsregime modifiziert werden. Hierzu wurden in die Rückwand zwei Löcher mit einem Durchmesser von 4 cm gebohrt, um die von der künstlichen Lunge kommenden und aus Silikon bestehenden Beatmungsschläuche mit dem Prüfling verbinden zu können. Die Schläuche sind innerhalb des Wärmeschrankes mit Storz-D-Kupplungen ausgestattet (Bilder 5.1 und 5.2), was eine schnelle Verbindung zwischen Versuchsobjekt und künstlicher Lunge sichert. Bild 5.1 zeigt den geöffneten Wärmeschrank.



Bild 5.1: Wärmeschrank innen



Bild 5.2: Im Wärmeschrank verbaute Storz-D-Kupplungen mit hitzebeständigen Viton-Dichtungen

Wie im Bild 5.1 zu sehen, sind im Inneren des Wärmeschrankes zusätzlich Schamottesteine eingelegt. Sie werden im Zuge des Aufheizvorgangs des Wärmeschrankes mit aufgeheizt und verbleiben dort während des gesamten Versuches. Während des Öffnens und Schließens des Wärmeschrankes, um die Wärmestrahlungsquelle zum Einsatz zu bringen, findet ein Wärmeaustausch statt, was eine Abkühlung der Luft im Schrank zur Folge hat. Die aufgeheizten Schamottesteine sichern die schnelle Erwärmung der Luft nach dem Schließen. Am Wärmeschrank sind zusätzlich elektrisch betriebene Antriebe installiert, um die Türen zu öffnen.

5.2 Künstliche Lunge

Zur Beatmung der Versuchsobjekte während des Versuches musste eine künstliche Lunge beschafft werden, die die Versuchsobjekte während der Wärmebeaufschlagung im Wärmeschrank beatmet und so realistische Einsatzbedingungen simuliert. Da jedoch hohe Temperaturen der Einatemluft zu erwarten waren, konnte keine medizinische Lunge (i.d.R. Balglungen) eingesetzt werden, da die darin integrierten luftführenden Komponenten aus Kunststoff bestehen. Heiße Einatemtemperaturen hätten unweigerlich zu deren Beschädigung geführt. Deshalb wurde nach einer alternativen Lösung in Form einer Kolbenlunge gesucht, deren luftführende Komponenten aus Metall bestehen. Nach sehr intensiven Recherchen konnte lediglich

ein Produkt recherchiert werden, das von der in Großbritannien ansässigen Firma *INSPEC International Limited* produziert wird und alle geforderten Spezifikationen erfüllt (s. Bilder 5.3 und 5.4).

Tabelle 5.2: Technische Daten der künstlichen Lunge [3]

Typenbezeichnung:	Breathing Machine
Bauweise	Pneumatische Kolben-/Zylinder-Konstruktion (Aluminium)
Breite (außen):	1,12 m
Höhe (außen):	0,58 m
Tiefe (außen):	0,43 m
Masse:	85 kg
Atemvolumina:	1 L bis 2,5 L
Hubrate Kolben:	15 min ⁻¹ bis 40 min ⁻¹
PC-Schnittstelle:	RS232
Gewählte Konfiguration bei den Versuchen:	25 Hübe min ⁻¹ ; 2 L je Hub

Das Gerät ist zusätzlich mit einem Feindruckmanometer ausgestattet, um die unter der Atemschutzmaske resultierenden Ein- und Ausatemwiderstände zu messen. Mittels eines Datenkabels werden diese Messwerte auf einem speziell konfigurierten PC gespeichert.



Bild 5.3: Innenansicht der künstlichen Lunge



Bild 5.4: Frontansicht der künstlichen Lunge

5.3 Sheffield-Prüfkopf

Zur Positionierung der Atemschutzmaske wurde ein Sheffield-Prüfkopf eingesetzt, welcher beispielsweise auch bei Prüfungen gemäß DIN EN 136 (Vollmasken - Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung) zur Anwendung kommt und im Normalfall einen mit Kunststoff überzogenen Aluminiumkern aufweist. Da sich der Prüfkopf während der Versuche im Wärmeschrank befindet und der Kunststoff der Kopfoberfläche nicht thermisch stabil ist, musste der Prüfkopf seitens der Herstellerfirma komplett aus Aluminium gefertigt werden.



Bild 5.5: Sheffield-Prüfkopf



Bild 5.6: Sheffield-Prüfkopf mit Maske

Der Prüfkopf verfügt über konzentrische Rohre zum Anschluss einer künstlichen Lunge und über einen Anschluss zur Messung des in der Maske vorherrschenden Drucks [4].

Um im Rahmen der Vorbereitungen zur Instrumentierung der Versuchsobjekte die Möglichkeit zu eröffnen, den Prüfkopf in der Höhe zu verstellen, war dieser auf einem variabel einstellbaren Halter montiert.

5.4 Porenstrahler

Um die im Teilschritt 1 für die Untersuchungen am Versuchsobjekt festgelegte Wärmestromdichte zu erreichen, musste ein Hochleistungswärmestrahler beschafft werden. Die Vorgaben konnten intensiven Recherchen zufolge nur durch einen gasbetriebenen Wärmestrahler erreicht werden. Die Beschaffung gestaltete sich jedoch sehr aufwändig, da die überwiegende Anzahl der angebotenen Standardwärmestrahler nicht über die notwendige Leistung verfügen. Der Zuschlag wurde letztlich der Firma *GoGaS Goch GmbH & Co. KG* für den von ihr hergestellten Porenstrahler erteilt. Um die während des Versuches im Wärmeschrank befindlichen Atemschutzgeräte möglichst homogen zu beaufschlagen, wurde ein Heizfeld, bestehend aus vier Einzelstrahlern, benötigt.

Tabelle 5.3: Technische Daten des Heizfeldes [5]

Bauweise	Heizfeld, bestehend aus 4 RADIMAX Porenstrahlern
Breite eines Einzelstrahlers (außen):	0,2 m
Länge eines Einzelstrahlers (außen):	0,15 m
Leistung eines Einzelstrahlers:	max. 25 kW
Gasverbrauch des Einzelstrahlers:	ca. 2 kg/h
Verbrennungsluftventilator	
Volumenstrom:	420 m ³ /h
Druck:	5000 Pa
Motorleistung:	3 kW

Das Heizfeld wird gespeist von einer 4-Flaschenanlage (4-mal 33 kg Propangasdruckbehälter) und ist auf einem verfahrbaren Gestell montiert. Die Bilder 5.7 bis 5.10 zeigen die Hauptkomponenten des Wärmestrahlers.



Bild 5.7: Heizfeld auf verfahrbarem Gestell



Bild 5.8: Schaltschrank



Bild 5.9: Flaschenbatterie



Bild 5.10: Verbrennungsluftventilator

Die Heizleistung des Strahlerfeldes ist nicht regelbar, so dass die am Versuchsobjekt einzustellende Wärmestromdichte über den Abstand geregelt werden musste. Bild 5.11 zeigt die bei definierten Abständen gemessene Wärmestromdichte.

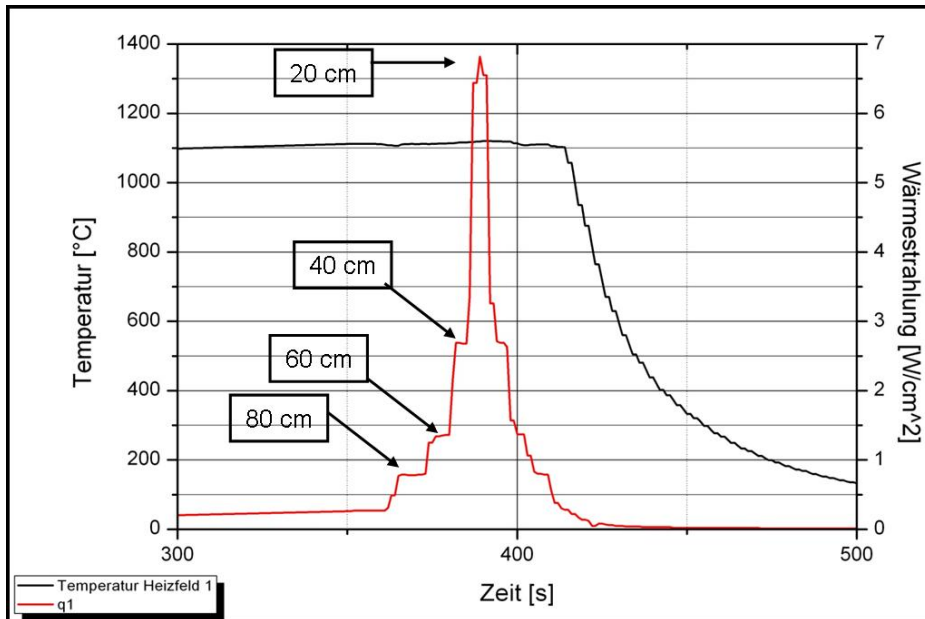


Bild 5.11: Vom Heizfeld erzeugte Wärmestromdichten in Abhängigkeit vom Abstand

5.5 Halteplattform

Der Pressluftatmer wird vor Beginn des Versuches auf einem Haltebügel montiert, der sich auf einer Halteplattform befindet. Auf der Plattform ebenfalls angeordnet ist der Sheffield-Prüfkopf, der vor Versuchsbeginn mit der zu untersuchenden Vollmaske bestückt wird. Im Verlauf der 45 Experimente musste die Plattform etwas modifiziert werden, da hinsichtlich der Versuchsbedingungen der Versuchsregime 1 bis 3 Veränderungen (Steigerung des Temperaturniveaus im Wärmeschrank) vorgenommen wurden (siehe Abschnitt 3.2). Die Bilder 5.12 und 5.13 zeigen die Halteplattformen, die bei den Versuchen zum Einsatz kamen.



Bild 5.12: Halteplattform für die VS_1



Bild 5.13: Halteplattform für die VS_2 und VS_3

Insbesondere im Rahmen von Vorversuchen zu den Versuchsregimen 2 und 3 zeigte sich, dass höhere Wärmeschranktemperaturen ohne Umbaumaßnahmen nicht erreicht werden konnten. Deshalb wurde die im Bild 5.12 zu erkennende Metallplatte entfernt. Es zeigte sich, dass durch das Fehlen dieser Platte der Wärmeübergang von den im Aufheizprozess des Wärmeschrankes mit aufgeheizten Schamottesteinen auf die im Wärmeschrank befindliche Umgebungsluft verbessert wurde. Darüber hinaus konnte die Masse der Plattform durch die Verkleinerung des Halterahmens gesenkt werden. Entsprechend musste eine geringere Masse im Wärmeschrank mit aufgeheizt werden. In der Summe führten diese Maßnahmen dazu, dass im Wärmeschrank Experimente bei deutlich höheren Temperaturen durchgeführt werden konnten. Im Zuge der Umbaumaßnahmen an der Halteplattform wurden sowohl der auf der Halteplattform montierte Haltebügel als auch der Prüfkopfhalter auf einem Schienensystem variabel verschiebbar angeordnet.

6 Messkonzept

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die drei Versuchsregime erläutert wurden, werden an dieser Stelle detaillierte Informationen zu aufgezeichneten Messgrößen, der eingesetzten Messtechnik und zu konkreten Messstellen gegeben. Die beabsichtigte Verfahrensweise wurde stets mit dem PbA abgestimmt.

6.1 Messstellen

Im Rahmen einer Vorabstimmung mit Mitarbeitern der Arbeitsgruppe *"Druckgeräte - Ausrüstungsteile"* der Fachgruppe 2.1 der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und der DEKRA EXAM GmbH wurden die Messstellen diskutiert, die bei den experimentellen Untersuchungen zum Einsatz kommen sollten. Bei einer im Anschluss daran stattfindenden PbA-Sitzung wurden diese bestätigt (siehe Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1: Verwendete Messstellen

Lfd. Nr.:	Messstellenbezeichnung	Messgröße
1	Druckbehälter, oben, außen	Temperatur
2	Druckbehälter, mittig, außen	Temperatur
3	Druckbehälter, unten, außen	Temperatur
4	Druckbehälterhals, außen	Temperatur
5	Mitteldruckleitung, vorn, Brusthöhe, außen	Temperatur
6	Gehäuse Lungenautomat, außen	Temperatur
7	Atemanschluss, außen, oberer Rand	Temperatur
8	Atemlufttemperatur im Atemanschluss	Temperatur
9	Schamottsteine	Temperatur
10	Wärmeschrank	Temperatur
11*	Druckbehälter, innen	Druck
12*	Druckbehälter-Kaskade, innen	Temperatur

* Bei VS_2 und VS_3 sollten die Messstellen je 1-mal bei Stahl-, CFK-Aluminiumliner- und CFK-Kunststoffliner-Druckbehälter zur Anwendung kommen.

Temperatur im Druckbehälter

Die Messung der Temperatur im Inneren des Druckbehälters war nicht trivial, denn das Anbohren des Druckbehälters und das anschließende Einsetzen und Einkleben von Thermoelementen wurden aus Sicherheitsgründen ausgeschlossen.

Für ein bei der BAM bereits vor einiger Zeit abgeschlossenes Forschungsprojekt entwickelte die Firma *VTI Ventil Technik GmbH* einen Prüfadapter, der es ermöglicht, drei Thermoelemente in den Druckbehälter einzuführen. Diesen Adapter stellte die BAM dem IdF LSA für die durchzuführenden Untersuchungen freundlicherweise zur Verfügung. Nach diesem Vorbild wurden durch die Firma *VTI Ventil Technik GmbH* zwei weitere Adapter in einer Kleinstserie hergestellt, so dass dem IdF LSA drei dieser Vorrichtungen für die Experimente zur Verfügung standen. Wie im Bild 6.2 zu erkennen ist, wird der aus Messing bestehende Prüfadapter im Übergang zwischen dem Druckbehälter und dem Ventil eingeschraubt. Darunter hängend angebracht waren die mit Gewichten beschwerten Thermoelemente, wodurch die Temperatur im Druckbehälter in drei verschiedenen Höhen (Nähe Flaschenhals, Mitte, Nähe Boden) gemessen werden konnte. Bedingt durch dieses System musste bei Versuchen, bei denen der Prüfadapter zum Einsatz kam, der Druckbehälter mit dem Ventil nach oben auf dem Haltebügel positioniert werden.

Tabelle 6.2: Im Prüfadapter eingesetzte Thermoelemente [6]

Typ:	K - NiCr-Ni (Toleranzklasse 2)
Ausführung:	verseilte Thermodrähte
Durchmesser eines Thermodrahtes:	0,2 mm
Material Ummantelung:	Perfluoralkoxy (PFA)
Temperaturbeständigkeit:	bis 250 °C



Bild 6.1: Prüfadapter zur Messung der Temperatur im Druckbehälter

Um diese Vorrichtung herum sind 6 Schrauben eingesetzt, die in der Mitte je eine Kabeldurchführung mit einem Durchmesser von 0,5 mm aufweisen, um die Messleitungen der Thermoelemente durchführen zu können. Im Übergang zwischen dem Prüfadapter und den um den Umfang herum angeordneten Schrauben sind kleine Teflonhohlzylinder eingesetzt, die beim Einschrauben der Schrauben gequetscht werden und die Abdichtung auch bei hohen Behälterinnendrücken ermöglichen.

Da die Verwendung des Prüfadapters einen Eingriff in die bestimmungsgemäße Verwendung des Druckbehälters darstellt, war es nicht möglich, diese in der Atemschutzwerkstatt des IBK Heyrothsberge einzuschrauben. Der Einbau erfolgte deshalb bei der BAM in Berlin. Durch die auf drei Stück begrenzte Anzahl der Adapter,

mussten die sechs drucklosen Druckbehälter in zwei Chargen nach Berlin transportiert und dort präpariert werden. Es stellte sich im Rahmen der Versuche jedoch heraus, dass trotz einer vorher durchgeführten Funktionsprüfung, nur bei vier der sechs Versuche die Thermoelemente Messwerte lieferten. Dadurch konnten bei den VS_2 und VS_3 je nur in einem Stahl- und einem CFK-Druckbehälter Temperaturen erfasst werden.

Temperatur auf der Oberfläche der untersuchten Komponenten

Die eingesetzten glasseideummantelten Thermoelemente wurden auf der Oberfläche des entsprechenden Bauteils mittels temperaturbeständigem *Kapton-Klebeband* befestigt. Ziel war es, die Messstellen nach Möglichkeit so anzubringen, dass diese frontal zur Wärmestrahlungsquelle ausgerichtet waren. Das nachfolgend dargestellte Bild 6.3 zeigt ein mit Thermoelementen instrumentiertes Versuchsobjekt.

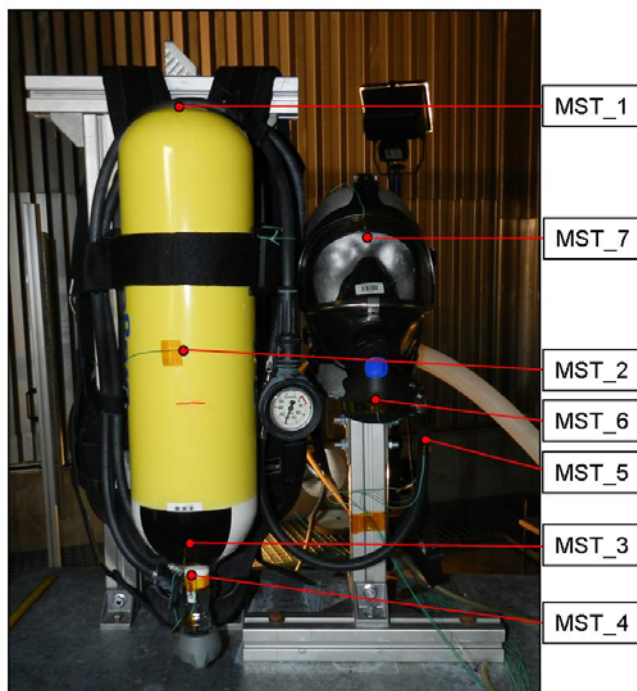


Bild 6.2: Messstellen (MST) gemäß Tabelle 6.1

Die Messstelle 2 (Druckbehälter, mittig, außen) war exakt in der Mitte des Druckbehälters abgebracht. Der Flaschenhals und das Ventil wurden bei der Vermittlung der MST_2 nicht berücksichtigt. Die unterhalb der MST_2 angebrachte rote Markierung entspricht der Mitte des gesamten Druckbehälters einschließlich des Druckbehälterhalses und des Ventils. Diese Markierung diente dazu, den Pressluftatmer in der Höhe auszurichten und an die Höhe des Lungenautomaten

anzupassen. So wurde die Mitte des Druckbehälters in der gleichen Höhe positioniert, wie die „Spitze“ des Lungenautomaten.

Tabelle 6.3: Eigenschaften des Kapton-Klebebandes [7]

Trägermaterial:	Kapton Polyimid-Folie Typ "H"
Klebstoff:	Silikon
Dicke:	0,07 mm
Temperaturbeständigkeit:	dauernd: - 75 °C bis 260 °C
	kurzfristig: bis 370 °C

Tabelle 6.4: Glasseidummantelte Thermoelemente [8]

Typ:	K - NiCr-N (Toleranzklasse 2)
Ausführung:	Isolierte Thermopaare
Durchmesser eines Thermodrahtes:	0,2 mm
Material Ummantelung:	Glasseide
Temperaturbeständigkeit:	Bis 400 °C

Temperatur der Einatemluft

Um während der Experimente die Temperatur der Einatemluft messtechnisch erfassen zu können, wurde ein Mantelthermoelement direkt im Übergang zwischen dem Lungenautomat und der Vollmaske platziert. Besonderes Augenmerk wurde darauf gelegt, dass weder die Funktion des Lungenautomaten noch die der Vollmaske beeinträchtigt wurde. Bei den untersuchten Geräten mit einem ESA-Anschluss war, bedingt durch das einfache Einstecken des Lungenautomaten in die Maske, die Instrumentierung sehr einfach (siehe Bild 6.4). Bei den Lungenautomaten, die mit einem Gewindeanschluss ausgestattet waren, wurde das Thermoelement mit dem Gewinde eingeschraubt, so dass die Messspitze des Thermoelementes in der Mitte der Luftausströmöffnung im Übergang zwischen dem Lungenautomat und der Maske positioniert war. War der Vorgang abgeschlossen, wurde mittels eines kurzen Veratmungszyklusses die Funktion der Messstelle überprüft.

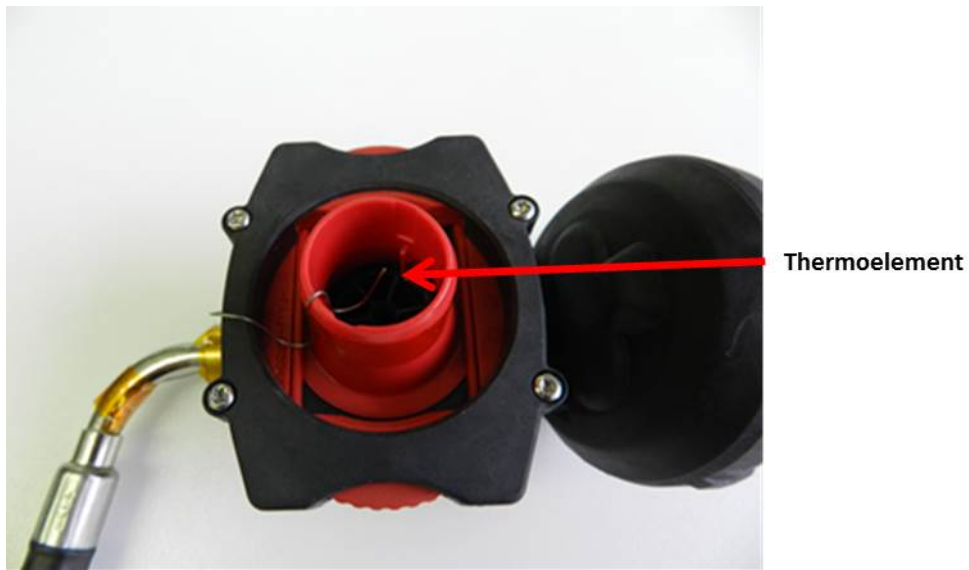


Bild 6.3: Mit Thermoelement ausgestatteter Lungenautomat

Tabelle 6.5: Mantelthermoelemente zur Messung der Einatemtemperatur [8]

Typ:	K - NiCr-N (Toleranzklasse 1)
Ausführung:	Mantelthermoelement
Durchmesser eines Thermodrahtes:	0,5 mm
Material (Mantel):	Edelstahl
Temperaturbeständigkeit (Mantel):	bis 850 °C

Messwerterfassung

Zur Erfassung und Speicherung der Messwerte wurden die nachfolgend dargestellten Geräte verwendet. Die Messwerte wurden im Takt von 1 Sekunde aufgezeichnet. Die Datenspeicherung erfolgte dann mittels eines PC's.



