

Abschlussbericht zum Vorhaben

FP462 - CoLiBri

„Sicherheitstechnische Bewertung
thermischer Betriebsbelastung auf
sicherheitskritische Ausrüstung am
Beispiel von Composite-Atemluftflaschen
und Lithiumbatterien “

Laufzeit

01.03.2021 – 29.02.2024

Bericht vom 15.04.2024

*Autor*innen*

Eric Duffner, Chalid el Dsoki, Sebastian
John, Derek Lochner, Björn Drousch,
Anita Schmidt, Georg Mair

Inhalt

Inhalt 2

Kurzfassung deutsch	3
Kurzfassung englisch.....	4
1 Problemstellung.....	5
1.1 Atemluftflaschen in der PSA	6
1.2 Lithiumbatterien in der Schutz-Ausrüstung.....	7
2 Forschungszweck/-ziel.....	9
3 Methodik	10
3.1 Vorarbeiten.....	11
3.2 Auswahl Prüfmuster	13
3.3 Aufbau und Inbetriebnahme der Versuchsstände	14
3.3.1 Versuchsstand für Atemschutzflaschen	14
3.3.2 Versuchsstand für Lithiumbatterien.....	20
4 Ergebnisse des Gesamtvorhabens	24
4.1 Ergebnisse der Realbrandversuche im FTTZ Grünheide.....	24
4.1.1 Raumtemperaturerfassung	25
4.1.2 Erfassung der Oberflächentemperatur auf der Atemluftflasche	27
4.1.3 Erfassung der Temperatur an den Funkgeräten.....	28
4.2 Versuchsergebnisse Atemschutzflaschen.....	30
4.3 Versuchsergebnisse Lithiumbatterien	41
4.3.1 Thermische Durchgehen und Gaskonzentrationen	42
4.3.2 Statische Temperaturversuche an Li-Batterien	43
4.3.3 Zyklische Temperaturversuche an Li-Batterien	46
4.3.4 Impedanzmessungen an den Funkgeräten.....	49
5 Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen	50
6 Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks/-ziels, Schlussfolgerungen	50
6.1 Bewertung der Ergebnisse der Atemschutzflaschen.....	50
6.2 Bewertung der Ergebnisse der Funkgeräte	52
7 Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan.....	54
7.1 Veröffentlichungsverzeichnis	54
7.2 Danksagung	55
8 Anhang/Anhänge	56
8.1 Ergänzende Informationen zu Funkgeräten	56
8.2 Literatur-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	61

Kurzfassung deutsch

Ziel des Vorhabens war es, den Einfluss der realen Temperaturbelastung auf Atemschutzflaschen und Lithiumbatterien in Funkgeräten (FG) im Löscheinsatz von Rettungskräften zu ermitteln und deren Auswirkung auf die Alterung und Lebensdauer sowie die potenziellen Gesundheitsgefahren bei deren Nutzung besser beurteilen zu können und Handlungshilfen abzuleiten.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden zum einen unterschiedlich thermisch gealterte Composite-Atemluftflaschen systematisch hinsichtlich ihrer Restfestigkeiten untersucht. Zum anderen wurden Lithiumbatterien aus FG hinsichtlich der Einwirkung von kritischen Temperaturen untersucht, ab denen es zu einem thermischen Durchgehen der Batterien kommen kann. Für diese beiden wichtigen Komponenten, Lithiumbatterien und Composite-Atemluftflaschen, wurden kritische Temperatur-Zeit-Profile ermittelt, die Auswirkungen durch geeignete Methodiken untersucht und die sich ergebenden Gefährdungen für den Träger bewertet.

Als **Methodische Vorgehensweise** wurden durch Realversuche die tatsächlichen und zuvor durch Literaturrecherche ermittelten Temperaturprofile verifiziert und auf deren Grundlage die Laborbelastungen abgeleitet. Um den Eigenschaften der aus Faserverbundwerkstoffen hergestellten Composite-Atemluftflaschen Rechnung zu tragen, wurden an zwei repräsentativen Baumustern unterschiedlicher Hersteller Stichprobengruppen unterschiedlicher thermischer Belastung ausgesetzt und hinsichtlich ihrer verbleibenden Restfestigkeitsabnahme geprüft und mit thermisch unbelasteten Baumustern verglichen. Neben den statischen Berstversuchen wurden auch kombinierte Alterungs- und Restfestigkeitsuntersuchungen an zyklisch belasteten Behältern durchgeführt.

Die FG wurden thermisch sowohl statischen als auch zyklischen Belastungen ausgesetzt und mit Kapazitätsmessungen begleitet. Die statischen Versuche dienten dem Zweck, die maximale thermische Belastbarkeit der Akkus zu ermitteln, bei der noch kein Versagen auftritt. Bei den zyklischen Versuchen wurde der Temperaturverlauf bei Löscheinsätzen so nah wie möglich im Labor nachgestellt. Hierbei wurden die Akkus wiederholt einem Belastungsprofil mit konstanter Temperatur ausgesetzt und nach einigen Intervallen die Restkapazitäten am Akku gemessen und so die Degradation bestimmt.

Als **Fazit** der im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Untersuchungen an zwei repräsentativen Baumustern von Atemschutzflaschen kann gefolgert werden, dass die thermischen Belastungen abhängig vom Baumuster einen z.T. deutlichen Einfluss auf die Restfestigkeiten der Atemschutzflaschen haben. Höhere thermische Exposition ist, zumindest an den untersuchten Atemschutzflaschen, deutlich zu erkennen und die Flaschen können durch die zuständigen Gerätewarte leicht ausgesondert und ersetzt werden. Die thermischen Belastungen, wie sie im Rettungseinsatz auftreten, waren für die untersuchten Atemschutzflaschen und die Rettungskräfte nicht kritisch sind. Die langjährige Erfahrung etablierter Hersteller dürfte hier aber nicht ohne Einfluss sein. Es ist somit kein Grund erkennbar, von der Verwendung der leichteren Typ 4 Atemschutzflaschen abzuraten, wenn Atemschutzflaschen, die visuell erkennbare thermische Einwirkungen (Farbänderungen, Materialschmelzungen o.ä.) aufweisen, unmittelbar ersetzt werden.

Die Ergebnisse an den FG zeigen, dass trotz hoher Temperaturen keine Selbstentzündung der Lithiumbatterien ausgelöst wird. Der Kapazitätsverlust der Batterien infolge der Belastung führt ebenfalls nicht zu einem Funktionsausfall. Es konnte gezeigt werden, dass die Kapazitätsbestimmung als zuverlässiges und geeignetes Kriterium für die Sicherheitsbewertung der Akkus herangezogen werden kann, wenn die Kapazitätsmessung bei gleichbleibenden Bedingungen (gleiche Raumtemperaturen, gleiche Messgeräte, etc.) stattfindet. Es wird empfohlen, die Akkus ab einer Restkapazität von unter 80% zu tauschen. Als schnelle und sehr einfache Überprüfung kann eine Sichtprüfung an den FG stattfinden. Die im Projekt verwendeten FG zeigten eine Verformung der Kunststoffhülle bei zu hohen Belastungen.

Kurzfassung englisch

The **aim** of the project was to determine the influence of the real temperature load on breathing apparatus cylinders and Lithium batteries in radio devices in firefighting operations by rescue services and to be able to better assess their effect on ageing and service life time as well as the potential health hazards and to derive guidelines for action.

As part of this project, composite breathing air cylinders that had undergone different thermal ageing processes were systematically analysed with regard to their residual strength. As a second use case, lithium batteries used in radio devices were analysed with regard to the effect of critical temperatures above which thermal runaway of the batteries can occur. Critical temperature-time profiles were determined for these two important components, lithium batteries and composite breathing air cylinders, the effects for the user were analysed using suitable methods and the resulting hazards for the wearer were assessed.

As a **methodical approach**, the actual temperature profiles previously determined by literature research were first verified in real tests and the laboratory loads were derived on this basis. In order to take into account the properties of composite breathing air cylinders made of fibre composites, sample groups were subjected to different thermal loads and examined with regard to their residual strength reduction and in comparison to thermally unloaded samples from two representative samples from different manufacturers. In addition to the static burst tests, combined ageing and residual strength tests were also carried out on cyclic loaded cylinders.

The radio devices were subjected to both static and cyclic thermal loads with accompanying capacity measurements. The purpose of the static tests was to determine the maximum thermal load capacity of the batteries at which no failure occurs. In the cyclic tests, practical conditions were simulated as closely as possible in the laboratory. For this purpose, the batteries were repeatedly subjected to a load profile at a constant temperature and the residual capacity of the battery was measured after several intervals to determine the degradation.

As a **conclusion** of the tests carried out on two representative types of breathing apparatus cylinders as part of this project, it can be concluded that the thermal loads have a sometimes significant influence on the residual strength of the breathing apparatus cylinders, depending on the type. Higher thermal exposure is clearly recognizable, at least on the breathing apparatus cylinders tested, and the cylinders can be easily removed and replaced by the responsible equipment maintainers. The thermal loads that occur during rescue operations were not critical for the tested breathing protection cylinders and the rescue teams. However, the many years of experience of established manufacturers should not be without influence here. There is therefore no reason to advise against the use of the lighter Type 4 breathing protection breathing apparatus cylinders if cylinders with visually recognizable thermal effects (color changes, material melting, etc.) are replaced immediately.

The results on the radio devices showed that determination of the capacity can serve as a suitable criterion for the safety assessment for the batteries. The loss of capacity of the batteries as a result of the load also does not lead to a functional failure. The capacity determination can be used as a reliable and suitable criterion for the safety assessment of the batteries if the capacity measurement is carried out under constant conditions (same room temperatures, same measuring devices, etc.). It is recommended to replace the batteries when the remaining capacity is below 80%. A visual inspection of the radio devices can be carried out as a quick and very simple check. The radio devices used in the project showed deformation of the plastic casing when subjected to excessive loads.

1 Problemstellung

Die persönliche Schutzausrüstung (PSA) wird im Einsatz teilweise einer sehr starken Hitzeeinwirkung, also einer thermischen Belastung, ausgesetzt. Dies kann zu einer Beeinträchtigung ihrer Schutzwirkung führen. Eine zusätzliche Gefährdung der Einsatzkräfte durch ein thermisch induziertes Versagen der PSA z.B. unter Bersten oder Brand ist unbedingt zu vermeiden. Aus diesem Grund sollen zwei besonders kritische Komponenten der PSA bzw. der sicherheitskritischen Ausrüstung hinsichtlich dieser thermischen Belastung systematisch untersucht werden, Atemluftflaschen und Funkgeräte mit Lithiumakkumulatoren (allgemein unter dem Begriff Lithiumbatterien subsumiert).

Atemschutzgeräte werden im Laufe ihrer Lebensdauer unterschiedlichsten Belastungen ausgesetzt. Dazu zählen neben der Belastung durch den Innendruck auch besonders die hohen thermischen Belastungen beim Befüllen und beim Betrieb der Flaschen, insbesondere bei Löscheinsätzen. Die Belastungen durch den Innendruck sind gut bekannt und stellen heute für die Auslegung durch den Hersteller eine beherrschbare Aufgabe dar. Demgegenüber stehen jedoch die Belastungen durch die thermischen Einwirkungen und ihre Auswirkungen auf den Druckbehälter. Hier gibt es noch viele ungeklärte Randbedingungen und Einflüsse, die die Hersteller vor deutlich größere Herausforderungen stellen.

Diesen Fragestellungen der realen Temperaturbelastung und deren Einfluss auf die Alterung soll im Rahmen dieses Vorhabens nachgegangen werden. Dabei soll besser beurteilt werden können, ob die Prüf- und Zulassungsanforderungen in den meist herangezogenen Normen den beschriebenen Sicherheitsaspekten in ausreichender Weise Rechnung tragen. Vorliegende neuere Untersuchungsergebnisse (siehe [9] bis [13]) deuten bereits auf sicherheitstechnische Lücken in diesen Normen hin. Eine akute Gefahr für die Anwender von Atemschutzgeräten besteht aktuell zwar nicht, jedoch könnte mit steigender Lebensdauer der Atemluftflaschen das Risiko für schwerwiegende Unfälle ansteigen.

Ein weiteres Risiko können die in zunehmendem Maße in Ausrüstungsgeräten enthaltenen Lithiumbatterien darstellen. Während diese im unbeschädigten Zustand als sicher anzusehen sind, können sie durch die thermische Belastung beim Löscheinsatz ausfallen, brennen oder sogar explodieren und zu einer Gefährdung der Einsatzkräfte führen.

Lithiumbatterien kommen aufgrund ihrer hohen Leistung zunehmend in mobilen Geräten zum Einsatz. So sind sie neben den mobilen Telefonen auch in Funkgeräten, Taschenlampen, CO-Warngeräten usw. in der Ausrüstung oder in handgehaltenen Geräten enthalten. Es ist weitläufig bekannt, dass die Lithiumbatterien durch Beschädigungen und insbesondere auch Hitze thermisch durchgehen können, d. h. sie können brennen oder explodieren. Die zur Auslösung benötigten Temperaturen variieren je nach Zelltyp (chemische Zusammensetzung und Zellgeometrie) und liegen in der Regel um ca. 150°C. Diese können z.B. durch Strahlungswärme beim Löscheinsatz erreicht werden. Um eine Gefährdung der Rettungskräfte durch diese oft am Körper getragenen Geräte (z. B. Funkgeräte am Oberarm) zu verhindern, müssen die für die jeweils zum Einsatz kommenden Geräte und Batterietypen kritischen Temperaturen bekannt sein und ggf. Warnvorrichtungen implementiert werden.

Sowohl die thermische Belastung als auch das resultierende Gefährdungspotenzial sind für die beiden hier betrachteten Komponenten sehr ähnlich. Das Bersten einer Atemluftflasche kann allein in Folge der Druckwelle zu schweren körperlichen Verletzungen in einem Umkreis von mehreren Metern führen. Ebenso kann ein Brand oder eine Explosion einer Lithiumbatterie aufgrund der Körpernähe schwere Verletzungen der Einsatzkräfte hervorrufen. Daher muss durch entsprechende auslegungstechnische Regulierungen die Sicherheit beider hier betrachteten Komponenten auch mit steigender Lebensdauer und unter thermischer Belastung auf einem sichereren Niveau gehalten werden. Beide Komponenten unterscheiden sich jedoch grundlegend einerseits im Schadensverhalten und

andererseits bezüglich der notwendigen Sicherheitsvorkehrungen. Daher ist es zweckmäßig beide Szenarien gemeinsam in diesem Vorhaben zu betrachten, gleiche kritische thermische Lasten zu definieren und entsprechende Maßnahmen für die unterschiedlichen Regelwerke und Handlungsanweisungen in harmonisierter Weise zu entwickeln.

1.1 Atemluftflaschen in der PSA

Compositeflaschen bestehen aus einem gasdichten Innenbehälter (Liner), um den eine in einen Polymerwerkstoff eingebettete Endlosfaser (meist eine Carbonfaser) gewickelt wird. Aufgrund dieses Aufbaus hat der Liner nur noch geringe oder keine Lastanteile zu tragen, während der hochfeste und leichte Verbundwerkstoff den größten Lastanteil trägt. Bei Composite-Werkstoffen kommt gegenüber den metallischen Werkstoffen noch das schwer zu beurteilende und besonders temperaturabhängige betriebliche Alterungsverhalten hinzu. Dies ist jedoch von besonderer Bedeutung, wenn die sichere Betriebslebensdauer der Compositeflaschen beurteilt werden soll.

Untersuchungen zur Ermittlung der maximalen Betriebslasten während der Benutzung in Brandübungsszenarien [9] bis [13] zeigen, dass im Extremfall die Umgebungstemperaturen kurzzeitig auf über 1.000°C ansteigen können. Dabei wurden Oberflächentemperaturen auf den Atemschutzflaschen von bis zu 150°C gemessen. Bei realen Einsatzszenarien kann jedoch von deutlich höherer Wärmeexposition der Druckbehälter ausgegangen werden. Inwieweit durch diese äußere Wärmeeinwirkung für den Verbundwerkstoff (oder auch Composite-Werkstoff) kritische Temperaturen in der Tiefe der Behälterwandung erzielt werden, ist bisher nur unzureichend erforscht.

Der Einfluss thermischer Betriebsbelastungen auf betrieblich gealterte Atemluftflaschen wurde in [9] untersucht. Informationen über reale Belastungsprofile im Betrieb sowie zur Vergleichbarkeit mit neuen Atemluftflaschen und der damit verbundenen Alterung infolge thermischer und mechanischer Belastung sind jedoch auch hier nicht verfügbar.

In den gängigen Druckgefäßnormen [8] werden aktuell nur Temperatureinflüsse von bis zu 65°C auf die Druckbehälter untersucht. Die thermische Funktionsprüfung der PSA [14], [15] sieht deutlich höhere Prüftemperaturen von bis zu 900°C vor, die jedoch nur mit sehr kurzen Expositionszeiten untersucht werden. In den sich momentan in Erarbeitung befindlichen ISO-Normen für Atemschutzgeräte werden im Teil 5 der Normenreihe ISO 17420 fünf Stufen (Level 0 – 4) bezüglich der Temperaturanforderungen an Atemschutzgeräte für die Verwendung bei Feuerwehreinsätzen unterschieden. Das Level 0 entspricht in etwa den Anforderungen der DIN EN 137 ohne Flammenprüfung, das Level 4 sieht eine Flammenprüfung wie in der DIN EN 137 allerdings nach einer Lagerung bei 260°C vor. Nach den Flammenprüfungen sind keine weiteren Tests an den Geräten vorgesehen, d.h. das einmalige Bestehen der Prüfung ist im Sinne der Norm ausreichend. Eine erneute Schadensüberprüfung in Bezug auf eine reduzierte Restlebensdauer finden nicht statt.

Bzgl. der in der Normenreihe ISO 17420 angegebenen Temperaturbelastung gibt es jedoch u.a. seitens der Prüflaboratorien Unsicherheiten, wie mit den bis 300 bar gasgefüllten Atemschutzgeräten bei den erhöhten Prüftemperaturen zu verfahren ist und welche Sicherheitsvorkehrungen hier zu treffen sind. Selbst der Schutz der Prüfer beruht momentan lediglich auf Erfahrungswerten. Dabei ist zu bedenken, dass man eine vorgeschädigte Atemluftflasche äußerlich nicht von einer intakten Flasche unterscheiden kann.

Diese skizzierten offenen Fragestellungen und Unsicherheiten sollen mit diesem Vorhaben systematisch beantwortet werden. Schwerpunkte der geplanten Untersuchungen sollen auf der Restfestigkeitsermittlung betrieblich realer und im Labor künstlich gealterter Atemluftflaschen liegen, die nach realen Einsatz-/Umgebungsbedingungen thermischen Belastungen unterzogen wurden. Die bereits während anderer Untersuchungen (siehe [9] bis [13]) ermittelten Belastungsprofile sollen nach Möglichkeit durch Übungsszenarien verifiziert werden, welche der realen Einsatzpraxis nachempfunden sind. Hierzu sollen die Restfestigkeiten einer

Anzahl neuwertiger Atemluftflaschen als Referenzgrundlage ermittelt werden, die dann als Bewertungsgrundlage für alle nachfolgenden Untersuchungen dienen.

Die Restfestigkeiten der thermisch belasteten Referenzbehälter sollen mit baugleichen Atemluftflaschen untersucht werden, die im Labor mittels unterschiedlicher Belastungsprofile gealtert wurden. Im Labor sollen kombinierte thermische und mechanische Lasten aufgebracht werden, um kritische Belastungszustände für die Restlebensdauer der Behälter gezielt bewerten zu können.

Vor der beschriebenen zerstörenden Restfestigkeitsermittlung sollen zusätzliche Druckprüfungen, begleitet durch das zerstörungsfreie Prüfverfahren der Schallemissionsprüfung, durchgeführt werden. Die Schallemissionsprüfung hat sich insbesondere bei Composite-Atemluftflaschen als erfolgsversprechend herausgestellt. Es existieren Entwurfsnormen [23], die zur Bewertung der eingebrachten Schädigungen herangezogen werden können und die voraussichtlich in Kürze veröffentlicht werden könnten. Für den Nutzer kann so eine weitere Methode zur Beurteilung der thermischen Schädigung geschaffen werden, die eine fundiertere Schadensbeurteilung als es die bisherige Praxis ermöglicht.

Bei den Untersuchungen wird sich nur auf einen Flaschentyp, die sogenannten Typ 4 Flaschen konzentriert, die einen Kunststoffliner und eine Carbonfaser-Vollumwicklung besitzen. Typ 4 Druckflaschen weisen die größten Gewichtseinsparungen auf und werden schon heute in einer großen Anzahl bei Feuerwehren weltweit eingesetzt. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Flaschentyp kurz- bis mittelfristig die auf dem Markt befindlichen Typ 3 Behälter ablösen wird.

Die in diesem Vorhaben geplante Aufzeichnung sowohl thermischer als auch mechanischer Messgrößen ermöglicht es nicht nur die thermische Schädigung, sondern auch die durch die Gasfüllung eingebrachte mechanische Schädigung des Faserverbundes exakter erfassen und miteinander korrelieren zu können.

1.2 Lithiumbatterien in der Schutz-Ausrüstung

Im Brandeinsatz ist die Schutz-Ausrüstung dafür ausgelegt, für einen bestimmten Zeitraum hohen Wärme- und Strahlungswärmeeinwirkungen stand zu halten. Lithiumbatterien gehen jedoch bei bestimmten Temperaturen thermisch durch und brennen oder explodieren sogar. Dieser Prozess kann ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr verhindert werden.

Dieses sogenannte thermische Durchgehen (engl. thermal runaway (TR)) erfolgt für die unterschiedlichen Arten von Lithium-Ionen-Akkus bei unterschiedlichen Temperaturen bzw. unterschiedlichen Wärmestrahlungen. Lithiumbatterien unterscheiden sich durch die Zellchemie (NMC (Nickel-Mangan-Kobaltoxid Kathode), LFP (Lithium-Eisen-Phosphat Kathode), LCA (Lithium Cobalt Aluminiumoxid Kathode) u.a.) sowie durch Ihre Zellgeometrie (Rundzellen, Pouchzellen, prismatische Zellen). Wie BAM eigene Untersuchungen zeigen, ist das Verhalten für einen einzelnen Akkutyp in der Regel gut reproduzierbar und es kann von kritischen Temperaturen für das thermische Durchgehen je nach Typ zwischen 140 und 180°C ausgegangen werden.

Beim thermischen Durchgehen eines Akkus (siehe Abb. 1) im Funkgerät entstehen während eines Lösch-Einsatzes zwei Hauptprobleme. Zum einen ist die Funktion des Funkgeräts und damit einhergehend die Kommunikation zwischen den Einsatzkräften nicht mehr gewährleistet und zum anderen kann infolge des TR der Träger der Ausrüstungsteile durch freigesetzte Gase, Flammenbildung oder Splitterflug erheblich verletzt werden. Die besondere Gefahr eines TRs besteht auch darin, dass dieser mit größerem zeitlichem Verzug, also auch nach einem Lösch-Einsatz auftreten kann. In der Praxis wurde dies schon mehrfach beim Aufladen der Geräte nach dem Einsatz beobachtet.

Häufig tragen die Einsatzkräfte zu diesem Zeitpunkt keine Schutzausrüstung und Atemschutz mehr. Infolgedessen wären die Einsatzkräfte auch dem bei einem Lithiumbatteriebrand entstehenden Gasmisch ausgesetzt. Die Gasmische sind stark toxisch, da sie neben CO und anderen Gasen auch eine nicht unerhebliche Menge an Fluorwasserstoff (HF) [22] enthalten.

Das zeitlich nicht bestimmte und nicht vorhersehbare Ereignis eines thermischen Durchgehens von Lithiumbatterien birgt also im Ernstfall lebensbedrohliche Gefahren für die Einsatzkräfte, während und nach einem Einsatz. Das Risiko lässt sich minimieren, indem Erkenntnisse über die Gefahren untersucht und Schutzmaßnahmen abgeleitet werden. Diese Ziele werden mit dem vorliegenden Projekt verfolgt.

Generell dürfen Lithium-Batterien nur dann transportiert werden, wenn sie die Prüfungen nach Abschnitt 38.3 der Empfehlungen für die BEFÖRDERUNG GEFÄHRLICHER GÜTER Handbuch über Prüfungen und Kriterien [31] bestanden haben, die Ausnahme bilden nur Prototypen, zur Entsorgung vorgesehene sowie defekte Batterien. Da es sich um die Mindestsicherheitsanforderungen handelt, werden allerdings nur Temperaturen von bis zu 70°C abgeprüft. Diese Temperaturen werden jedoch beim Löscheinsatz häufig überschritten.

Im Rahmen dieses Projekts werden exemplarisch Akkutypen von in der Praxis häufig verwendeten Funkgeräten der Schutzausrüstung der Feuerwehren betrachtet. Es sollen dafür die jeweiligen Temperaturen ermittelt werden, ab denen eine sichere Handhabung nicht mehr möglich ist. Dafür sind neben den kritischen Temperaturen der Akkus selbst auch die maximalen Temperaturen, Strahlungswärmen und Zeiten zu ermitteln, die an der Außenoberfläche der Geräte herrschen dürfen.

Die relevanten Geräte- und Akkutypen wurden in Zusammenarbeit und auf Empfehlung mit den beteiligten Teilnehmern des projektbegleitenden Lenkungskeises und der Berliner Feuerwehr sowie dem Deutschen Feuerwehrverband ausgewählt.



Abb. 1: Li-Ionen-Batterien in einem Laptop beim thermischen Durchgehen nach Erhitzen auf einer Herdplatte

2 Forschungszweck/-ziel

Ziel des Vorhabens ist es, den Einfluss der realen Temperaturbelastung auf Atemschutzflaschen und Lithiumbatterien in Funkgeräten (FG) im Löscheinsatz von Rettungskräften zu ermitteln und deren Auswirkung auf die Alterung und Lebensdauer und die daraus resultierenden potenziellen Gesundheitsgefahren besser beurteilen zu können. Es soll untersucht werden, ob die Prüf- und Zulassungsanforderungen in den meist herangezogenen Normen den Sicherheitsaspekten in ausreichender Weise Rechnung tragen.

Im Rahmen dieses Vorhabens sollen zum einen unterschiedlich thermisch gealterte Composite-Atemluftflaschen systematisch hinsichtlich ihrer Restfestigkeiten untersucht werden. Zum anderen sollen Lithiumbatterien aus Funkgeräten hinsichtlich der Einwirkung von kritischen Temperaturen untersucht werden, ab denen es zu einem thermischen Durchgehen der Batterien, verbunden mit einer sehr starken Gasfreisetzung und im Extremfall einer Explosion der Batterie, kommen kann. Für diese beiden wichtigen Komponenten, Lithiumbatterien und Composite-Atemluftflaschen, sollen kritische Temperatur-Zeit-Profile ermittelt und die Auswirkungen durch geeignete Methodiken untersucht und hinsichtlich der sich ergebenden Gefährdungen für den Träger bewertet werden.

Für den Anwender sollen so Lösungen erarbeitet werden, die ihm ermöglichen, eine potenziell kritische Beschädigung der Komponenten frühzeitig zu erkennen und somit rechtzeitig erforderliche Schritte einzuleiten, um mögliche Schäden abzuwenden. Dies könnte in Form von einfachen Temperaturmessstreifen, integrierten Messgeräten oder auch nachfolgenden zerstörungsfreien Prüfverfahren erfolgen.

Durch die Kombination aus Ermittlung realistischer Betriebslasten, Beurteilung der Restfestigkeiten – und somit des Grads der Schädigung der Atemluftflaschen – und Abgleich mit realen Gasfüllzyklen, werden Untersuchungsergebnisse ermittelt, die eine bessere ganzheitliche Beurteilung der Atemluftflaschen ermöglichen.

Bei den Untersuchungen an Lithiumbatterien in Geräten der Schutzausrüstung – hier am Beispiel der an Arm oder Brust getragenen Funkgeräte – soll eine Abschätzung des tatsächlichen Gefahrenpotentials unter Berücksichtigung realer Bedingungen erfolgen. Dabei wird ermittelt, unter welchen Einflüssen die Lithiumbatterie durch das Gehäuse hindurch geschädigt wird oder sogar thermisch durchgehen kann, d.h. welche Hitze bzw. Wärmestrahlungseinwirkung über welchen Zeitraum welche Schädigungswirkung zur Folge hat. Auch die für die Einsatzkräfte entstehenden Risiken werden betrachtet, indem das Ausmaß der Reaktion (Explosion, Splitterwirkung) ermittelt und die Zusammensetzung sowie Konzentration der giftigen Rauchgase bestimmt werden. Für die Praxis während und nach Einsätzen soll eine einfach umsetzbare Leitlinie zur Identifizierung gefährlich geschädigter Batterien entwickelt werden. Damit kann verhindert werden, dass diese Batterien zum Ladevorgang oder in die nächsten Einsätze gelangen und dort gefährlich reagieren. Auch geeignete Warnmechanismen wie bspw. Temperaturmessstreifen sollen betrachtet werden.

3 Methodik

Das Vorhaben FP462 „CoLiBri“ konnte, trotz kleiner Verzögerungen innerhalb der geplanten 3-jährigen Projektlaufzeit, vollständig in der dafür geplanten Vorhabenlaufzeit bearbeitet und abgeschlossen werden. Lediglich kurzzeitige Verlängerungen einzelner Arbeitspakete (vgl. Tab. 1) traten innerhalb der Projektlaufzeit auf. Die Gründe und Auswirkungen sind im nachfolgenden erläutert.

Tab. 1 zeigt den Projektzeitplan und den Status jedes Arbeits- und Teilarbeitspaketes zum Ende des Projektes am 28.02.2024. Verzögerungen von Arbeits- und Teilarbeitspaketen sind gegenüber der ursprünglichen im Projektantrag geplanten Dauer in Tabelle 1 in hellgrau markiert. Der Status der Teilarbeitspakete ist in rot-gelb-grün angegeben, grün bedeutet eine vollständige Erfüllung, gelb markiert bedeutet Verzögerungen und rot markiert ein nicht erfülltes Arbeitspaket am Vorhabenende.

Tab. 1: Status des Projektzeitplanes zum Ende des Projektes

	1. Jahr												2. Jahr												3. Jahr												Status
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
AP1	Ermittlung realer Betriebsbelastungen																																				
T1.1	Integration p/T-Ventil																																				rot
T1.2	Ermittlung p/T-Verläufe																																				rot-gelb
T1.3	Auswertung und Ergebnistransfer																																				grün
AP2	Bestimmung der Restfestigkeit künstlich gealterter Druckbehälter																																				
T2.1	Beschaffung Druckbehälter und Versuchsequipment																																				grün
T2.2	Ermittlung Vergleichsreferenz																																				grün
T2.3	Prüfstandbau und Erprobung thermischer Alterung																																				grün
T2.4	Ermittlung Restfestigkeit thermischer Alterung																																				grün
T2.5	Versuchsbegleitende Schallemissionsprüfung																																				grün
AP3	Bestimmung der Restfestigkeit im Einsatz gealterter Druckbehälter																																				
T3.1	Ermittlung Restfestigkeit aus Einsatz-/Übungsszenarien																																				grün
T3.2	Versuchsbegleitende Schallemissionsprüfung																																				grün
AP4	Thermische Untersuchungen an Lithiumakkubetriebener Brandschutzausrüstung																																				
T4.1	Auswahl und Beschaffung Funkgerätetypen und Lithium-Akkus																																				grün
T4.2	Ermittlung der Parameter, die für die Akku-Typen zum TR führen																																				grün
T4.3	Ermittlung kritischer Bedingungen im Geräteinneren (Batteriefach)																																				grün
T4.4	Empfehlungen für Vorbeuge- bzw. Warnmaßnahmen																																				grün
AP5	Ergebnistransfer																																				
T5.1	Strategie mit Implementierungsplan während der Vorhabenlaufzeit																																				grün
T5.2	Fortschrittsbericht Lenkungs-/Kontrollausschuss																																				rot-gelb
T5.3	Veröffentlichung und Ergebnistransfer																																				gelb
T5.4	Strategie mit Implementierungsplan nach der Vorhabenlaufzeit																																				grün

Legende (Status)

- vollständig erfüllt
- noch offene Aufgaben
- nicht erfüllt
- Verzögerung gg. ursprünglicher Planung

Gegenüber dem Berichtsstand zum 28.02.2023 gibt es keine kritischen Veränderungen, Teilarbeitspaket T1.1 wird bis zum Ende der Vorhabenlaufzeit unverändert als rot markiert bleiben, da keine kommerziell verfügbaren und zugelassenen Ventile mit integrierter Druck- und Temperaturmesstechnik verfügbar waren und auf die Integration von kontinuierlicher Druckmessung während der Realbrandversuche aus genannten Gründen verzichtet wurde. Dies wurde bereits in den vorhergehenden Statusberichten zum Vorhaben FP462 adressiert. Jedoch wurde ersatzweise eine Temperaturmessung am Ventil-Außenbereich durchgeführt. Diese ermöglicht zwar keine direkte Temperaturmessung des Gases, erfasst jedoch zumindest die beim Ausströmen resultierenden thermischen Auswirkungen (Abkühlung) auf den Ventilbereich.

Bedingt durch die Nachwirkungen der Corona-Pandemie und des Ukrainekrieges kam es bei der Beschaffung von Komponenten, Prüfständen und Prüfmustern zu deutlich längeren Lieferzeiten. Dies verzögerte die Beschaffung der thermischen Versuchsstände insbesondere in den Teilarbeitspaketen T2.3, T4.2 und T4.3. Der Aufbau der Versuchsstände verzögerte sich dementsprechend bis in die zweite Hälfte des Jahres 2022. Diese Verzögerungen betrafen auch die unmittelbar nachfolgenden Arbeitspakete T2.4 und T2.5 sowie die in T4.2 und T4.3 durchgeführten Versuche und die in T4.4 zu treffenden Empfehlungen für Vorbeugemaßnahmen und den generellen Ergebnistransfer in T5.3.

Auch die Beschaffung weiterer nicht-ATEX-Funkgeräte, die beim zweiten Treffen des Lenkungsausschusses angeregt bzw. gewünscht wurde, verzögert sich infolge der o.g. Lieferengpässe. Die zusätzlichen Untersuchungen an diesen

Funkgeräten konnten trotz der o.g. Verzögerungen noch innerhalb der Gesamtlaufzeit des Projektes durchgeführt und abgeschlossen werden.

Der in Teilarbeitspaket 5.3 geplante Ergebnistransfer in Form von Veröffentlichungen ist noch nicht vollständig abgeschlossen. Eine Veröffentlichung zu den Ergebnissen der Atemschutzflaschen ist vorbereitet, muss aber noch finalisiert und eingereicht werden und ist beim Verlag bereits angekündigt und eingeplant. Das gleiche gilt für eine Veröffentlichung zu den Lithiumbatterien. Ein weiterer Vortrag ist bei der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb) Tagung für April 2024 geplant und abgestimmt.

Alle erfolgten und geplanten Veröffentlichungen sind in Kapitel 7.1 Veröffentlichungsverzeichnis angegeben.

3.1 Vorarbeiten

Zur Bearbeitung der im Vorhabenantrag definierten Zielstellung wurde zunächst eine Literaturrecherche zur Ermittlung der (maximalen) thermischen Betriebslasten auf die persönliche Schutzausrüstung (PSA) während der Benutzung in Brandszenarien durchgeführt. Eine geeignete Vorab-Definition des zu erwartenden thermischen Lastprofils war insbesondere für die Konzeption und Planung der Versuchsstände zur thermischen Belastung zwingend erforderlich.

Untersuchungen der Betriebsfeuerwehr (BF) Karlsruhe [9] zeigen kurzzeitige thermische Lastspitzen mit einer Temperaturerhöhung von bis zu 70 K gegenüber der Grundlast (siehe Abb. 2), gemessen an der Oberfläche der PSA während eines Übungsszenarios. Diese Maximalwerte sind allerdings nur von sehr kurzer Dauer, lediglich wenige Sekunden.

Die in der umgebenden Raumluft gemessenen Temperaturen liegen dabei um ein Vielfaches höher (bis über 400°C), sodass bei einer längeren Expositionszeit vermutlich mit einer noch stärkeren Erwärmung der PSA gerechnet werden muss. Entsprechende Annahmen decken sich mit Erkenntnissen aus [12], wo von einer durchgängigen Erwärmung der PSA von bis zu 160°C ausgegangen wird (siehe Abb. 3).

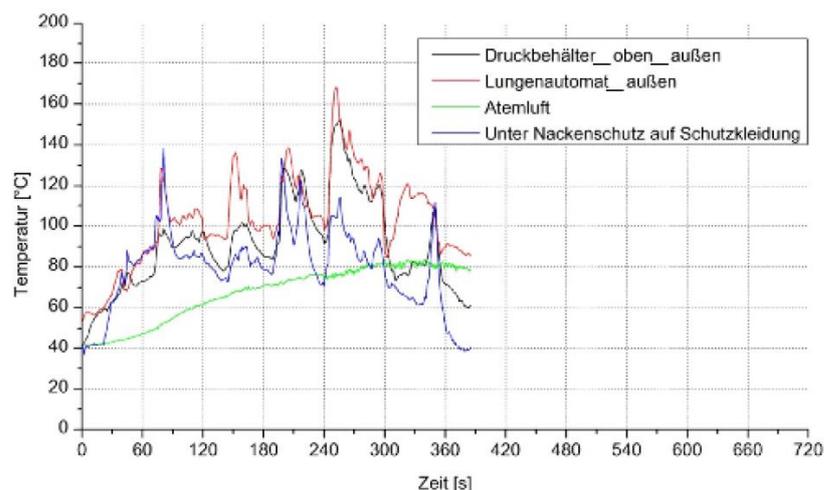


Abb. 2: Von der BF Karlsruhe während eines Übungsbrandeinsatzes an der PSA gemessene Temperaturverläufe [9]

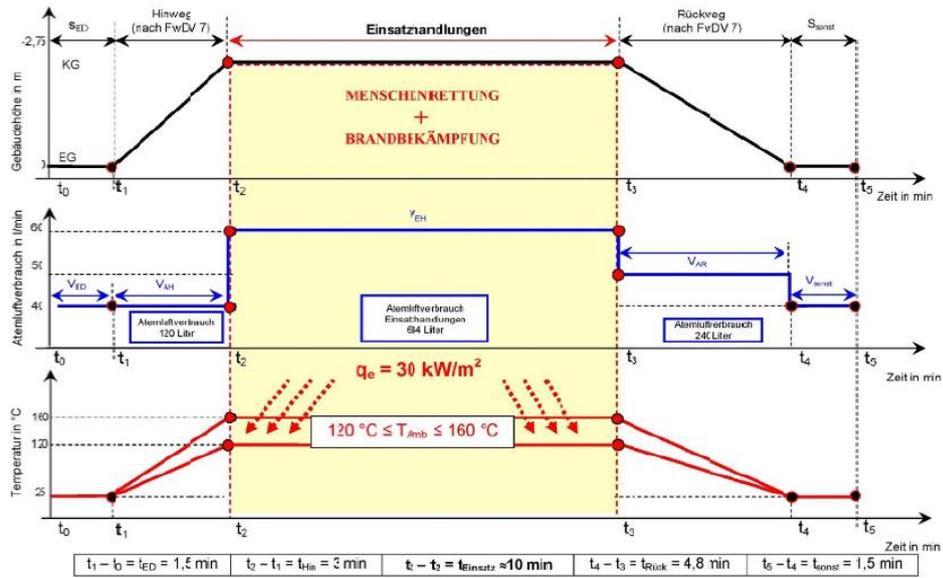


Abb. 3: Anforderungsprofil für Menschenrettung und Brandbekämpfung aus [9]

Ausgehend von den Ergebnissen oben genannter Veröffentlichungen wurde für die Vorauslegung des hier zu realisierenden Versuchstandes untenstehendes Temperaturprofil erarbeitet, Abb. 4. Dabei handelt es sich um progressive Annahmen, welche mit folgenden Randbedingungen zunächst fest definiert werden sollen:

- 1) Realisierung einer durchgängigen Oberflächentemperatur auf der PSA von bis zu 150°C über einer Versuchsdauer bis zu 20 Minuten (thermische Grundlast).
- 2) Realisierung kurzzeitiger Temperaturspitzen mit Oberflächentemperaturen bis zu 290°C über eine Einwirkdauer bis zu 30 Sekunden.
- 3) Realisierung einer maximalen Temperaturanstiegsrate von 100K/20s.

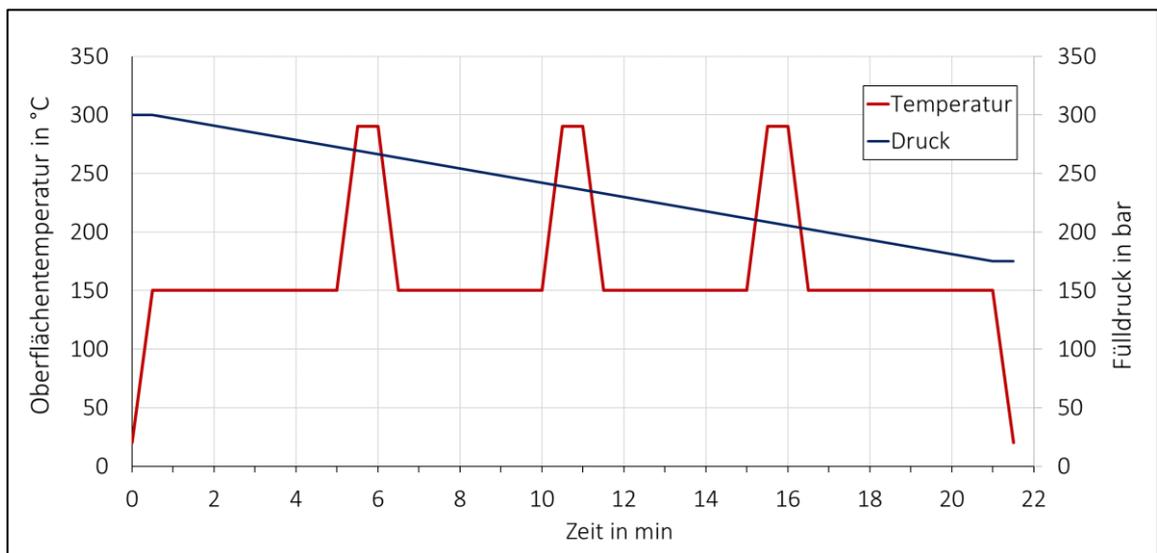


Abb. 4: Abgeleitetes thermisches Anforderungsprofil für die Versuchsstandauslegung (BAM)

Des Weiteren wurden eigene Realbrandversuche im Feuerwehrtechnischen Trainingszentrum (FTTZ) in Grünheide/ Brandenburg durchgeführt. Die Versuche dienten dem Zweck der Vergleichswertermittlung sowie zur Generierung

einer erweiterten Datenbasis, welche als Grundlage für die weiterführenden experimentellen Untersuchungen an den Versuchständen diene. Durch die Verwendung gleicher Prüfmuster im Realbrand- und Laborversuch kann zudem ein hohes Maß an Übertragbarkeit und Vergleichbarkeit sichergestellt werden.

3.2 Auswahl Prüfmuster

Im Rahmen des Projektes wurden zwei besonders sensible Komponenten der PSA bzw. der sicherheitskritischen Ausrüstung, Atemschutzflaschen sowie Funkgeräte mit Lithium-Ionen-Batterien untersucht. Es wurden zwei Atemluftflaschen unterschiedlicher Bauart und verschiedener Hersteller sowie neuwertige als auch gebrauchte Funkgeräte vom Typ Motorola MTP850Ex [27] mit integrierten Lithium-Ionen-Batterien beschafft. Dabei handelt es sich um die nach Abstimmung mit dem Lenkungsausschuss und der Berliner Feuerwehr standardmäßig verwendeten Funkgeräte. Die verwendete Ausrüstung zeigt Abb. 5.

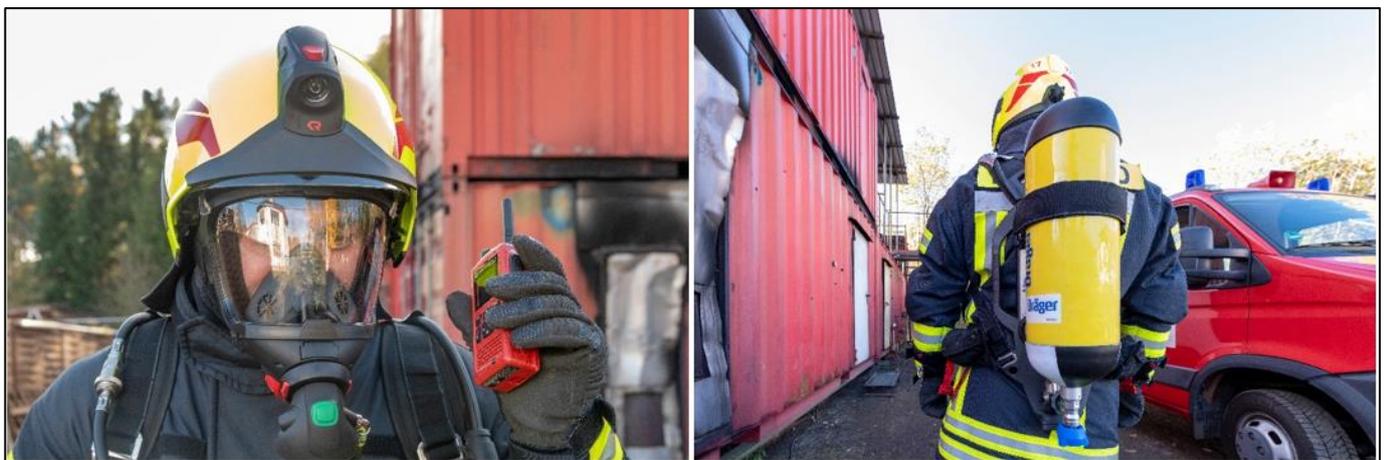


Abb. 5: Motorola MTP850Ex-Funkgerät (links) und Dräger Typ 4 Atemschutzflaschen (rechts)

Tab. 2 gibt eine Übersicht aller beschafften Prüfmuster der Atemluftflaschen. Fokus der Untersuchungen liegt dabei auf den Prüfmustern der Fa. Dräger Safety AG & Co. [25], da diese in großem Umfang Anwendung bei deutschen Feuerwehren finden. Als Vergleichsprodukt werden Prüfmuster der Fa. Composite Technical Systems (CTS) [26] verwendet und untersucht. Im Rahmen von Vorversuchen zur Wärmeeintragsprüfung und zur Einstellung der Druckregelung kommt zudem ein Typ 1 Behälter der Fa. Dräger zum Einsatz.

Alle verwendeten Atemschutzflaschen sind gemäß DIN EN 12245 [8] hergestellt und geprüft, die Zulassung erfolgt nach der Europäischen Druckgeräte-Richtlinie (PED 2014/68/EU)[5] .

Tab. 2: Übersicht und Spezifikation aller beschafften Atemschutzflaschen

Behältertyp	Hersteller	Anzahl	p_w/p_h	Gewicht	Volumen	Hinweis
Typ 4	Dräger	51	300bar/450bar		6,8 l	
Typ 4	CTS	12	300bar/450bar	2,7 Kg	6,8 l	
Typ 1	Dräger	1	300bar/450bar		6,0 l	für Vorversuche

Als Ergebnis der Diskussionen aus der zweiten Lenkungsausschusssitzung 2022 wurden neben den geplanten Untersuchungen an MTP850Ex auch Funkgeräte vom Typ MXP600 [28] beschafft. Diese Funkgeräte sind nicht explosionsgeschützt und die Akkus besitzen im Vergleich eine viermal so hohe Kapazität. An diesen Funkgeräten sind stichpunktartige Vergleichsversuche durchgeführt worden, die im Forschungsantrag nicht vorgesehen waren, (siehe Tab. 3).

Tab. 3: Übersicht und Spezifikation aller beschafften Funkgeräte

Funkgerät	Hersteller	Anzahl	U_{max}	U_N	Energie	Kapazität	Hinweis
MTP850Ex	Motorola Solution	17	8,66 V	7,8 V	5,2 Wh	750 mAh	im Projektantrag vorgesehen
MXP600	Motorola Solution	3	-	3,7 V	12,9 Wh	3400 mAh	zusätzliche Untersuchungen

Durch die höhere Kapazität und den nicht vorhandenen EX-Schutz können die MXP600 Funkgeräte als kritischer beim Versagen und somit eher als „worst-case“ angesehen werden. In den ATEX-Funkgeräten der MTP850Ex-Serie sind zwei Lithium-Zellen in Reihe, während in der MXP600-Serie vier Zellen parallel verbaut sind. Die Herstellerangaben und technischen Daten zu den verbauten Lithium Zellen sind in

Tab. 10 im Anhang 8.1 dargestellt.

3.3 Aufbau und Inbetriebnahme der Versuchsstände

Zur Durchführung der geplanten Versuche in dem Projekt sind zwei neue Prüfstände zur thermischen Belastung geplant und aufgebaut worden. Ein Prüfstand für die Atemschutzflaschen (s. Kap. 3.3.1) und ein Prüfstand für die Funkgeräte mit Lithiumbatterien (s. Kap. 3.3.2). Details zu dem Aufbau, der Inbetriebnahme und der Versuchsdurchführung finden sich in den nachfolgenden Kapiteln.

3.3.1 Versuchsstand für Atemschutzflaschen

In den folgenden Unterabschnitten werden die durchgeführten Arbeiten zum Prüfstandsaufbau und zur Versuchsdurchführung dargestellt.