Bild 6.4: Almemo-Messsystem



Bild 6.5: Graphtec GL200
midiLOGGER

Tabelle 6.6: Spezifikationen des Almemo-Messsystems [9]

Hersteller:	Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH
Typ:	8990-6
Anzahl der Messeingänge:	9; galvanisch getrennt
Für die Messungen verwendete Thermostecker:	Typ: K (NiCr-Ni) Messbereich: -200 °C bis 1370 °C Auflösung: 0,1 K

Tabelle 6.7: Spezifikationen des Graphtec Datenloggers [10]

Hersteller:	GRAPHTEC corporation
Typ:	GL200 midiLOGGER
Anzahl der Messeingänge:	10; galvanisch getrennt

6.2 Instrumentierung

Die Instrumentierung der einzelnen Gerätekomponenten mit Thermoelementen gestaltete sich im Detail sehr aufwändig. Im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der Versuche war dies allerdings unumgänglich. Durch verschiedene kleinere Umbauten an der Halteplattform (siehe auch Abschnitt 5.5) war es erforderlich, die Instrumentierungsabläufe dahingehend etwas anzupassen.

Im Rahmen der Versuche der VS_1 waren der Prüfkopfhalter und der Haltebügel auf der Halteplattform fest montiert. Der Haltebügel war allerdings deutlich, von der vorderen Kante der Halteplattform aus betrachtet, hinter dem Prüfkopfhalter angeordnet. Auch nach der Positionierung des Pressluftatmers auf dem Haltebügel war der Pressluftatmer, im Vergleich zu dem mit der Maske versehenen Prüfkopf, etwas zurückgesetzt angeordnet. Die exakte Position konnte mittels Distanzschrauben eingestellt werden, die am Haltebügel angebracht waren. Diese gesamte Prozedur war sehr zeitaufwändig, so dass für die VS_2 und VS_3 die Halteplattform, wie im Abschnitt 5.5 beschrieben, modifiziert wurde. Damit konnte der zeitliche Aufwand für die Positionierung der Versuchsobjekte auf der Halteplattform deutlich reduziert werden.

Im Einzelnen wurden bei jedem Versuch dennoch stets die nachfolgend dargestellten Arbeitsschritte ausgeführt.

Tabelle 6.8: Arbeitsschritte zur Versuchsvorbereitung

1.	Positionierung der Vollmaske auf dem Prüfkopf und Prüfung auf Dichtigkeit
2.	Einsetzen des Lungenautomaten in die Maske
3.	Abstand des Lungenautomaten von der vorderen Kante der Halteplattform <ul style="list-style-type: none"> • Fällen des Lotes von der äußersten „Spitze“ des Lungenautomaten auf die Halteplattform • Messen und notieren des horizontalen Abstandes dieses Punktes von der Vorderkante der Halteplattform
4.	Montieren des Pressluftatmers auf dem Haltebügel
5.	Ausrichtung des Pressluftatmers <ul style="list-style-type: none"> • Einstellen der exakten vertikalen Lage des Druckbehälters • Einstellung des exakt gleichen Abstandes der Vorderseite des Druckbehälters von der Vorderkante der Halteplattform (analog zum Arbeitsschritt 3)
6.	Gegenseitige Ausrichtung von Vollmaske und Pressluftatmer <ul style="list-style-type: none"> • Die Wärmestrahlerfläche ist begrenzt auf eine Fläche von 0,3 m · 0,4 m • Vollmaske und Pressluftatmer müssen also so dicht wie möglich beieinander positioniert sein, damit eine möglichst große Fläche der beiden Komponenten mittels Wärmestrahlung beaufschlagt wird.

7.	<p>Positionierung der Halteplattform im Wärmeschrank und Einstellung der Wärmestromdichte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Positionierung der Halteplattform im Wärmeschrank (durch das Anbringen von Markierungen kann sie beim Versuchsbeginn exakt an die selbe Position gestellt werden) • Heranrollen des Wärmestrahlers und Messen des Abstandes von der Strahleroberfläche bis zum Versuchsobjekt • Beträgt der Abstand 37,9 cm, wird am Versuchsobjekt eine Wärmestromdichte von $\dot{q} = 30\text{kW} / \text{m}^2$ erreicht
8.	Instrumentieren der Versuchsobjekte und Dokumentation mittels Fotos (nach dem Herausnehmen aus dem Wärmeschrank)

6.3 Probleme bei der Instrumentierung

Durch die Andersartigkeit der einzelnen Gerätetypen konnte keine in allen Details einheitliche Instrumentierung erfolgen. Die Instrumentierung betreffenden Unterschiede sind vor allem die beiden nachfolgend dargestellten.

1. Bauformen und Materialien der Lungenautomaten

Ziel der Instrumentierung der Lungenautomaten sollte sein, jeweils die „Spitze“, sprich den dem Wärmestrahler am nächsten liegenden Bereich, mittels eines Thermoelementes auszustatten. Die Prämisse dabei war immer die thermische Beständigkeit der Anbringung während Versuchszeit. Durch die zum Teil sehr diffizil aufgebauten Lungenautomaten war dies jedoch nicht immer möglich. Erschwerend kam hinzu, dass die Anbringung von Thermoelementen mittels Klebeband insbesondere auf Werkstoffen, wie Silikon, schwierig ist. Unter Berücksichtigung dieses Aspektes wurde stets die sicher über die Versuchszeit beständige Anbringung der Thermoelemente bevorzugt. Diese Sachverhalte führten in der Summe jedoch dazu, dass die an den Lungenautomaten angebrachten Thermoelemente nicht an dem dem Wärmestrahler am nächsten liegenden Bereich angebracht werden konnten.

2. Länge und Bauform der Mitteldruckleitungen (MDL)

Bedingt durch Vielfalt der Ausführungen des Übergangsbereiches „MDL ↔ Lungenautomat“ und der Länge der MDL selbst, war die über alle Gerätetypen gleichartige Instrumentierung nicht möglich. Die nachfolgenden Bilder zeigen Beispiele der verschiedenen Bauformen.



Bild 6.6: Bauformen von MDL

Ziel der Instrumentierung war es, dass optimalerweise die MDL vom Lungenautomat ausgehend senkrecht nach unten hängend angeordnet ist. Darüber hinaus sollte nach Möglichkeit der „Abgang“ der MDL von vorn gesehen links des Lungenautomaten liegen, damit sie trotz der begrenzten Strahlerfläche mittels Wärmestrahlung weitreichend beaufschlagt werden kann. Gleichzeitig sollte das Manometer so angeordnet sein, dass auch dieses vom Wärmestrahler miterfasst wird. Diese Bedingungen konnten allerdings nur erfüllt werden, wenn die MDL in einem bestimmten Längenbereich liegt und getrennt von der Hochdruckleitung ist. Nur bei wenigen Gerätetypen war diese Konstellation optimal, so dass auch die Anbringungsorte bzw. die dort gemessenen Werte variieren.

7 Vorversuche

Die nachfolgend dargestellten Vorversuche dienten in erster Linie der Plausibilitätsprüfung des im Teilschritt 1 formulierten thermischen Belastungsprofils, das überwiegend auf geschätzten Daten basierte. Zudem konnten Routinen, Checkliste und Sicherheitsvorkehrungen erprobt werden, die für den sicheren und repräsentativen Ablauf der Hauptversuche unumgänglich waren.

7.1 Berstversuche

Um die von den Hauptversuchen ausgehenden Gefährdungen auf die Versuchsdurchführenden und die Versuchstechnik abzuschätzen, waren gemäß dem bestätigten Messkonzept Berstversuche bei der BAM durchzuführen. Bei zwei Versuchen wurde das Berstverhalten von CFK-Druckbehältern bei äußerlicher Wärmebeaufschlagung mittels Heizmanschetten untersucht. Dabei wurden konkret folgende CFK-Druckbehälter verwendet.

Tabelle 7.1: Details der untersuchten CFK-Druckbehälter

Lfd. Nr.:	Material	Flaschenvolumen
1	Kohlefaser umwobener Kunststoffdruckbehälter	6,7 l
2	Kohlefaser umwobener Aluminiumdruckbehälter	6,9 l

Jede der beiden Heizmanschetten wurde herstellerseitig speziell an den zu beheizenden Druckbehälter angepasst und im Zuge des Berstens vollständig zerstört. Bild 7.1 zeigt den von einer Heizmanschette umschlossenen und mit Thermoelementen ausgestatteten Druckbehälter mit Aluminium-Liner in der Sprenggrube des „BAM Testgeländes Technische Sicherheit“. Zusätzlich zur Videoaufzeichnung und zu Temperaturmessungen an der Oberfläche des Druckbehälterbodens, des -halses sowie in der Mitte, wurde der Behälterinnendruck messtechnisch erfasst.



Bild 7.1: Instrumentierter Druckbehälter

7.1.1 Versuchsdurchführung

Nachdem der vollständig gefüllte (300 bar) und mit Messtechnik ausgestattete Druckbehälter in die Heizmanschette verbracht wurde, wurde der Versuch gestartet. Wie auf dem Bild 7.2 dargestellt, wurde die Temperatur der Manschette mittels eines angeschlossenen Temperaturreglers auf die Stufen 60 °C, 100 °C, 150 °C und 200 °C eingestellt. Bei jeder Temperaturstufe wurde die Temperatur über einen Zeitraum von 10 min konstant gehalten. Eine Veratmung erfolgte nicht. Jeder Versuch endete mit dem Bersten des Druckbehälters.

7.1.2 Ergebnisse

Im Bild 7.2 sind die Temperatur- und Druckverläufe der Berstversuche über der Zeit dargestellt. Hinzugefügt werden muss, dass es aufgrund der heftigen physikalischen Explosion der Pressluftflasche mit Kunststoffliner im ersten Versuch zu einem Kurzschluss in der elektrischen Anlage kam. Davon betroffen war auch das Messwerterfassungssystem, so dass die im Bild 7.2 links dargestellten Verläufe aus den handschriftlichen Notizen resultieren. Im Versuch 2 konnten die Temperatur- und Druckverläufe fehlerfrei aufgezeichnet werden.

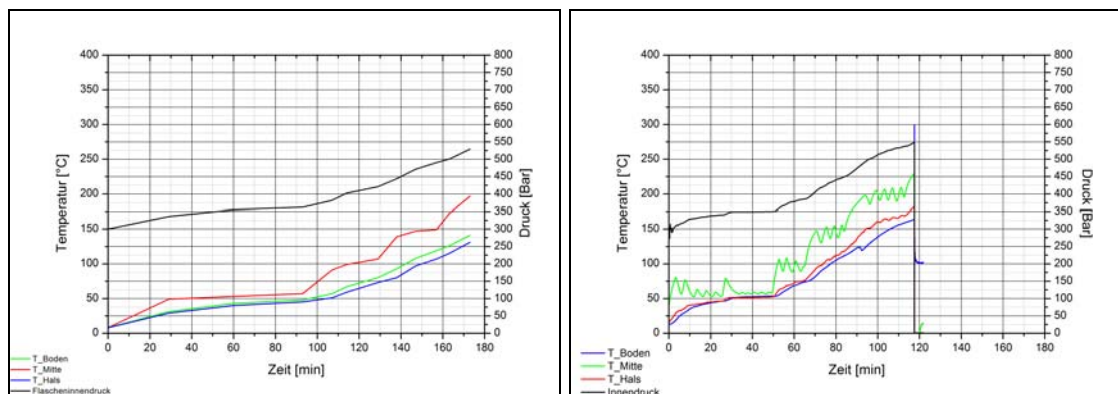


Bild 7.2: Temperatur- und Druckverläufe Berstversuche; Kunststoff-Liner (links) Alu-Liner (rechts)

Im Ergebnis der Versuche konnten die in Tabelle 7.2 dargestellten Messwerte zum Berstverhalten der untersuchten CFK-Flaschen ermittelt werden.

7.1.3 Berstversuch eines Stahl-Druckbehälters

Im Jahr 2007 wurde bei der BAM ein Berstversuch mit einem ebenfalls bei Feuerwehren eingesetzten Stahl-Druckbehälter (6 L, 300 bar) durchgeführt. Auch bei diesem Versuch erfolgte die Wärmebeaufschlagung mittels einer Heizmanschette. Allerdings wurde ein anderes Aufheizregime angewandt, bei dem die Temperatur der Heizmanschette kontinuierlich erhöht wurde, bis es zum Bersten des Druckbehälters kam. Nachfolgend dargestellt sind im Bild 7.3 die Temperatur- und Druckverläufe über der Zeit. Tabelle 7.2 zeigt die extrahierten Werte für Temperatur und Berstdruck.

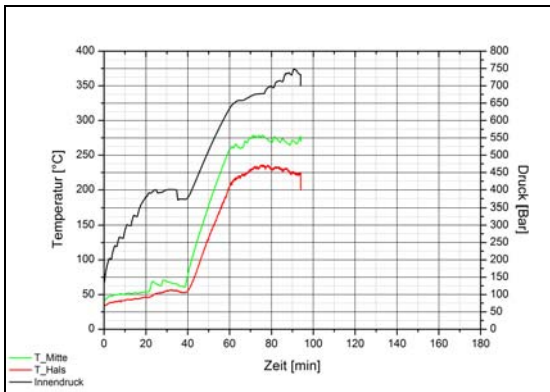


Bild 7.3: Temperatur- und Druckverlauf für Berstversuch mit Stahldruckbehälter

Tabelle 7.2: Messwerte aus Berstversuchen mit Pressluftflaschen

Material Pressluftflaschen	Bersttemperatur (Flaschenmitte)	Berstdruck
Kunststoffliner	225 °C	559 bar
Aluminium-Liner	220 °C	549 bar
Stahl	269 °C	748 bar

7.1.4 Diskussion der Ergebnisse der Berstversuche

Die Ergebnisse der dargestellten Berstversuche sind im Hinblick auf die von den Hauptversuchen ausgehenden Gefahren durch das Bersten des Druckbehälters sehr positiv zu bewerten. Einerseits erfolgt die Wärmebeaufschlagung bei den Hauptversuchen mittels erzwungener Konvektion und nicht wie bei den Berstversuchen durch Wärmeleitung. Die Wärmeübertragung durch Konvektion ist unter Berücksichtigung der thermischen Bedingungen bei den Hauptversuchen weniger effektiv, als die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung. Andererseits liegen die Temperaturen im Wärmeschrank während der Hauptversuche bei allen drei Versuchsregimen zum Teil sehr deutlich unter denen, die mittels der Heizmanschetten erzeugt wurden. Der jedoch wichtigste Punkt ist, dass im Rahmen der Hauptversuche die Druckbehälter kontinuierlich veratmet werden. Dies führt zum einen dazu, dass der Behälterinnendruck sinkt und zum anderen, dass die Temperatur im Druckbehälter durch den Joule-Thomson-Effekt sinkt.

Auch im Hinblick auf Feuerwehreinsätze sind die Ergebnisse als nicht beunruhigend zu bewerten, denn auch hier erfolgt der Wärmeeintrag fast ausschließlich konvektiv bzw.

durch Wärmestrahlung und nicht mittels Wärmeleitung. Da die Pressluftatmer während der Einsätze zusätzlich veratmet werden, kann ein Bersten praktisch ausgeschlossen werden. Gestützt wird diese Aussage auch durch die bereits im Teilschritt 1 (Bericht Nr.: 161) vorgestellte Unfallstatistik, die zeigt, dass es im Rahmen eines Feuerwehreinsatzes (Innenangriff) bisher nicht zum Bersten eines Druckbehälters durch thermische Beaufschlagung kam.

7.2 Tests zu verschiedenen Wärmestrahlungsintensitäten

Im Folgenden werden Vorversuche erläutert, die bei Wärmestromdichten von 60 kW/m^2 (Ausgangssituation gemäß Abschlussbericht des Teilschrittes 1) und bei 40 kW/m^2 durchgeführt wurden. Es sei darauf verwiesen, dass bewusst auf die Darstellung von Fotos beschädigter Komponenten der Atemschutztechnik verzichtet wurde.

Zum Beginn der Vorversuche am Versuchsstand wurde ein Experiment mit einem ausgemusterten Gerätensensemble (Pressluftatmer, Lungenautomat und Vollmaske) durchgeführt, das drucklos und nicht im Wärmeschrank konditioniert mittels Wärmestrahlung beaufschlagt wurde. Die Wärmestromdichte betrug auf dem Lungenautomaten und dem Druckbehälter 60 kW/m^2 . Bereits nach 5 s kam es zur starken Ausgasung und damit verbunden zur starken Rauchentwicklung am Lungenautomat, der Vollmaske und am Flaschenband des Pressluftatmers. Mit zunehmender Versuchszeit intensivierte sich die Rauchentwicklung. Bereits nach 15 s kam es zur Blasenbildung am Lungenautomaten und auf der Sichtscheibe der Maske. Zudem verkohlte das Flaschenband. Dies intensivierte sich weiter, bis bei der Versuchszeit von 60 s mit Ausnahme des CFK-Druckbehälters alle Komponenten brannten und in der Folge abgelöscht werden mussten.

Bei zwei weiteren Versuchen wurden zwei ausgemusterte Geräteensembles im Wärmeschrank 10 min bei Temperaturen von 120 °C bis 130 °C konditioniert. Bei diesen beiden Versuchen wurden die Geräte je 3-mal mit einer Wärmestromdichte von 40 kW/m^2 beaufschlagt. Das Bild 7.4 zeigt die aufgezeichneten Temperaturverläufe eines der beiden Versuche.

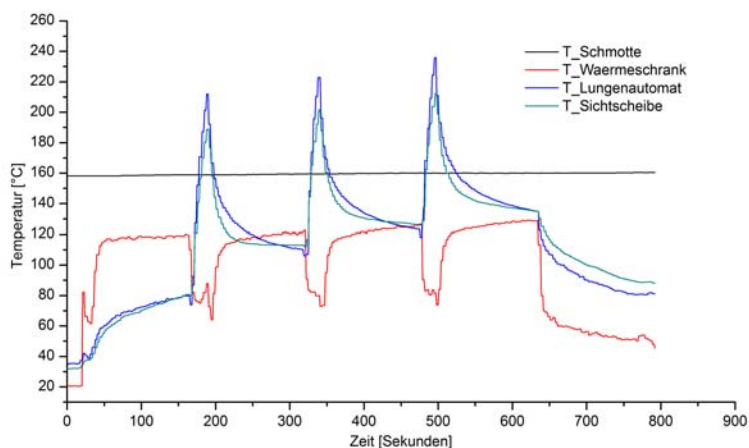


Bild 7.4: Vorversuch mit Wärmestrahlungsbeaufschlagung

Bereits bei der ersten Wärmestrahlungsbeaufschlagung kam es zur Blasenbildung am LA. Im weiteren Verlauf des Versuchs intensivierten sich die Beschädigungen. Während der zweiten Beaufschlagung mittels Wärmestrahlung schäumte dann die Sichtscheibe der Maske auf und es traten zudem erste Verkohlungserscheinungen am Flaschenband des Pressluftatmers auf. Auch diese beiden Beschädigungen intensivierten sich im Laufe des Versuches.

Im zweiten Versuch wurde bei gleichem Versuchsregime ein Lungenautomat eines anderen Herstellers verwendet. Dieser LA wurde zwar im Vergleich zu dem oben dargestellten Versuch nicht so stark beschädigt, dennoch kam es auch hier zur starken Blasenbildung. Erste derartige Erscheinungen wurden auch im Rahmen der ersten Wärmestrahlungsbeaufschlagungen sichtbar. Diese Beschädigung intensivierte sich ebenfalls im weiteren Verlauf. Bei diesem Versuch wurden dieselbe Maske und derselbe PA verwendet. Es können daher keine Aussagen bezüglich etwaiger Beschädigungen getroffen werden, da beide Komponenten bereits Vorschädigungen aufwiesen.

7.3 Raumbrandversuche mit der Berufsfeuerwehr Magdeburg

Die Berufsfeuerwehr Magdeburg führte im März 2012 eine 3-tägige Übung in einem sechsgeschossigen und mit Möbeln ausgestatteten Abrisshaus durch, die das IdF LSA messtechnisch begleitete. Hierbei wurden insgesamt 10 realitätsnahe Zimmerbrände bis zum Vollbrand initiiert. Neben Gasanalysen und Messungen zur

Strömungsgeschwindigkeit wurden in verschiedenen Höhen im brennenden Raum auch die Temperaturen und die von der Decke zum Boden gerichtete Wärmestrahlungsintensität erfasst. Weiterhin war je ein Angehöriger des jeweiligen Angriffstrupps mittels personengetragener Temperaturmesstechnik ausgestattet. Es konnten jedoch nur bei 6 Zimmerbränden Temperaturwerte am Druckbehälter und am Lungenautomaten gemessen werden, da die Thermoelemente bei vier Übungsläufen im Einsatzgeschehen abrissen.

In der nachfolgend dargestellten Tabelle 7.3 sind die Maximalwerte für die Temperatur (personengetragen) und die Wärmestrahlung exemplarisch dargestellt.

Tabelle 7.3: Maximalwerte für Temperatur und Wärmestrahlung bei Versuchen mit der BF Magdeburg

	LA	Druckbehälter	Wärmestromdichte
Maximalwerte	174 °C	199 °C	29,6 kW/m ²

Das nachfolgend dargestellte Bild 7.5 zeigt exemplarisch die Verläufe der Temperaturen am Druckbehälter und am LA des aus thermischer Sicht heftigsten aufgezeichneten Übungsdurchlaufes.