3.3.1.1 Aufbau des Versuchsstandes

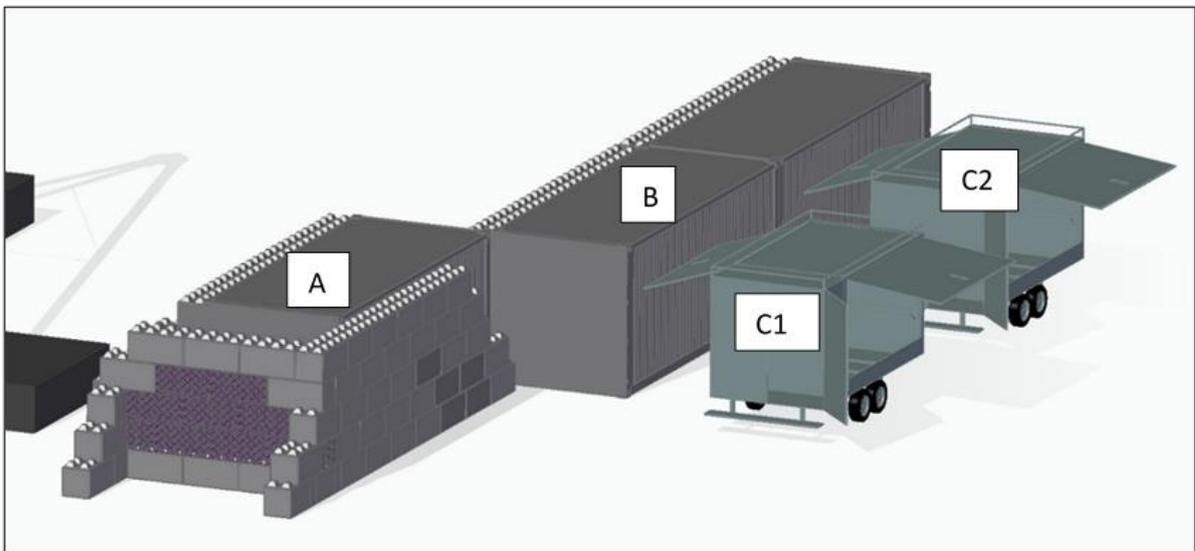


Abb. 6: Anordnung von Versuchs- (A) und Messcontainer (B) sowie der Gasfülleinheit (C1 & C2) auf dem BAM TTS

Wie bereits im letzten Zwischenbericht beschrieben, erfolgt der Aufbau des thermischen Versuchsstandes für Atemschutzflaschen auf dem Testzentrum Technische Sicherheit (TTS) der BAM. Eine Übersicht der Test-Infrastruktur, bestehend aus Versuchscontainer (A), Steuer- und Kontrollraum (B) sowie der Gasfülleinheit (C1 & C2) und den umgebenden Schutzelementen zeigt Abb. 6.

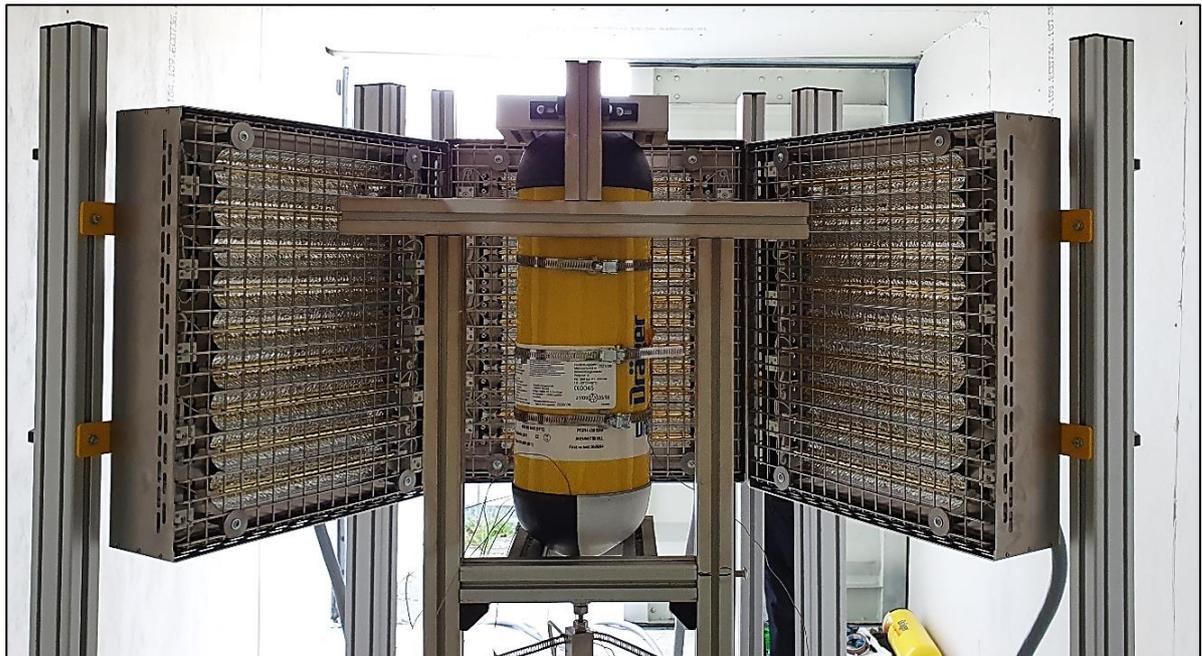


Abb. 7: Versuchsaufbau mit Prüfmuster und den umgebenden IR-Strahlern im Versuchscontainer

Die Aufbringung der thermischen Last auf die Prüfmuster erfolgt mittels Infrarot (IR)-Strahler im Versuchscontainer. Zum Einsatz kommen dabei 3 IR-Strahler mit einer Maximalleistung von 2 x 18kW und 1 x 24kW. Die drei Strahler werden auf einem Ständerwerk in einem Winkel von 120° um das Prüfmuster angeordnet (siehe Abb. 7). Der maximale Wärmestrom geht dabei vom mittig angeordneten Strahler mit einer Maximalleistung von 24kW aus, ergänzt von den davon jeweils seitlich angeordneten 18kW Strahlern. Zudem erfolgte der Anschluss der Gasfüllanlage an das Prüfmuster, wodurch eine Befüllung des Prüfmusters mit Atemluft auf Betriebsdruck von $p_B = 300$ bar sowie ein realistisches Abströmen während der thermischen Beanspruchung umgesetzt werden konnte.

3.3.1.2 Inbetriebnahme und Versuchsablauf

Einfluss der Sensorpositionierung

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass die Positionierung der verwendeten Temperatursensoren erheblichen Einfluss auf die gemessene Oberflächentemperatur besitzt. Abb. 8 zeigt die unterschiedliche Anordnung der Sensoren. Neben der Lage (oben/ unten/ Mitte/ links/ rechts) wurde auch der Einfluss der Ausrichtung der Messköpfe bezüglich der Behälteroberfläche (siehe Detailbild rechts) untersucht.

Der dazugehörige Temperaturverlauf, dargestellt in Abb. 9, liefert wichtige Information über die Auswirkungen genannter Einflussfaktoren. Darauf aufbauend wurde auch das Regelungsverhalten analysiert und optimiert. Nach der Auswertung der Daten wird zunächst deutlich, dass bei einem geraden Aufliegen der T-Sensoren auf der Oberfläche (siehe S2) stets eine höhere Temperatur gemessen wird, als bei einer angewinkelten Ausrichtung (Messkopf zeigt normal auf Behälteroberfläche, vgl. Sensor XS5) (vgl. Abb. 8). Dies ist vermutlich damit zu begründen, dass bei einem gerade aufliegenden Temperatursensor ein Teil der vom Strahler emittierten IR-Strahlung direkt auf den Sensor trifft und diesen erwärmt, während bei der angewinkelten Variante eine Erwärmung der Messspitze überwiegend von der Behälteroberfläche erfolgt.

Ziel der Messungen war es, die auf der Behälteroberfläche vorherrschenden Temperaturen zu erfassen und die Temperaturmessung von umliegenden Einflussquellen auszuschließen.

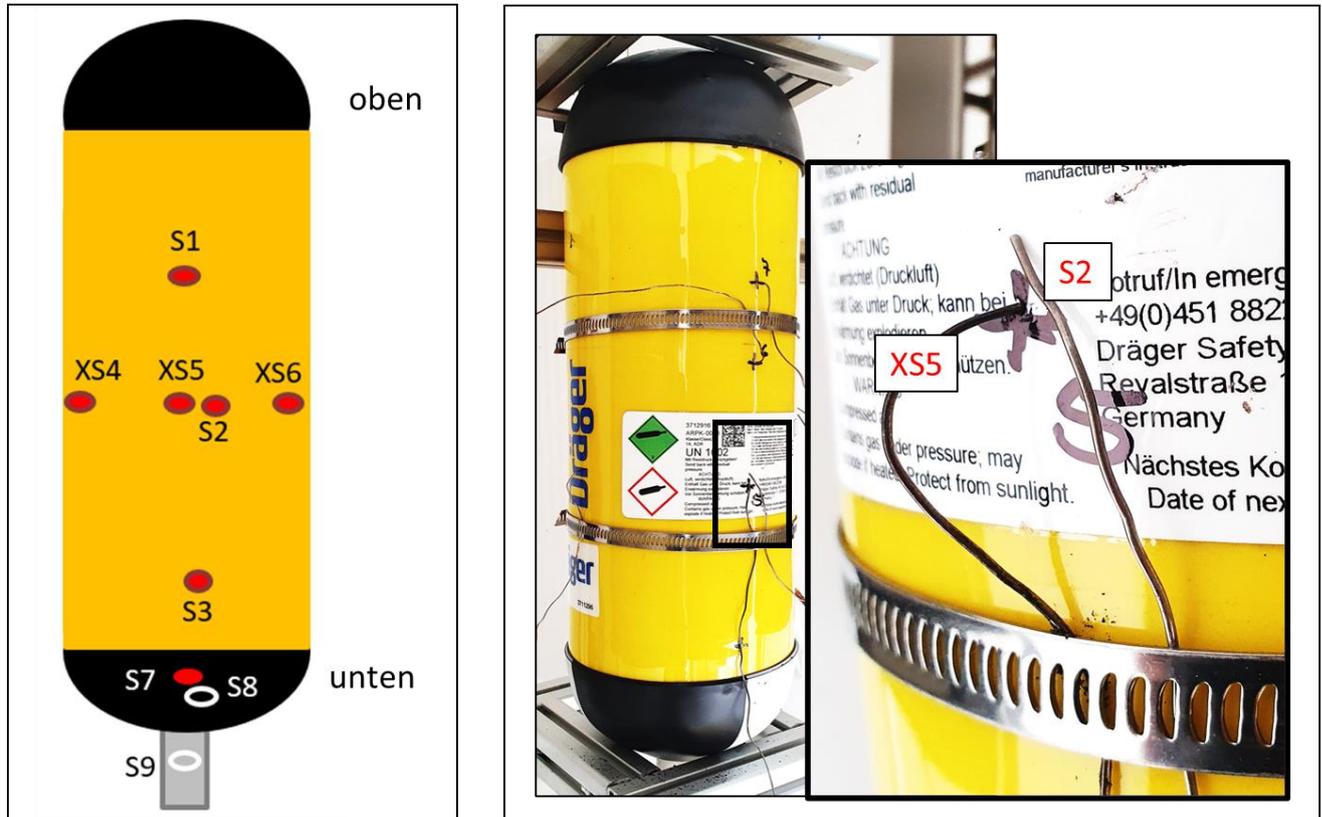


Abb. 8: links: Verteilung der Temperatursensoren auf der Behälteroberfläche, rechts: Voruntersuchungen über den Einfluss von Positionierung und Ausrichtung der T-Sensoren auf die Messung der Oberflächentemperatur

Für den weiteren Versuchsverlauf erfolgte daher eine Temperaturmessung mittels der angewinkelten Ausrichtung der T-Sensoren (vgl. XS5 in Abb. 8). Zur Fixierung wurden die Sensordrähte mittels Stahlschellen in Position gehalten. Um eine optimale Anbindung der Messköpfe an die Behälteroberfläche zu gewährleisten, wurden diese zudem punktuell mittels Klebstoff angeklebt. Weiterhin wird ersichtlich, dass im oberen Bereich des Behälters eine höhere Temperatur gemessen wird als im Unteren, was infolge der Konvektion warmer Luft auch erwartbar ist.

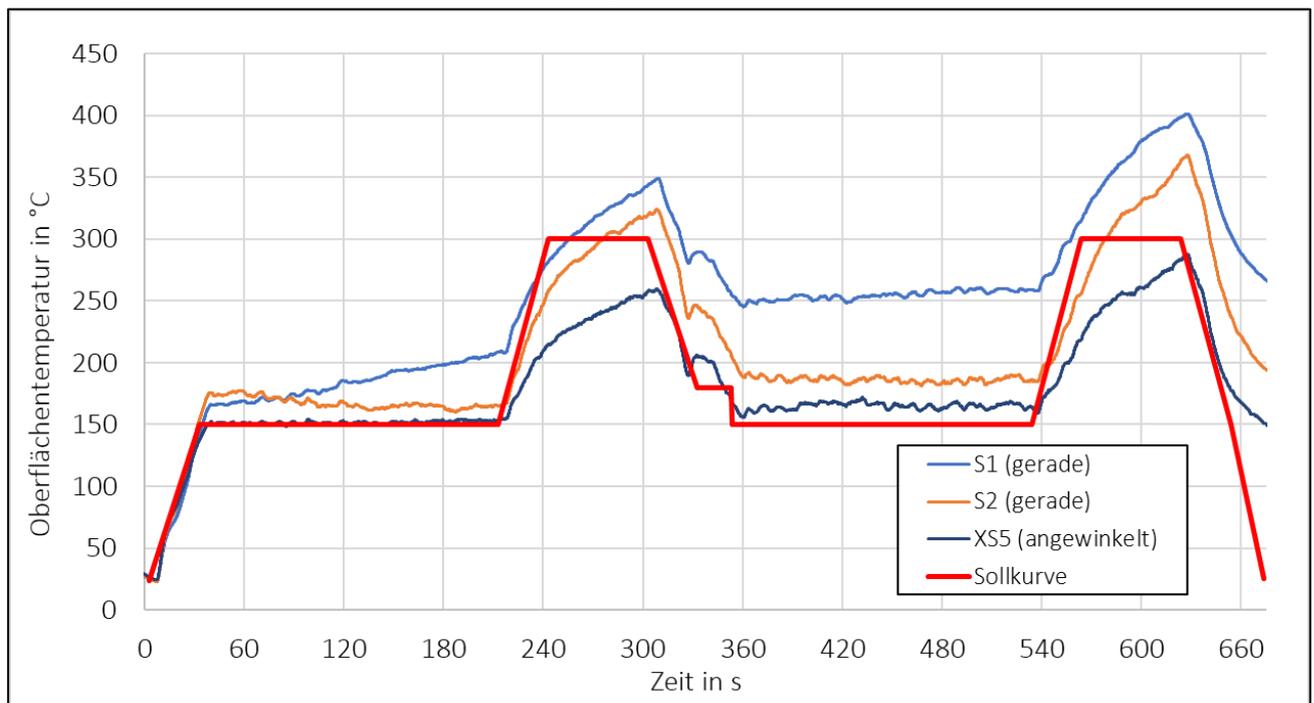


Abb. 9: Einfluss der Sensorpositionierung auf den gemessenen Temperaturverlauf

Um später die Temperaturverteilung auf der gesamten außenliegenden Behälteroberfläche abbilden zu können, erfolgte die Verwendung aller in Abb. 8 (links) abgebildeter Sensoren. Zudem erfassten zusätzliche Sensoren die Temperaturen am Ventilbereich, welche durch Kompressionseffekte (Zu- und Abströmung der Atemluft) beeinflusst werden. Die mit XS bezeichneten Sensoren (vgl. Abb. 8) dienen als Steuer- und Regelgrößen für die IR-Strahlerfelder.

Versuchsablauf

Die Versuchsdurchführung orientierte sich an den im FTTZ gemessenen Temperaturprofilen und Zyklen. Das hier verwendete Temperaturprofil umfasste jeweils drei Belastungszyklen je Versuchseinheit, bestehend aus drei sich jeweils abwechselnden Plateauphasen und Hochtemperaturphasen (siehe Abb. 10 und Abb. 11 - roter Kasten). Die einzelnen Versuchseinheiten wurden anschließend mehrmals wiederholt. Abb. 11 zeigt exemplarisch den Temperaturverlauf eines vollständig durchgeführten Versuchsszenarios an dem Behälter D37 und Abb. 12 den ersten Temperaturzyklus exemplarisch für Behälter D32.

Um den Einfluss verschiedener Expositionszeiten und Temperaturen und deren Auswirkungen abbilden und untersuchen zu können, wurden zunächst unterschiedlichste Belastungszyklen gefahren. Ziel war es, somit möglichst schadhafte Kombinationen aus Expositionszeit, Maximal- und Grundtemperaturen zu identifizieren und im Folgenden ggf. Grenzwerte (Minimal- als auch Maximalwerte) für einen sicheren Betrieb festlegen zu können.

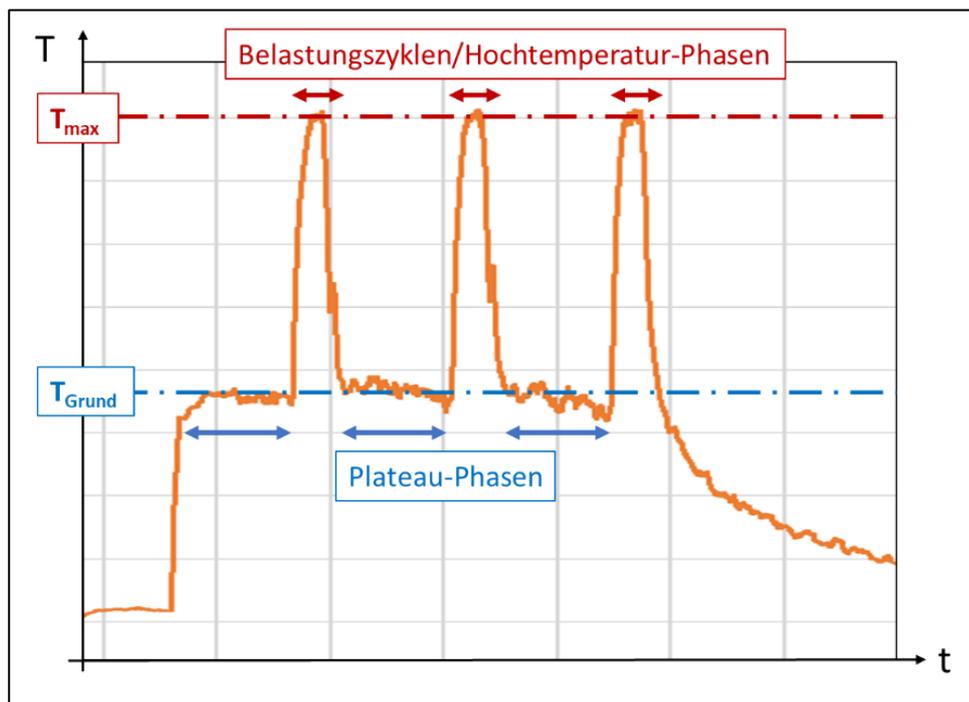


Abb. 10: Schematische Darstellung des Temperaturprofils einer Versuchseinheit am Behälter D37

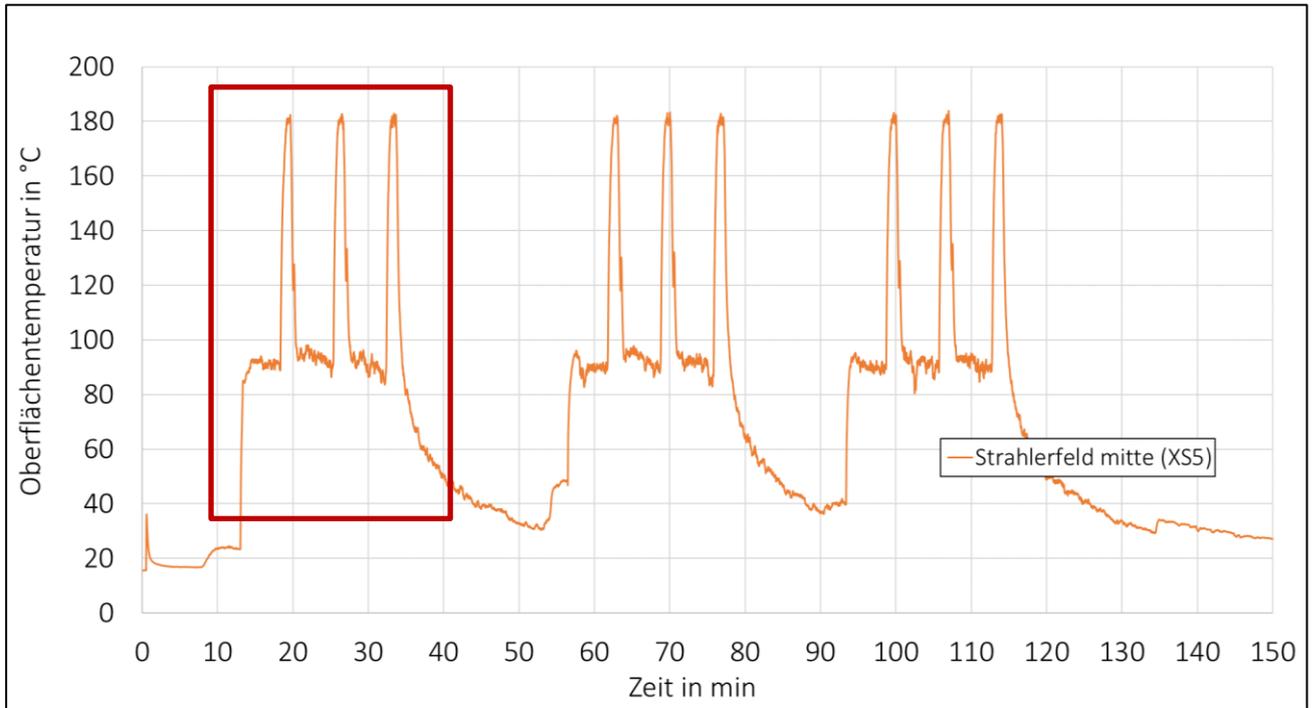


Abb. 11: Darstellung des Temperaturverlaufs dreier aufeinanderfolgender Versuchseinheiten (3x3 Belastungszyklen); gemessen auf der Behälteroberfläche in mittiger Position (vgl. **Abb. 8**) am Behälter D37

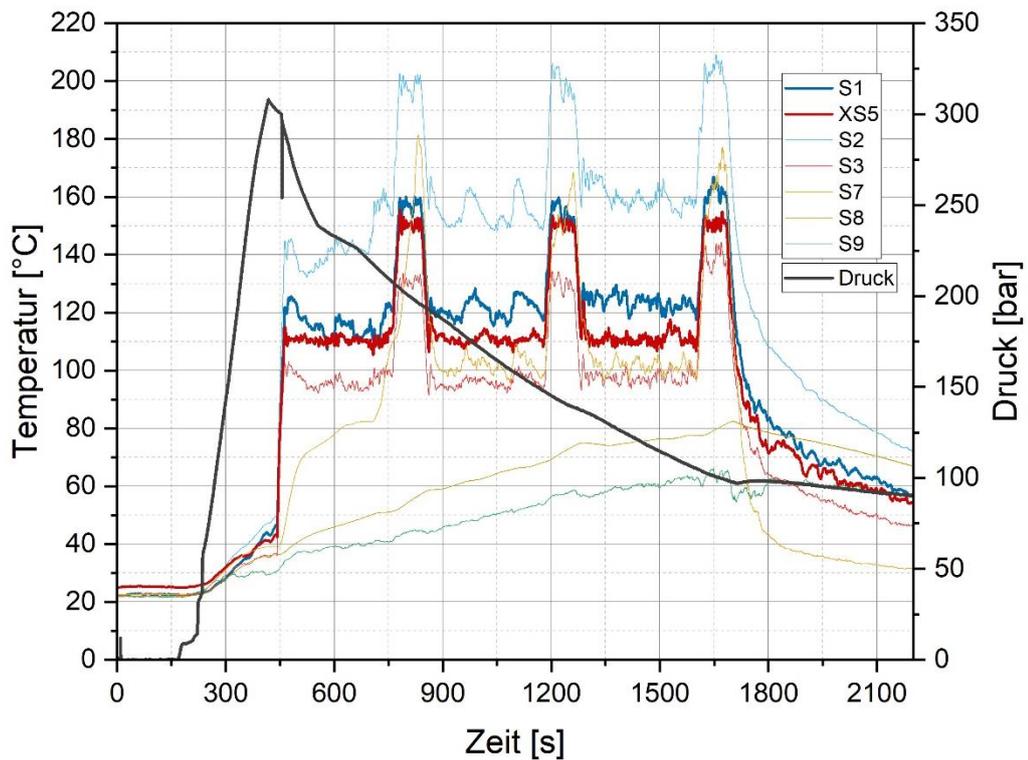


Abb. 12: Darstellung des Temperaturprofils einer Versuchseinheit am Behälter D32

In der Abb. 12 ist der oben beschriebene Einfluss der Sensorpositionierung (vgl. Abb. 8, links) deutlich am Sensor S2 zu erkennen, der gegenüber dem als Regelgröße verwendeten Sensor XS5 einen Unterschied von fast 50°C aufweist, lediglich durch die Ausrichtung.

3.3.1.3 Simulationsmodell zur Abschätzung thermischer Belastungen an Atemschutzflaschen

Parallel zu den geplanten experimentellen Laborversuchen wurde ein Finite-Elemente (FE)- Simulationsmodell aufgebaut, um den Wärmedurchgang, d.h. die Auswirkungen der gemessenen Oberflächentemperaturen auf die messtechnisch nicht erreichbaren inneren Behälterschichten – insbesondere auf den im Inneren liegenden Kunststoffliner – zu ermitteln. Das Modell umfasst die einzelnen Lack-, Glasfaser-Kunststoff (GFK)- als auch Kohlefaser-Kunststoff (CFK)-Verbundschichten sowie den inneren Kunststoffliner aus Polyethylen (PE). Abb. 13 zeigt den Aufbau des Simulationsmodells.