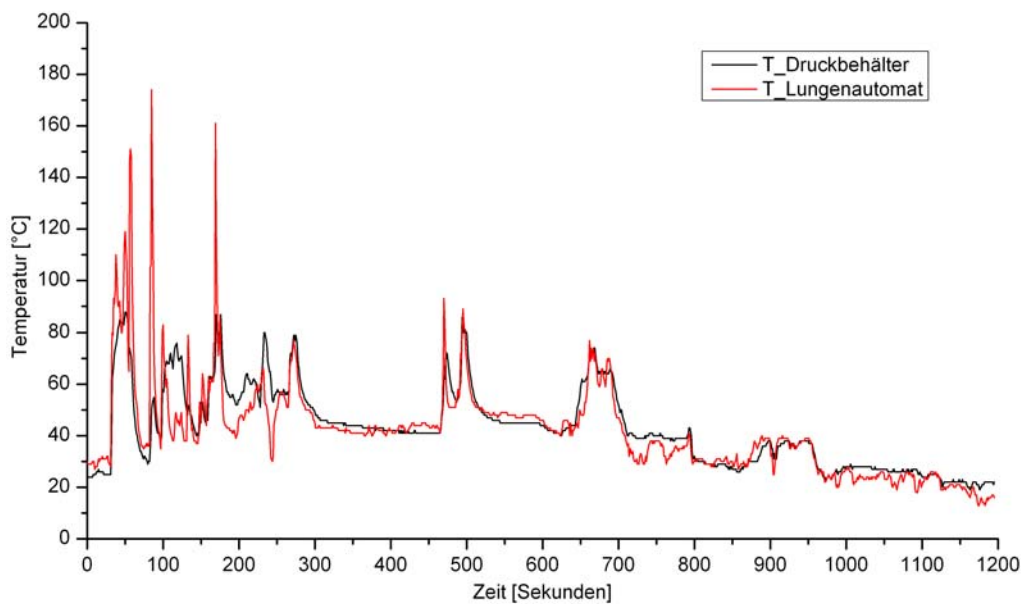


Bild 7.5: Temperaturverläufe bei Realbrandübung 3 mit der BF Magdeburg

Es ist ersichtlich, dass Maximalwerte zeitlich sehr eingeschränkt auftraten. Die überwiegende Anzahl der Messwerte lag zum Teil deutlich unter der gemäß Norm vorgegebenen Funktionstemperatur von 60 °C (DIN EN 137). Auch der oben angegebene Maximalwert für die Wärmestromdichte wurde lediglich 1-mal während der dreitägigen Versuchsserie erreicht, ansonsten lag die gemessene Wärmestromdichte im Bereich von 15 kW/m² und 18 kW/m². Die gemessenen Wärmestromdichten decken sich im Übrigen auch mit den in der HBUEA der BF Karlsruhe gemessenen Werte (siehe Bericht zum Teilschritt 1 des Forschungsvorhabens). Gleiches gilt für die Temperaturmesswerte.

Von den Teilnehmern der Übung wurde die Übung als „sehr hart“ eingeschätzt. So kam es nicht nur einmalig zum Durchschlagen der Wärme durch die Kleidung und zu Beschädigungen an Helmen. Die Komponenten der Atemschutztechnik wurden trotz thermischer Beaufschlagung nicht beschädigt.

7.4 Interpretation der Ergebnisse der Vorversuche im Hinblick auf die Hauptversuche

Die in diesem Kapitel beschriebenen Vorversuche waren unter dem Aspekt der Konkretisierung des Versuchsregimes der Hauptversuche unumgänglich. Nach Abschluss der Vorversuche muss festgehalten werden, dass die im Teilschritt 1 theoretisch ermittelten Versuchsparameter in einigen Bereichen zu hart gewählt wurden. Insbesondere das Experiment, bei dem die Wärmestromdichte von 60 kW/m^2 am Versuchsobjekt einwirkte, zeigt deutlich, dass Wärmestrahlung in dieser Höhe unweigerlich dazu führt, dass untersuchte Geräteensembles extrem stark beschädigt werden. Das Zerlegen dieser Komponenten und die Detailuntersuchung potentiell ausgefallener Geräte wäre unter diesen Bedingungen ebenfalls nicht möglich. Aber auch die Wärmestrahlungsbeaufschlagung bei einer Wärmestromdichte von 40 kW/m^2 zeigte, dass Komponenten der Atemschutztechnik bei derart hohen, über mehrere Sekunden einwirkenden Wärmestrahlungsintensitäten, unweigerlich irreparabel beschädigt werden.

Daher wurde für die 27 Hauptversuche, bei denen zusätzlich zur konvektiven Wärmebeaufschlagung im Wärmeschrank auch die Wärmebeaufschlagung mittels Strahlung erfolgt, im PbA festgelegt, dass die Wärmestromdichte am Versuchsobjekt 30 kW/m^2 betragen soll. Weiterhin muss an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, dass es nicht Ziel der Untersuchungen war, alle Geräteensembles „kaputt“ zu prüfen. Es sollte vielmehr der Ist-Zustand der thermischen Belastbarkeit dieser Geräte dargelegt werden. Nachdem die hier gewonnenen Erkenntnisse ausführlich im PbA vorgestellt und diskutiert worden waren, wurde ein 3-stufiges Versuchskonzept erstellt. Mit aufsteigender Intensität immer härter werdender Versuchsbedingungen (siehe Abschnitt 3.2) sollte die Belastungsgrenze der untersuchten Geräte erreicht werden.

Mit Hilfe der Berstversuche sollten lediglich offene Fragen zur Sicherheit der Versuchsdurchführenden beantwortet werden. Eine Übertragung der im Abschnitt 7.1 erläuterten Messwerte auf Einsatzbedingungen verbietet sich ausdrücklich, da beispielsweise im Einsatz Pressluftatmer kontinuierlich veratmet werden und ein Druckanstieg, wie er im Rahmen der Berstversuche aufgezeigt wurde, dadurch nicht auftreten kann. Da die Berstversuche den „Worst case“ widerspiegeln, konnten unter Berücksichtigung obligatorischer Sicherheitsvorkehrungen die Hauptversuche durchgeführt werden. Dennoch wurden zur Sicherstellung des Arbeitsschutzes von den Versuchsdurchführenden folgende PSA-Komponenten getragen:

- Gehörschutz,
- Helm mit Visier,
- Feuerwehreinsatzkleidung nach DIN EN 469,
- Feuerwehrschtzhandschuhe nach DIN EN 659 und
- Feuerwehrschtzschuhwerk nach DIN EN 15090.

Gleichzeitig wurden die Komponenten der Messwertaufzeichnung aus Sicherheitsgründen außerhalb des Brandraumes aufgebaut. Damit während des Versuchs die Wärmeschranktüren nicht per Hand geöffnet werden müssen, wurden von außen schaltbare elektrisch betriebene Torantriebe installiert. Der Wärmestrahler konnte zudem mit Hilfe von Seilzügen an den geöffneten Wärmeschrank versetzt werden. Diese Maßnahmen dienten dazu, den Arbeitsschutz umfänglich sicher zu stellen.

8 Experimentelle Untersuchungen nach thermischen Belastungsprofilen

An dieser Stelle werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen aller drei Versuchsreihen dargestellt, erläutert und diskutiert. Wie bereits erwähnt, werden keine Fotos dargestellt, die im Anschluss an die thermische Beaufschlagung aufgenommen wurden. Den drei Herstellern wurde vor Beginn der experimentellen Untersuchungen per Los einer der Kennbuchstaben „A“, „B“ und „C“ zugeordnet.

Zur Übersicht werden an dieser Stelle erneut kurz die thermischen Bedingungen und die weiteren Eckdaten der drei Versuchsserien aufgelistet.

Tabelle 8.1: Übersicht zu den Versuchsbedingungen der VS_1 bis VS_3

	Versuchsserien (VS)		
	VS_1	VS_2	VS_3
Versuchsdauer:	10 min	10 min	15 min
Wärmestrahlungs- beaufschlagung (30 kW/m ²):	3-mal gleichverteilt über die Versuchszeit; Dauer jeweils 15 s	3-mal gleichverteilt über die Versuchszeit; Dauer jeweils 15 s	Keine
Temperaturverlauf im Wärmeschrank:	Siehe Bild 3.1	Siehe Bild 3.1	Siehe Bild 3.1
Versuchsumfang:	9 Geräte <i>(1 Gerät je Gerätetyp)</i>	18 Geräte <i>(2 Geräte je Gerätetyp)</i>	18 Geräte <i>(2 Geräte je Gerätetyp)</i>

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nicht alle Verläufe von Temperatur- und Atemwiderstandsmessungen in den Bericht aufgenommen. Wurden Besonderheiten bei Experimenten festgestellt, werden diese dargestellt und diskutiert.

8.1 Ergebnisse der Versuchsserie 1

Temperatur auf der Oberfläche der untersuchten Komponenten

In den nachfolgend dargestellten Diagrammen sind beispielhaft die Temperaturverläufe zweier Versuche dargestellt, bei denen je ein Stahl- und ein CFK-Druckbehälter eingesetzt wurden.

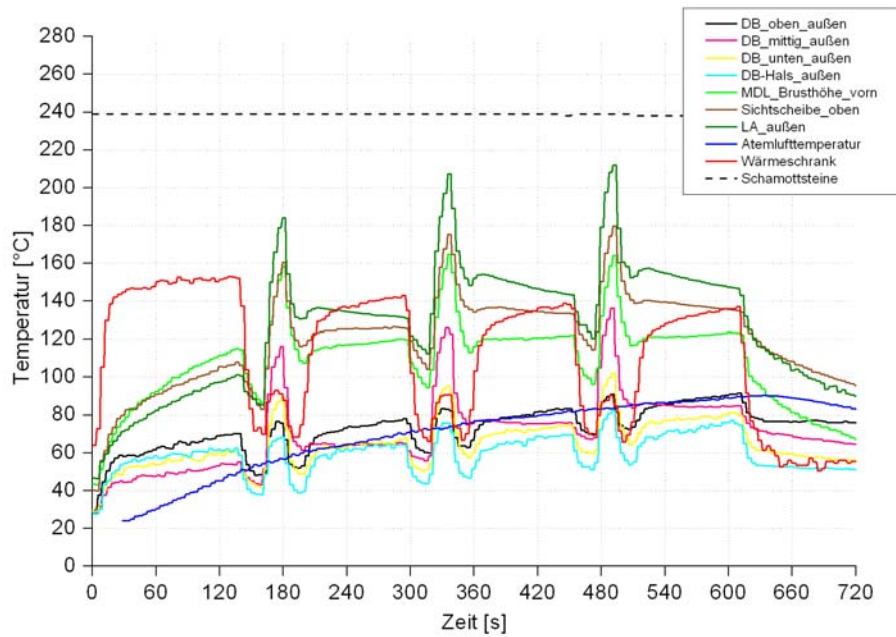


Bild 8.1: Temperaturverlauf des Versuches 4 (Stahl-Druckbehälter)

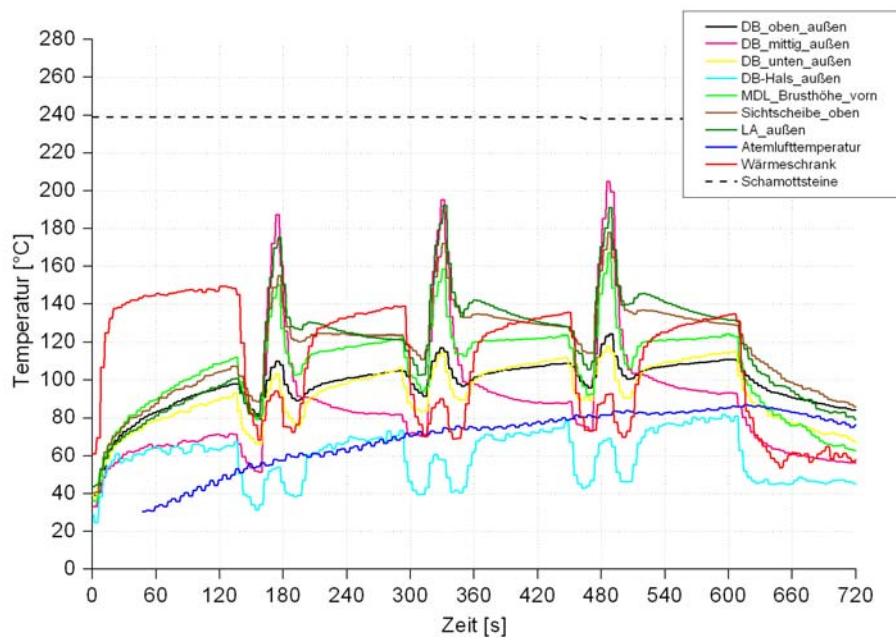


Bild 8.2: Temperaturverlauf des Versuches 8 (CFK-Druckbehälter)

Die Bilder zeigen prinzipiell einen ähnlichen Verlauf der Temperaturen an den einzelnen Messstellen. Während die Wärmestrahlungsquelle zum Einsatz kommt, steigen die Temperaturen an den einzelnen Messstellen stark an. Davon ausgenommen ist die Temperatur im Wärmeschrank. Diese sinkt durch das Öffnen der

Türen durch den Luftaustausch mit der Umgebung und steigt nach Abschluss dieser Prozedur wieder stark an.

Der wesentliche Unterschied besteht bei den Temperaturen an der Oberfläche der Druckbehälter. Erkennbar ist, dass die Temperatur im Versuch 4 (Stahl-Druckbehälter) an der Messstelle DB_mittig_außen auf maximal 136,2 °C steigt, während die Temperatur an der gleichen Messstelle im Versuch 8 (CFK-Druckbehälter) maximal 204,9 °C beträgt. Diese doch erheblichen Unterschiede werden durch die unterschiedlichen Druckbehältermaterialien verursacht. Durch die gegenüber CFK-Materialien deutlich bessere Wärmeleitfähigkeit von Stahl wird die von außen aufgebrachte Wärme leichter ins Innere des Druckbehälters geleitet. Umgekehrt wird, bedingt durch die schlechtere Wärmeleitfähigkeit des bei Druckbehältern eingesetzten CFK-Materials, die von außen aufgegebene Wärme schlechter weiter nach innen geleitet. Auf der Druckbehälter-Oberfläche akkumuliert sich die Wärme und verursacht daher höhere Oberflächentemperaturen. Abhängig von den Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten der einzelnen Behältermaterialien kann dieser Effekt zum Teil deutlich variieren.

Beobachtet wurde zusätzlich, dass schwarze Silikonbestandteile stets höhere Oberflächentemperaturen aufwiesen als Bauteile aus schwarzen Duroplasten. Inwieweit die höheren Oberflächentemperaturen durch den höheren Absorptionsgrad dieser Materialien bzw. durch deren geringere Wärmeleitfähigkeit verursacht wurde, konnte nicht abschließend geklärt werden, da keine derartigen Detailuntersuchungen durchgeführt werden konnten. Das nachfolgend dargestellte Diagramm zeigt den Temperaturverlauf eines Versuches, bei dem ein Lungenautomat zum Einsatz gelangte, der schwarze Silikonbestandteile aufwies.

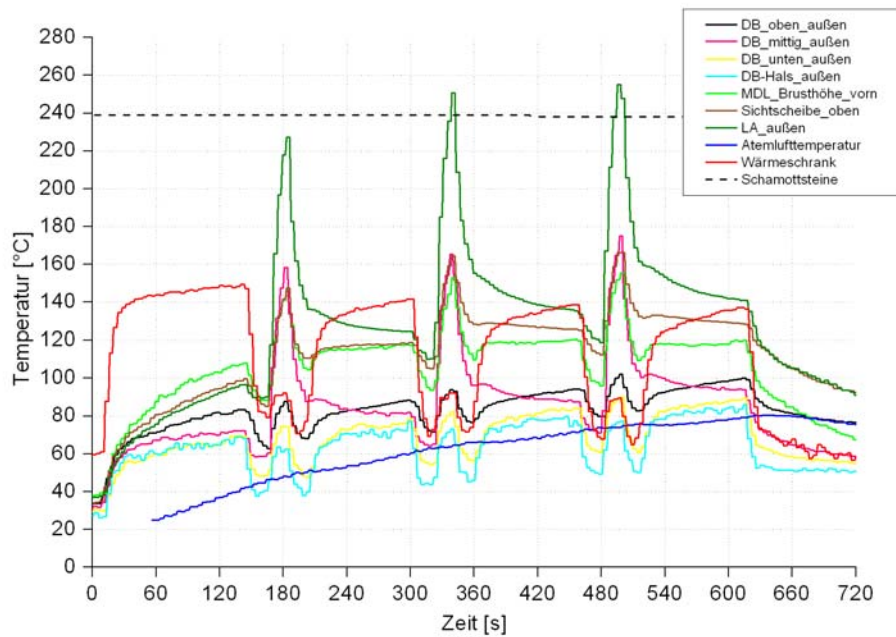


Bild 8.3: Temperaturverlauf des Versuches 9 (CFK-Druckbehälter)

Deutlich erkennbar ist, dass die maximale Temperatur am Lungenautomaten im Versuch 9 mit 255 °C deutlich über der im Versuch 8 (Bild 8.2) am Lungenautomat gemessenen Maximaltemperatur von 192 °C lag. Ein Einfluss auf die Temperatur der Einatemluft konnte allerdings nicht nachgewiesen werden.

In einem Fall wurde beobachtet, dass ein auf dem Druckbehälter angebrachter Produktaufkleber dazu führte, dass die dort auf der Oberfläche gemessenen Temperaturen höher sind (Versuch 8, Bild 8.2), als bei Druckbehältern ohne jegliche Beklebung (Versuch 9, Bild 8.3). Es wurde festgestellt, dass sich der betreffende Aufkleber offensichtlich exotherm zersetzte, so dass extrem hohe Oberflächentemperaturen auftraten. Nach Beendigung des Versuches wurden starke Beschädigungen an dem Produktaufkleber dokumentiert (Blasenbildung, Verfärbungen, Verkohlung). Das nachfolgend dargestellte Bild 8.4 zeigt den Temperaturverlauf dieses Versuches.

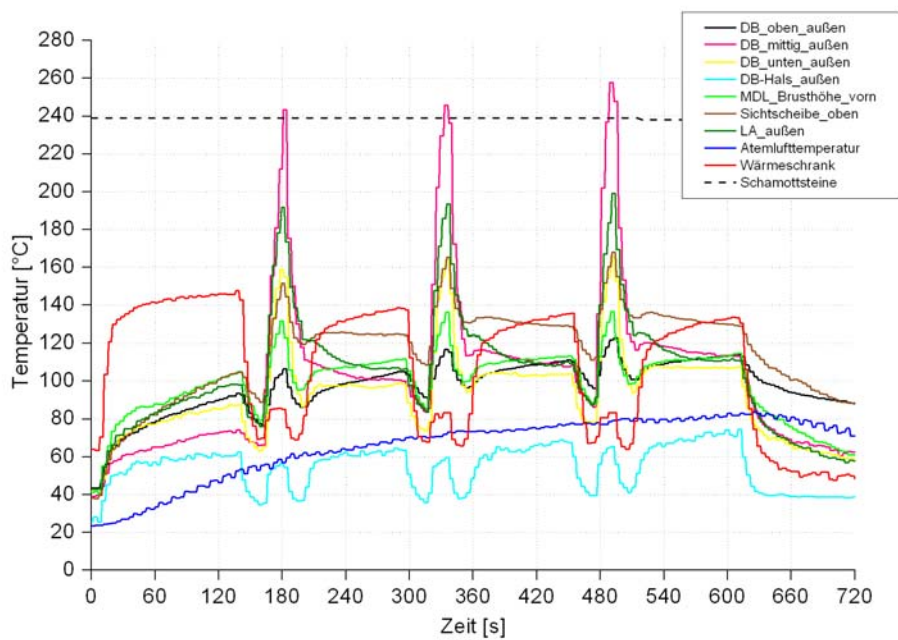


Bild 8.4: Temperaturverlauf des Versuches 2 (CFK-Druckbehälter)

In der nachfolgend dargestellten Tabelle sind zur Übersicht die an den Atemschutzgerätekomponenten gemessenen Temperaturen auf der Oberfläche und die Atemlufttemperaturen dargestellt.

Tabelle 8.2: Maximaltemperaturen bei VS_1

Versuch, DB- Material	Maximale Temperaturen an den Messstellen in °C							
	DB oben	DB mittig	DB unten	DB Hals	MDL	Sicht- scheibe	LA	Atem- luft
1, Stahl	98,1	134,1	114,3	84,9	133,9	167,2	-**	89,6
2, CFK	123,1	257,9	165,7	74,6	136,7	167,8	199,1	83,8
3, CFK	102,9	172,5	134	94,5	107,6	146,1	220,6	74,4
4, Stahl	91,5	136,2	102,1	82,2	164,7	179,8	211,9	90,5
5, CFK	111,8	204,8	103,4	93	141,3	176	244,6	83,3
6, Stahl	88,9	140,1	91,6	76,6	138,6	171,1	251,7	85,7
7, CFK	128,8	201,4	115,5	63,2	151,7	175,4	220	83,4
8, CFK	124,1	204,9	118	81,9	167,1	177,9	192,4	87,2
9, CFK	102,3	175,1	90	86	155,3	166,1	255,2	80,6

** Messstelle ist ausgefallen

Einatemtemperaturen

Wie bei den Temperaturen auf der Oberfläche der untersuchten Atemschutzgerätekomponten, war auch die Temperatur der Einatemluft abhängig vom Material der entsprechenden Druckbehälter. Die Bilder 8.5 und 8.6 zeigen die Einatemtemperaturverläufe aller Versuche der VS_1, getrennt nach Stahl- und CFK-Druckbehältern.