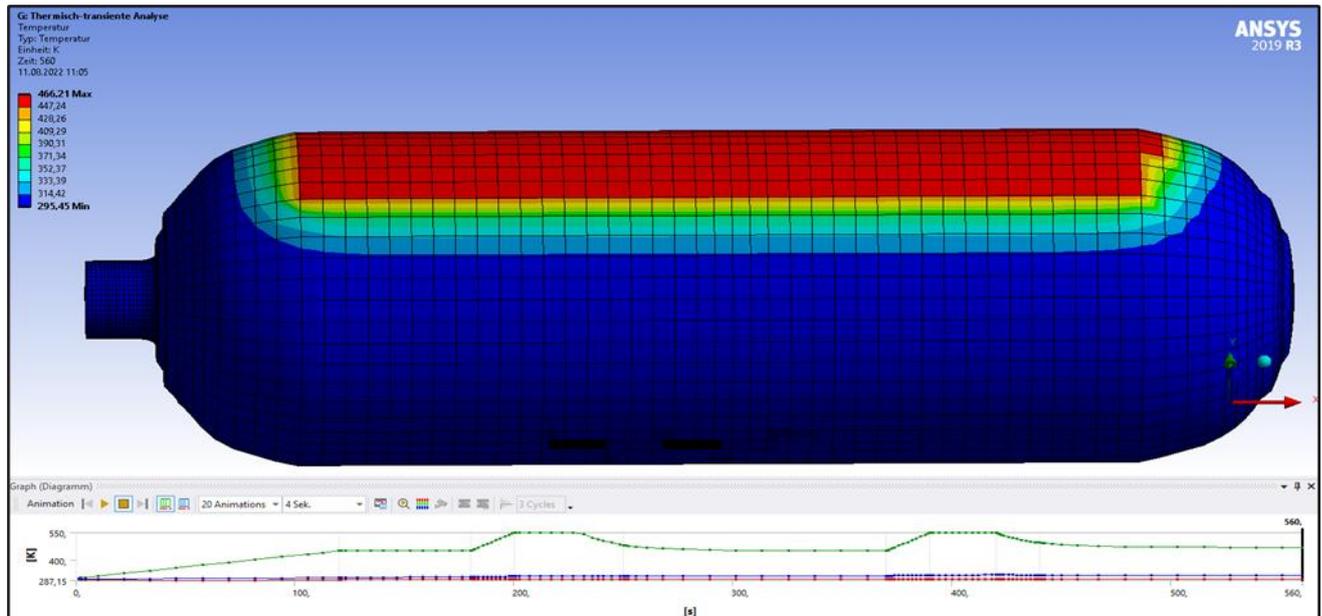


Abb. 13: Darstellung des FE-Simulationsmodells mit dem applizierten thermischen Temperaturprofil auf einem Teil der Mantelfläche

Zur Simulation des Wärmedurchgangs wurde auf einem Teil der Außenfläche im zylindrischen Bereich eine thermische Last aufgebracht. Aufheiz- und Abkühlzeiten sowie die dazugehörigen Temperaturrandbedingungen wurden entsprechend des unter Kapitel 3.1 definierten Temperaturprofils in einer transienten Simulation umgesetzt. Eine grafische Darstellung der daraus resultierenden Temperaturverläufe zeigt Abb. 14.

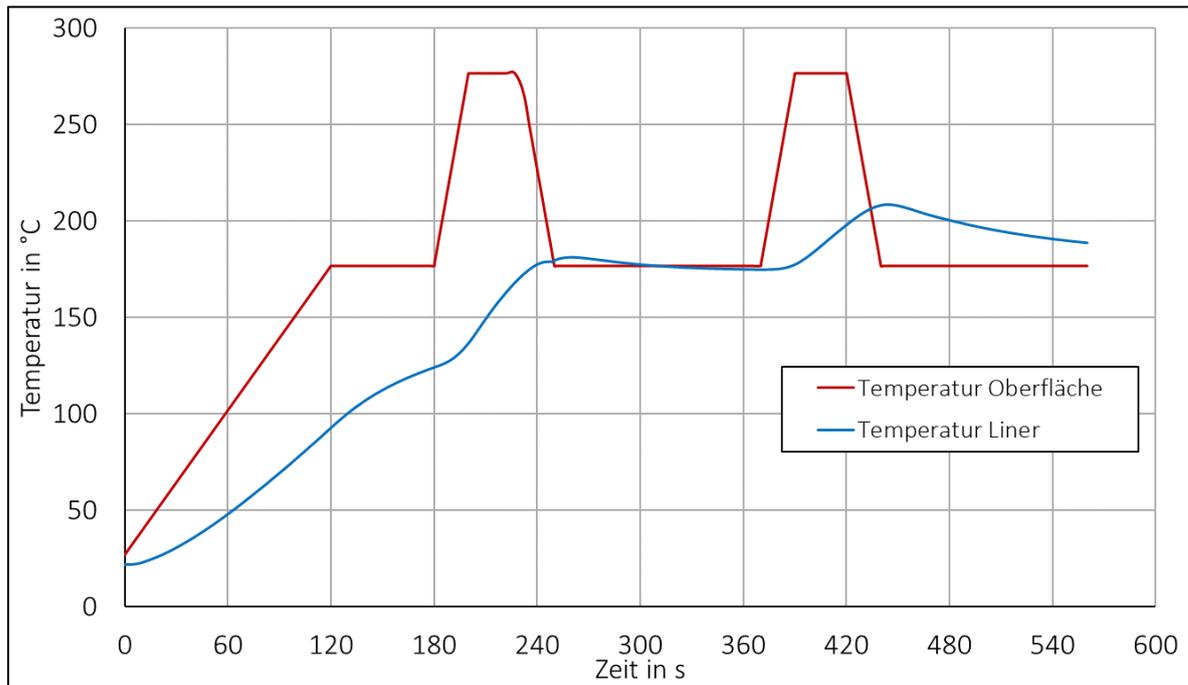


Abb. 14: Vergleich des mittels FE-Simulation ermittelten Temperaturverlaufs auf der Behälteroberfläche und Behälterinnenseite (Liner)

Die Simulation zeigt, dass sich die Temperatur am Liner mit zeitlichem Verzug an die Oberflächentemperatur angleicht. Es ist folglich davon auszugehen, dass die auf der Außenseite herrschenden Grundtemperaturen nach etwa 2-5 Minuten auch im Behälterinneren erreicht werden. Auf Grund ihrer nur kurzzeitigen Einwirkzeit beeinflussen thermische Lastspitzen die Innentemperatur zu Beginn nur geringfügig. Mit zunehmender Expositionszeit begünstigen jedoch auch solch kurzzeitige Einflüsse eine stetige Erhöhung der Innentemperatur. Die hohe spezifischen Wärmekapazität des Composite-Materials führt beim gezeigten Szenario generell zu einem stärkeren Temperaturanstieg. Das heißt, dass ein einmal erwärmter Behälter die Wärme für einen sehr langen Zeitraum speichert.

3.3.2 Versuchsstand für Lithiumbatterien

Für die Untersuchungen an den Funkgeräten waren sowohl thermisch statische als auch thermisch zyklische Belastungen vorgesehen. Die statischen Versuche dienten dem Zweck, die maximal thermische Belastbarkeit der Akkus zu ermitteln, bei der noch kein Versagen auftritt. Als Versagen gilt dabei der Funktionsausfall und/ oder ein thermisches Durchgehen der Zellen im Akku. Dabei wurde die Temperatur – mit dem vorgegeben Belastungsprofil – einmalig und sukzessive bis zum Erreichen einer kritischen Grenztemperatur erhöht und bis zum Ende des Versuchs gehalten. Nach jeder thermischen Belastungsstufe wurde die verbliebende Kapazität im Akku gemessen und somit die Auswirkungen der Belastungsstufe bestimmt. Anschließend folgte die nächste Belastungsstufe. Die Ergebnisse aus den statischen Versuchen wurden auch als Input für die zyklischen Belastungen genutzt, um den Belastungshorizont zu bestimmen.

Im Vergleich zu den statischen Versuchen war bei den zyklischen Versuchen das Ziel, die Realität so nah wie möglich im Labor abzubilden und die Lebensdauer der Funkgeräte zu bestimmen. Hierzu wurde der Akku wiederholt (Zyklen) einem definierten Profil mit einer vorgegebenen konstanten maximalen Grenztemperatur ausgesetzt. Nach bestimmten Intervallen wurden die Kapazitäten am Akku erneut gemessen und so die Schädigung durch die Zyklen bestimmt.

Da die Feuerwehr bei einem aktiven Löscheinsatz ständig mit dem Zugführer, Kameraden und anderen Löschtrupps in Verbindung stehen muss und daher das Funkgerät nutzt, wurde während der Temperaturbelastung im Prüfstand sowohl bei den statischen als auch bei den zyklischen Versuchen Strom aus den Akkus entzogen. Da in Realität nach einem Einsatz das Funkgerät wieder in seine Ladeschale gestellt und geladen wird, wurden die Akkus ebenso direkt nach jeder Belastung im Prüfstand wieder voll (auf-)geladen.

3.3.2.1 Aufbau des Versuchsstandes

Für die Konzipierung des Prüfstandes zur thermischen Belastung von Ausrüstungsteilen mit Lithiumbatterien wurde ein Prüfstand entwickelt, der über einen ca. 1m³ großen Innenraum verfügt (Abb. 15) und dessen Wänden aus Zement-gebundenen Brandschutzplatten bestehen.



Abb. 15: Prüfstand für thermische Belastung an Ausrüstungsteilen mit Lithiumbatterien, Konstruktionsmodell des Prüfstandes (links) und fertiger Prüfstand (Mitte und rechts)

Der Innenraum des Prüfstandes wurde über ein Umluftsystem temperiert. Dies war notwendig, um Außentemperaturschwankungen infolge unterschiedlicher Witterungen auszugleichen und um den Prüfraum nach einer thermischen Belastung kühlen zu können. Als Heizquelle wurde ein baugleiches 18 kW IR-Strahlerfeld aus dem oben beschriebenen Versuchsaufbau für die Atemluftflaschen (Kapitel 3.3.1.1) verwendet. Der Strahler und die dafür nötige Ansteuerungseinheit wurde ebenfalls von der Fa. IWT geliefert.

Die Prüfprozeduren, Zyklenzählung, Versagenserkennung, Abschaltkriterien und Ansteuerung des Prüfstandes erfolgten über eine programmierte grafische Oberfläche mittels DASyLab.

3.3.2.2 Aufbau der Akkus

Da über den inneren Aufbau der Akkus nichts bekannt war, wurden sowohl ein Akku der MTP850Ex-Serie als auch ein Akku der MXP600-Serie demontiert und der Aufbau der Akkus untersucht, gezeigt in Abb. 48 im Anhang 8.1.

Anhand der Erkenntnisse vom Aufbau der Akkus konnten die Positionen der anzubringenden Temperatursensoren definiert werden. Durch die Zerlegung des Akkus war es ebenso möglich, die genaue Position der Plus- und Minus-Pole der Zellen zu bestimmen. Dies ermöglichte es, während der Laborversuche die elektrische Spannung unmittelbar an den Zellen zu messen und gleichzeitig den Akku mit der Originalladestation von Motorola zu

verbinden, um die Akkus während des Versuchs laden und entladen zu können, Abb. 16 (vgl. auch Anhang 8.1 Abb. 47).



Abb. 16: Rückseite des Akkus inklusive angeschweißte Lötflächchen (links), Position der freigelegten Kontaktierungsstellen (Mitte) und angeschweißte Lötflächchen (rechts)

3.3.2.3 Inbetriebnahme und Versuchsablauf

Das Funkgerät war in der Halterung so eingebaut, dass der Akku zum Heizstrahler und das Display zur abgewandten Seite zeigt (siehe Abb. 17).

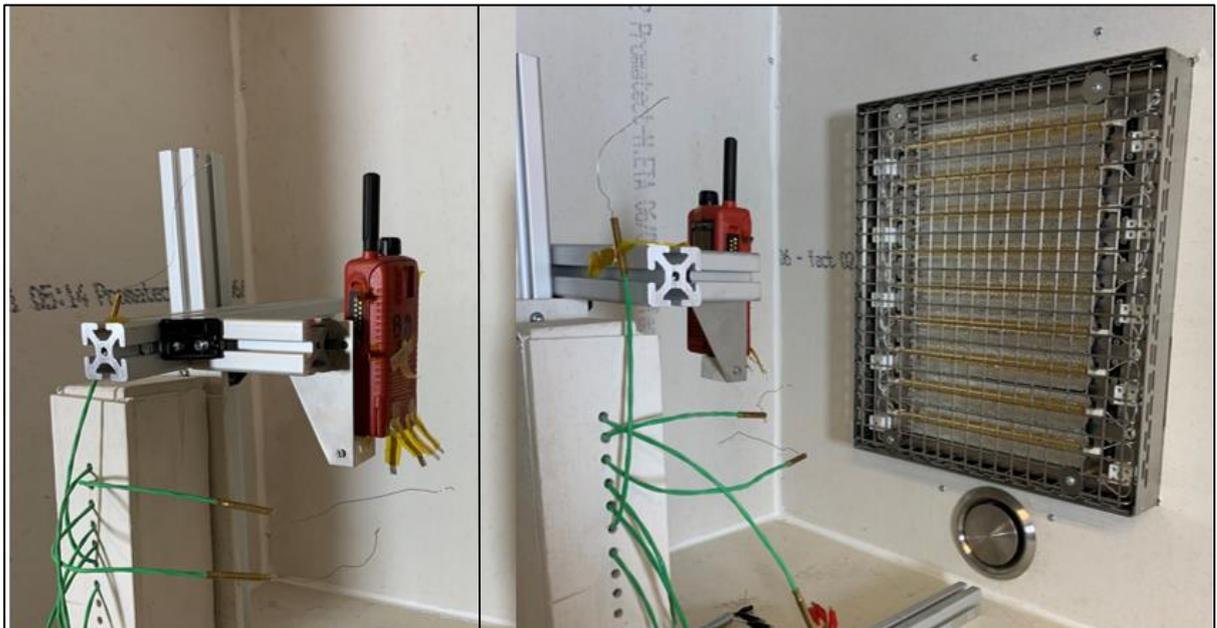
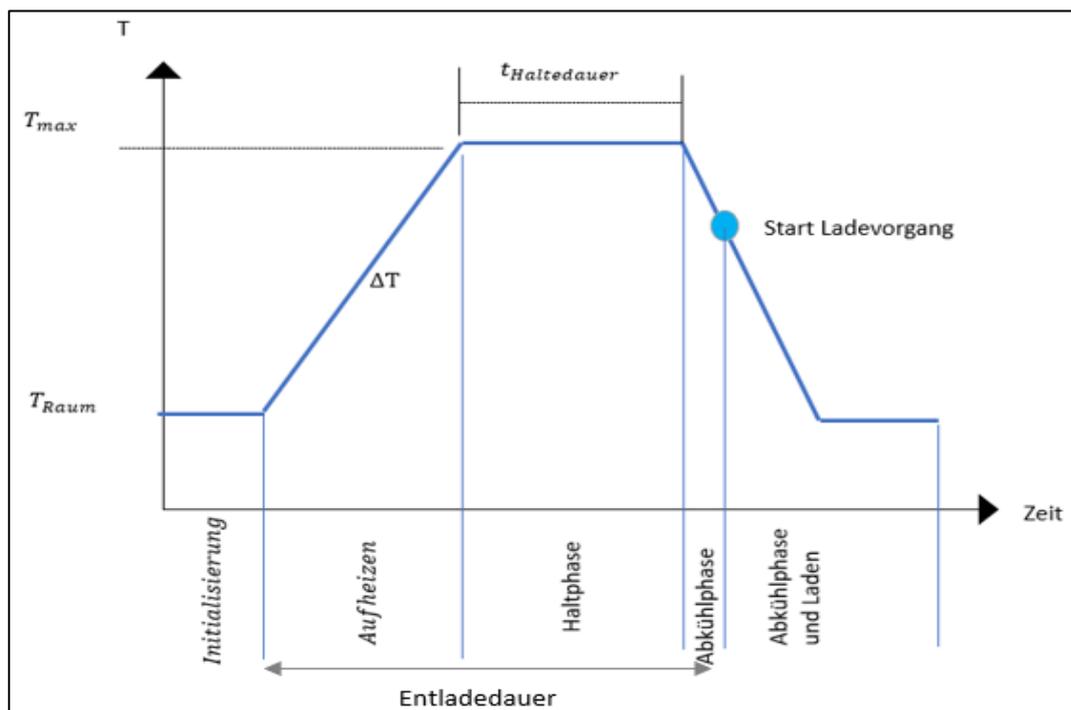


Abb. 17: Haltevorrichtung des Funkgeräts (links) und Position des Funkgeräts im Prüfstand (rechts).

Für die Versuche wurde folgender Ablauf definiert:

- An den verschiedenen unbeanspruchten Akkus wurden zunächst Kapazitätsmessungen zur Vorcharakterisierung durchgeführt, um den Ausgangszustand der Akkus zu bestimmen.
- Das Funkgerät wurde auf einem Ladezustand SOC (State of Charge) von 100% geladen.
- Das Funkgerät wurde mit dem Akku in den Prüfstand eingebaut und sowohl die Temperatursensoren als auch die Kontakte für das Be- und Entladen und für die Spannungsmessung angebracht.
- Der Versuch wurde gestartet und der Akku für die gewünschten Anzahl an Zyklen mit dem thermischen Belastungsprofil beaufschlagt.
- Während der Aufheizphase und der Haltedauer wurde der Akku entladen.
- 5 Minuten nach Beginn der Abkühlphase wurde der Akku wieder geladen bis SOC 100% erreicht wurde.
- Die Abkühlphase dauerte so lange, bis alle Temperatursensoren auf einen Wert unterhalb 25°C fielen.
- Nach einem Versuch wurde das Funkgerät auf sichtbare Schäden untersucht und sowohl Display als auch die Funktionsfähigkeit überprüft
- Im Anschluss an einer Belastung wurde eine Kapazitätsmessung durchgeführt und danach der Versuch beendet.

In Abb. 18 ist der schematische Ablauf des Belastungsprofils für ein Zyklus dargestellt und zeigt die Dauer der einzelnen Versuchsphasen: Initialisierung, Aufheizphase (600 s), Haltephase (1200 s), Abkühlphase (300 s), Aufladephase des Akkus (3300 s).



- **Abb. 18:** Übersicht über die einzelnen Phasen des thermischen Belastungsprofils

4 Ergebnisse des Gesamtvorhabens

In den folgenden Kapiteln werden nun die Ergebnisse für die Realbrandversuche auf dem Feuerwehrtechnischen Trainingszentrum (FTTZ), sowie die Ergebnisse für die Untersuchungen an den Atemschutzflaschen und den Funkgeräten präsentiert.

4.1 Ergebnisse der Realbrandversuche im FTTZ Grünheide

Wie bereits im Kapitel Vorarbeiten beschrieben, diente die Durchführung der Realbrandversuche dem Zweck der Generierung einer umfassenden Datenbasis von Umgebungstemperaturen und Oberflächentemperaturen der PSA beim Brandeinsatz. Um eine möglichst hohe thermische Belastung zu erzielen, wurde als Trainingsszenario eine Rauchgasdurchzündung gewählt und umgesetzt. Es kennzeichnet sich durch die plötzliche Durchzündung der Rauchgase infolge von starker Frischluftzufuhr und folglich einer sich im Deckenbereich schnell ausbreitenden Feuerwalze. Es bietet erfahrungsgemäß das höchste Potential eines unerwarteten, plötzlichen und sehr hohen Temperaturanstiegs, mit einer entsprechend hohen thermischen Beanspruchung von Personen und PSA. Die Umsetzung eines solchen Szenarios erfolgte mit Unterstützung der Betriebsfeuerwehr der BAM und des Personals vom FTTZ in Grünheide. Eine Darstellung des Versuchsraums am FTTZ, bestehend aus Brennkammer, mit dem vor Versuchsbeginn aufgestapeltem Holz im hinteren Bereich, und dem Versuchsraum zeigt Abb. 19.

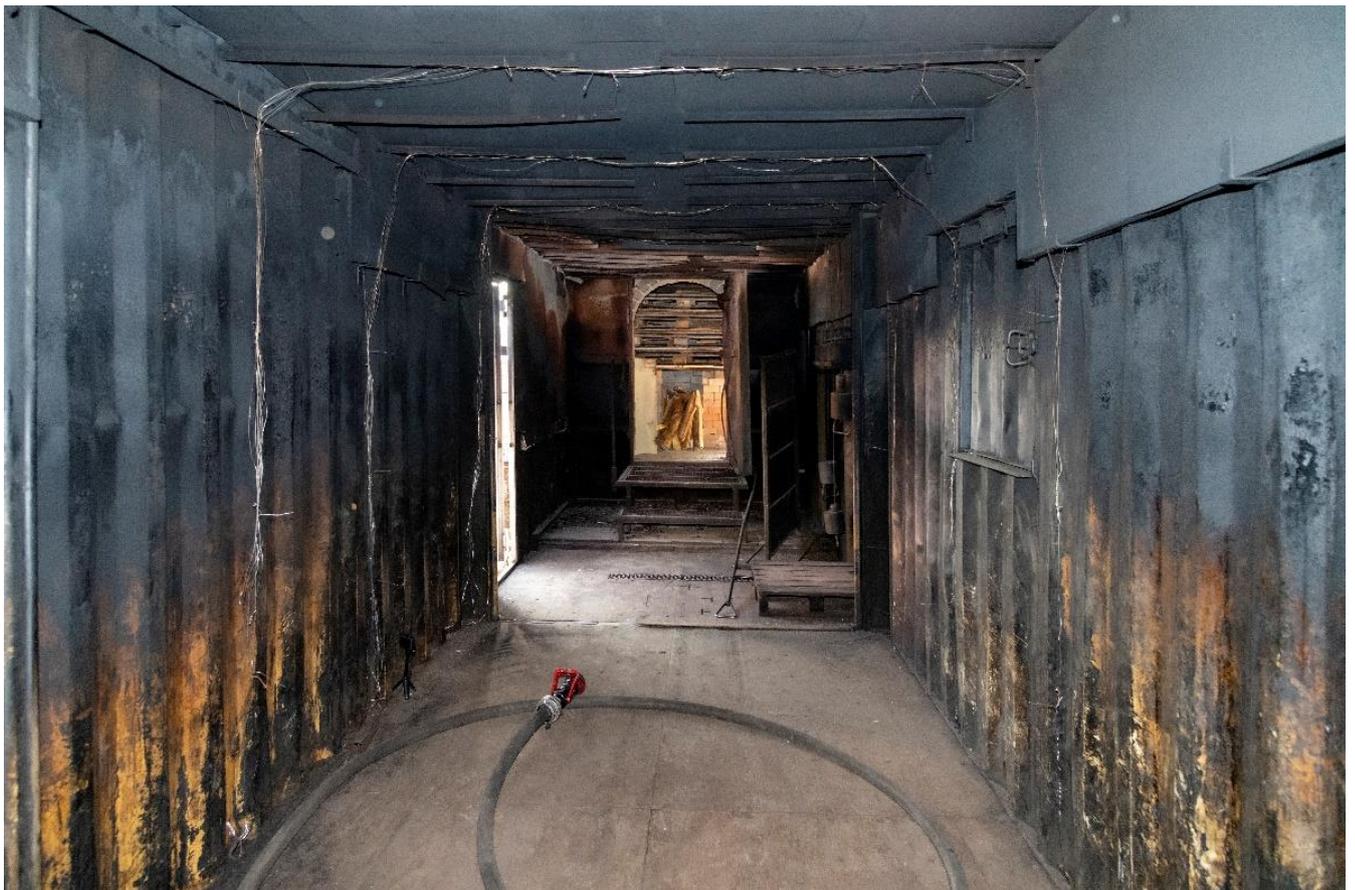


Abb. 19: Brand- und Versuchsraum des Übungscontainers.

Nach dem Anfachen der Brennkammer wurde zunächst eine starke Rauchentwicklung im Versuchsraum beobachtet, in welchem dann die Feuerwehreinsatzkräfte inkl. der mit Temperatursensoren bestückten PSA

eintraten. Durch das Öffnen der Tür zur Brennkammer und der Dachluke wurde im Folgenden eine Zuleitung von Sauerstoff gesteuert, was zur schlagartigen Ausbildung einer Feuerwalze führte. Das geschilderte Szenario wurde mehrmals wiederholt. Der Umfang des Versuchsprogramms umfasste drei Tage mit jeweils zwei Versuchseinheiten á ca. 30min. Während aller Versuchseinsätze wurden kontinuierliche die Temperaturen erfasst. Die Einsatzkräfte arbeiteten wie in einem realistischen Einsatzfall bei der Brandbekämpfung mit dem Strahlrohr und agierten zusätzlich in alternativen Einsatzszenarien rein passiv ohne den Einsatz von Löschwasser aus dem Strahlrohr.

4.1.1 Raumtemperaturerfassung

Zur räumlichen Erfassung der auftretenden Temperaturen wurden vier Messkaskaden (Portale) á 3 - 9 Temperatursensoren im Versuchsraum verteilt. Eine Übersicht der Sensoranordnung zeigt Abb. 20.

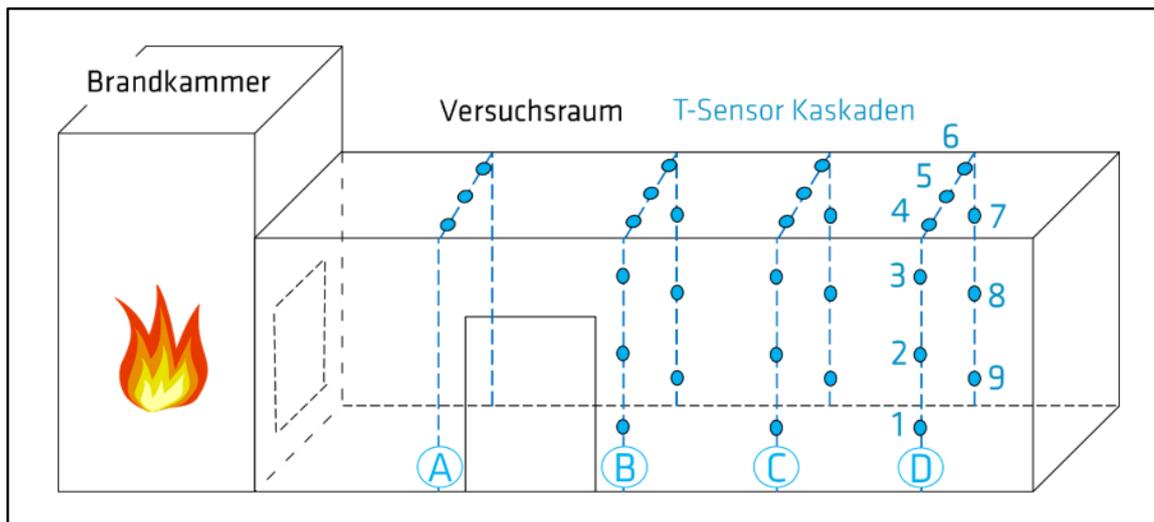


Abb. 20: Seitenansicht von Brand- und Versuchsraum sowie Anordnung der Temperatursensoren zur räumlichen Erfassung der Umgebungstemperatur.

Abb. 21 zeigt exemplarisch für einen Versuchszeitraum von 10 Minuten die Temperaturverläufe der im Versuchsraum (entsprechend Abb. 20) angebrachten Sensoren. Der Übersichtlichkeit halber wurden die einzelnen Sensoren der Portale C & D nicht explizit in der Legende aufgeführt.

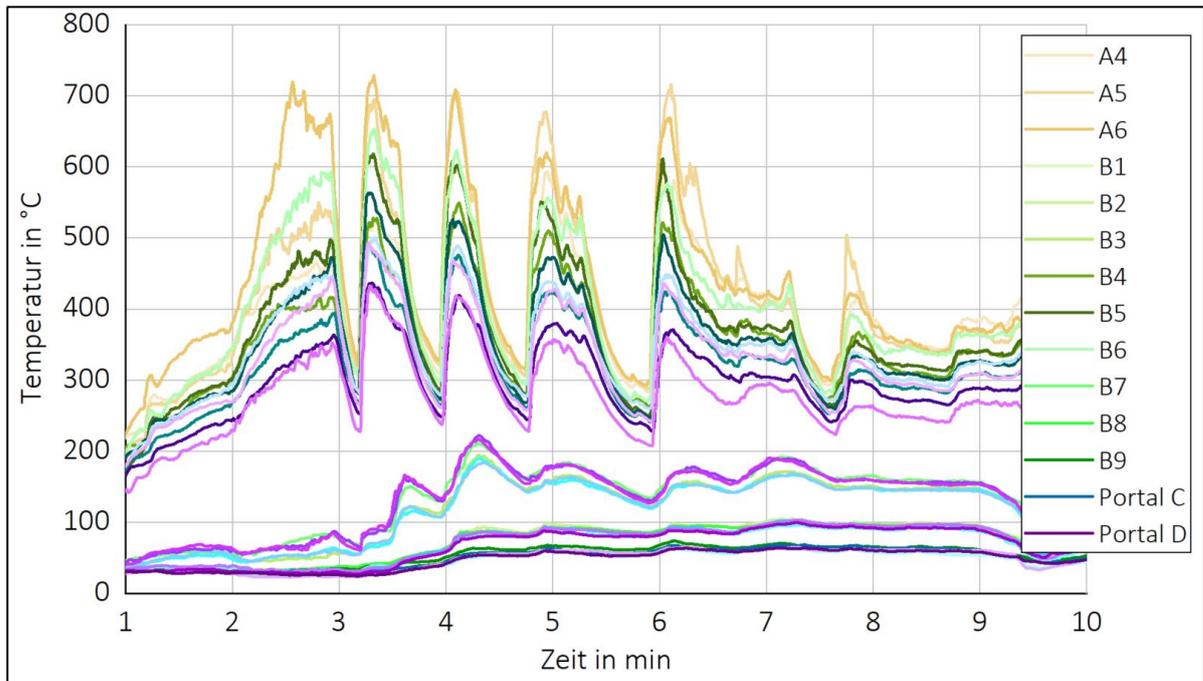


Abb. 21: Auszug eines Temperaturverlaufs der am dritten Versuchstag gemessenen Rauminnentemperaturen.

Deutlich zu sehen sind die schnellen Temperaturzunahmen und -abnahmen im Deckenbereich (Sensorpositionen 3-8 aller Portale), geprägt durch den Aufheizprozess, die Einflüsse der Rauchgasdurchzündung (kurzzeitiges Öffnen der Klappe zur Brandkammer) sowie der Frischluftzufuhr durch die Dachluke. Im vorderen Bereich (Portal A) wurden dabei kurzzeitige Maximaltemperaturen von über 700°C gemessen. Im hintersten Bereich (Portal D) wurden Maximaltemperaturen von bis zu 500°C erreicht. Die Temperaturentwicklung im bodennahen Bereich (Sensorpositionen 1 & 9, ca. 0,5 m über dem Boden) war deutlich konstanter und maßgeblich geprägt vom stetig zunehmenden Aufheizprozess, wobei die Temperaturen zunächst ansteigen und sich dann fortfolgend in einem Temperaturbereich zwischen 50°C und 100°C befinden. Im mittelhohen Bereich (Sensorpositionen ca. 1 m & 1,5 m über dem Boden) bewegen sich die Temperaturen im Bereich zwischen 150°C und 220°C. Einflüsse der Rauchgasdurchzündung sind hier in abgeschwächter Form zu beobachten.

4.1.2 Erfassung der Oberflächentemperatur auf der Atemluftflasche

Parallel zur Raumtemperaturmessung erfolgte die einsatzbegleitende Messung der Oberflächentemperaturen an der PSA. Abb. 22 zeigt die Sensorverteilung auf der Atemluftflasche. Die Messwerterfassung erfolgte mittels portabler Datenlogger, die in den Jackeninnentaschen der Feuerwehrleute untergebracht waren.



Abb. 22: Sensor- und Messpunkte zur Temperaturmessung an der Atemluftflasche.

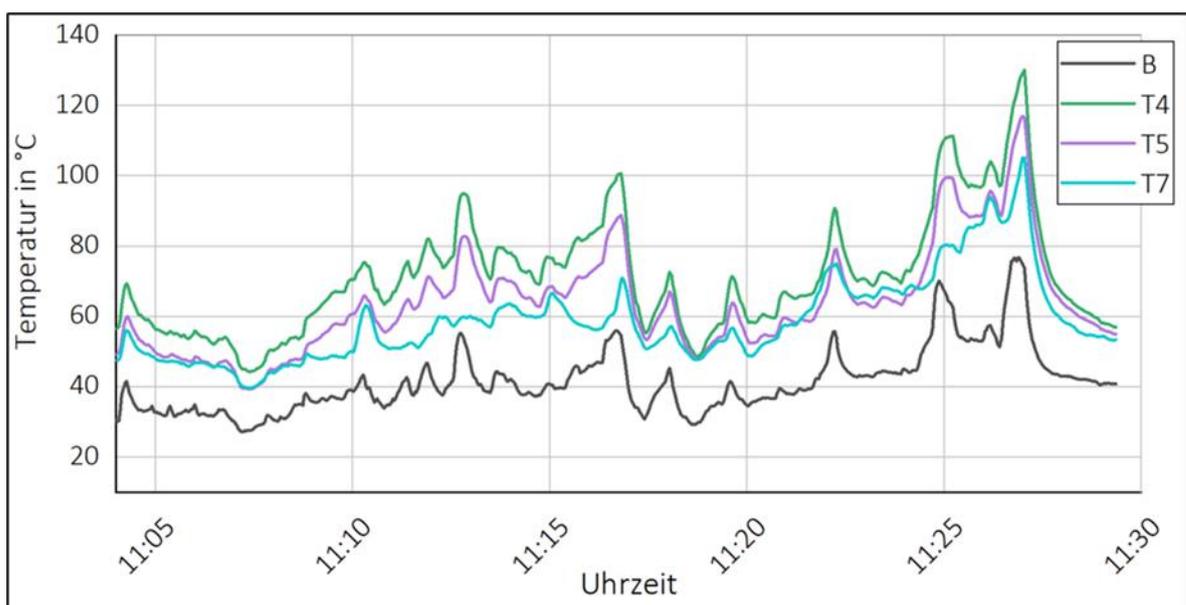


Abb. 23: Auszug des erfassten Temperaturverlaufs ausgewählter Messstellen auf einer Atemluftflasche, gemessen am dritten Versuchstag.

Abb. 23 zeigt exemplarisch den erfassten Oberflächen-Temperaturverlauf ausgewählter Sensoren auf der Atemluftflasche während eines ca. 30-minütigen Einsatzszenarios. Abhängig von der Sensorpositionierung wurden kurzzeitige Temperspitzen von bis zu 130°C gemessen. Die Temperaturen auf der Atemluftflasche korrelieren demnach mit den im Versuchscontainer in einer Höhe von etwa 1 bis 1,5m gemessenen Umgebungstemperaturen während einer Rauchgasdurchzündung. Entsprechend der in Abb. 20 dargestellten Raumtemperaturverteilung erwärmte sich auch hier der obere Bereich der Behälter deutlich stärker als der Untere.

4.1.3 Erfassung der Temperatur an den Funkgeräten

Analog zur Messung der Oberflächentemperaturen an den Atemluftflaschen in Kapitel 0 wurden auch die auf die Funkgeräte wirkenden Temperaturlasten aufgezeichnet. Um die Temperatur an den Funkgeräten und dem Akku messen zu können, wurden insgesamt 4 Sensoren angebracht. Die Anordnung und Position der vier Temperatursensoren T1 bis T4 war dabei wie folgt und gilt sowohl für die MTP850Ex Akkus (Abb. 24) als auch für die MXP600 Serie (vgl. Anhang 8.1 Abb. 46):

- T1 ist der Temperatursensor für die Regelung und an der Rückseite (Außenseite) angebracht
- T2 ist der Temperatursensor am nächsten zur Zelle (innerhalb des Akkupacks) und somit der entscheidende Sensor für die Bewertung der thermischen Belastung
- T3 ist der Temperatursensor zwischen Funkgerät und Akkupack
- T4 ist der Temperatursensor an der Displayaußenseite (mittig vom FG)



Abb. 24: Anordnung und Position der vier Temperatursensoren T1(links) bis T4(rechts) am Beispiel der MTP850Ex-Serie

Einen exemplarisch dargestellten Temperaturverlauf für die gemessenen Temperaturen am bzw. im Funkgerät während einer Rauchgasdurchzündung zeigt Abb. 25.

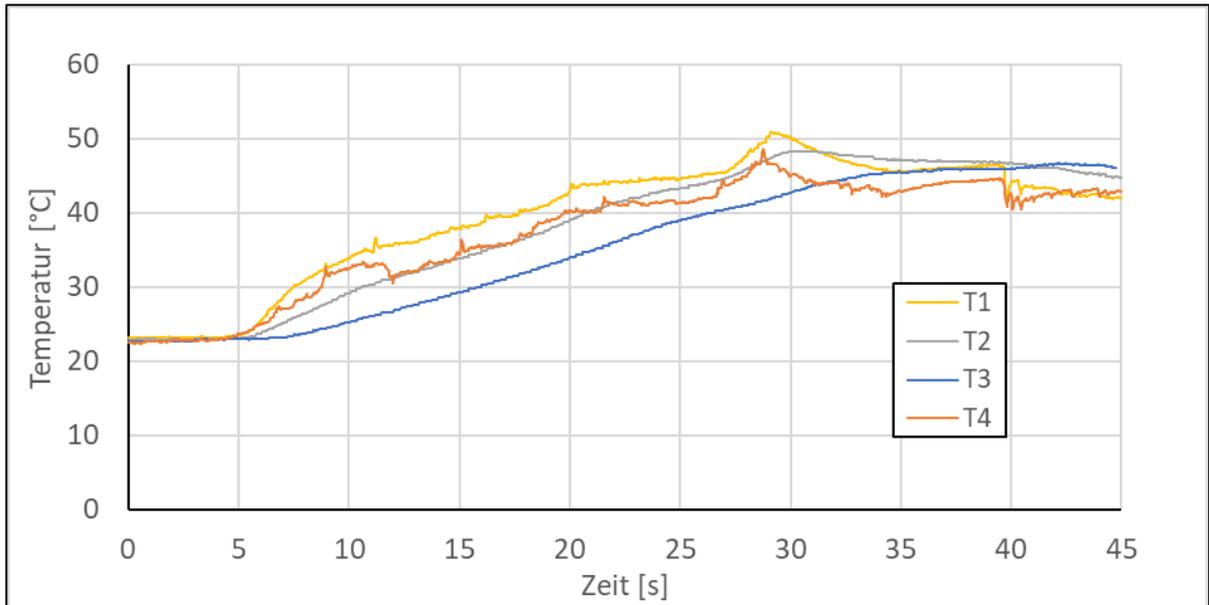


Abb. 25: Auszug des während einer Rauchgasdurchzündung am Funkgerät 1 gemessenen Temperaturverlaufs, aufgenommen im FTTZ am Versuchstag 3.

Weiterhin wurden aus den Realbrandversuchen im FTTZ Belastungsprofile ermittelt und für die Laborversuche herangezogen (vgl. auch Abb. 25). Die Belastung im FTTZ hatte eine Dauer von 30 Minuten und erreichte eine max. Temperatur von 45°C unmittelbar an dem Akku, siehe Abb. 26. Der hier dargestellte Verlauf zeigt den Mittelwert des Temperaturverlaufs von Sensor T2 aus den Versuchen im FTTZ. Der Sensor T2 war der am nächsten zum Akku applizierte Temperatursensor.

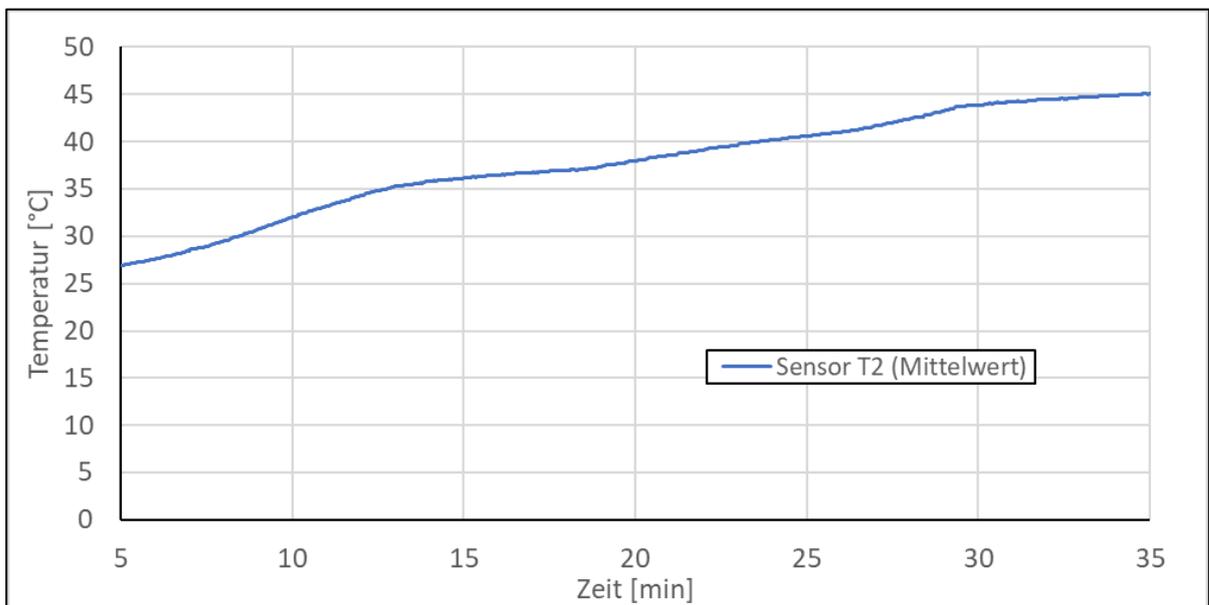


Abb. 26: Temperaturverlauf von Sensor T2 aus den Realbrandversuchen im FTTZ

4.2 Versuchsergebnisse Atemschutzflaschen

Zur Bewertung der durch die Temperatureinflüsse bedingten Folgen in den Atemschutzflaschen, wurden die thermisch beanspruchten Prüfmuster einer Restfestigkeitsuntersuchung unterzogen. Sowohl die Ermittlung der Ausgangs- als auch Restfestigkeit erfolgte mittels hydraulischer Berstprüfungen. Dabei wurden die Prüfmuster hydraulisch bei einem linearen Druckanstieg so lang beansprucht, bis ein Versagen (Bersten) auftrat. Der so ermittelte maximal ertragbare hydraulische Innendruck stellt die Berstfestigkeit der Atemschutzflaschen und damit Ihre Restfestigkeit dar. Die so ermittelten Berstfestigkeiten der neuen und beanspruchten Behälter wurden anschließend miteinander verglichen, um die Auswirkungen der thermischen Belastung auf die Atemschutzflaschen qualitativ zu beurteilen.

Atemschutzflaschen aus faserverstärkten Kunststoffen (FvK) unterscheiden sich von klassischen Stahl-Atemschutzflaschen unter anderem dadurch, dass Sie bereits im Grundzustand eine im Vergleich höhere Streuung aufweisen. Aus diesem Grund muss bei der Bewertung auch immer die Streuung der Stichprobe betrachtet werden. Deshalb wurden im Rahmen dieses Vorhabens nach Möglichkeit immer annähernd gleich große Gruppen von Atemschutzflaschen untersucht, um der Streuung der Berstfestigkeiten ausreichend Rechnung tragen zu können. Zusätzlich wurden die Berstversuche als langsame Berstversuche (engl. Slow Burst Test: SBT) durchgeführt, da diese Versuchssteuerung erfahrungsgemäß dazu beiträgt eine geringere Streuung der Behälter zu erzielen und somit besser geeignet ist Stichproben zu beurteilen und Veränderungen zu erkennen.

An den Baumustern der Fa. Dräger wurden zwei große Versuchskampagnen durchgeführt. Die **erste Versuchsserie** untersucht die Auswirkungen der thermischen Bestrahlungen auf die Berstfestigkeit des Baumusters. Sie liefert eine Aussage über die Abnahme der Restfestigkeit und damit auch eine Beurteilung darüber, ob der Faserverbund, der hauptsächlich für die Tragfähigkeit der Atemschutzflasche verantwortlich ist, geschädigt wurde. Um ein katastrophales Versagen der Flasche zu verhindern, muss der Restberstdruck immer deutlich größer als der maximal im Betrieb auftretenden Drucks sein. Alle untersuchten Baumuster wiesen einen Betriebsdruck von 30 MPa (300 bar) auf. Sie werden jedoch beim Befüllen üblicherweise bis zu einem etwas höheren Druck befüllt, um die beim Befüllen auftretende thermische Erwärmung zu kompensieren und einen Betriebsdruck von mind. 30 MPa zu gewährleisten. Der beim Befüllen auftretende Innendruck ist abhängig von der Gasart, liegt jedoch immer unterhalb des Prüfdrucks von 45 MPa (450 bar). Der Quotient aus Restberstdruck und Prüfdruck stellt somit den Sicherheitsfaktor der Gasflaschen gegenüber einem Bersten dar. Die nachfolgende Tab. 4 und die Abb. 27 bis Abb. 30 zeigen die Ergebnisse dieser ersten Versuchsserie.

In der **zweiten Versuchsserie** wurde die Auswirkung der thermischen Belastung auf die zyklische Festigkeit der Behälter untersucht. Nach der thermischen Belastung wurden die Behälter einer zyklischen (schwellenden) Innendruckbelastung ausgesetzt. Hierzu wurden die Behälter 12.000-mal hydraulisch einer zwischen 2 und 45 MPa wechselnden sinusförmigen Innendruckbelastung ausgesetzt. Auf diese Weise sollte die betriebliche Alterung infolge von Be- und Entlastung der Atemschutzflaschen untersucht werden. Damit sollten etwaige Auswirkungen auf den Kunststoff-Behälterliner, die Liner-Boss Anbindung oder eine fortschreitende Festigkeitsabnahme des Faserverbundes untersucht werden. Bei Typ 4 Behältern kann es infolge von fortschreitender Alterung insbesondere auch im Bereich der Liner-Boss-Anbindung zu Leckagen oder sogar einem Versagen kommen. Liner-Boss-Anbindung bezeichnet den Teil des Behälters, an dem das Ventil eingeschraubt wird. Der Liner wird mit einem festen Metallanschluss, dem Boss, in den später das Ventil eingeschraubt wird, verklebt und die mit dem Harz getränkte Faser im Rahmen der Fertigung anschließend um den Liner und die Bossanbindung gewickelt. Deshalb wurde auch dieser Aspekt hier berücksichtigt und untersucht. Im Anschluss an die 12.000 Zyklen wurden die Behälter ebenfalls geborsten und so, wie in der ersten Versuchsserie, die nach der Zyklisierung verbleibende Restfestigkeit ermittelt. Die Ergebnisse dieser kombinierten Alterungs- und Restfestigkeitsversuche sind in Tab. 5 sowie in Abb. 33 und Abb. 34 dargestellt.

Die **dritte Versuchsserie** wurden identisch zur ersten Versuchsserie durchgeführt, jedoch an den Baumustern der Fa. CTS. Die Ergebnisse sind in Tab. 6 sowie Abb. 35 und Abb. 36 dargestellt.

Im Rahmen der **ersten Versuchsserie** wurden insgesamt 16 Behälter der Fa. Dräger untersucht (s. Tab. 4). An fünf Behältern wurde ohne thermische Belastung jeweils ein langsamer Berstversuch (SBT) durchgeführt. Diese Behälter dienen als Vergleichsreferenz für die Beurteilung der Auswirkungen der thermischen Bestrahlungsversuche. Insgesamt wurden 10 Behälter mit dem in Abb. 10 gezeigten Temperaturprofil belastet. Davon wurden fünf Behälter bei mittlerer Belastung mit einer Grundtemperatur von 80°C und drei Temperaturspitzen von 110°C bestrahlt. Diese Belastung wurde insgesamt dreimal wiederholt, vergleichbar der Darstellung in Abb. 11. Die restlichen fünf Behälter wurden einer hohen Temperaturbelastung ausgesetzt, bei einer Grundtemperatur von 110°C und drei Temperaturspitzen von 150°C, ebenfalls mit einer dreimaligen Wiederholung. Ein einzelner Behälter wurde verwendet, um die Temperaturverteilung unter einer Flaschenhülle während einer thermischen Bestrahlung zu untersuchen (siehe Abb. 31 und Abb. 32).

Tab. 4: Übersicht der durchgeführten Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. Dräger mit und ohne thermische Belastung

	Versuch	Anzahl	Behälternr.	Berstergebnisse [MPa]					Mittelwert [MPa]	Std. Abw. [MPa]
	Dräger	SBT (Vergleichsreferenz)	5	D45, D46, D47, D48, D49	105	107,8	107,2	106	101,8	105,56
Bestrahlungsversuche TTS T(Grund)=80°C, T(Max)=110°C (3x), mit insgesamt 3malige Wiederholung		5	D38, D39, D40, D41, D62	104,3	104	104,3	116,8	96,2	105,12	7,39
Bestrahlungsversuche TTS T(Grund)=110°C, T(Max)=150°C (3x), mit insgesamt 3malige Wiederholung		5	D37, D42, D43, D55, D76	109,4	109,1	111,3	107,4	112,9	110,02	2,12
Bestrahlungsversuche TTS (Atemschutzflasche mit Schutzhülle)		1	D74	107,7	-					

In allen nachfolgenden Abbildungen und Tabellen ist die Vergleichsreferenz in schwarz, die **mittlere Temperaturbelastung** ($T_{\text{Grund}}=80^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{Max}}=110^{\circ}\text{C}$) in hellrot und die **hohe Temperaturbelastung** ($T_{\text{Grund}}=110^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{Max}}=150^{\circ}\text{C}$) in dunkelrot dargestellt.