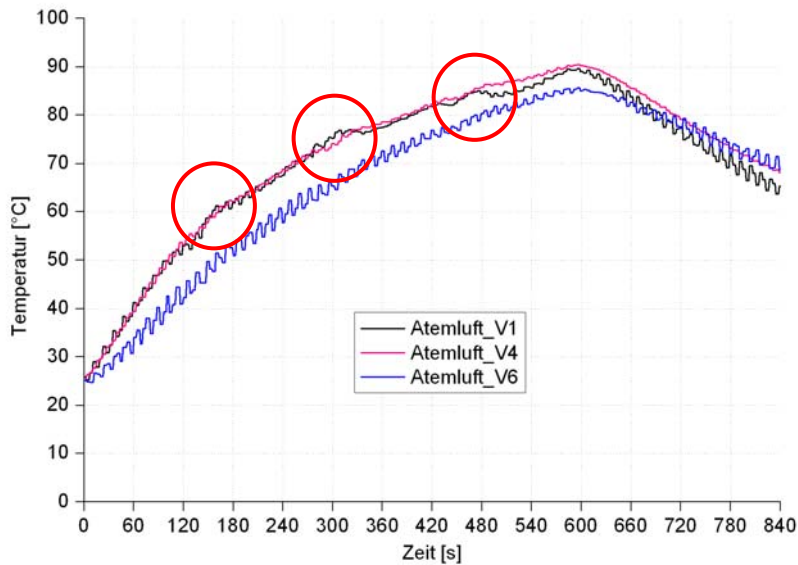


Bild 8.5: Atemlufttemperatur bei Stahl-Druckbehältern der VS_1

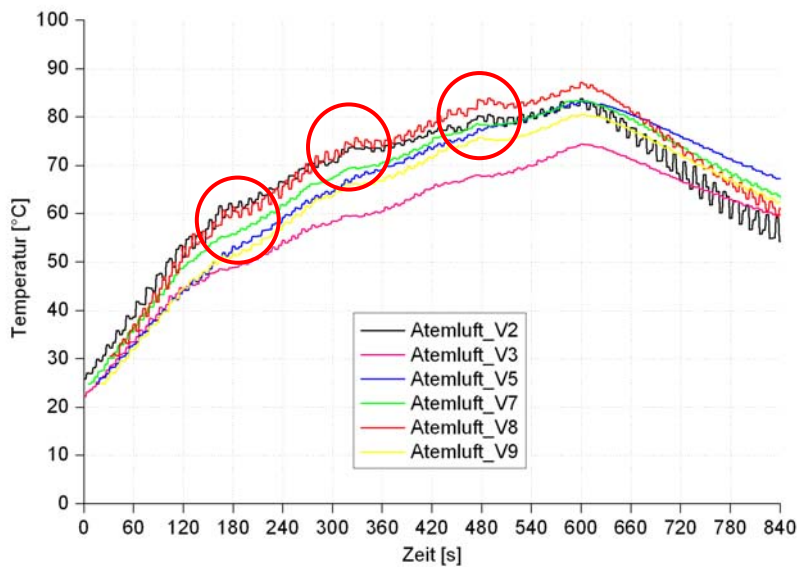


Bild 8.6: Atemlufttemperatur bei CFK-Druckbehältern der VS_1

Es zeigt sich, dass die Temperaturverläufe qualitativ ähnlich sind, wobei insbesondere bei Stahl-Druckbehältern geringfügig höhere Atemlufttemperaturen erreicht werden. Sichtbar ist in den Verläufen auch die 3-fach äußerlich aufgebrachte Wärmestrahlung in Form von leicht erhöhten Anstiegen (s. Markierung). Ein wesentlicher Einfluss auf die Höhe des Einatemtemperaturniveaus konnte durch die kurzzeitige Wärmestrahlungsbeaufschlagung allerdings nicht festgestellt werden. Das nachfolgend dargestellte Bild 8.7 zeigt die getrennt nach Stahl- und CFK-Druckbehältern gemittelten Atemlufttemperaturen aller Versuche der VS_1.

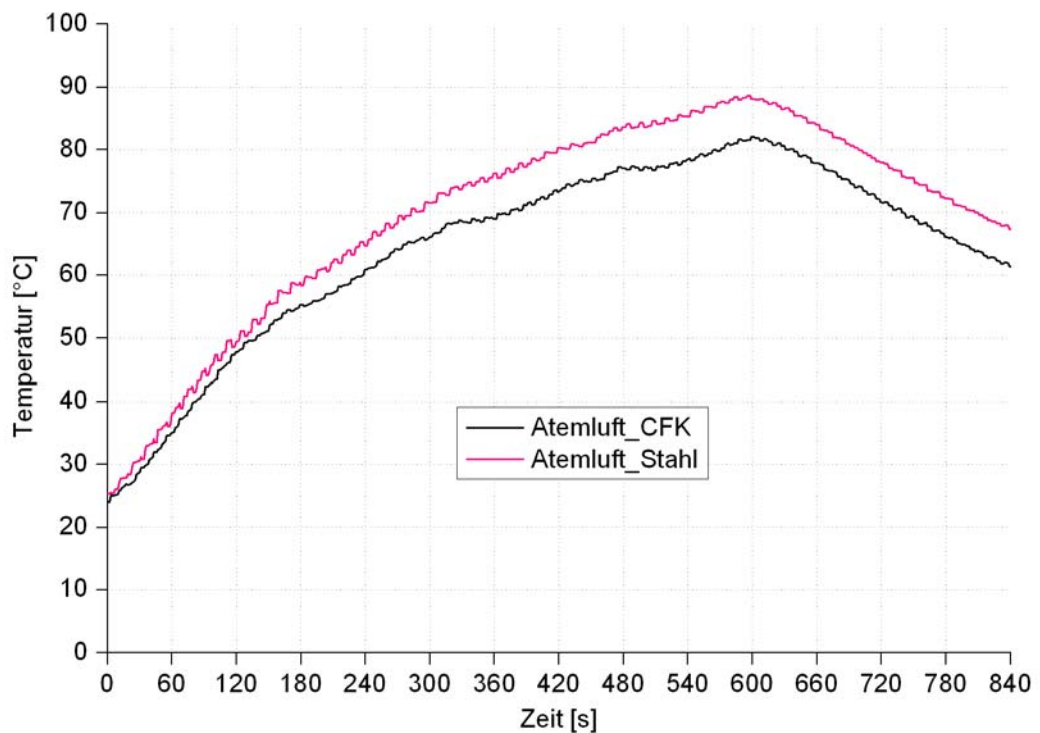


Bild 8.7: Gemittelte Atemlufttemperaturen bei CFK- und Stahl-Druckbehältern der VS_1

Die mittleren Atemlufttemperaturen zeigen, dass bei der Verwendung von Stahl-Druckbehältern tendenziell höhere Einatemtemperaturen erreicht werden. So liegt das Maximum des Verlaufs von Stahl-Druckbehältern bei 88,4 °C, während es bei CFK-Druckbehältern mit 81,6 °C um etwas weniger als 7 K niedriger liegt. Auch bei den im Bild 8.7 dargestellten gemittelten Verläufen ist deutlich zu erkennen, zu welchen Zeitpunkten die äußerlich aufgebrachte Wärmestrahlungsquelle zum Einsatz gelangte.

Atemwiderstände

Im Rahmen der Messwertaufzeichnung wurden die in der Maske resultierenden Atemwiderstände mittels eines Feindruckmanometers aufgezeichnet. Nachfolgend dargestellt sind in einer Übersicht wichtige Kennwerte bezüglich der gemessenen Atemwiderstände der VS_1. In einschlägigen Normen werden keine Grenzwerte für die Atemwiderstände für komplett ausgerüstete Atemschutzgeräte (Maske, LA, Pressluftatmer) vorgegeben. Eine quantitative Bewertung der gemessenen Atemwiderstände ist daher nicht möglich.

Tabelle 8.3: Ein- und Ausatemwiderstände der VS_1

	Versuche (V)								
	V1 N	V2 Ü	V3 Ü	V4 N	V5 Ü	V6 N	V7 Ü	V8 Ü	V9 Ü
Einatemwiderstände	-450 Pa bis -370 Pa	-20 Pa bis 100 Pa	-320 Pa bis 70 Pa	-540 Pa bis -500 Pa	50 Pa bis 110 Pa	-400 Pa bis -260 Pa	150 Pa bis 230 Pa	-40 Pa bis 90 Pa	100 Pa bis 180 Pa
Ausatemwiderstände	210 Pa bis 620 Pa	640 Pa bis 810 Pa	550 Pa bis 600 Pa	150 Pa bis 310 Pa	560 Pa bis 790 Pa	210 Pa bis 280 Pa	530 Pa bis 570 Pa	640 Pa bis 740 Pa	540 Pa bis 600 Pa
Anmerkungen	homogener Verlauf	homogener Verlauf	sehr unhomogener Verlauf	sehr homogener Verlauf	homogener Verlauf	Homogener Verlauf	sehr homogener Verlauf	homogener Verlauf	homogener Verlauf

Getrennt nach Normal- und Überdruck werden an dieser Stelle einige markante Atemwiderstandsverläufe dargestellt.

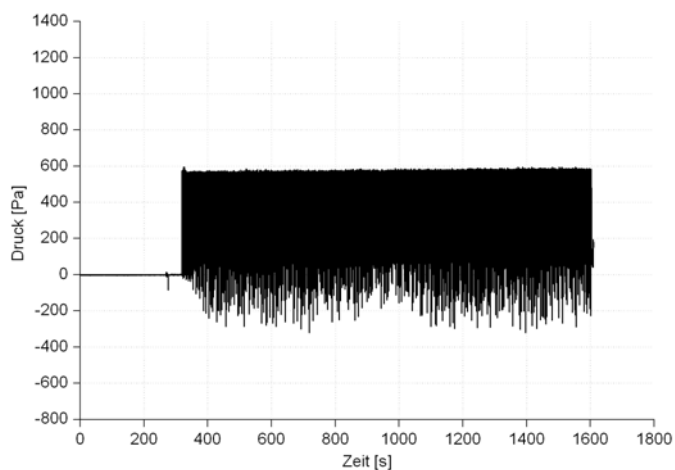


Bild 8.8: Atemwiderstände im Versuch 3 (Überdruckgerät)

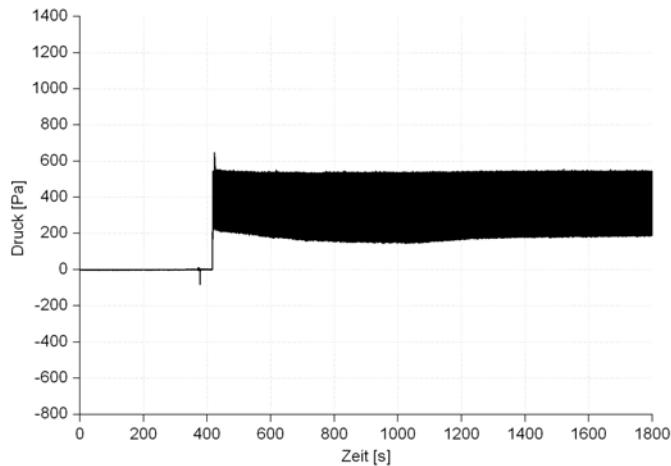


Bild 8.9: Atemwiderstände im Versuch 7 (Überdruckgerät)

Die Bilder 8.8 und 8.9 zeigen zwei sehr unterschiedliche Verläufe für Atemwiderstände bei Überdruckgeräten. Bild 8.9 zeigt einen sehr typischen und gleichzeitig sehr homogenen Verlauf für ein Überdruckgerät, bei dem sowohl der Ein- als auch der Ausatemwiderstand im positiven Druckbereich liegen. Der im Bild 8.8 dargestellte Verlauf hingegen ist gekennzeichnet durch homogene Ausatemwiderstände und sehr unhomogene Einatemwiderstände über die gesamte Versuchszeit hinweg. Eine Detailuntersuchung des Gerätes konnte nicht durchgeführt werden. Die Ursachenermittlung der unhomogenen Einatemwiderstände war daher nicht möglich.

Begründet durch die Tatsache, dass gemäß der einschlägigen Normen keine vorgeschriebenen Grenzwerte für Atemwiderstände von Kompletgerät (Vollmaske, LA, Pressluftatmer) einzuhalten sind, kann lediglich eine vergleichende qualitative Bewertung mit anderen Atemwiderstandsverläufen der Versuchsreihe durchgeführt werden. Es muss also festgestellt werden, dass im Vergleich zu den Atemwiderständen der übrigen Überdruckgeräte im Versuch 3 die unhomogensten und mit Abstand die niedrigsten Drücke gemessen wurden.

Die Druckverläufe bei den Versuchen mit Normaldruckgeräten in der VS_1 (siehe Bild 8.10 und 8.11) waren verhältnismäßig homogen. Keines der Geräte ist negativ hervorzuheben, da die Atemwiderstände in etwa in der gleichen Größenordnung lagen. Zudem wurden keine Ausfälle und Unregelmäßigkeiten festgestellt. Auch hier kann in Ermangelung von normativen Grenzwerten keine Aussage hinsichtlich deren Einhaltung getroffen werden.

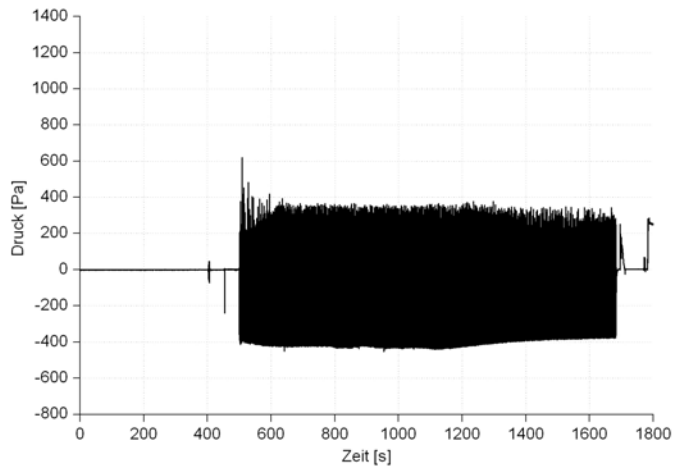


Bild 8.10: Atemwiderstände im Versuch 1 (Normaldruckgerät)

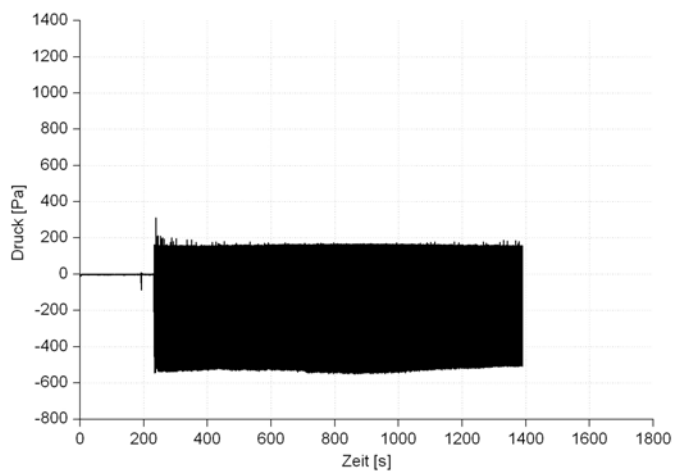


Bild 8.11: Atemwiderstände im Versuch 4 (Normaldruckgerät)

Beschädigungen

Wie bereits in den Kapiteln zuvor erwähnt, werden an dieser und anderer Stelle keine Fotos von Beschädigungen eingefügt. Im Rahmen der Versuche kam es zu zahlreichen Beschädigungen durch thermische Beaufschlagung, die jedoch als unkritisch zu werten sind, da diese nur äußerlich auftraten. Die Aufzeichnung der Videokamera, die am verfahrbaren Wärmestrahler angebracht war, lieferte aufschlussreiche Erkenntnisse hierzu. Bei der Auswertung der Videoaufnahmen wurde festgestellt, dass der Großteil der Beschädigungen durch das Einwirken der Wärmestrahlungsquelle verursacht wurde. Das Ausmaß der Beschädigungen intensivierte sich im weiteren Versuchsverlauf. Besonders betroffene Komponenten

waren Lungenautomaten, Flaschenbänder, Druckbehälter (Beschädigungen an Aufklebern und Lacken) und Manometer. Masken waren seltener und nur geringfügig beschädigt. Im Folgenden werden die aufgetretenen Beschädigungen und sonstige Beobachtungen stichpunktartig aufgelistet.

Lungenautomaten

- Aufschäumungen/Blasenbildung am Gehäuse
- Aufschäumungen/Blasenbildung am Handrad
- „Silikonummantelte“ Bauteile und Bauteile, bei denen Silikon verbaut wurde, wiesen im Allgemeinen einen deutlich geringeren Beschädigungsgrad auf

Flaschenbänder

- Verfärbungen
- Verkohlungen
- Flaschenbänder aus Metall wurden nicht beschädigt

Druckbehälter

- Blasenbildung/Aufschäumen eines Produktaufklebers
- Aufreißen einer Kunststoffschutzfolie, so dass die Kohlefaserwicklung frei lag
- Blasenbildung/Aufschäumen von Kunststoffkappen zum Schutz vor mechanischer Beschädigung)
- An Stahlflaschen kam es zu keinen Beschädigungen

Manometer

- Verformung des Schauglases (Bildung einer nach außen gewölbten Delle)
- Aufschäumen des Schauglases

Hochdruckleitungen

- Aufreißen der Kunststoffummantelung bis auf die Armierung nach Blasenbildung

8.2 Ergebnisse der Versuchsserie 2

Temperatur auf der Oberfläche der untersuchten Komponenten

Nachfolgend sind in den Bildern 8.12 und 8.13 zwei typische Temperaturverläufe dargestellt, die auf der Oberfläche untersuchter Atemschutzgeräte gemessen wurden.

Unterschieden wird erneut zwischen Stahl- und CFK-Druckbehältern.

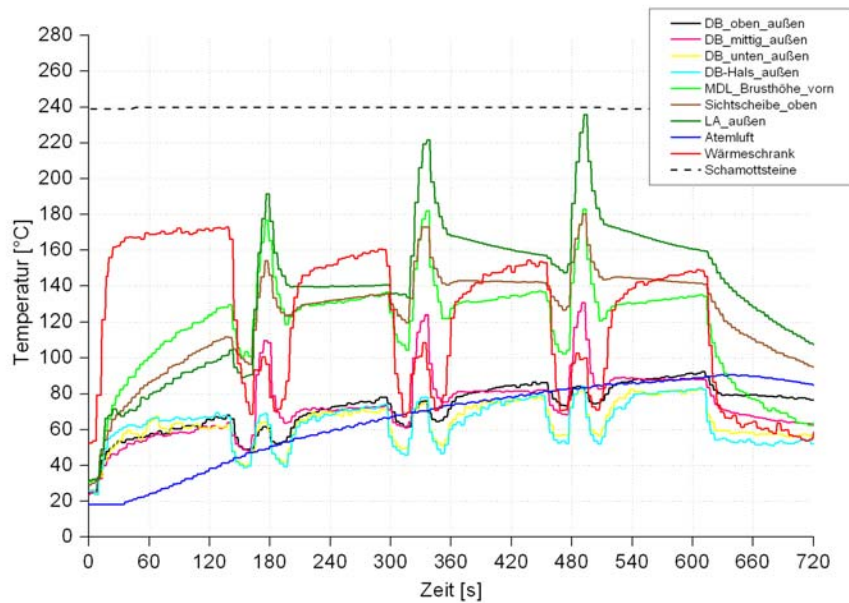


Bild 8.12: Temperaturverlauf des Versuches 25 (Stahl-Druckbehälter)

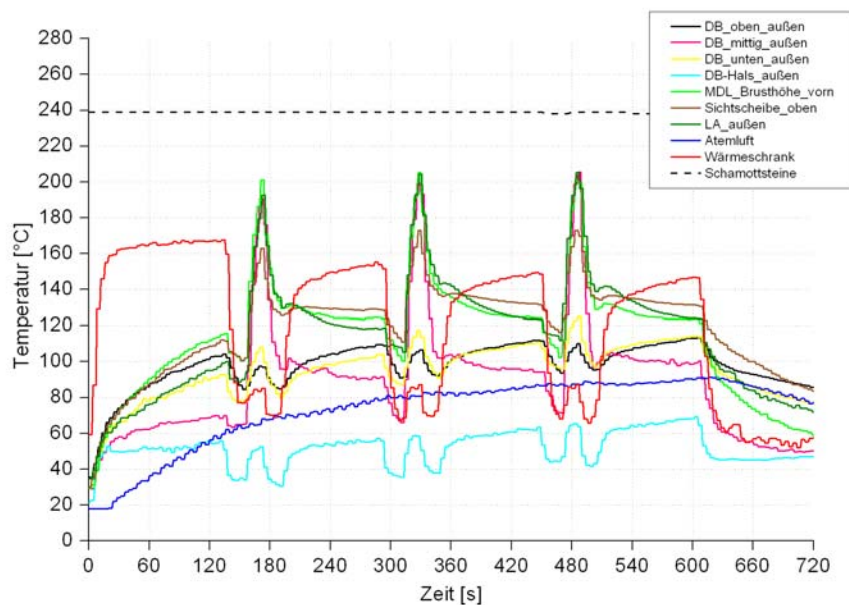


Bild 8.13: Temperaturverlauf des Versuches 12 (CFK-Druckbehälter)

Den Bildern ist zu entnehmen, dass die Temperaturverläufe der VS_2 zu denen der VS_1 grundsätzlich ähnlich sind. Es wird aber auch hier ersichtlich, dass auf der Oberfläche des Stahl-Druckbehälters deutlich niedrigere Temperaturen gemessen wurden, als bei CFK-Druckbehältern. Wie bereits im Abschnitt 8.1 erläutert, kann diese Tatsache auf das bessere Wärmeleitverhalten von Stahl zurückgeführt werden. Das CFK-Behältermaterial weist entsprechend eine geringere Wärmeleitfähigkeit auf. Die Wärme wird von der Oberfläche der CFK-Druckbehälter schlechter ins Innere geleitet, wodurch höhere Temperaturen auf der Oberfläche gemessen werden. Aufgrund der hohen Diversität der eingesetzten CFK-Behältermaterialien ist die Angabe eines exakten Wärmeleitkoeffizienten ohne eine experimentelle Bestimmung nicht möglich.

Festgestellt wurde auch in der VS_2, dass die Temperatur auf Bauteilen, die aus schwarzem Silikon bestehen bzw. davon umschlossen sind (Bild 8.14), deutlich höher sind, als auf schwarzen Duroplast-Bauteilen.

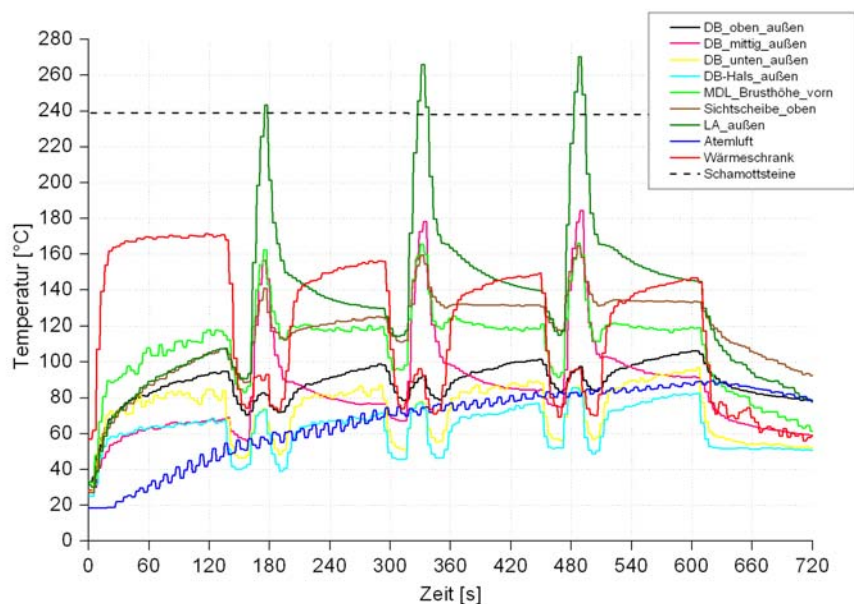


Bild 8.14: Temperaturverlauf des Versuches 14 (CFK-Druckbehälter)

Ebenso wie bei der VS_1 wurde beobachtet, dass sich ein Fabrikat eines angebrachten Produktaufklebers auf Druckbehältern offensichtlich exotherm zersetzte. Im Ergebnis wurden extrem hohe Temperaturen auf der Oberfläche der betroffenen Druckbehälter gemessen (siehe Bild 8.15). Bei dieser Art von Produktaufklebern wurden starke Blasenbildungserscheinungen, starke Verfärbungen und Verkohlungen festgestellt. Im zweiten Versuch mit diesem Produktaufkleber in der VS_2 löste sich

aufgrund der Blasenbildung das Thermoelement von der Oberfläche. In der Folge wurden niedrigere Temperaturen gemessen.