Tab. 4 zeigt die Übersicht aller untersuchten Behälter und der jeweiligen Berstdrücke der ersten Versuchsserie, sowie den Mittelwert und die Standardabweichung jeder Gruppe, angegeben in MPa (1 MPa = 10 bar). Die einzelnen Berstergebnisse und die jeweiligen Mittelwerte sind in Abb. 27 grafisch dargestellt.

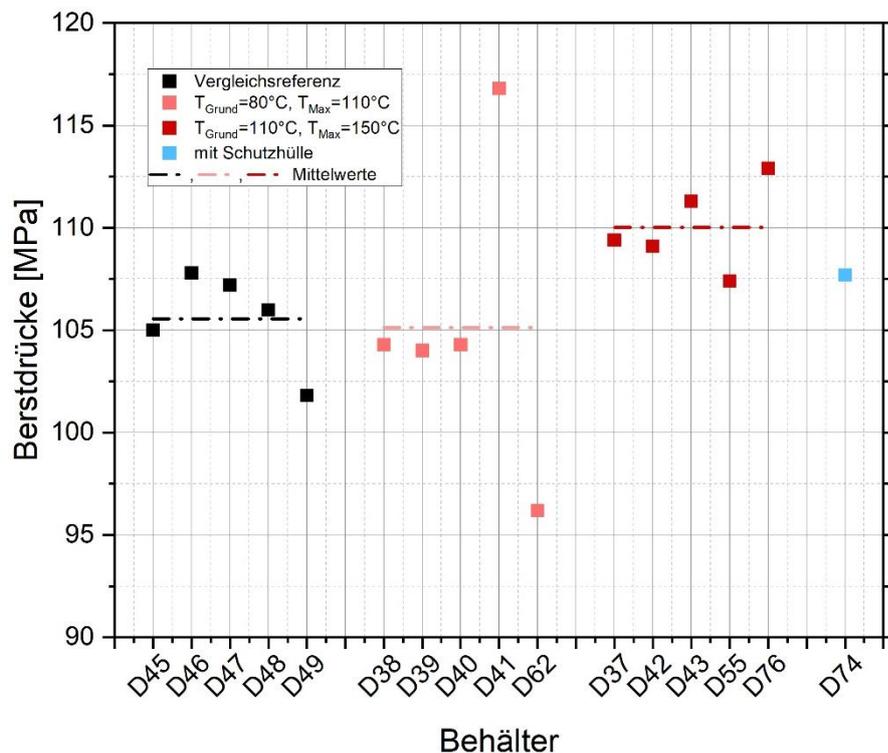


Abb. 27: Ergebnisse der Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. Dräger für die Vergleichsreferenz, die zwei unterschiedlichen thermischen Belastungsprofile sowie einen Behälter mit Schutzhülle

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich der Mittelwert der Berstdrücke, dargestellt als gestrichelte Linie, zwischen der Vergleichsreferenz und der mittleren Temperaturbelastung kaum verändert und bei hoher Temperaturbelastung sogar leicht zunimmt. Die Streuung der Stichproben ist zwischen Vergleichsreferenz und hoher Temperaturbelastung nahezu identisch, lediglich bei der mittleren Temperaturbelastung ist die Standardabweichung ungefähr dreimal so hoch.

Eine mögliche Erklärung für dieses Behälterverhalten liegt darin, dass die **mittlere Temperaturbelastung** im Bereich der Glasübergangstemperatur des Faserverbundwerkstoffes liegt und damit möglicherweise zu einer Veränderung des Spannungszustandes im Behälter führt. Dies wirkt sich direkt auf die Restfestigkeiten aus und erhöht die Streuung der Stichprobe. Bei **hoher Temperaturbelastung** kommt es möglicherweise zu einer Nachvernetzung im Faserverbundwerkstoff, was die Erhöhung der Berstfestigkeit um etwa 5% erklären würde. Selbst der Behälter D62 mit dem geringsten Berstdruck von 96,2 MPa, weist noch eine 2-fache Sicherheit gegenüber dem Prüfdruck von 45 MPa auf.

Eine einfache Möglichkeit die Streuung einer Stichprobe und das daraus resultierende statistische Risiko eines Versagens beurteilen zu können, bietet die nachfolgende Stichprobenauswertung in Abb. 28. In dem Diagramm wird der Quotient aus dem Mittelwert der Berstdrücke und dem Prüfdruck ($\Omega_{50\%}$) auf der x-Achse gegenüber der Standardabweichung (Ω_s) dieser Stichprobe auf der y-Achse aufgetragen. Eine Stichprobe mit geringer Streuung und hohem Sicherheitsfaktor würde in dem Diagramm in der linken oberen Ecke sein und als sicher angesehen werden können, eine Stichprobe die eine hohe Streuung und einen geringen Sicherheitsfaktor aufweist, würde in der rechten unteren Ecke liegen und wäre damit als unsicher anzusehen. Jede Stichprobe kann so als ein Punkt dargestellt werden und die Stichprobe kann leicht beurteilt werden [16],[17].

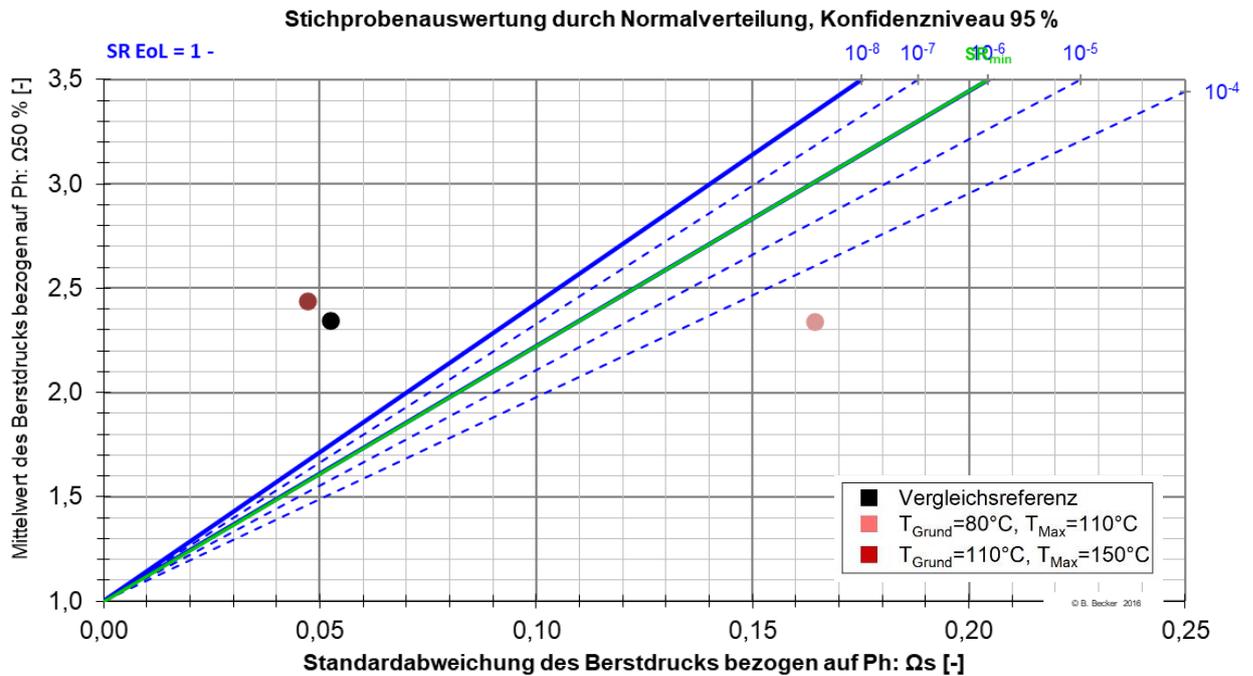


Abb. 28: Stichprobenauswertung der Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. Dräger für die Vergleichsreferenz und die zwei unterschiedlichen thermischen Belastungsprofile

In Abb. 28 ist einfach zu erkennen, dass die Stichproben der Vergleichsreferenz und der Gruppe mit hoher Temperaturbelastung nahezu identisch sind. Hier kam es nicht zu einer Reduzierung der Restfestigkeiten. Die Stichprobe der mittleren Temperaturbelastung weist jedoch infolge der etwa dreimal so hohen Standardabweichung ein deutlich höheres Versagensrisiko auf.

Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen exemplarisch jeweils ein Prüfmuster nach mittlerer Temperaturbelastung (siehe Abb. 29) und hoher Temperaturbelastung (siehe Abb. 30). Die Folgen der mittleren Temperaturbelastung sind nur sehr schwach in leichten Verformungen an den Schutzkappen der Atemschutzflasche, kleinen Oberflächenrissen in der gelben Glasfaser-Schutzschicht und einer schwachen Verfärbung der Oberfläche zu erkennen. Die Folgen der hohen Temperaturbelastung sind durch die geschmolzenen Schutzkappen, die auf der Flasche verlaufen, zu erkennen sowie durch die starken Verfärbungen der gelben Glasfaser-Schutzschicht.



Abb. 29: Prüfmuster der Fa. Dräger nach mittlerer thermischer Bestrahlung ($T_{\text{Grund}}=80^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{Max}}=110^{\circ}\text{C}$) (oben) und Detailansicht (unten)



Abb. 30: Prüfmuster der Fa. Dräger nach hoher thermischer Bestrahlung ($T_{\text{Grund}}=110^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{Max}}=150^{\circ}\text{C}$) (oben) und Detailansicht (unten)

Die Versuche an dem Prüfmuster D74 dienen dazu, die Temperaturmessungen auf dem FTTZ (vgl. Kapitel 4.1) in den Versuchsständen der BAM nachzuvollziehen. Aus diesem Grund wurden diese Versuche mit der Schutzjacke,

dem in der Jackentasche auf der Brust befindlichen Funkgerät vom Typ MTP850Ex, und der Atemschutzflaschen in dem Tragegestell durchgeführt, wie nachfolgende Abb. 31 zeigt. Die Atemschutzflasche wurde zusätzlich noch in die Schutzhülle gesteckt, um deren Auswirkung beurteilen zu können.



Abb. 31: Vergleichsversuche am Behälter D74 mit Schutzhülle und an dem Funkgeräten MTP850EX in der Jackentasche der Schutzkleidung

Es wurden zwei Versuchsreihen gefahren. Bei der ersten Versuchsreihe wurde wie in Abb. 31 zu sehen, das Funkgerät in der linken Brusttasche der Schutzjacke frontal auf den mittleren IR-Strahler ausgerichtet und die Atemschutzflasche leicht schräg von dem linken Strahler bestrahlt. Bei der zweiten Versuchsreihe wurde die Atemschutzflasche direkt auf den mittleren Strahler ausgerichtet und das Funkgerät komplett durch die Schutzkleidung abgeschirmt. Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe sind in Abb. 32 links und die der zweiten Versuchsreihe in Abb. 32 rechts abgebildet.

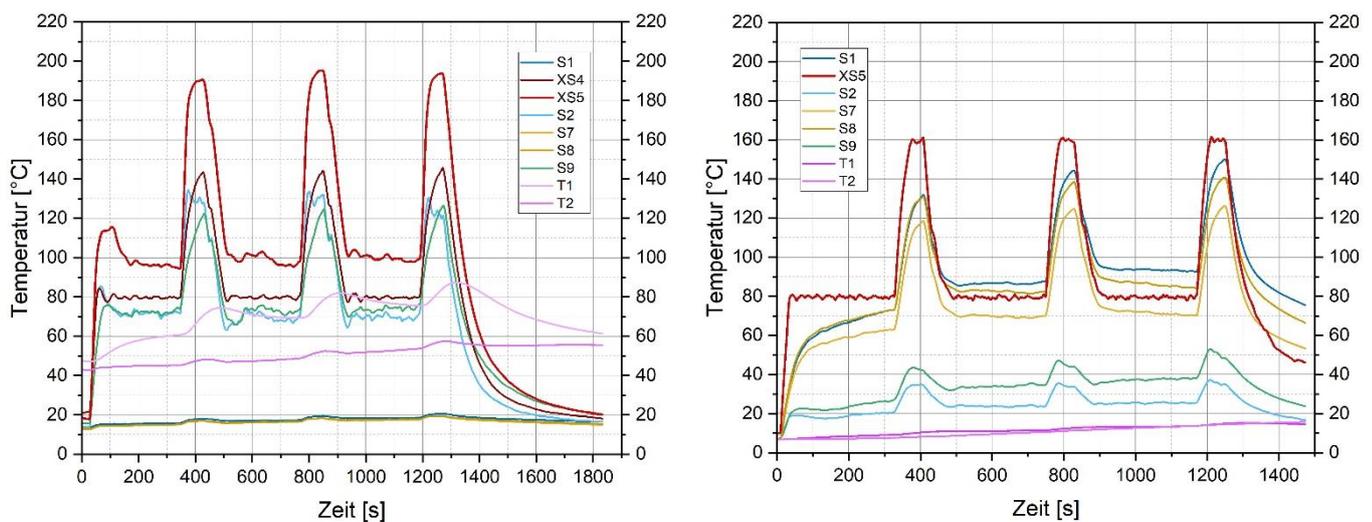


Abb. 32: Ergebnisse der Vergleichsversuche an Prüfmuster D74 (s. **Abb. 31**), links: erst Versuchsreihe mittlerer Ausrichtung des Funkgerätes in der Jackentasche, rechts: zweite Versuchsreihe mit mittlerer Ausrichtung der Atemschutzflasche

Wie in Abb. 32, links zu sehen, steigt die Temperatur der Funkgeräte bei direkter frontaler Bestrahlung sogar leicht über die in den Versuchen auf dem FTZ ermittelten maximalen Temperaturen von 50°C (vgl. Abb. 25) an und erreicht sogar knapp 90°C an Pos T1. Die für die Temperatur der Lithiumbatterie relevantere Temperatur T2 erreicht jedoch nur knapp 60°C und ist damit im Bereich der Ergebnisse der Versuche auf dem FTZ. Die Temperaturen auf der Oberfläche der Atemschutzflasche (Sensoren S1 und S2) steigen trotz schräger Ausrichtung und Schutzhülle immer noch auf 130°C in der Spitze an.

Bei der zweiten Versuchsreihe mit mittlerer Ausrichtung der Atemschutzflasche vor dem zentralen IR-Strahler (vgl. Abb. 32, rechts) steigen die Temperaturen am Sensor S1 in der Spitze auf etwa 150°C an und liegen damit etwas niedriger als bei den Versuchen ohne Schutzhülle (vgl. Abb. 12). Es ist jedoch eine deutliche Zunahme der Temperaturen unter der Schutzhülle über die drei Temperaturspitzen und damit die Versuchszeit hinweg zu erkennen.

Die Diskrepanz zwischen Abb. 32, links und rechts bei der Regelgröße XS5 liegt insbesondere in der Anordnung des Temperatursensoren auf den stark unterschiedlichen Oberflächen und der Ausrichtung dieser zum Strahler. In der ersten Versuchsreihe war dieser Sensor auf der Schutzkleidung, in der zweiten Versuchsreihe auf der Schutzhülle angeordnet gewesen.

In Tab. 5 sind die Ergebnisse der kombinierten Alterungs- und Restfestigkeitsversuche an den Prüfmustern der Fa. Dräger dargestellt. Auch hier wurde wieder eine Vergleichsreferenz als Grundlage zur Beurteilung der verschiedenen thermischen Belastungsprofile gebildet. Die vier Behälter der Vergleichsreferenz wurden nicht thermisch belastet, sondern nur den o.g. 12.000 hydraulischen Innendruckzyklen und einem abschließenden Berstversuch unterzogen.

Tab. 5: Übersicht der durchgeführten kombinierten Alterungs- und Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. Dräger mit und ohne thermische Belastung

	Versuch	Anzahl	Behälternr.	Berstergebnisse [MPa]					Mittelwert [MPa]	Std. Abw. [MPa]
	Dräger	LCT + SBT (Vergleichsreferenz)	4	D63, D64, D66, D67	103,1	104,3	100,8	100,1		102,08
Bestrahlungsversuche TTS T(Grund)=80°C, T(Max)=110°C (3x), mit insgesamt 3malige Wiederholung		5	D33, D34, D35, D58, D60	107	108,3	108,6	101,3	99,8	105,00	4,14
Bestrahlungsversuche TTS T(Grund)=110°C, T(Max)=150°C (3x), mit insgesamt 3malige Wiederholung		5	D31, D32, D36, D54, D61	101,9	102,3	111	106,7	102,8	104,94	3,89

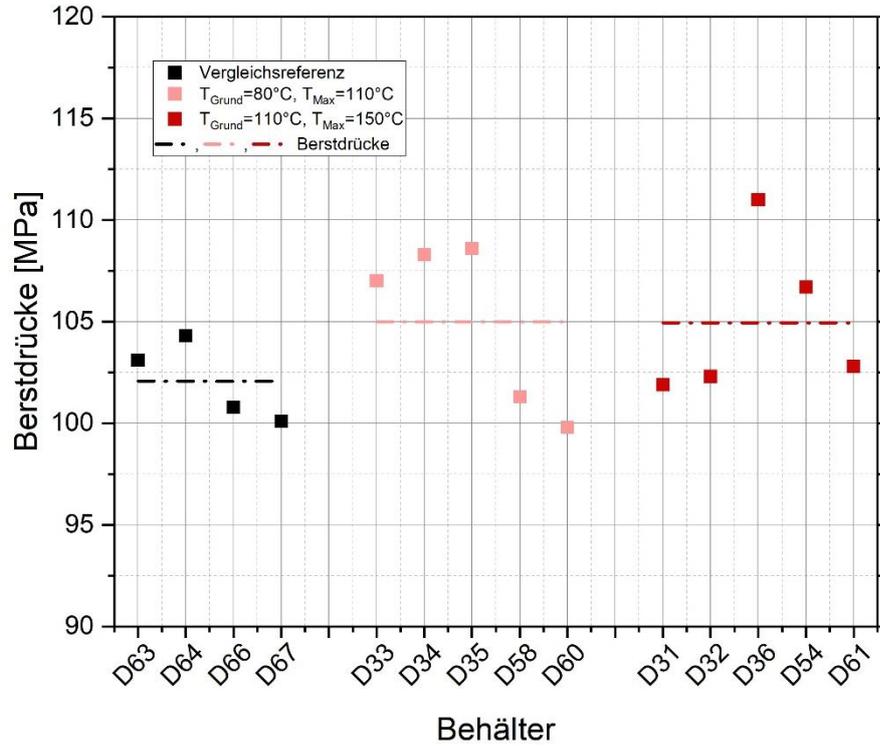


Abb. 33: Ergebnisse der kombinierten Alterungs- und Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. Dräger für die Vergleichsreferenz und die zwei unterschiedlichen thermischen Belastungsprofile

Die Ergebnisse der kombinierten Alterungs- und Restfestigkeitsuntersuchungen zeigen eine Zunahme der mittleren Berstdrucke der Stichproben für die mittlere und hohe thermische Belastungsstufe um etwa 3% gegenüber der Vergleichsreferenz. Die Ergebnisse der mittleren und hohen thermischen Belastungsstufe sind sowohl im mittleren Berstdruck als auch der Standardabweichung vergleichbar. Nur die Standardabweichung ist um etwa Faktor 2 höher als bei der Vergleichsreferenz. Dies zeigt sich auch in der Stichprobenauswertung in nachfolgender Abb. 34.

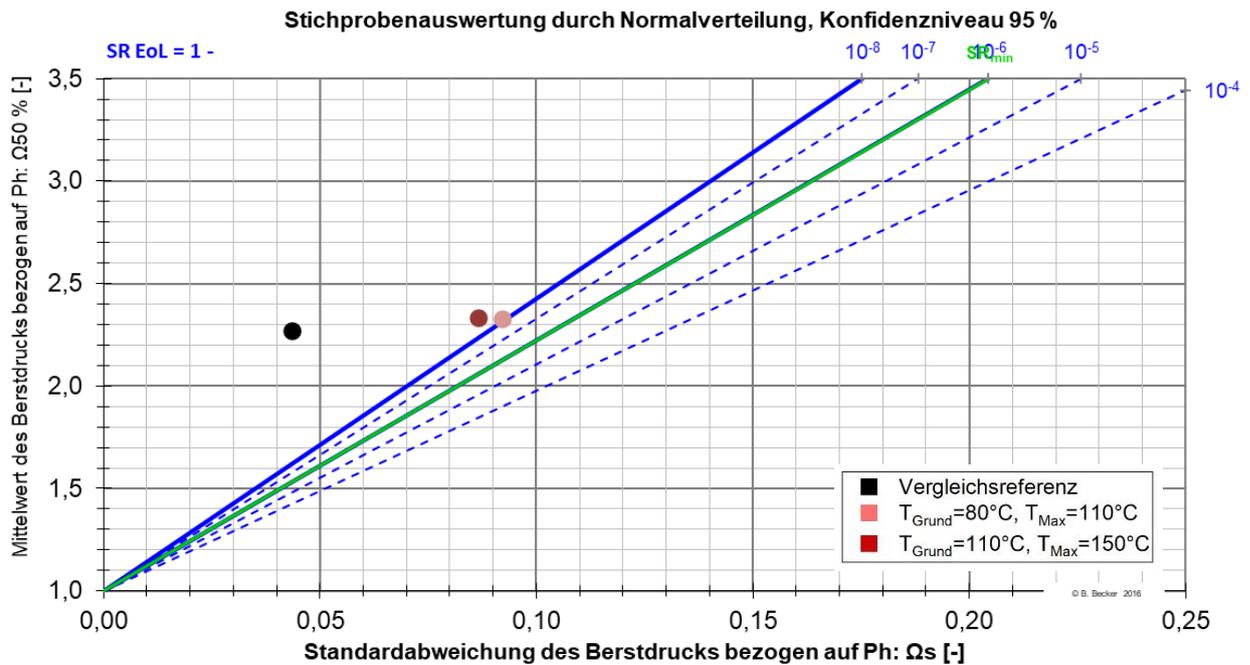


Abb. 34: Stichprobenauswertung der kombinierten Alterungs- und Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. Dräger für die Vergleichsreferenz und die zwei unterschiedlichen thermischen Belastungsprofile

In der **dritten Versuchsserie** an den Atemschutzflaschen wurde ein zweiter Flaschentyp hinsichtlich seiner Restfestigkeiten untersucht, da sich in der zuvor durchgeführten ersten und zweiten Versuchsserie diese Art der Versuche als kritischer gegenüber den kombinierten Versuchen herausgestellt haben (vgl. Abb. 28 und Abb. 34).

Dieser Behältertyp und Hersteller wurde gewählt, da es in der Vergangenheit bei anderen Untersuchungen bereits vermeintliche Auffälligkeiten gab, auf die die BAM hingewiesen wurde. Die Versuche wurden identisch zur ersten Versuchsserie durchgeführt, lediglich der Stichprobenumfang wurde aufgrund der zur Verfügung stehenden Behälter auf vier reduziert. Die beiden Behältertypen und Hersteller sind also von der Versuchsdurchführung direkt vergleichbar.

Tab. 6 zeigt die Einzelergebnisse aller durchgeführten Versuche für die drei Stichproben aus thermisch unbelasteter Vergleichsreferenz, mittlere und hoher thermischer Belastung und Abb. 35 die grafische Auswertung der Restberstdrücke.

Tab. 6: Übersicht der durchgeführten Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. CTS mit und ohne thermische Belastung

	Versuch	Anzahl	Behälternr.	Berstergebnisse [MPa]				Mittelwert [MPa]	Std. Abw. [MPa]
CTS	SBT (Vergleichsreferenz)	4	C58, C59, C60, C61	104,6	106,1	101,4	102,6	103,68	2,09
	Bestrahlungsversuche TTS T(Grund)=80°C, T(Max)=110°C (3x), mit insgesamt 3malige Wiederholung	4	C52, C53, C54, C62	98,2	102,4	96,9	92,1	97,40	4,24
	Bestrahlungsversuche TTS T(Grund)=110°C, T(Max)=150°C (3x), mit insgesamt 3malige Wiederholung	4	C55, C56, C57, C63	99,4	92,4	95,4	107,8	98,75	6,68

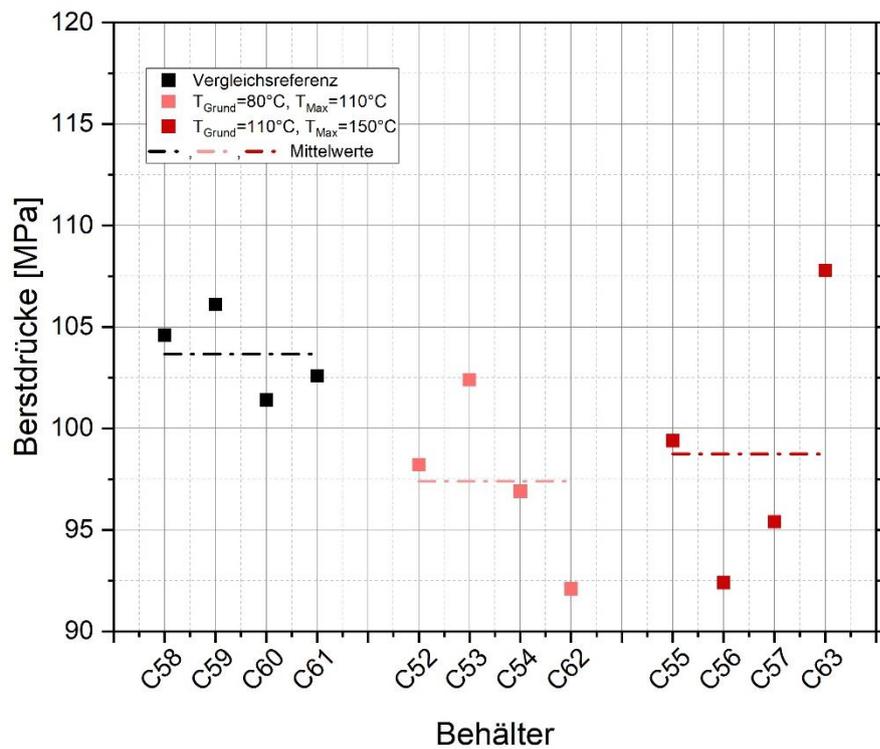


Abb. 35: Ergebnisse der Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. CTS für die Vergleichsreferenz und die zwei unterschiedlichen thermischen Belastungsprofile

Es ist zu erkennen, dass durch die thermische Belastung der Berstdruck um rund 5-6% niedriger ist als gegenüber der unbelasteten Vergleichsreferenz. Auch die Standardabweichung der thermisch belasteten Behälter erhöht sich um den Faktor 2-3. In der Stichprobenauswertung in Abb. 36 ist diese leichte Abnahme des Berstdruckes und die deutliche Zunahme der Streuung der Populationen der CTS-Atemschutzflaschen gut zu erkennen.