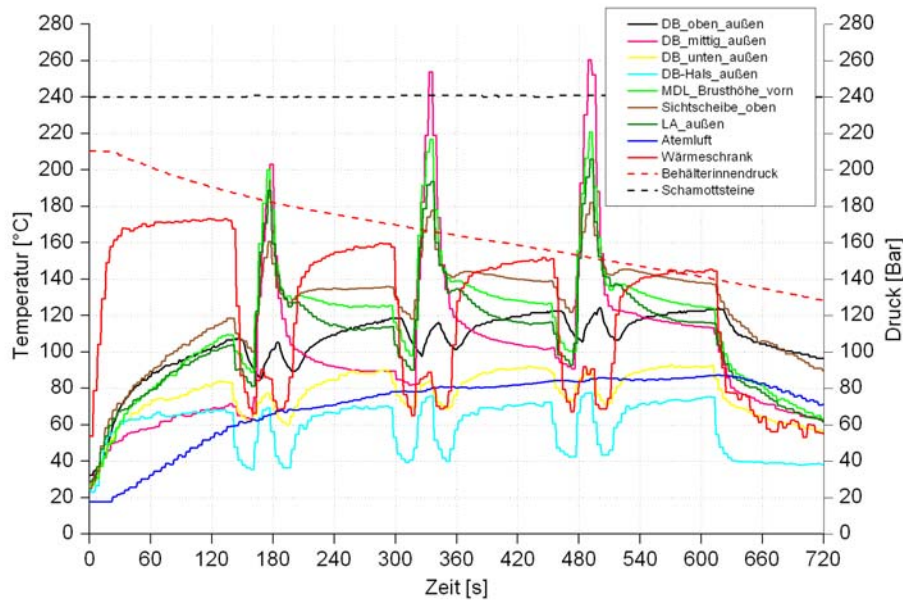


Bild 8.15: Temperatur- und Druckverlauf des Versuches 23 (CFK-Druckbehälter)

Wie auch in der VS_1 kam es bei einem CFK-Druckbehältertyp (zwei Experimente mit diesem Typ in der VS_2) zur fast vollständigen Zerstörung der um den Druckbehälter gelegten Schutzfolie, so dass die Kohlefaserwicklung offen zugänglich frei lag. Beschädigungen druckrelevanter Komponenten konnten nicht festgestellt werden.

In der nachfolgenden Tabelle 8.4 sind zur Übersicht die an den einzelnen Messstellen gemessenen Maximaltemperaturen aller Experimente der VS_2 dargestellt. Bei den Versuchen 18 und 21 wurden zusätzlich zu den Temperaturen auf der Oberfläche der Bauteile auch die Temperaturen im Inneren des Druckbehälters gemessen.

Tabelle 8.4: Maximaltemperaturen der VS_2

Versuch DB- Material	Maximale Temperaturen an den Messstellen in °C							
	DB oben	DB mittig	DB unten	DB Hals	MDL	Sicht- scheibe	LA	Atem- luft
10, Stahl	96,5	142	85,8	81,6	190,2	165,9	184,2	92,3
11, CFK	120,4	209,3	100,8	71,1	185,7	179,9	201,1	89,9
12, CFK	113,3	205,6	125,1	69,2	205,2	173,1	205,1	91,4
13, Stahl	90	125,8	80,6	84,5	164,6	163,4	263	90,8
14, CFK	106,4	184,4	97	85,9	166,1	164,7	270,3	89,5
15, CFK	101,8	175	86,5	84,7	160,6	163,1	264,3	81,1
16, Stahl	90,4	117,9	78,1	82,8	190,8	175	217,8	96,9
17, CFK	104,1	169,5	86,8	104,3	184,9	168,6	241,7	89,4
18, CFK	149,7*	186,2*	114,5*	-*	170,5	173,9	229,2	85,2
19, CFK	104,5	168,6	82,1	95,6	155,2	170,4	249	80
20, CFK	120,9	190,8	114,1	65,9	157,7	167,4	254,4	89
21, Stahl	118,2*	121,9*	77,6*	-*	203,1	171	192	89,3
22, CFK	111	197,4	113,2	69,3	155,4	168	190,9	84,5
23, CFK	124,5	260,5	92,9	77,6	220,7	182	205,9	87,3
24, Stahl	89,9	123,5	89,6	91,4	163,2	169,3	261	89
25, Stahl	92,4	130,8	82,9	84,3	182,8	180,4	235,8	90,7
26, CFK	-**	181,6	90,6	78,3	164	165,1	271	84,1
27, CFK	99,5	177,3	85,8	104	151,2	174,6	236,8	83,8

** Messstelle ist ausgefallen

Bedingt durch die Konstruktion der Thermoelement-Kaskade (siehe Abschnitt 6.1) mussten die Druckbehälter im Versuch um 180° vertikal gedreht positioniert werden. Das Druckbehälterventil lag dadurch oben und der Boden des Druckbehälters entsprechend unten. Durch diesen Umstand wurde die Bezeichnung der Messstellen am Druckbehälter bei diesen beiden Versuchen verändert. Die Messstelle DB_Hals wurde nicht angebracht. Die Werte sind in Tabelle 8.4 mittels eines * besonders gekennzeichnet. Um den Prüfadapter gegenüber thermischen Einflüssen abzuschirmen, wurde dieser mittels PROMAGLAF®-HTI Glaswolle ummantelt. Bei dem dargestellten Gerät wurde gleichzeitig der Flascheninnendruck erfasst. Die hierzu notwendige verlängerte Hochdruckleitung wurde ebenfalls mittels PROMAGLAF®-HTI Glaswolle umhüllt.

Temperatur im Druckbehälter und Innendruck

Im Rahmen der Versuche der VS_2 konnte bei zwei Versuchen die Temperatur im Druckbehälter und bei drei Versuchen der Behälterinnendruck gemessen werden. Einer der Druckverläufe wurde bereits im Bild 8.15 hier im Kapitel 8.2 vorgestellt. Bei einem Versuch wurden gleichzeitig sowohl die Temperatur als auch der Druck im Druckbehälter gemessen. Zur besseren Übersicht wurden in den nachfolgend dargestellten Diagrammen nicht alle Temperaturverläufe der Messstellen dargestellt, an denen Messwerte erhalten wurden. Als Referenzmessstellen wurden die Wärmeschrank- und die Einatemtemperatur eingefügt.

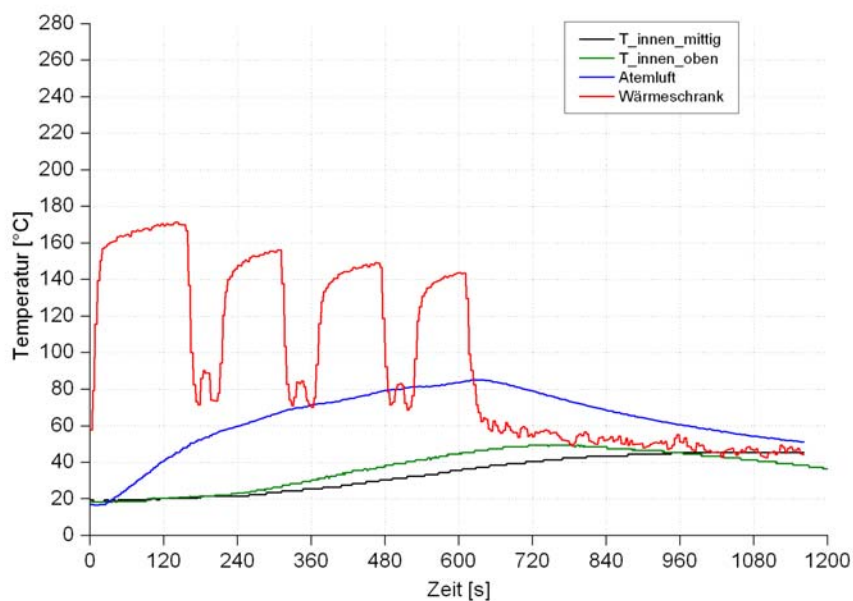


Bild 8.16: Temperaturverläufe des Versuches 18 (CFK-Druckbehälter)

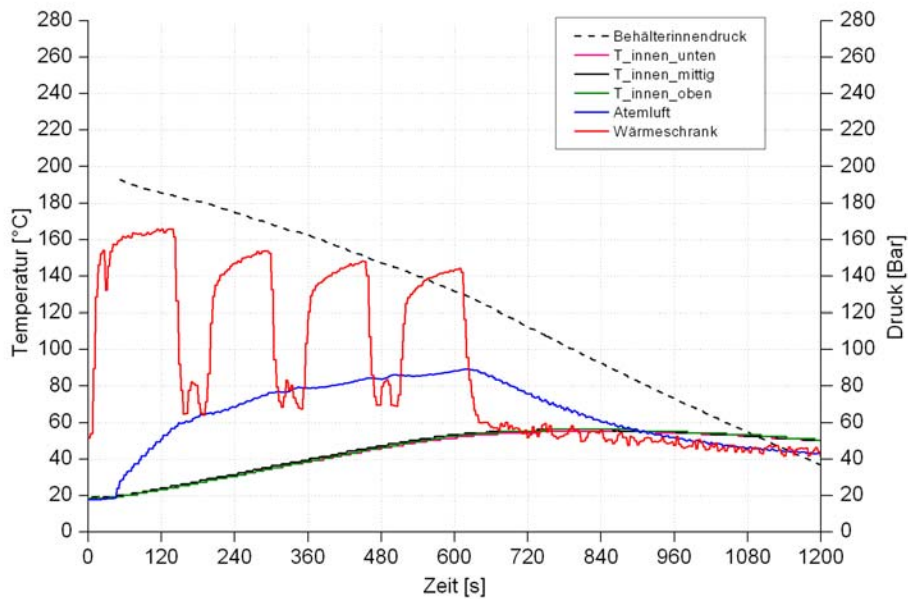


Bild 8.17: Temperatur- und Druckverlauf des Versuches 21 (Stahl-Druckbehälter)

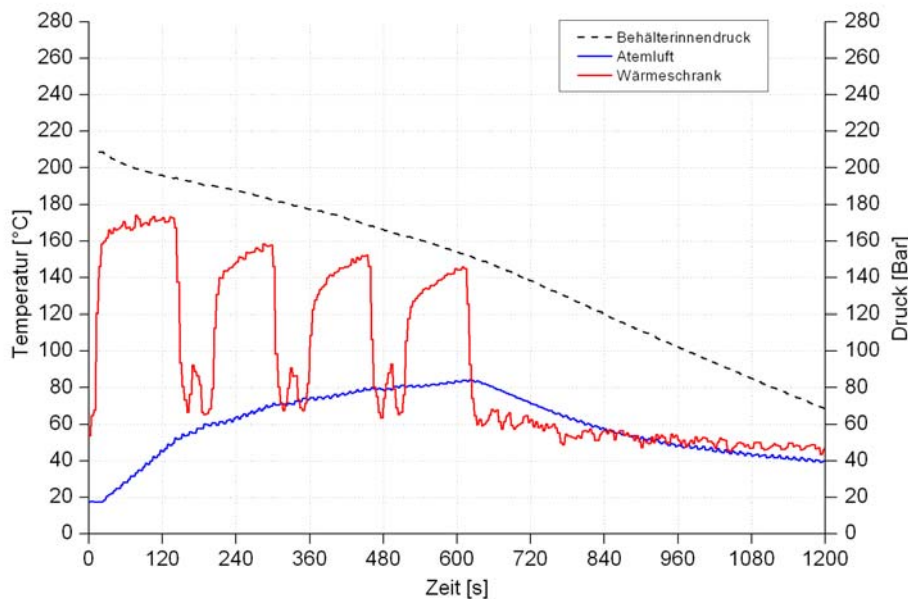


Bild 8.18: Temperatur- und Druckverlauf des Versuches 22 (CFK-Druckbehälter)

Es zeigt sich, dass die Behälterinnentemperaturen erst nach einer Anlaufzeit von 1 min (Stahl-Druckbehälter) bzw. 3 min (CFK-Druckbehälter) signifikant steigen. Verursacht wird der zeitlich versetzte Anstieg der Innentemperatur beim untersuchten CFK-Druckbehälter durch die schlechteren Wärmeleiteigenschaften des Materials. Begünstigt wird dieser Umstand vermutlich durch die im Vergleich zu Stahl-Druckbehältern größere Wandstärke des CFK-Druckbehälters.

Die Tabelle 8.5 zeigt die gemessenen Maximaltemperaturen im Inneren der untersuchten Druckbehälter.

Tabelle 8.5: Maximaltemperaturen im Inneren der Druckbehälter (VS_2)

Versuch DB-Material	Maximale Temperaturen an den Messstellen in °C		
	T_innen_oben	T_innen_mittig	T_innen_unten
18, CFK	49,5	45,5	_**
21, Stahl	56,4	56,4	55,4

** Messstelle wurde beim Einbau des Prüfadapters beschädigt

Es zeigt sich, dass die Temperaturen im untersuchten Stahl-Druckbehälter bis maximal 56,4 °C steigen wobei die Maxima der drei Temperaturmessstellen erst deutlich nach der Beendigung der Versuche erreicht werden. Die Temperaturen fallen anschließend nur langsam. Auffällig wird, dass an allen drei Messstellen fast identische Messwerte erhalten wurden. Eine Temperaturverteilung über die Höhe des Druckbehälters ist damit nicht messbar. Dies deutet auf einen sehr homogenen Wärmeeintrag über die gesamte Oberfläche des Druckbehälters hin. Die im Inneren des CFK-Druckbehälters aufgezeichneten Temperaturverläufe unterscheiden sich dagegen deutlich voneinander. Das Temperaturmaximum im oberen Bereich des Druckbehälters wird bei etwa 12 min erreicht, während Maximalwerte für die Temperatur in der Mitte des Druckbehälters erst nach etwa 16 min erreicht werden.

Die gemessenen Werte sind als positiv zu werten, da sie trotz äußerlicher thermischer Beaufschlagung zum größten Teil deutlich unter der für Pressluftatmer vorgeschriebenen Funktionstemperatur von 60 °C lagen. Es zeigt sich aber auch, dass die im Übergang vom Lungenautomat zur Vollmaske gemessenen Atemlufttemperaturen offensichtlich nur zu einem geringen Teil durch die im Inneren des Druckbehälters vorliegende Temperatur beeinflusst werden. Entsprechend muss der wesentliche Anteil des Wärmeeintrages, der zur Erhöhung der Atemlufttemperatur führt, auf dem Weg vom Druckbehälter zum Lungenautomaten wirken.

Die im Inneren der Druckbehälter gemessenen Druckverläufe zeigen trotz äußerlicher Wärmebeaufschlagung eine kontinuierlich abfallende Tendenz. Dennoch ist der Einfluss der äußerlich wirkenden Wärmebeaufschlagung auf den Behälterinnendruck messbar, denn nach dem Öffnen der Wärmeschranktüren und dem damit verbundenen

Beenden der Wärmebeaufschlagung, fällt der Druck messbar stärker als während der Wärmebeaufschlagung (s. Bilder 8.17 und 8.18).

Einatemtemperaturen

Die Einatemtemperaturen, getrennt nach dem Druckbehältermaterial, sind in den folgenden zwei Bildern dargestellt.

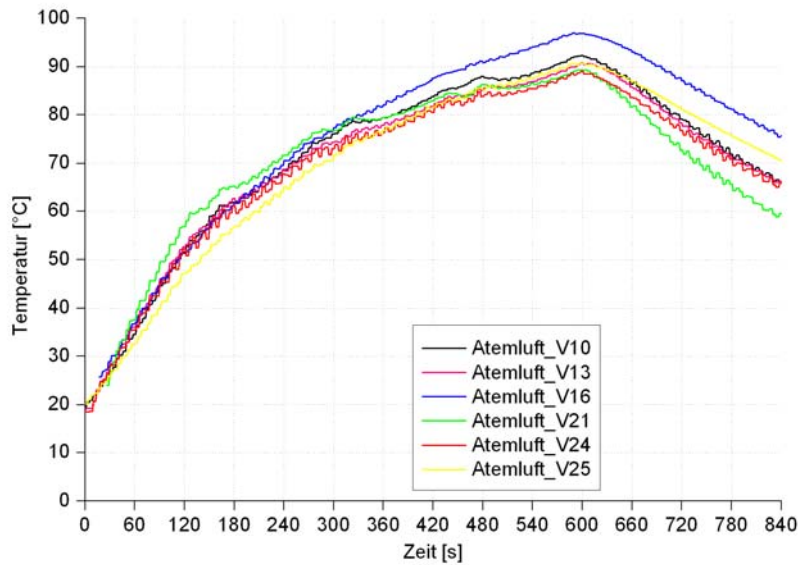


Bild 8.19: Atemlufttemperatur bei Stahl-Druckbehältern der VS_2

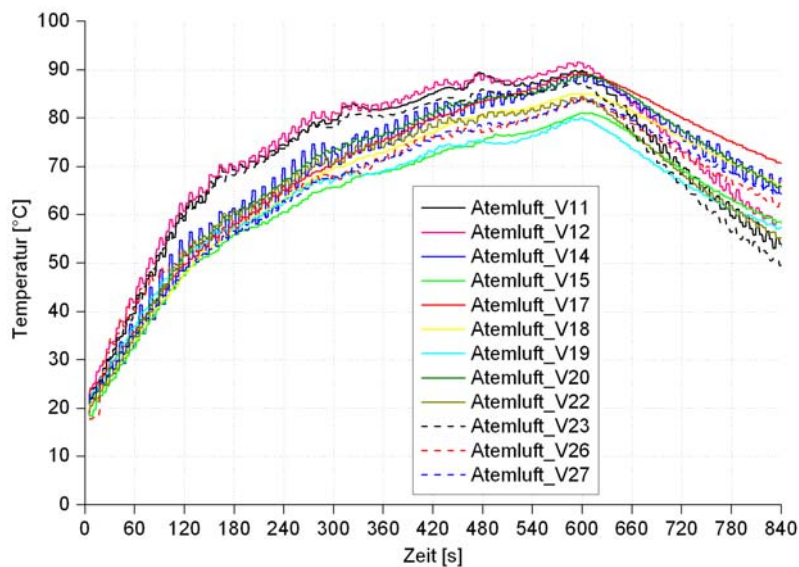


Bild 8.20: Atemlufttemperatur bei CFK-Druckbehältern der VS_2

Es zeigt sich, dass die Verläufe insbesondere bei den CFK-Druckbehältern zum Teil sehr unterschiedlich sind. Es zeichnet sich dennoch ab, dass die Einatemtemperaturen bei der Verwendung von Stahl-Druckbehältern geringfügig höher sind. Dies zeigt auch das nachfolgend dargestellte Bild 8.21. Darin sind die einzelnen Temperaturverläufe, getrennt nach dem Druckbehältermaterial, gemittelt dargestellt.

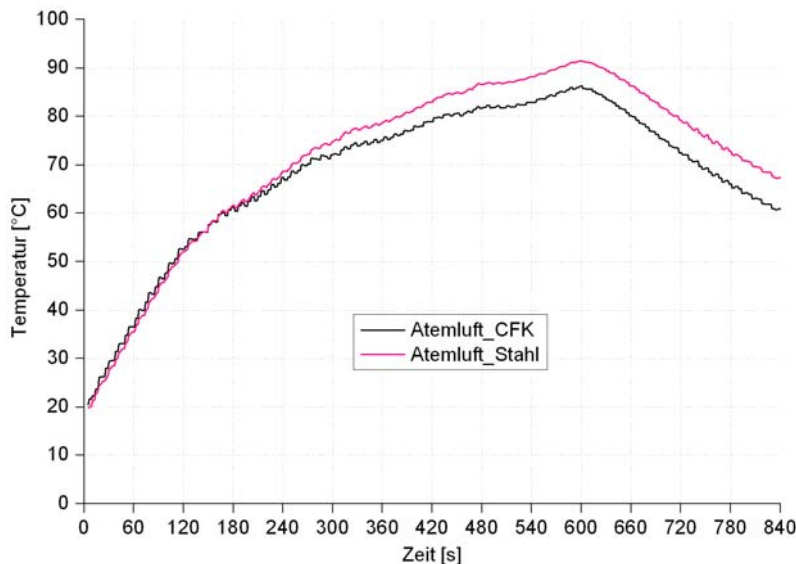


Bild 8.21: Gemittelte Atemlufttemperaturen bei CFK- und Stahl-Druckbehältern der VS_2

Die Verläufe zeigen prinzipiell einen qualitativ ähnlichen Verlauf. Auch die zusätzliche Wärmebeaufschlagung mittels Wärmestrahlung ist anhand kleinerer Maxima erkennbar. Innerhalb der ersten 4 min sind die Verläufe nahezu identisch. Mit weiter fortschreitender Versuchszeit laufen die Kurven auseinander. Ihr Maximum erreichen beide Kurven bei 86,3 °C (CFK) und 91,5 °C.

Die hier im Abschnitt 8.2 dargestellten Temperaturverläufe im Inneren der Druckbehälter sowie den in Tabelle 8.5 daraus extrahierten Maximalwerten zeigen, dass die Temperaturen mit Anlaufzeit von 1 min (Stahl-Druckbehälter) bzw. 3 min (CFK-Druckbehälter) signifikant steigen. Daraus kann geschlossen werden, dass ab einer Versuchszeit von ca. 4 min der Einfluss der Behälterinnentemperatur auf die Atemlufttemperatur steigt. Entsprechend sind die Einatemtemperaturen ab diesem Zeitpunkt bei der Verwendung von Stahl-Druckbehältern höher.

Atemwiderstände

Die Messung der Atemwiderstände erfolgte obligatorisch bei jedem der 27 Versuche. Auffällige bzw. kritische Verläufe wurden nicht registriert. Dennoch wurden wie auch in der VS_1 Verläufe aufgezeichnet, die entweder sehr homogen oder sehr unhomogen waren. Insbesondere bei Überdruckgeräten zeigte sich, dass die im Atemanschluss gemessenen Atemwiderstände leicht in den Unterdruckbereich gingen (s. Bild 8.22). Eine quantitative Bewertung der Ein- und Ausatemwiderstände kann mangels Grenzwerten nicht vorgenommen werden. Beispielhaft werden an dieser Stelle je drei Druckverläufe für Normal- und Überdruckgeräte vorgestellt. Ausfälle durch z.B. Abblasen oder Blockieren von Lungenautomaten wurden nicht beobachtet.