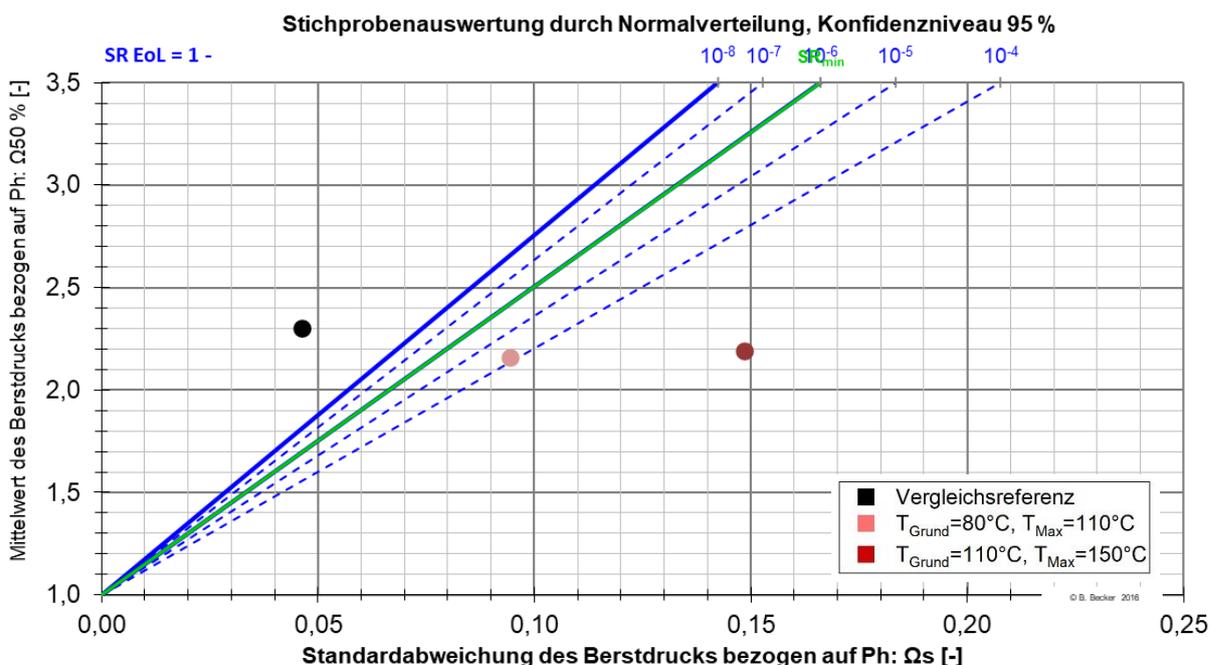


Abb. 36: Stichprobenauswertung der Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. CTS für die Vergleichsreferenz und die zwei unterschiedlichen thermischen Belastungsprofile

Auch bei den Atemschutzbehältern der Fa. CTS [24] können, wie bei den Behältern von Dräger [25], die hohe thermische Belastung an den geschmolzenen Schutzkappen und der geschmolzenen dünnen Kunststoff-Schutzhülle (vgl. Abb. 37) gut erkannt werden. Vergleichbar zu den Dräger-Behältern sind jedoch auch hier die mittleren thermischen Belastungen kaum zu erkennen.



Abb. 37: Prüfmuster C52 der Fa. CTS nach hoher thermischer Bestrahlung ($T_{\text{Grund}}=110^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{Max}}=150^{\circ}\text{C}$)

4.3 Versuchsergebnisse Lithiumbatterien

Um das Risiko der thermischen Belastung der Akkus der Funkgeräte bei einem Löscheinsatz bewerten zu können, müssen unterschiedliche Szenarien und verschiedene Risiken berücksichtigt werden. Eines der Risiken besteht im elektrischen Ausfall der Funkgeräte. Ein weiteres Risiko besteht in thermischen Durchgehen der Akkus. Hier muss zwischen den austretenden giftigen Gasen und zwischen den hohen Temperaturen bei einem thermischen Durchgehen (engl. thermal runaway) unterschieden werden. Bei den Szenarien muss zwischen dem aktiven Löscheinsatz und der Zeit danach unterschieden werden. Diese Unterscheidung ist notwendig, da im ersten Szenario die Einsatzkräfte noch die Atemschutzausrüstung tragen und die Gase somit kein unmittelbares Risiko darstellen. Hingegen stellen die Gase im zweiten Szenario ein Risiko dar, da die Einsatzkräfte die Atemschutzausrüstung zu diesem Zeitpunkt abgelegt haben. Die hohen Temperaturen sowie mögliche Sekundärfolgen stellen beim thermischen Durchgehen in beiden Szenarien ein Risiko dar.

Im Rahmen des Projektes wurden daher das thermische Durchgehen der Zellen (Kapitel 4.3.1 Thermische Durchgehen und Gaskonzentrationen), die maximale Belastbarkeit der Akkus (Kapitel 4.3.2 Statische Temperaturversuche an Lithiumbatterien) und die Abbildung von wiederholenden Feuerwehreinsätzen genauer untersucht (Kapitel 4.3.3 Zyklische Temperaturversuche an Lithiumbatterien). Tab. 7 zeigt die hierfür durchgeführten Versuche an den jeweiligen Akkus.

Für die statischen und zyklischen Untersuchungen war es wichtig, die Anfangskapazität der Akkus zu bestimmen, um - ausgehend von diesem Istzustand - die Auswirkungen der thermischen Belastungen und der Degradation bzw. Schädigung bewerten zu können.

Tab. 7: Übersicht der durchgeführten Untersuchungen mit entsprechenden Temperaturhorizonten an den Akkumodellen MTP850Ex und MXP600

Akku- bezeichnung	Prüfung	Thermisches Durchgehen	statisch				zyklisch (200 Zyklen)	
			120°C	140°C	160°C	180°C	FTTZ	120°C
MTP850Ex	A1	x						
	A2			x	x	x		
	A4	x						
	A5		x					x
	B6							x
	B7			x	x			
	B9						x	
	B10			x	x	x	x	
	B11						x	
	B12			x	x	x		
	B13						x	
	C14			x	x	x		
	C15			x	x	x		
	C16							x
	D17			x	x	x	x	
	F3				x	x		
F9			x	x	x			
MXP600	P1	x	-	-	-	-		
	P2						x	
	P3							x (44 Zyklen)

4.3.1 Thermische Durchgehen und Gaskonzentrationen

Bei diesen Vorversuchen zum thermischen Durchgehen an den Zellen wurden die Untersuchungen ohne Kunststoffumhausung und ohne Elektronik, durchgeführt. Die Versuche geben Aufschluss darüber, ab welcher Temperatur die Zellen thermisch durchgehen und welche maximalen Temperaturen erreicht werden. Hierzu wurde jeweils eine Zelle mittels einer Heizpatrone bis zum thermischen Durchgehen erhitzt. Weiterhin wurden bei diesen Versuchen die Gasmengen und die Gaszusammensetzung gemessen.

Abb. 49 im Anhang 8.1 für das Funkgerät MTP850Ex zeigt, dass die Spannung nach ca. 1100 Sekunden bei ca. 180°C zusammenbricht und anschließend das thermische Durchgehen ab ca. 1200 Sekunden bei einer Temperatur von ca. 210°C startet. Wenige Sekunden später wurden infolge des thermischen Durchgehens maximale Temperaturen von über 500°C gemessen. Die drei weiteren Graphen in Abb. 49 zeigen die gemessenen Gasmengen. Die gemessene Gaskonzentration beim thermischen Durchgehen nur der Lithiumzelle ohne Gehäuse und Elektronik lag unterhalb der AGW bzw. AEGL 2 Grenzwerte. Eine unmittelbare Gefährdung für die Einsatzkräfte, insbesondere während oder auch nach eines Löscheinsatzes mit getragendem Atemschutz, besteht aus diesen Gasmengen nicht.

Ebenso sind in 8.1 Abbildung Abb. 50 die Gaskonzentrationen, die infolge eines thermischen Durchgehens entstehen für das MXP600 dargestellt. Beim Versuch wurden alle 4 Zellen eines Akkus geprüft. Die parallele Verschaltung wurde dabei beibehalten und die Initiierung des thermischen Durchgehens erfolgte nur an einer Zelle, Abb. 38. Beim Versuch sind 2 von 4 Zellen thermisch durchgegangen, weshalb die elektrische Spannung nicht auf 0 V gefallen ist, Abb. 50. Weiterhin ist zu erkennen, dass das thermische Durchgehen ab ca. 700 Sekunden bei einer Temperatur von ca. 200°C startet. Wenige Sekunden später wurden infolge des thermischen Durchgehens maximale Temperaturen von über 650°C gemessen.

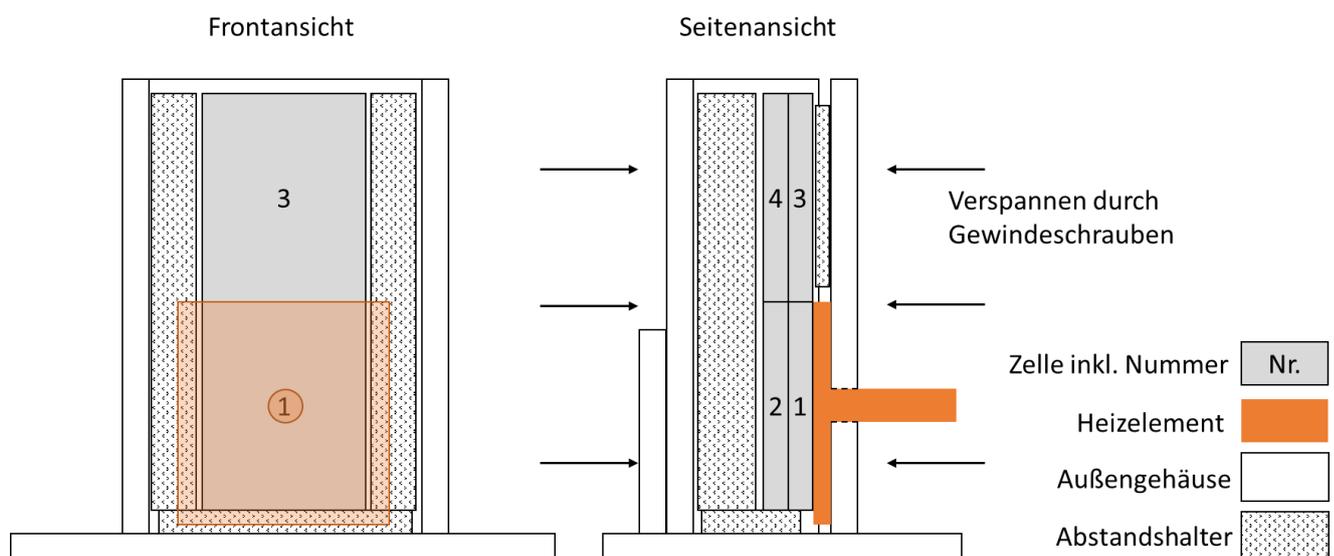


Abb. 38: Qualitative Darstellung der Versuchshalterung zum thermischen Durchgehen an Zelle 1 am Beispiel des MXP600 Modells

Im Vergleich zu den Gaskonzentrationen der MTP850Ex Zellen liegen die Gaskonzentrationen um ein Vielfaches höher. Sie überschreiten auch deutlich die AEGL2 Grenzwerte. Während der Löschrupp bei einem aktiven Einsatz bzw. Löschvorgang (erstes Szenario) durch die PSA vor diesen Gasen geschützt ist, besteht im Nachgang zum aktiven Löscheinsatz (zweites Szenario) ein erhebliches Risiko. Das Risiko des zweiten Szenarios liegt darin, dass ein thermisches Durchgehen oftmals auch zeitverzögert stattfinden kann und bei diesem Szenario im Normalfall der Atemschutz bereits abgelegt wurde.

Bei beiden untersuchten Zellen sind durch das thermische Durchgehen sehr hohe Temperaturen von über 500°C erreicht worden. Die gemessenen Temperaturen können in beiden Szenarien eine Gefahr darstellen, da die Funkgeräte am Körper getragen werden oder im Nachgang ein neuer Brand ausgelöst werden könnte.

4.3.2 Statische Temperaturversuche an Lithiumbatterien

In der ersten Versuchsreihe wurden statische Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden die Funkgeräte und Akkus mit dem vorgegebenen thermischen Belastungsprofil nach Abb. 18 belastet. Ziel dieser Untersuchungen war es, die maximale thermische Belastbarkeit der Akkus zu bestimmen. Dabei wurde die Temperatur sukzessive bis zum Erreichen einer kritischen Grenztemperatur erhöht. Nach jeder thermischen Belastungsstufe wurde der Akku wieder hinsichtlich der verbliebenen Kapazität, äußerer Beschädigungen und Funktionsfähigkeit überprüft.

Für die statischen Versuche wurde die Erstbelastung bei einer Temperatur von 120°C ausgewählt. Im Anschluss kamen die Temperaturen 140°C, 160°C und 180°C hinzu. Die hier angegebenen Temperaturen beziehen sich dabei auf die Regelgröße Sensor T1, der auf der Außenseite des Funkgerätes am Batteriefach angebracht ist (vgl. Abb. 24). Für die Bewertung ist jedoch die Temperatur an T2 relevanter, da dieser Temperatursensor am nächsten zu den Zellen positioniert ist. Abb. 39 zeigt beispielhaft die Belastungskurve und die gemessenen Temperaturen T2 bis T4 für Akku D17 bei T1= 180°C.

Bei diesem Versuch brach die Spannung während der Haltephase (bei ca. 1400 s) mehrfach zusammen. Die Spannung von Zelle 2 unterschritt dabei den Grenzwert von 3 V, wodurch das Abschaltkriterium erkannt und der Versuch gestoppt wurde, siehe Abb. 40. Das Funkgerät war wegen des Spannungsverlustes ausgegangen und ließ sich anschließend auch nicht wieder einschalten.

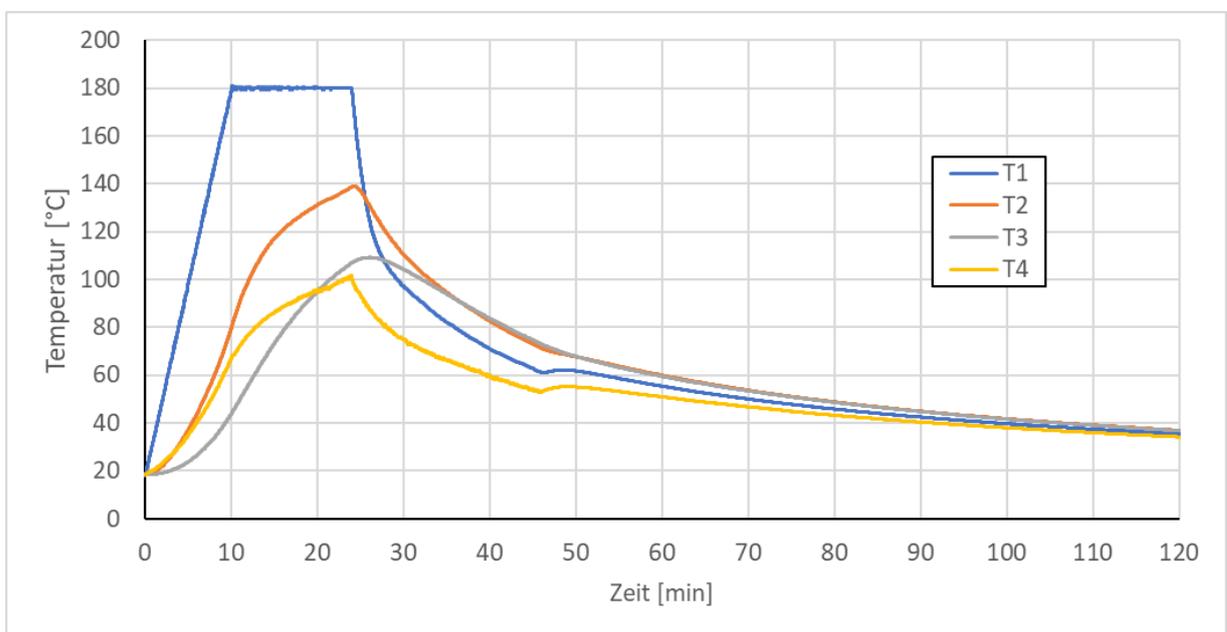


Abb. 39: Belastungskurve für Akku D17 bei T1= 180°C und die gemessenen Temperaturen T2 bis T4

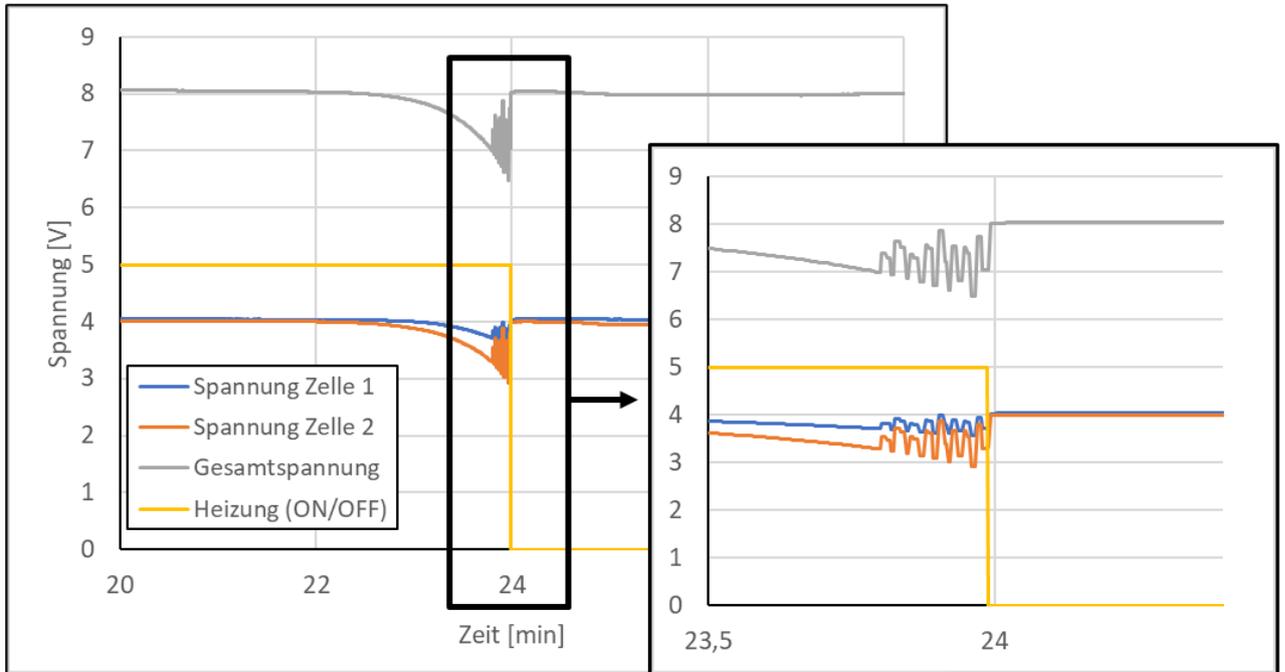


Abb. 40: Erreichen des Abbruchkriteriums von Zellspannung 2 und Abschaltung des Versuchs (Akku D17 bei 180°C)

In Abb. 41 sind für die einzelnen Akkus (Bezeichnung A2, B10, B12, C15 und D17) die Restkapazitäten in Prozent für die jeweiligen Temperaturbelastungen aufgetragen. Wie zu erwarten, sinken die Restkapazitäten bei steigender thermischer Belastung. Zur vollständigen grafischen Darstellung der durchgeführten Lasthorizonte für die einzelnen Akkus wurden die Kapazitäten nach der Belastung mit 180°C mit 3% Restkapazitäten zur Visualisierung angegeben, obwohl keine Kapazitätsmessung mehr durchgeführt werden konnte und alle Akkus bei dieser Temperatur versagt haben.

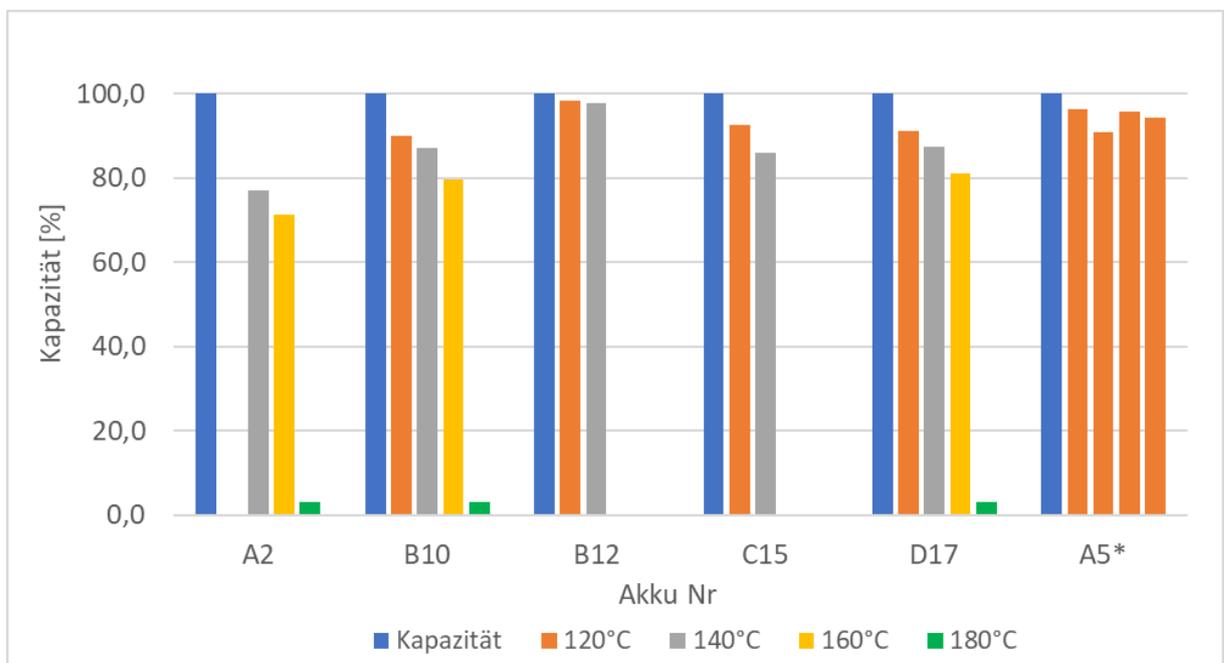


Abb. 41: Anfangs- und Restkapazitäten der der MTP850Ex Akkus nach den verschiedenen statischen Belastungsstufen

Alle Akkus haben sowohl die Belastung von 120°C als auch von 140°C, gemessen auf der äußeren Akkuabdeckung, ohne technische Schäden überstanden. Bis zu einer Temperatur von 140°C ähneln sich die Ergebnisse in Bezug auf die verbliebenen Kapazitäten. Im Mittel reduzieren sich die Kapazitäten der bis 140°C belasteten Akkuzellen je Belastungsstufe um jeweils rund 6%. Am Beispiel von Akku A2 ist zu erkennen, dass die verbleibende Kapazität auf einen Wert von 86% fällt, nachdem dieser mit einer Temperatur von 140°C belastet wurde, ohne zuvor dabei die thermische Belastung von 120°C erfahren zu haben. Die Restkapazität fällt also auf das gleiche Niveau der anderen Akkus, die allerdings zusätzlich eine Belastung von 120°C erfahren haben. In Abb. 41 ist ebenso zu erkennen, dass der Akku A5 viermal in Folge mit einer Temperatur von 120°C belastet wurde. Nach jeder Belastung erfolgte eine Kapazitätsmessung. Das Ergebnis von A5 liegt sowohl nach einer als auch nach vier Belastungen bei einer Kapazität von ca. 94%. Dies würde den Schluss nahelegen, dass ausschließlich die Höhe der maximalen Temperatur für die Reduzierung der Kapazität verantwortlich ist und nicht die Häufigkeit einer Belastung.