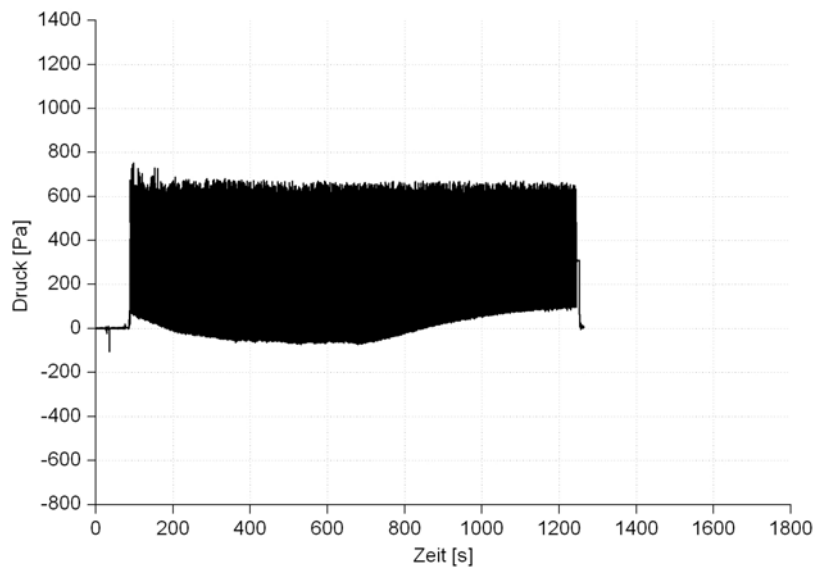


Bild 8.22: Atemwiderstände im Versuch 11 (Überdruckgerät)

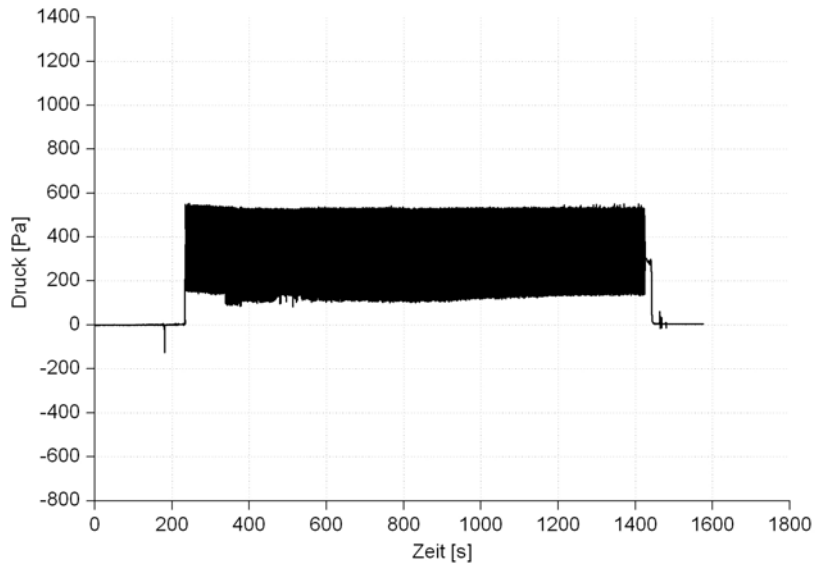


Bild 8.23: Atemwiderstände im Versuch 18 (Überdruckgerät)

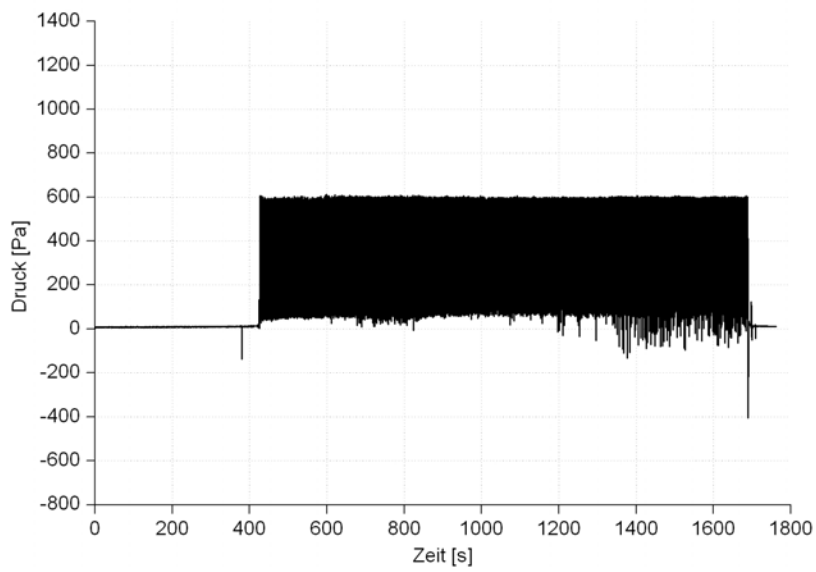


Bild 8.24: Atemwiderstände im Versuch 19 (Überdruckgerät)

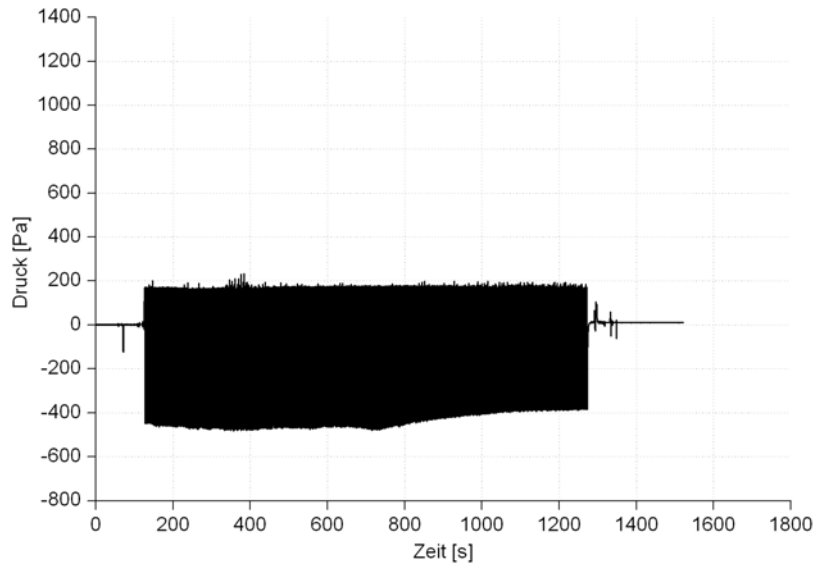


Bild 8.25: Atemwiderstände im Versuch 10 (Normaldruckgerät)

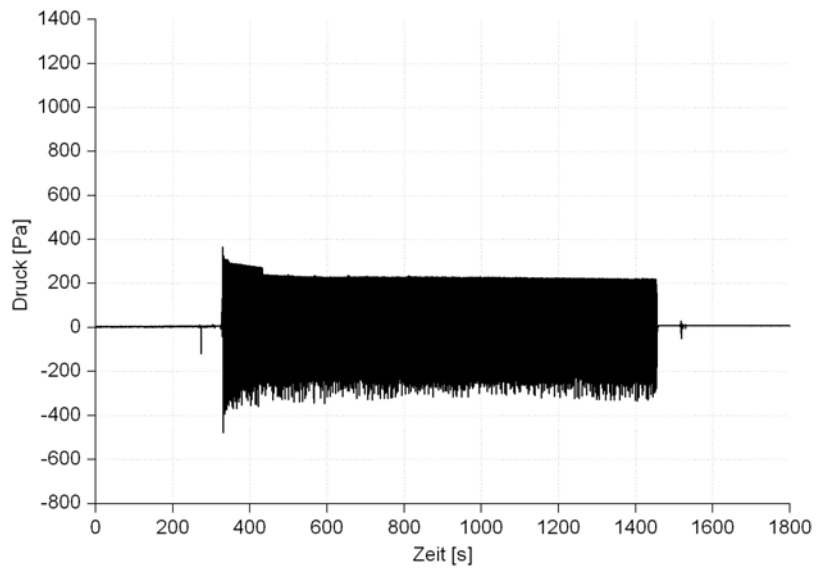


Bild 8.26: Atemwiderstände im Versuch 13 (Normaldruckgerät)

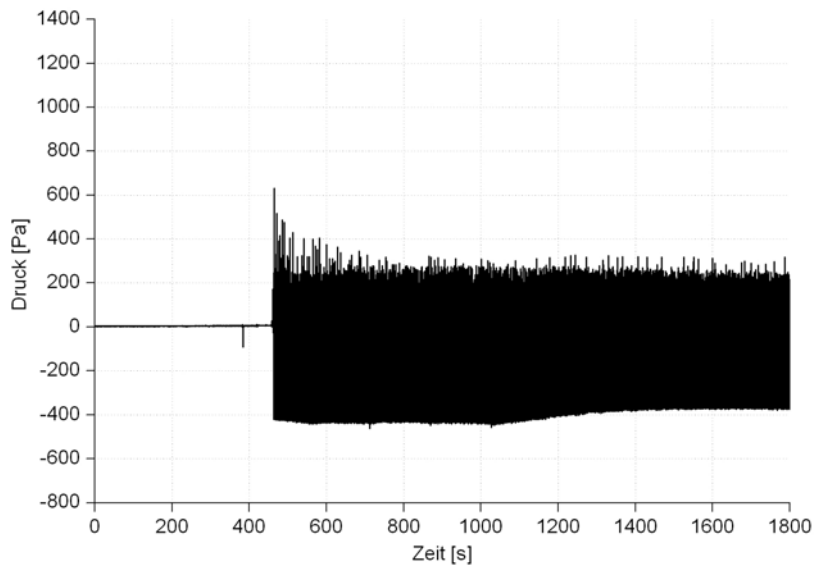


Bild 8.27: Atemwiderstände im Versuch 21 (Normaldruckgerät)

Beschädigungen

Wie in VS_1 wurden im Rahmen der Versuche in der VS_2 die untersuchten Prüflinge zum Teil stark beschädigt. Diese Beschädigungen sind als unkritisch zu werten, da diese nur äußerlich auftraten. Betroffen waren die gleichen Komponenten wie bei der VS_1. Der Beschädigungsgrad war bei den hier dargestellten Versuchen allerdings etwas größer. Mit Hilfe der am Wärmestrahler angebrachten Videokamera konnte festgestellt werden, dass die Beschädigungen erst bei der ersten Wärmestrahlungsbeaufschlagung auftraten. Das Ausmaß der Beschädigungen intensivierte sich im weiteren Versuchsverlauf.

Lungenautomaten

- Aufschäumungen/Blasenbildung am Gehäuse
- Aufschäumungen/Blasenbildung am Handrad
- „Silikonummantelte“ Bauteile und Bauteile, bei denen Silikon verbaut wurde, wiesen im Allgemeinen einen deutlich geringeren Beschädigungsgrad auf

Flaschenbänder

- Verfärbungen
- Verkohlungen
- Flaschenbänder aus Metall wurden nicht beschädigt

Druckbehälter

- Blasenbildung/Aufschäumen zweier Produktaufkleber
- Aufreißen zweier Kunststoffschutzfolien, so dass die Kohlefaserwicklung frei lag
- Blasenbildung/Aufschäumen von Kunststoffkappen zum Schutz vor mechanischer Beschädigung)
- An Stahlflaschen kam es zu keinen Beschädigungen

Manometer

- Verformung von Schaugläsern (Bildung einer nach außen gewölbten Delle)
- Aufschäumen des Schauglases

Hochdruckleitungen

- Aufreißen der Kunststoffummantelung bis auf die Armierung nach Blasenbildung

8.3 Ergebnisse der Versuchsserie 3

Im Unterschied zu den VS_1 und VS_2 wurde in der VS_3 auf den Einsatz der Wärmestrahlungsquelle verzichtet. Gleichzeitig wurde die Versuchszeit auf 15 min erhöht. Es kam bei den Versuchen 30, 33 und 41 zu Ausfällen von. Bei den Experimenten 36, 38, 39 und 45 wurden deutlich erhöhte Atemwiderstände gemessen. Diese betroffenen Geräte wurden als untersuchungsbedürftig eingestuft.

Entgegen der Gliederung der Abschnitte 8.1 und 8.2 werden die eben genannten Versuche hier im Kapitel 8.3 ausführlich beschrieben und diskutiert. Der DEKRA EXAM GmbH wurden die Geräteensembles der Versuche 30, 33, 41, 36 und 38 zur Detailuntersuchung übergeben.

Temperatur auf der Oberfläche der untersuchten Komponenten

Die nachfolgenden beiden Bilder 8.28 und 8.29 zeigen zwei typische Temperaturverläufe, die auf der Oberfläche untersuchter Atemschutzgeräte gemessen wurden. Die Unterscheidung erfolgt auf der Basis der Materialien der Druckbehälter.

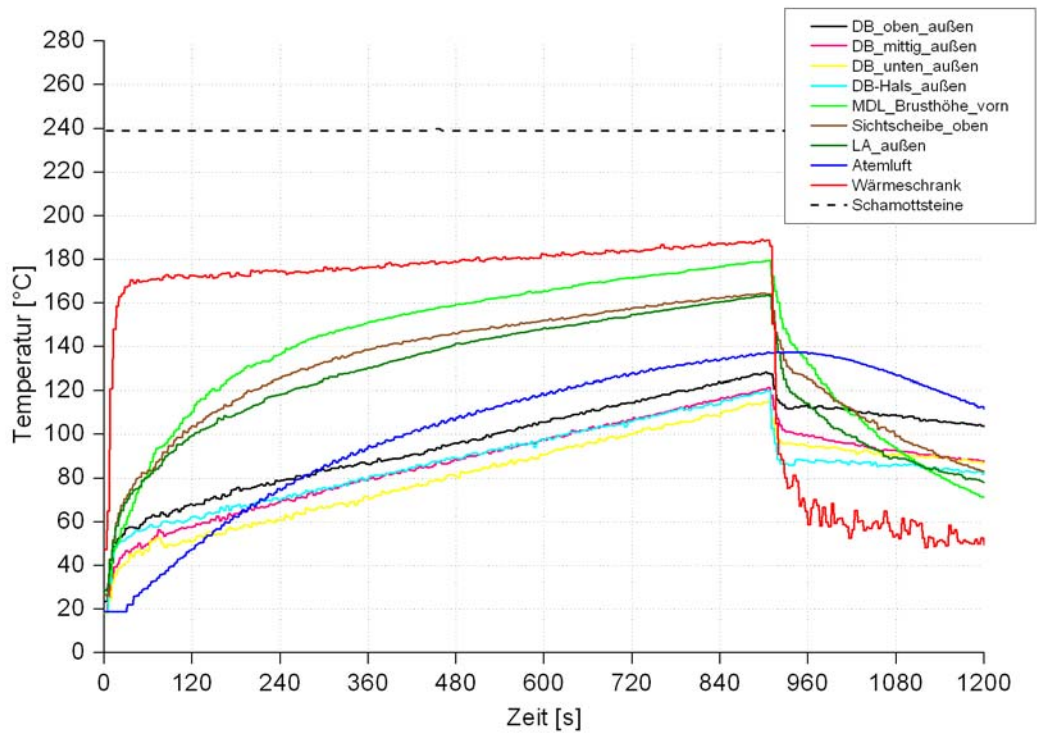


Bild 8.28: Temperaturverlauf des Versuches 32 (Stahl-Druckbehälter)

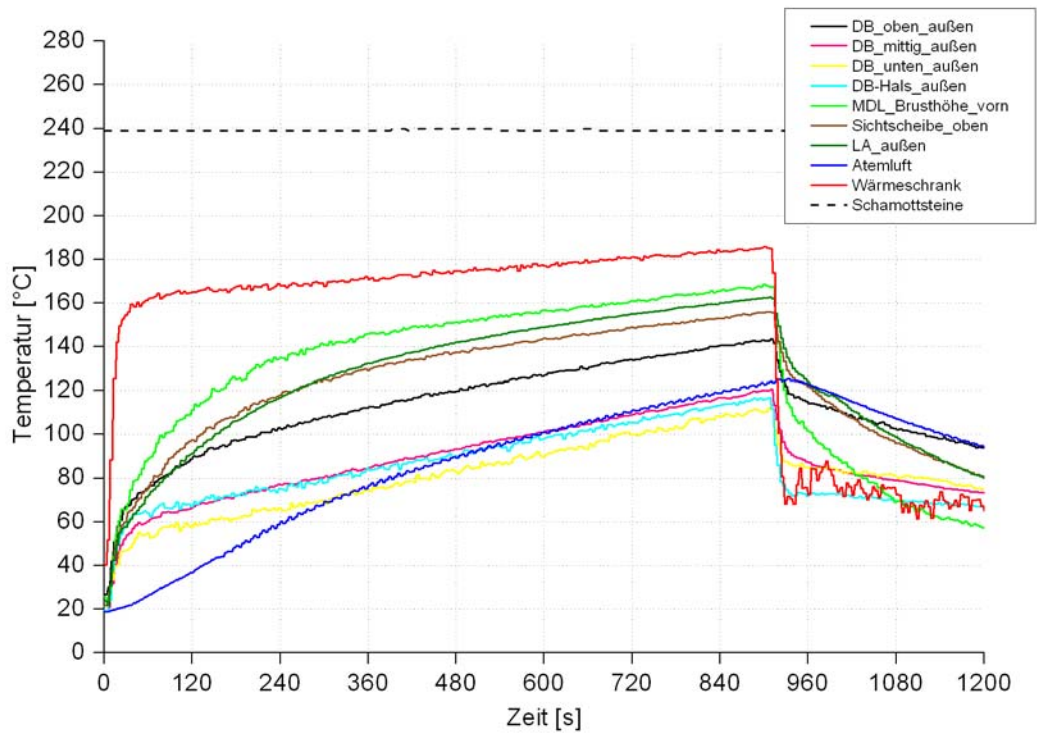


Bild 8.29: Temperaturverlauf des Versuches 34 (CFK-Druckbehälter)

Wie bei den VS_1 und VS_2 zeigt sich auch hier, dass qualitativ keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Verläufen der Stahl- und CFK-Druckbehälter bestehen. Auch zeigt sich erneut, dass an CFK-Druckbehältern in der Regel höhere Oberflächentemperaturen erreicht werden. Dies ist auf das schlechtere Wärmeleitverhalten des Behältermaterials CFK zurückzuführen (siehe Abschnitte 8.1 und 8.2 - Temperatur auf der Oberfläche der untersuchten Komponenten). Dennoch variieren die am Druckbehälter gemessenen Temperaturen sehr stark. Sichtbar wird auch, dass die Messwerte an Messstellen MDL, Sichtscheibe und Lungenautomat bei den einzelnen Versuchen weniger stark variieren und im Vergleich zu den Messwerten am Druckbehälter deutlich höher liegen. Durch den Wegfall der Wärmestrahlungsquelle werden an Lungenautomaten, die aus schwarzem Silikon bestehen bzw. davon umschlossen sind, keine signifikant höheren Temperaturen festgestellt. Auch der äußerliche Beschädigungsgrad aller Geräte war im Verhältnis zu den beiden zuvor durchgeführten Versuchsserien deutlich niedriger.

Nachfolgend dargestellt sind die an den einzelnen Messstellen erhaltenen Maximaltemperaturen aufgelistet. Die Versuche, bei denen es zu konkreten Ausfällen kam, sind rot markiert. Hinzuzufügen ist, dass beide Geräte, bei denen Stahl-Druckbehälter zum Einsatz kamen, bereits bei einer Versuchszeit von 7 min 58 s bzw. 8 min 50 s Zeitpunkt begannen auszufallen. Dabei wurden kontinuierlich steigende Einatemwiderstände gemessen. Zu den Geräteausfällen kam es dann bei den Versuchszeiten 9 min 29 s (V33) und 11 min 9 s (V41). Da die Versuche beim Auftreten der Störungen abgebrochen wurden, sind die dargestellten Maximaltemperaturen zum Teil deutlich niedriger. Im Versuch 30 wurden ab einer Versuchszeit von 11 min 50 s erhöhte Atemwiderstände gemessen. Zum Ausfall kam es jedoch erst bei der Versuchszeit von 14 min 40 s vor der planmäßigen Beendigung des Versuches. Die im Versuch gemessenen Maximaltemperaturen sind aus diesem Grund in der gleichen Größenordnung, wie die übrigen planmäßig verlaufenen Versuche.

Tabelle 8.6: Maximaltemperaturen der VS_3

Versuch DB- Material	Maximale Temperaturen an den Messstellen in °C							
	DB oben	DB mittig	DB unten	DB Hals	MDL	Sicht- scheibe	LA	Atem- luft
28, Stahl	128	122,8	121,7	117,8	171,6	168,7	169,7	136,9
29, CFK	139,6	115,6	114,3	119,6	158,8	160,7	160,6	120,5
30, CFK	148,5	119,7	156,7	101	167,3	164,2	169,5	138,9**
31, CFK	131,9	117,3	120	110,3	156,5	157,7	159	126,4
32, Stahl	128,3	121,5	115,2	120,1	179,3	164,6	163,6	137,6
33, Stahl	112,3	98,9	93,9	107,7	154,4	150,8	158,7	133,7**
34, CFK	143,5	120,8	112,2	117	168,4	155,8	162,7	125,3
35, CFK	159	132,5	149,6	83,2	167,8	158,7	166,5	129,7
36, CFK	157,6	125,6	129,9	102,5	164	162,6	161,3	135,6
37, Stahl	123,4	113,9	110,1	106,7	162,4	160,6	169	133,1
38, CFK	144,6	121,7	116	118,9	170,5	158,3	162,8	124,2
39, CFK	144,5*	109,2*	141,5*	-	160,2	159,3	158,6	131,4
40, Stahl	129	117,8	118,3	107,6	172	163,1	168,2	136,1
41, Stahl	106,2*	96,8*	121,3*	-	173,3	154,6	156,8	139,9**
42, CFK	128,3	118,5	110,8	104,6	157,1	156,2	180,2	123,5
43, CFK	138,6	118,2	111,1	120,5	157,2	159,4	158,1	121,8
44, CFK	150,2	130,2	159,7	84,3	162,6	157,7	164,5	125,3
45, CFK	167,2	109,7	132,5*	91,9	158,7	161,2	157,8	127,2

** der Lungenautomat war zu diesem Zeitpunkt bereits blockiert, die Kühlung durch die Atemluft war zu diesem Zeitpunkt nicht mehr gegeben.

Wie auch im Abschnitt 8.3 – „Temperatur auf der Oberfläche der untersuchten Komponenten“ mussten diejenigen Druckbehälter, bei denen die Behälterinnentemperatur gemessen wurden um 180° vertikal gedreht untersucht werden. Die Bezeichnungen der Messstellen mussten entsprechend geändert werden. Details können dem zitierten Abschnitt entnommen werden. Die betreffenden Messwerte sind in der Tabelle 8.6 mittels eines * gekennzeichnet.

Temperatur im Druckbehälter und Innendruck

Wie auch bei den zuvor dargestellten Versuchsreihen, wurden auch in der VS_3 in je einem Stahl- und einem CFK-Druckbehälter Messungen der Behälterinnentemperatur durchgeführt. Bei beiden Versuchen wurde gleichzeitig der Behälterinnendruck

miterfasst. In einem weiteren Versuch wurde nur der Druck im Druckbehälter gemessen. Nachfolgend dargestellt sind in den Bildern 8.30 bis 8.32 die Temperatur- und Druckverläufe. Als Bezugstemperaturen wurden die Messstellen Atemluft und Wärmeschrank eingefügt. Im Versuch, in dem zusätzlich zur Messung der Temperaturen auf der Oberfläche der Bauteile auch der Behälterinnendruck erfasst wurde, sind alle Verläufe im Diagramm dargestellt.

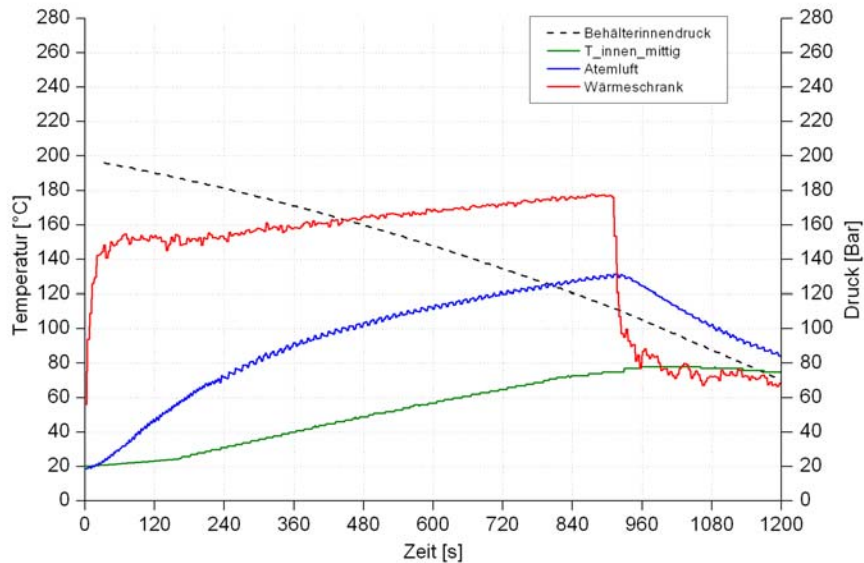


Bild 8.30: Temperatur- und Druckverlauf des Versuches 39 (CFK-Druckbehälter)

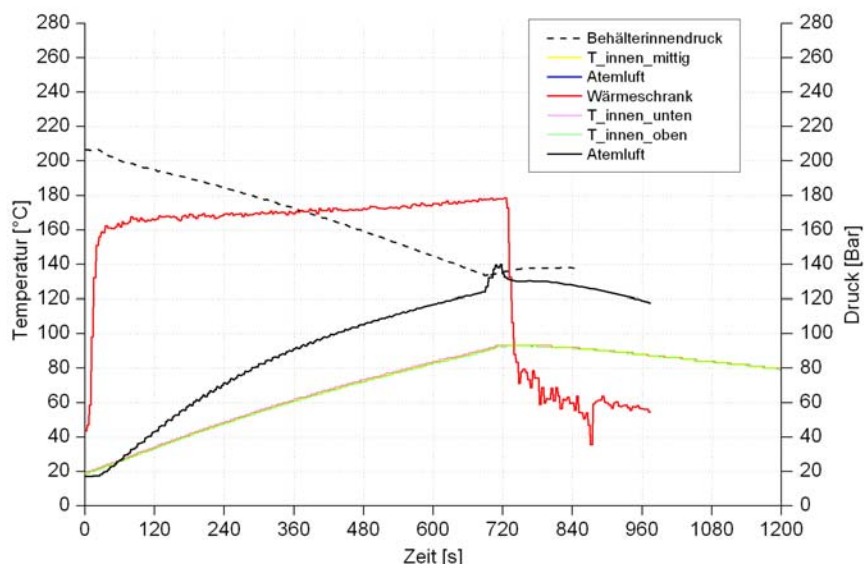


Bild 8.31: Temperatur- und Druckverlauf des Versuches 41 (Stahl-Druckbehälter)

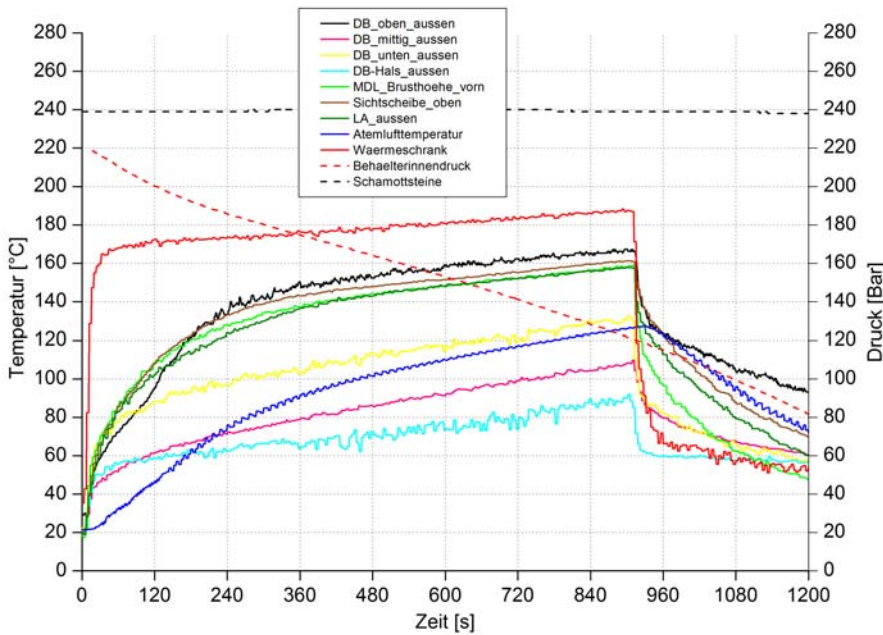


Bild 8.32: Temperatur- und Druckverlauf des Versuches 45 (CFK-Druckbehälter)

Im Versuch 41 fiel das Gerät aus, so dass die in der Tabelle 8.7 dargestellten Temperaturen nur die Maximalwerte zeigen, die bis zum Zeitpunkt des Ausfalls erreicht wurden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Temperatur im Inneren des Druckbehälters auf Werte von mindestens 100 °C gestiegen wäre. Die Tabelle 8.7 zeigt außerdem den Maximalwert der Temperatur im Versuch 39.

Tabelle 8.7: Maximaltemperaturen im Inneren der Druckbehälter (VS_3)

Versuch DB-Material	Maximale Temperaturen an den Messstellen in °C		
	T_innen_oben	T_innen_mittig	T_innen_unten
39, CFK	- **	78,9	- **
41, Stahl	93,2	93,2	93,2

** Messstelle wurde beim Einbau des Prüfadapters beschädigt

Es zeigen sich deutliche Unterschiede bei den Maximaltemperaturen. Wird davon ausgegangen, dass im Verlauf des Versuches 41 die Maximaltemperaturen auf über 100 °C gestiegen wären, so würde sich eine beträchtliche Differenz von mehr als 20 K gegenüber dem untersuchten CFK-Druckbehälter ergeben. Sichtbar ist, dass unmittelbar nach Beginn des Experimentes die Temperatur im Inneren des Stahl-Druckbehälters, begründet durch die bessere Wärmeleitfähigkeit des Behältermaterials, im Verhältnis zum CFK-Druckbehälter stärker ansteigt. Erkennbar

ist zudem, dass die drei im Stahldruckbehälter in verschiedenen Höhen gemessenen Temperaturen nahezu gleich sind. Eine Temperaturverteilung über die Höhe existiert nicht. Aussagen zur Temperaturverteilung im CFK-Druckbehälter können aufgrund fehlender Messdaten nicht gemacht werden. Dennoch wird sichtbar, dass CFK als Druckbehältermaterial dazu führt, dass im Inneren deutlich geringere Temperaturen vorliegen.

Die in der VS_3 gemessenen Temperaturen im Inneren der Druckbehälter liegen deutlich über denen der VS_1 und VS_2. Das zeigt, dass das Öffnen der Wärmeschranktür und das gleichzeitige Absinken der Wärmeschranktemperatur, trotz der ebenfalls aufgetragenen Wärmestrahlung, offensichtlich einen erheblichen Einfluss auf die Behälterinnentemperatur hat.

Die Messung des resultierenden Drucks im Druckbehälter ergab, dass aufgrund der kontinuierlichen sinusförmigen Veratmung, der Druck trotz äußerlicher Wärmebeaufschlagung sinkt. Im Bild 8.31 wird jedoch ersichtlich, dass der Druck bei einem ausgefallenen Gerät, das nicht beatmet thermisch beaufschlagt wird, schnell ansteigt. In dem dargestellten Versuch wurden kurze Zeit nach dem Ausfall die Wärmeschranktüren geöffnet, so dass ein weiterer Druckaufbau verhindert werden konnte.

Einatemtemperaturen

In den folgenden Bildern 8.33 und 8.34 sind die Einatemtemperaturen, getrennt nach den eingesetzten Behältermaterialien dargestellt. Die Maximalwerte für die Temperaturen können in Tabelle 8.6 eingesehen werden. Hinzugefügt werden muss, dass die dort dargestellten Temperaturen für die Atemluft der Versuche 33 und 41 den Zustand widerspiegeln, als die Atemluft bereits blockiert war. Die Atemlufttemperaturen, bei denen die Lungenautomaten der beiden Geräte tatsächlich ausfielen, lagen bei 117 °C (Versuch 33) und 124,1 °C (Versuch 41).

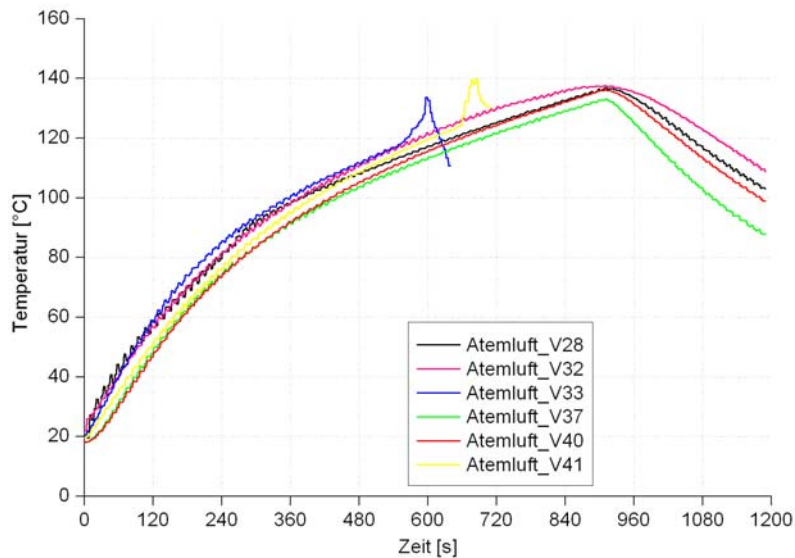


Bild 8.33: Atemlufttemperatur bei Stahl-Druckbehältern der VS_3

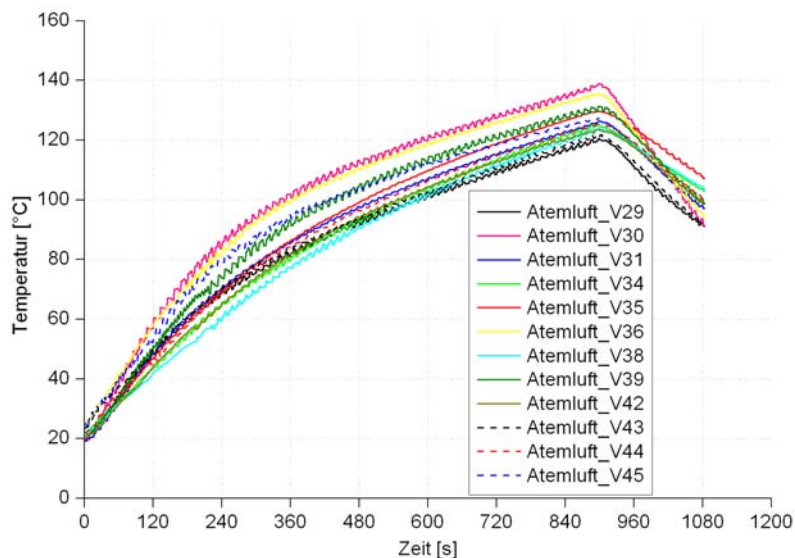


Bild 8.34: Atemlufttemperatur bei CFK-Druckbehältern der VS_3

Die Bilder zeigen, dass die Verläufe der Atemlufttemperatur bei Stahldruckbehältern im Vergleich zu CFK-Druckbehältern einheitlicher sind. Ausnahme bilden die im Bild 8.33 dargestellten Verläufe der Versuche 33 und 41, denn bei beiden Versuchen kam es zum Ausfall der dabei untersuchten Geräte. Es zeigt sich, dass unmittelbar nachdem die Geräte ausgefallen sind, die im Übergang vom Lungenautomaten zur Vollmaske gemessenen Temperaturen stark ansteigen. Dies ist auf die Blockierung der Luftzufuhr zurückzuführen, so dass der Kühleffekt, verursacht durch das Durchströmen der entspannten und damit abgekühlten Atemluft, fehlt. Wie bereits beschrieben, wurden unmittelbar nach den Ausfällen die Wärmeschranktüren geöffnet. Es zeigt sich dabei,

dass die im Übergang vom Lungenautomat zum Atemanschluss gemessenen Temperaturen rasch absinken. Das weist darauf hin, dass sich die untersuchten Lungenautomaten und Masken (nicht nur die Geräte, die ausfielen) hinsichtlich ihrer Temperatur den Umgebungsbedingungen rasch anpassen, da sie konstruktionsbedingt gut von der Umgebungsluft umspült werden. Dies hat in der Folge einen wesentlichen Einfluss auf die Einatemtemperatur. Abhängig vom herstellerspezifischen Design und dem spezifischen konstruktiven Aufbau, kann die Temperatur im Inneren des Lungenautomaten dementsprechend variieren. Dies hat letztlich einen wesentlichen Einfluss auf die Atemlufttemperatur.

Im Bild 8.34 ist zu erkennen, dass bei den drei Versuchen 30, 36 und 39 die höchsten Einatemtemperaturen aufgezeichnet wurden (Geräte des Herstellers „A“). Im Versuch 30 fiel das untersuchte Gerät aus. Bei den beiden anderen Versuchen wurden Atemwiderstände registriert, die vom IdF LSA als untersuchungsbedürftig eingestuft wurden. Der Verlauf der Einatemtemperatur im Versuch 38, bei dem ein Gerät des Herstellers „C“ zum Einsatz kam (Atemwiderstände wurden vom IdF LSA als untersuchungsbedürftig eingestuft), lag im Mittelfeld aller untersuchten Einatemtemperatur-Verläufe.

Es zeichnet sich ab, dass das Druckbehältermaterial nicht der alleinige ausschlaggebende Aspekt für die Höhe der Atemlufttemperatur ist, das zeigt beispielsweise der Verlauf der Einatemtemperaturen im Versuch 36. So liegt die Maximaltemperatur bei diesem Versuch mit 135,6 °C zum Teil deutlich über den gemessenen Maximaltemperaturen anderer Geräte, bei denen CFK-Druckbehälter zum Einsatz kamen. Gleichzeitig ist aber auch erkennbar, dass die Geräte anderer Hersteller, bei denen ähnlich hohe Einatemtemperaturen gemessen wurden, nicht ausfielen. Dies legt nahe, dass bei den Geräten des Herstellers „A“ Bauteile eingesetzt werden, die bei den im Versuch erzeugten thermischen Bedingungen beschädigt werden und letztlich zum Ausfall der Geräte führen.

Im nachfolgend dargestellten Bild 8.35 sind die mittleren Einatemtemperaturen getrennt nach dem Behältermaterial dargestellt. Die Auswertung der Atemlufttemperaturen zeigte, dass die beim Hersteller „A“ gemessenen häufig über denen der anderen Hersteller lagen. Es werden drei Temperaturverläufe gezeigt, wobei bei den CFK-Druckbehältern noch einmal differenziert wurde (mit und ohne Einatemtemperaturen des Herstellers „A“). Im mittleren Verlauf der Atemluft bei Stahl-Druckbehältern konnten die Verläufe des Herstellers „A“ nicht einbezogen werden, da

beide untersuchten Geräte vor der planmäßigen Beendigung des Versuches ausfielen. Die dort insbesondere während des Ausfalls gemessenen hohen Einatemtemperaturen hätten den Verlauf irregulär verfälscht.

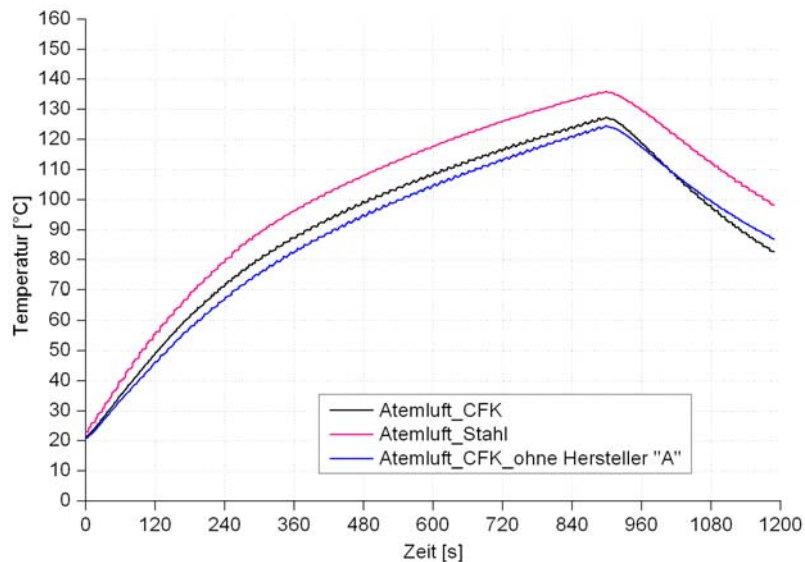


Bild 8.35: Vergleich der Atemlufttemperaturen bei CFK- und Stahl-Druckbehältern der VS_3

Es zeigt sich, dass die mittlere Einatemtemperatur bei Verwendung von Stahl-Druckbehältern mit 135,9 °C deutlich über der bei CFK-Druckbehältern gemessenen Atemlufttemperatur von 127,5 °C liegt. Extrahiert man aus dem Verlauf der mittleren Atemlufttemperaturen aller Geräte mit CFK-Flaschen, die Geräte des Herstellers „A“, ist erkennbar, dass diese um etwa 3 K über denen der Hersteller „B“ und „C“ lagen.

Atemwiderstände

Bei allen 27 Versuchen der VS_3 wurden die Atemwiderstände gemessen. Die Bilder 8.36 bis 8.38 zeigen die Verläufe der Atemwiderstände der Geräte, die im Verlaufe der thermischen Beaufschlagung ausfielen.

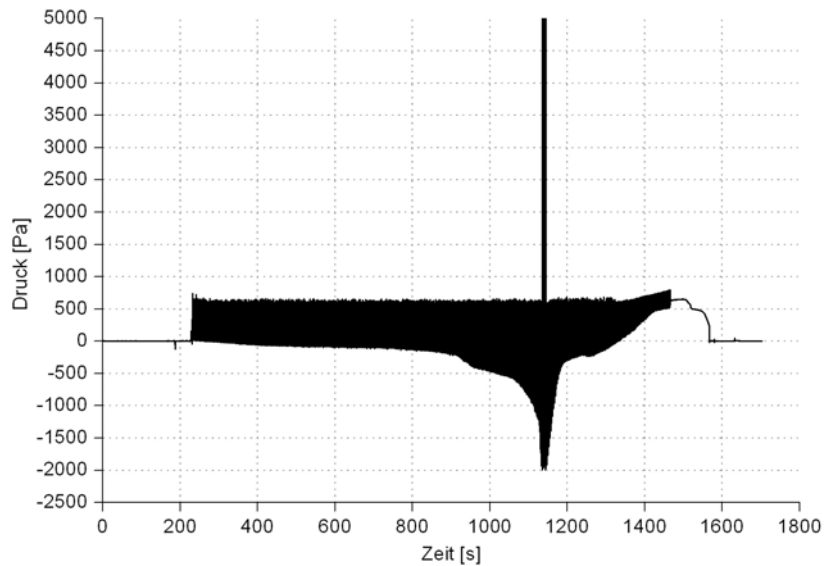


Bild 8.36: Atemwiderstände im Versuch 30 (Überdruckgerät)

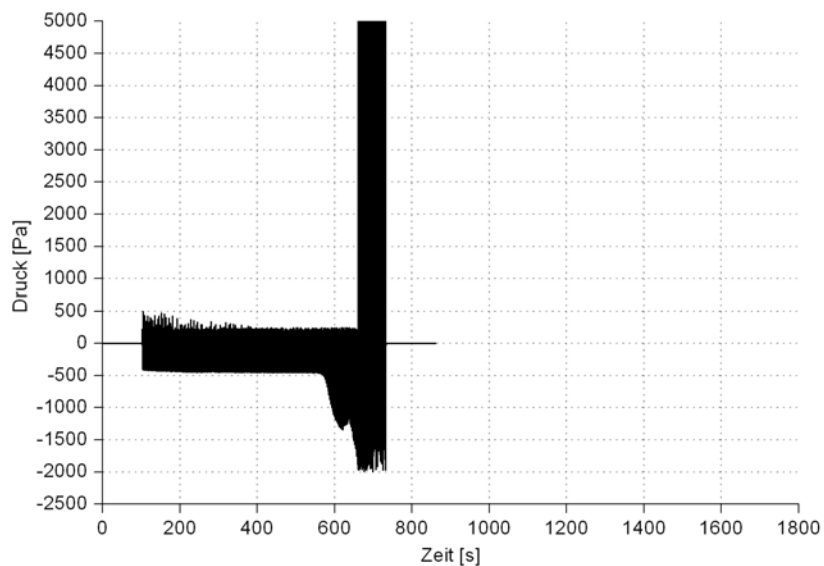


Bild 8.37: Atemwiderstände im Versuch 33 (Normaldruckgerät)

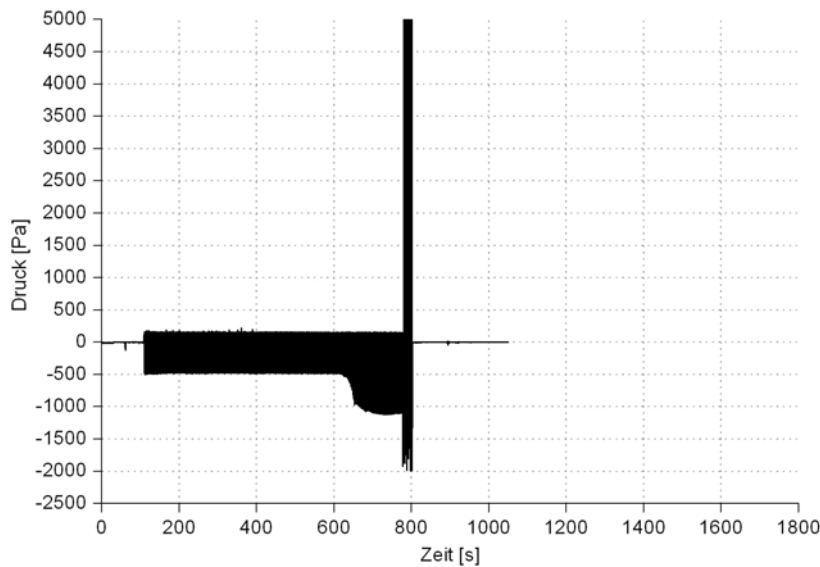


Bild 8.38: Atemwiderstände im Versuch 41 (Normaldruckgerät)

Die Ausfälle der Geräte sind zu Beginn gekennzeichnet durch zum Teil sehr stark steigende Einatemwiderstände. Im weiteren Verlauf steigen die Einatemwiderstände weiter an, bis sie schlagartig ein sehr hohes Niveau erreichen und in der Folge der Lungenautomat blockiert. Die Atemluft wird vom Lungenautomat ab diesem Zeitpunkt nicht mehr frei gegeben. Gleichzeitig werden hohe Überdrücke gemessen. Dem Untersuchungsbericht der DEKRA EXAM GmbH zufolge, waren diese Ausfallerscheinungen darin begründet, dass bei allen drei Geräten Beschädigungen im Bereich der Membranen der Lungenautomaten auftraten. Die Lungenautomaten konnten aufgrund der Beschädigungen nicht auf Dichtheit geprüft werden. Nachdem die Lungenautomaten mit neuen Bauteilen ausgestattet waren, wurden von allen drei Lungenautomaten die durchgeführten Prüfungen erfolgreich und ohne Grenzwertüberschreitungen absolviert [12].

Die Tabelle 8.8 zeigt die aus den Diagrammen extrahierten Versuchszeiten, bei denen es zum Anstieg der Atemwiderstände und letztlich zum Geräteausfall kam.

Tabelle 8.8: Ausfallzeiten der untersuchten Geräte der VS_3

Versuch / DB-Material	steigende Atemwiderstände	Ausfall
30, CFK	11 min 50 s	14 min 40 s
33, Stahl	7 min 58 s	9 min 29 s
41, Stahl	8 min 50 s	11 min 9 s

Die Bilder 8.39 bis 8.42 zeigen jene Geräte, die vom IdF LSA als untersuchungsbedürftig eingestuft wurden. Es handelt sich bei diesen Geräten ausschließlich um Überdruckgeräte, bei denen CFK-Druckbehälter eingesetzt wurden. Auch hier zeigt sich, dass die Einatemwiderstände stetig steigen. Es kommt jedoch nicht zum Ausfall.

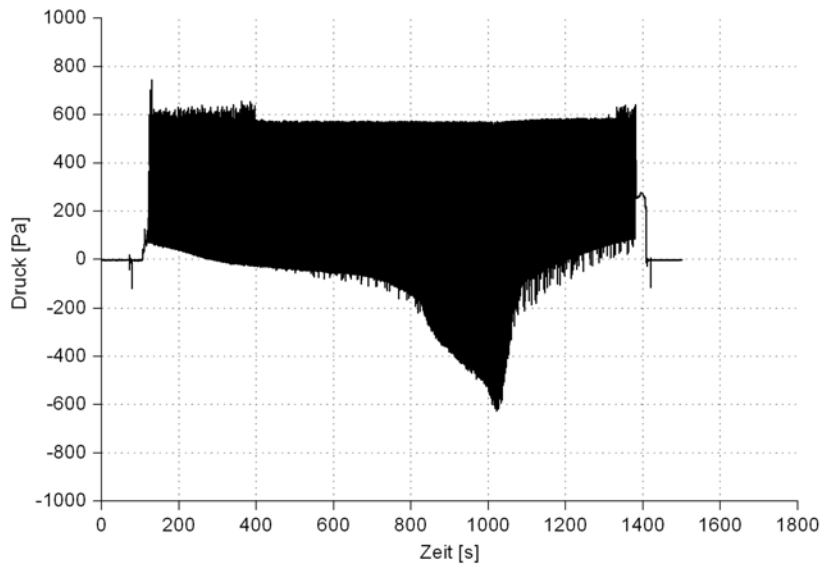


Bild 8.39: Atemwiderstände im Versuch 36 (Überdruckgerät)

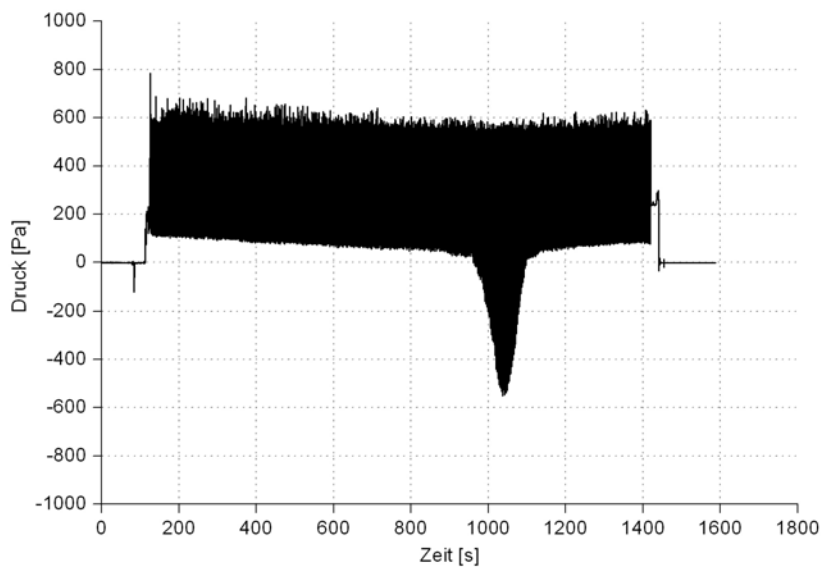


Bild 8.40: Atemwiderstände im Versuch 38 (Überdruckgerät)

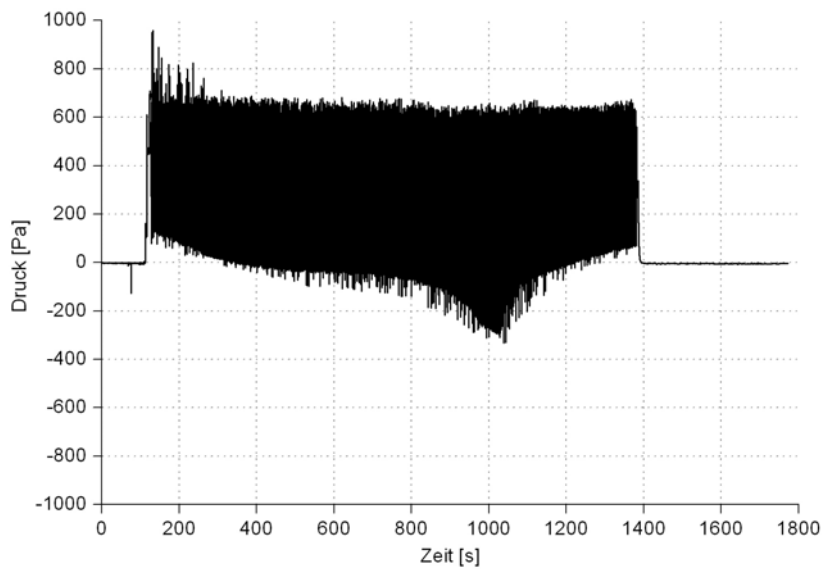


Bild 8.41: Atemwiderstände im Versuch 39 (Überdruckgerät)

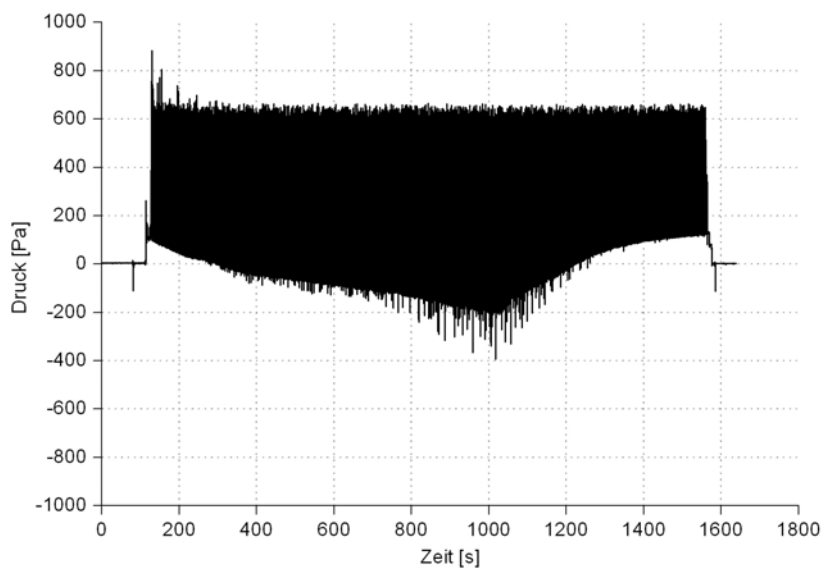


Bild 8.42: Atemwiderstände im Versuch 45 (Überdruckgerät)

Die Untersuchung der DEKRA EXAM GmbH ergab, dass bei den Geräten der Versuche 36, 39 und 45 die Ursache des Ausfallens Beschädigungen im Bereich der Membranen der Lungenautomaten war. Dichtheitsprüfungen der Lungenautomaten konnten aufgrund der Beschädigungen nicht durchgeführt werden. Diese wurden mit neu eingesetzten Bauteilen ausgeführt. Im Ergebnis wurden, abgesehen von

geringfügigen Überschreitungen zweier Ausatemwiderstände, keine Beanstandungen dokumentiert [12].

Das nach dem Versuch 38 als untersuchungsbedürftig eingestufte Gerät funktionierte bei den durchgeführten Nachuntersuchungen der DEKRA EXAM GmbH einwandfrei, wobei keine Grenzwertüberschreitungen dokumentiert wurden.

Mit Ausnahme der zuvor dargestellten sieben Verläufe der Atemwiderstände, wurden bei den übrigen 20 Versuchen aus Sicht des IdF LSA keine untersuchungsbedürftigen Atemwiderstände registriert. Nachfolgend dargestellt sind zwei Verläufe von Atemwiderständen, die bei Versuchen mit Normal- und Überdruckgeräten aufgezeichnet wurden. Eine quantitative Bewertung der Verläufe kann aufgrund fehlender Grenzwerte nicht vorgenommen werden.

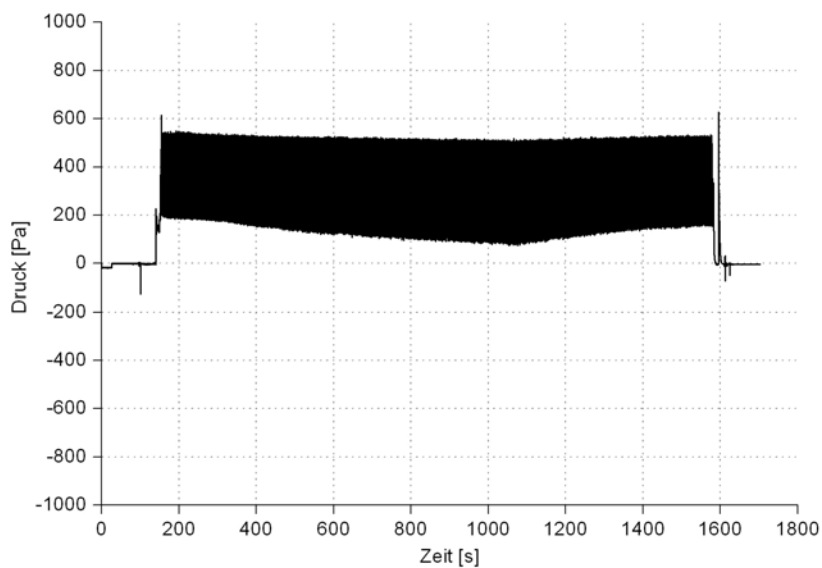


Bild 8.43: Atemwiderstände im Versuch 35 (Überdruckgerät)

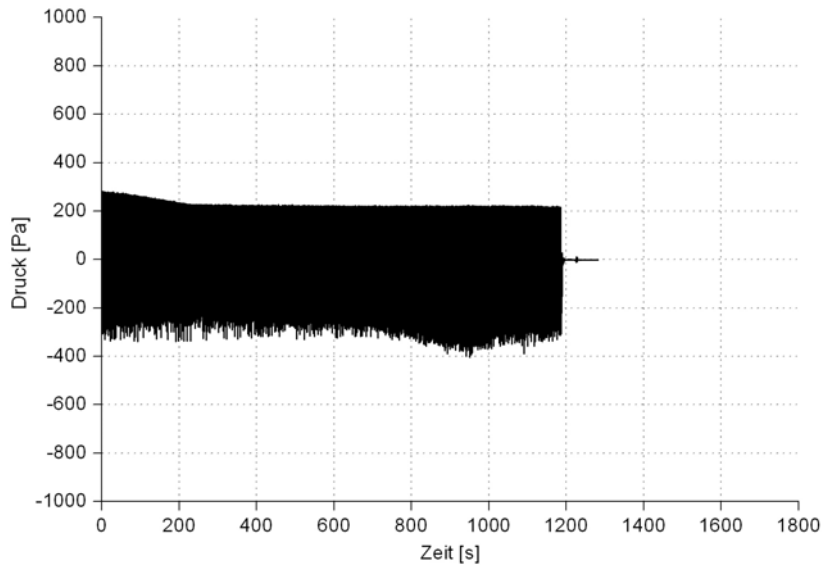


Bild 8.44: Atemwiderstände im Versuch 37 (Normaldruckgerät)

Äußerliche Beschädigungen

Auch bei den Versuchen der VS_3 kam es zu einigen äußerlichen Beschädigungen durch die thermische Beaufschlagung im Wärmeschrank. Anders als bei den vorherigen Versuchsserien, bei denen die Wärmestrahlungsquelle zum Einsatz kam, kam es hier in der VS_3 sehr selten zur Blasenbildung an PSA-Komponenten. Verfärbungen wurden in keinem Fall beobachtet. Durch den Wegfall der Wärmestrahlungsquelle war der Einsatz eines zweiten Camcorders, der Detailaufnahmen der untersuchten Geräte im Verlauf des Versuches aufnimmt, nicht möglich. Angaben zum zeitlichen Verlauf der Beschädigungen können daher nicht getroffen werden.

Lungenautomaten

- Blasenbildung an Gehäusen
- „Silikonummantelte“ Bauteile und Bauteile, bei denen Silikon verbaut wurde, wiesen im Allgemeinen einen deutlich geringeren Beschädigungsgrad auf

Druckbehälter

- Blasenbildung an einigen Produktaufklebern
- Blasenbildung an einer Kunststoffschutzfolie (die Kohlefaserwicklung wurde nicht frei gelegt)
- Blasenbildung von Kunststoffkappen zum Schutz vor mechanischer Beschädigung

Bauch- und Schultergurte

- Schrumpfungen der Gurte

Manometer

- Verformung von Schaugläsern (Bildung einer nach außen gewölbten Delle)

Vollmasken

- Schmelzen eines Maskentragebandes

Hochdruckleitungen

- Aufreißen der Kunststoffummantelung bis auf die Armierung nach Blasenbildung

9 Physiologische und arbeitsmedizinische Betrachtungen

Im Rahmen einer PbA-Sitzung wurden die Ergebnisse der VS_2 und VS_3 diskutiert. Das IdF LSA wurde aufgefordert, die in der VS_3 gemessenen Einatemtemperaturen hinsichtlich der physiologischen und arbeitsmedizinischen Relevanz zu bewerten. Kernfrage war, wie der menschliche Körper (insbesondere Atemtrakt) auf Einatemtemperaturen im Bereich von 120 °C bis 140 °C reagiert. Hierzu wurde eine erste nicht voll umfängliche Literaturrecherche durchgeführt. Unterstützt wurde die Literaturrecherche durch Konsultationen von Fachleuten aus dem Bereich der Arbeitsmedizin. An dieser Stelle sei Frau Prof. Dr. med. habil. Irina Böckelmann und ihrem Team des Bereiches Arbeitsmedizin der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg für die wertvollen Informationen gedankt. Auch apl. Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernhard Kampmann vom Fachgebiet für Arbeitsphysiologie, Arbeitsmedizin und Infektionsschutz der Bergischen Universität Wuppertal sei gedankt.

Nach Auswertung der bisher eingesehenen Literaturquellen und der durchgeführten Befragungen muss festgestellt werden, dass die Fragestellungen nicht abschließend beantwortet werden konnte, da eine umfangreiche und systematische Literaturrecherche im Rahmen der zur Verfügung stehenden Zeitspanne nicht realisierbar war.

In [11] wurden eine Reihe von internationalen Quellen zum Thema der thermischen Beschädigung der Atemwege ausgewertet. Festgestellt wurde darin unter anderem, dass das Ausmaß der Verbrennungen der Atemwege stärker von der Feuchtigkeit des Mediums abhängt, als dies bei Hautverbrennungen der Fall ist. Trockene Luft weist eine geringe Wärmekapazität auf. Die Atemwege weisen eine große Oberfläche auf, sind feucht und zudem gut durchblutet. Durch heiße trockene Luft wird demnach keine Verbrennung unterhalb des oberen Endes der Luftröhre verursacht. 100 °C heißer Dampf kann durch die hohe Wärmekapazität und die Wärmefreisetzung bei der Kondensation hingegen Verbrennungen tief in der Lunge verursachen. Heiße trockene Luft von ca. 300 °C kann nach einigen Minuten Verbrennungen am Kehlkopf verursachen. Wenn es nicht behandelt wird, kann dies zu einem lebensbedrohlichen Kehlkopfüdem führen. Schäden tiefer liegender Lungenpartien sind unwahrscheinlich. Es ist möglich, dass solche Kehlkopf-Verbrennungen auch bei niedrigeren Temperaturen (bis auf 120 °C) auftreten können. Dies ist jedoch abhängig von der Inhalationsdauer.

Fest steht aber auch, dass bei den einzelnen Versuchen der VS_3 Einatemtemperaturen im Bereich von 120 °C und 135 °C zu deutlich unterschiedlichen Versuchszeiten erreicht wurden. Die Kernfrage, ob Einatemtemperaturen im Temperaturbereich von 120 °C bis 140 °C vom menschlichen Körper tolerierbar sind, muss also differenzierter betrachtet werden. Die nachfolgend dargestellten Tabellen 9.1 und 9.2 zeigen die Versuchszeiten, bei denen Schwellenwert-Temperaturen erreicht wurden.

Tabelle 9.1: Zeit bis zum Erreichen von Schwellenwert-Temperaturen (V28 bis V36)

Schwellenwert	Zeit bis zum Erreichen der Schwellenwert-Temperatur in Sekunden								
	V28	V29	V30	V31	V32	V33	V34	V35	V36
120 °C	655	916	600	788	616	576	844	759	632
125 °C	731	-	684	880	680	-*	920	839	716
130 °C	811	-	760	-	752	-*	-	923*	804
135 °C	892	-	861	-	853	-*	-		900

* Bei diesen Schwellenwerten ist das Gerät bereits ausgefallen

Tabelle 9.2: Zeit bis zum Erreichen von Schwellenwert-Temperaturen (V37 bis V45)

Schwellenwert	Zeit bis zum Erreichen der Schwellenwert-Temperatur in Sekunden								
	V37	V38	V39	V40	V41	V42	V43	V44	V45
120 °C	716	863	691	671	635	844	892	823	777
125 °C	787	-	791	743	-*	-	-	912	876
130 °C	875	-	875	823	-*	-	-	-	-
135 °C	-	-	-	903	-*	-	-	-	-

* Bei diesen Schwellenwerten ist das Gerät bereits ausgefallen

Es zeigt sich, dass Temperaturen von mehr als 130 °C bei nur 8 Versuchen erreicht werden. Der Schwellenwert von 135 °C wird lediglich bei 5 Versuchen erreicht. Betrachtet man die einzelnen Versuche unter diesem Aspekt, wird ersichtlich, dass Temperaturen im Bereich von 120 °C bis 140 °C nur bis maximal 5 min auftraten. Die Fragestellung, ob Einatemtemperaturen im genannten Bereich vom menschlichen Organismus tolerierbar sind, kann damit weiter konkretisiert werden. Eine Untersuchung in Form einer umfangreichen systematischen Literaturrecherche muss unter diesem Aspekt durchgeführt werden.

10 Ausblick

Die Untersuchungen haben wesentliche Erkenntnislücken im Bereich der thermischen Belastung von Pressluftatmern, Vollmasken und Lungenautomaten geschlossen.

Dennoch sind im Rahmen der Bearbeitung des hier vorliegenden Berichts zum Teilschritt 2 des PSA-Forschungsvorhabens einige zusätzliche Fragestellungen in den Fokus folgender Untersuchungen gekommen. Insbesondere die Frage nach der thermischen Belastbarkeit von nicht fabrikneuen Atemschutzgeräten muss im Verlauf des nächsten Jahres bearbeitet werden. Hierzu wurde das Nachfolgeprojekt „Untersuchung von nicht fabrikneuen Atemschutzausrüstungen der Feuerwehr“ initiiert, das ebenfalls im Rahmen der Brandschutzforschung der Bundesländer bearbeitet wird.