Um diese Annahme zu belegen und gleichzeitig das Ergebnis zu verifizieren, wurden an zwei weiteren Akkus Wiederholungsversuche durchgeführt. Dabei wurde der Akku C14 mit den Temperaturstufen von 120°C, 140°C, während der Akku B7 nur mit der Temperaturstufe 140°C belastet wurde. Das Ergebnis ist in Abb. 42 dargestellt. Auffällig im Vergleich zum Ergebnis A2 und als Beispiel D17 ist, dass die Akkus C14 und B7 trotz des gleichen Prozedere und der gleichen Belastung viel weniger an Kapazität verlieren. Eine ausführliche und intensive Analyse ergab, dass die Unterschiede von den jahreszeitlich bedingten verschiedenen Tagestemperaturen herrühren. Die Kapazitätsmessung fand nicht in einer kontrolliert temperierten Umgebung statt. Die Versuche und die Kapazitätsbelastung an den Akkus C14 und B7 fanden im Sommer statt, während die anderen Versuche im Herbst und Winter stattfanden. Die vorliegenden Raumtemperaturen, bei denen die Kapazitätsmessungen stattgefunden haben, sowie die nach der Belastung gemessene Kapazitätsabnahme für die einzelnen Akkus sind in Tab. 8 dargestellt. Die farbliche Zuordnung der Tagestemperaturen in den einzelnen Feldern der Tabelle zeigen deutlich, dass der Akku bei warmen Temperaturen im Allgemeinen weniger an Kapazität verliert.

Tab. 8: Raumtemperaturen bei denen die Kapazitätsmessungen stattgefunden haben

Akku Nr	120°C	140°C	160°C
A2		-13,8%	-24,5%
B10	-10,1%	-12,8%	-17,1%
B12	-6,4%	-6,7%	-76,2%
C15	-3,7%	-13,3%	-71,3%
D17	-4,7%	-12,3%	-17,3%
B7		-3,1%	-4,1%
C14	-1,2%	-2,4%	-3,0%
F3		-8,2%	-60,1%
F9	-3,1%	-8,3%	-18,9%

Temperaturskala

Zur Überprüfung wurden daher die Kapazitätsmessungen der letzten Belastungsstufe im Winter an den Akkus C14 und B7 wiederholt. Die Akkus waren mit einer maximalen Temperatur von 160°C belastet worden und die Kapazitätsmessung fand sowohl im Sommer als auch als Wiederholung im Winter statt. Die Ergebnisse zeigten, dass im Winter ein größerer Kapazitätsverlust von ca. 3% gemessen wird.

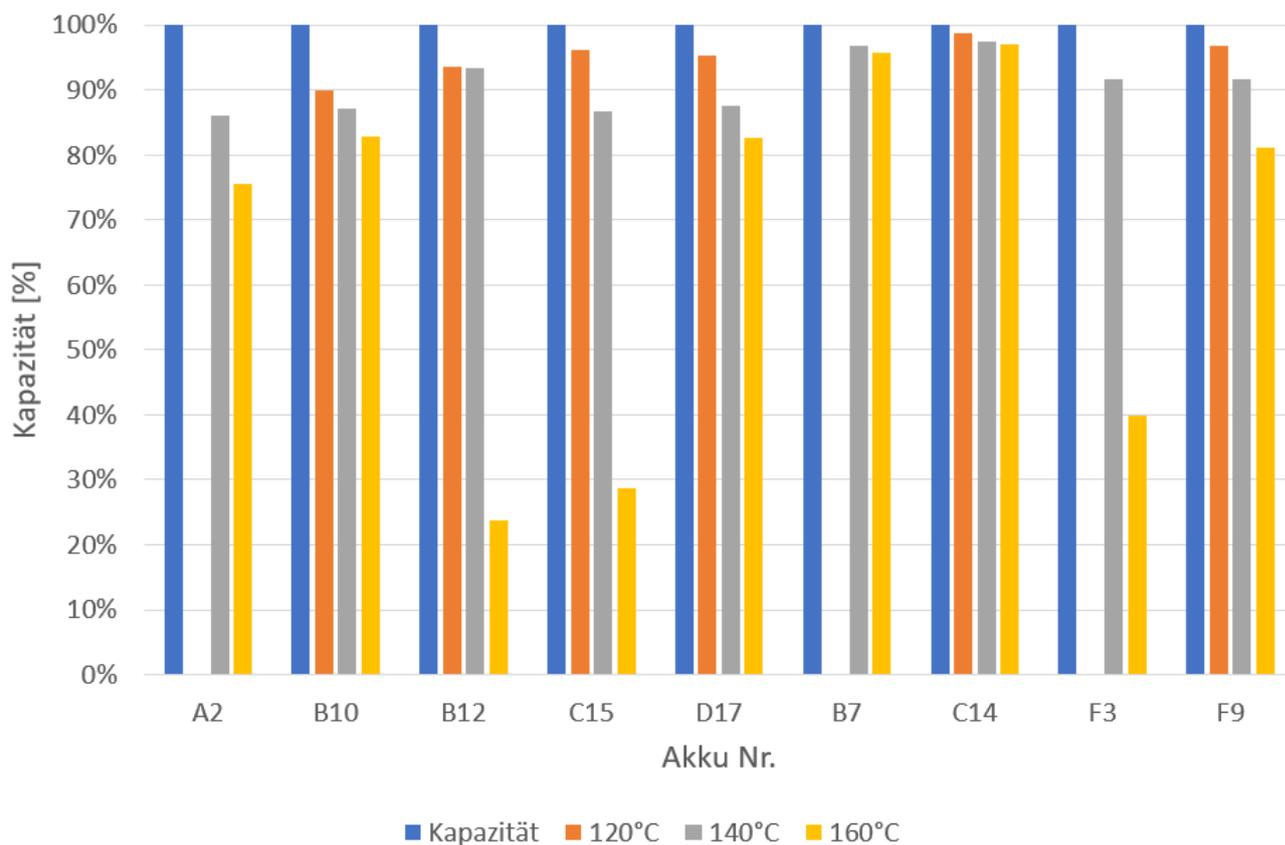


Abb. 42: Wiederholungsprüfungen der Anfangs- und Restkapazitäten der MTP850Ex Akkus nach den verschiedenen statischen Belastungsstufen

Um das Ergebnis und die Analyse zu verifizieren, wurden daher zwei weitere Versuche (Akku F3 und F9) entsprechend der Jahreszeit wieder bei kühleren Temperaturen durchgeführt. Dabei zeigen die Restkapazitäten dieser beiden Akkus nach den Belastungen bei 120°C, 140°C und 160°C das gleiche Verhalten wie Akku A2 und B10 bzw. D17. Die Kapazitätsreduzierung von F3 und F9 liegt für die einzelnen Belastungsstufe, innerhalb der Streuung der früheren Versuche (A2, B10, B12, C15 und D17). Deutlich zu erkennen ist auch, dass die verbleibende Kapazität von F3 auf den gleichen Wert von F9 fällt, nachdem dieser mit einer Temperatur von 140°C belastet wurde, ohne zuvor dabei die thermische Belastung von 120°C wie F9 erfahren zu haben. Somit ist nachgewiesen worden, dass allein die Temperaturverhältnisse im Aufstellungsort des Prüfstandes für die Kapazitätsmessung, das abweichende Verhalten bei den Akkus C14 und B7 hervorgerufen hat.

4.3.3 Zyklische Temperaturversuche an Lithiumbatterien

Die zweite Versuchsreihe für Lithiumbatterien war eine zyklische Belastung. Bei dieser Belastung wurde eine hohe Anzahl an Wiederholungen bei gleichbleibendem Belastungsniveau durchgeführt.

Die Belastungen im Prüfstand der statischen Versuche stellen eine um eine vielfache höhere Belastung für den Akku als bei den Vergleichsversuchen auf dem FTTZ dar. Tab. 9 gibt eine Übersicht über die maximalen Temperaturen für die einzelnen Lasthorizonte. Sie zeigt die an Sensor T2 erreichten Temperaturen sowie das Temperatur-Zeit-Integral, mit dem der Akku belastet wurde.

Tab. 9: Übersicht der einzelnen Lasthorizonte, den maximalen Temperaturen am Sensor T2 sowie dem Temperatur-Zeit-Integral

	FTTZ	Prüfstand			
	Vorversuch	120°C	140°C	160°C	180°C
Maximale Temperatur T2 [°C]	45	101	109	127	139
Temperatur-Zeit-Integral [°C*s]	29000	94087	100430	120978	107047

Die Ergebnisse aus Tab. 9 waren notwendig, um realitätsnahe und sinnvolle Lasthorizonte für die zyklischen Versuche zu bestimmen. Somit wurden für die zyklischen Versuche zum einen die maximale Temperatur der FTTZ-Realbrandversuche, als auch die 120°C als Belastungshorizonte ausgewählt.

Für die zyklischen Versuche wurde wie schon bei den statischen Versuchen die Dauer der Belastung auf 30 Minuten begrenzt. Davon waren 10 Minuten für das Aufheizen auf die Maximaltemperatur und 20 Minuten zum Halten der Temperatur auf diesem Maximum vorgesehen, siehe auch Abb. 18. Im Unterschied zu den statischen Versuchen wurde hier noch ein zweites Kriterium eingeführt, dass das Ende der thermischen Belastung darstellt. Dieses neue Kriterium stellte sicher, dass die jeweiligen Temperatur-Zeit Integrale von 29000 und 940087 am Temperatursensor T2 nicht überschritten wurden. Die Haltphase auf der Maximaltemperatur eines Zyklus war also dann beendet worden, wenn entweder die 30 Minuten oder der Wert des Temperatur-Zeit-Integrals erreicht wurde.

Als Zwischenschritt zwischen den statischen und den zyklischen Versuchsreihen wurden die Akkus, wie schon beim Akku A5, viermal in Folge mit einer Temperatur von 120°C belastet. Nach jeder Belastung erfolgte eine Kapazitätsmessung. Hintergrund dieses Vorgehens war, herauszufinden wie schnell die Akkus durch die wiederholte Belastung degradieren

Die Ergebnisse der zyklischen Belastung für die Funkgeräte MTP850Ex (C16, B6, A5) bei 120°C sind in Abb. 43 dargestellt. Alle 3 Akkus waren der Belastung 200 Zyklen ausgesetzt und zeigten keine sichtbaren Schäden. Wie zu erwarten, reduzierte sich die Kapazität mit der hohen und steigenden Anzahl der Zyklen. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Restkapazität nach 200 Zyklen beim Akku A5 noch bei ca. 73% liegt, während die Restkapazitäten bei Akku C16 und B6 noch zwischen 85% und 90% liegen. Auch hier, wie schon bei den statischen Untersuchungen, kam das Phänomen der Jahreszeittemperatur zum Tragen, da die Akkus C16 und B6 im Sommer und der Versuch an A5 im Winter durchgeführt wurden. Dennoch kam es trotz der Unterschiede in den Kapazitäten zu keinem funktionellen Schaden, zu keinem thermal Runaway, zu keinen äußeren Schäden und die Funkgeräte waren alle noch funktionsfähig.

Die Ergebnisse der zyklischen Belastung für die Funkgeräte MTP850Ex (B13, B9, B11) bei der FTTZ-Belastung sind ebenso in Abb. 43 dargestellt. Auch hier waren alle 3 Akkus der Belastung 200 Zyklen lang ausgesetzt und zeigten keine sichtbaren Schäden. Wie zu erwarten, reduzierte sich die Kapazität auch bei diesem Belastungsprofil mit der hohen und steigenden Anzahl der Zyklen. Allerdings lagen alle Kapazitäten, selbst nach 200 Belastungen, noch weit über 90%.

Das aus den Realbrandversuchen im FTTZ abgeleitete Belastungsprofil ist für die Funkgeräte unkritisch und verursacht kaum Schäden am Akku.

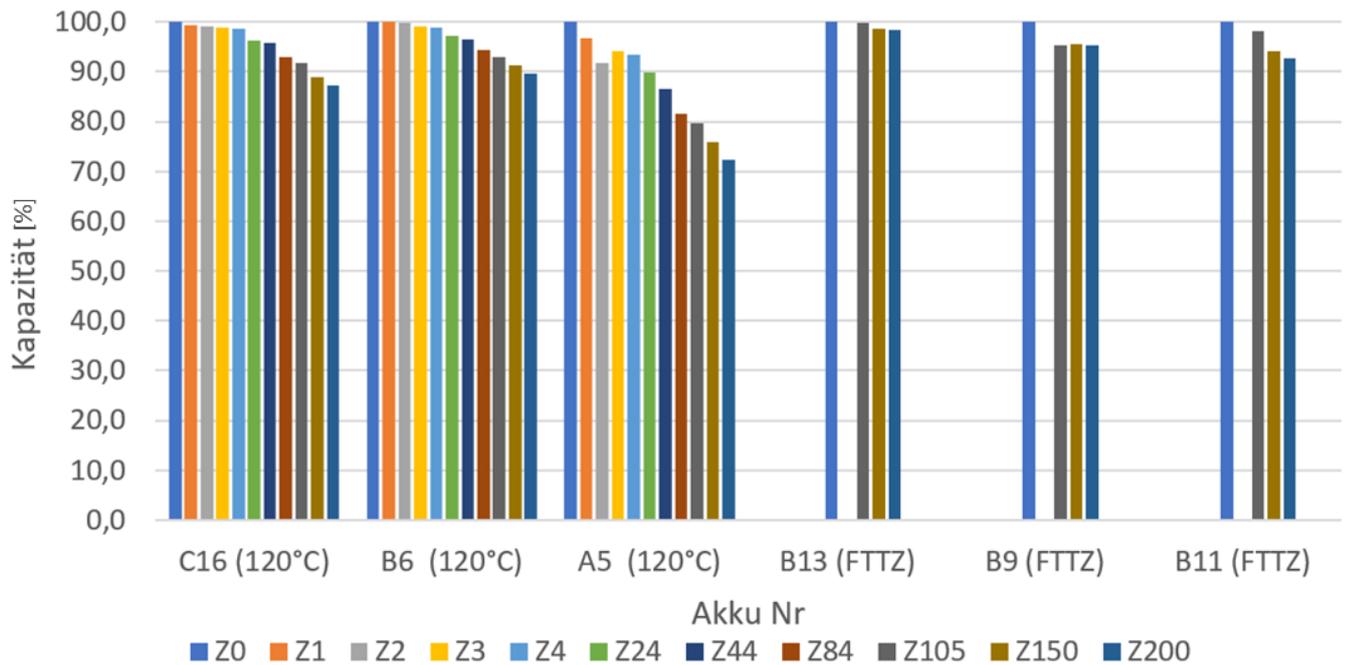


Abb. 43: Anfangs- und Restkapazitäten der MTP850Ex Akkus bei der FTTZ-Belastung und bei einer Belastung von 120°C

Stichpunktartig wurden auch zyklische Versuche mit den MXP600 Funkgerät durchgeführt. Dieses Funkgerät ist nicht EX-geschützt und der Akku hat einen höheren Energiegehalt. Aus diesen Gründen war daher dessen Verhalten unter diesen Belastungen von besonderem Interesse. An den lediglich zwei verfügbaren Funkgeräten (P2 und P3) wurde jeweils eine zyklische Belastung mit 120°C und eine zyklische Belastung nach dem FTTZ-Profil durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 44 dargestellt.

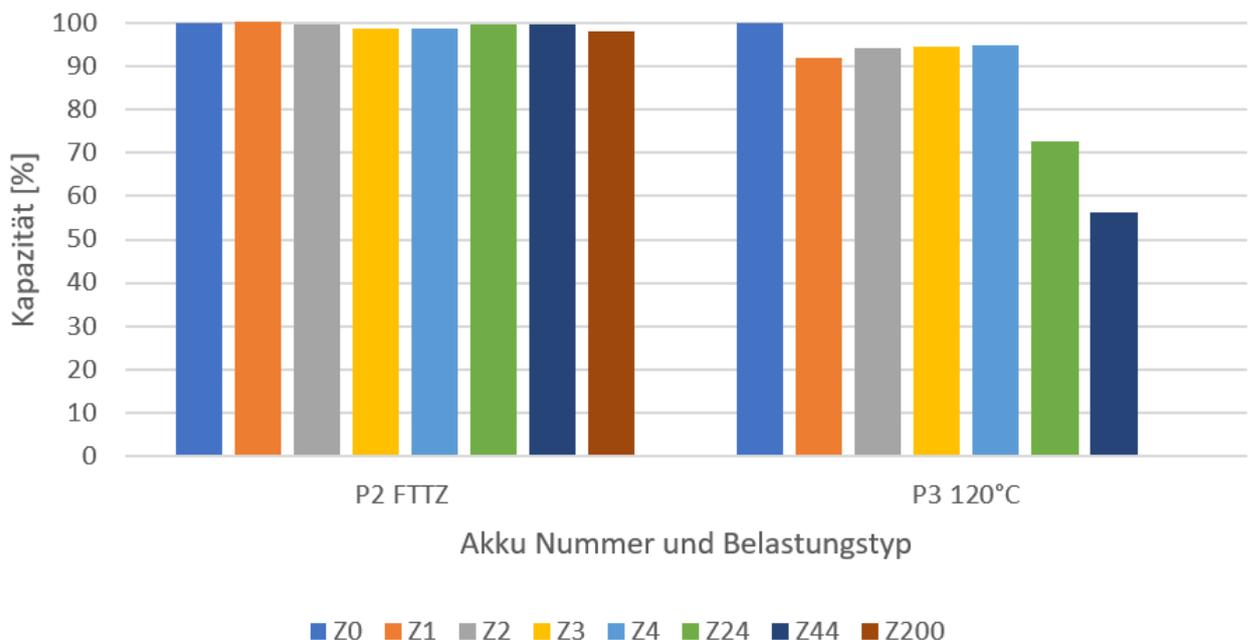


Abb. 44: Anfangs- und Restkapazitäten der MXP600 Akkus bei der FTTZ-Belastung und bei einer Belastung von 120°C

In der Abb. 44 ist klar zu erkennen, dass das FTTZ-Belastungsprofil am Akku P2 kaum eine Reduzierung der Kapazität bewirkt und dass der Akku 200 Zyklen quasi ohne Schäden mit einer Restkapazität von über 95% überstanden hat. Hingegen zeigt das Belastungsprofil bei 120°C schon nach 44 Zyklen eine Restkapazität von 56%, weswegen der Versuch nicht weiter fortgeführt wurde. Auch an diesen Akkus kam es zu keinem funktionellen Schaden, zu keinem thermal Runaway, zu keinen äußeren Schäden und beide Funkgeräte waren noch betriebsbereit.

4.3.4 Impedanzmessungen an den Funkgeräten

Um die Auswirkung der thermischen Belastungen zu bewerten, waren neben der Kapazitätsmessungen auch Impedanzmessungen vorgesehen. Die Impedanzmessungen waren allerdings widersprüchlich und nicht eindeutig zu interpretieren. Ein möglicher Grund könnte die sehr hohe Sensibilität der Impedanzmessung sein. Kleinste Veränderungen z.B. in der Kontaktierung, Temperatur oder dem Ladezustand können enormen Einfluss auf die Impedanzmessung und das Ergebnis haben. Die Möglichkeit, die Impedanzmessung innerhalb des Prüfstandes durchzuführen und eine Neukontaktierung somit zu vermeiden, war nicht gegeben. Außerdem wurde während des Zerlegens der Akkus herausgefunden, dass die Ladeelektronik in den Akkus mitverbaut ist. Die Elektronik von den Zellen so zu trennen, dass eine reine Impedanzmessung der Zellen ohne zusätzliche elektronische Bauteile hätte erfolgen können, war nicht möglich. Ein Trennen der Elektronik von den Zellen, hätte das Zerstören des Akkus bedeutet, wodurch das Funkgerät nicht mehr weiter hätte betrieben werden können. Aus diesem Grund wurde auf die Impedanzmessung verzichtet.

5 Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen

Es wurden keine Schutzrechte im Rahmen des Projektes FP462 „CoLiBri“ angemeldet, noch sind, sofern es den Autoren bekannt ist, bestehende Schutzrechte durch dieses Projekt betroffen oder adressiert.

Die im Rahmen der Arbeiten dieses Projektes entstandenen Veröffentlichungen sind in Kapitel „7.1 Veröffentlichungsverzeichnis“ angegeben.

6 Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks/-ziels, Schlussfolgerungen

In den nachfolgenden Kapiteln 6.1 und 6.2 werden die in Kapitel 4 dargestellten Ergebnisse hinsichtlich der in Kapitel „1 Problemstellung“ und Kapitel „2 Forschungszweck/-ziel“ angegebenen Ziele bewertet. Diese sind getrennt nach den Ergebnissen für Atemschutzflaschen und Lithiumbatterien in Funkgeräten unterteilt.

6.1 Bewertung der Ergebnisse der Atemschutzflaschen

Die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Untersuchungen an zwei repräsentativen Baumustern von Atemschutzflaschen zeigen, dass die thermischen Belastungen abhängig vom Baumuster einen z.T. deutlichen Einfluss auf die Restfestigkeiten der Atemschutzflaschen haben, diese jedoch als unkritisch für die Sicherheit der Rettungskräfte angesehen werden können.

Bei dem **Baumuster der Firma Dräger Safety AG & Co. [25]** zeigt insbesondere die mittlere Temperaturbelastung eine deutliche Erhöhung der Streuung der Restfestigkeiten gegenüber der Grundgesamtheit, aber auch gegenüber der hohen Temperaturbelastung (vgl. Abb. 28). Während bei den hohen Temperatureinwirkungen die thermische Belastung jedoch gut an den geschmolzenen bzw. verformten Schutzkappen zu erkennen ist (vgl. Abb. 30) und die Behälter damit leicht durch den Atemschutzgerätewart der Feuerwehren aussortiert werden können, ist die Einwirkung bei den mittleren Temperaturbelastungen visuell kaum zu erkennen (vgl. Abb. 29) und birgt auch daraus ein erhöhtes Risiko unerkannt zu bleiben. Dabei sind jedoch folgende wichtige Punkte anzumerken.

Selbst das mittlere Belastungsprofil ist gegenüber den in den Realbrandszenarien beim Feuerwehrtechnischen Trainingszentrum (FTTZ) gemessenen Oberflächentemperaturen (vgl. Abb. 23) sowohl in der Grundlast als auch in der Dauer der Belastung und der Anzahl der Temperaturspitzen, höher und bildet damit einen konservativen Fall der thermischen Belastung ab. Es ist davon auszugehen das insbesondere die mittlere thermische Grundlast mit 80°C, da Sie näher an der Glasübergangstemperatur des Faserverbundes liegt, kritischer für die Restfestigkeiten der Atemschutzflaschen sind. Die in [9] angegebenen statistischen Untersuchungen zeigen, dass Brandbekämpfungsszenarien nur bei etwa 10-20% der Einsatzszenarien, vermutlich sogar noch deutlich seltener, auftreten und dabei Szenarien wie die untersuchte Rauchgasdurchzündung einen noch weitaus selteneren Fall darstellt. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Atemschutzflaschen in Ihrem realen Einsatzleben eine vergleichbare Belastung sehen, der Sie in diesem Vorhaben ausgesetzt waren, ist demnach entsprechend vermutlich sehr gering.

Für die Restfestigkeiten der Prüfmuster der Fa. Dräger bleibt, selbst nach der kritischeren mittleren thermischen Belastung, immer noch ein Sicherheitsfaktor von mehr als 2 gegenüber dem Prüfdruck der Behälter und von etwa

2,5 gegenüber dem maximalen Überdruck beim Befüllen der Behälter. Sie bieten demnach immer noch einen ausreichenden Schutz gegenüber einem Versagen und erfüllen auch nach der thermischen Belastung noch die Vorgaben der DIN EN 12245 [8] für die Auslegungsprüfung der Baumuster.

Die kombinierten Alterungs- und Restfestigkeitsuntersuchungen (vgl. Abb. 34) an den Baumustern der Fa. Dräger zeigten, im Gegensatz zu den oben beschriebenen Restfestigkeitsuntersuchungen, sogar eine Zunahme der mittleren Restfestigkeiten. Weiterhin zeigten sie im Vergleich zu der mittleren thermischen Belastung, eine deutlich geringere Zunahme der Streuung um etwa Faktor 2 gegenüber der Vergleichsgruppe. Die Vergleichsgruppe der kombinierten Alterungs- und Restfestigkeitsuntersuchungen (vgl. Tab. 5) weist trotz einer um 12.000 Zyklen erhöhten Belastung eine vergleichbare Standardabweichung und nur einen leicht reduzierten Mittelwert gegenüber der Vergleichsgruppe der Restfestigkeitsuntersuchungen (vgl. Tab. 4) auf.

Bei den Baumustern der **Firma Composite Technical Systems (CTS)** [24] zeigen die hohen thermischen Belastungen die größten Streuungen der Ergebnisse der Berstversuche (vgl. Abb. 36) und auch hier nimmt der Mittelwert der jeweiligen Stichprobenpopulationen nur gering gegenüber der Vergleichspopulation ab. Der Mindest-Auslegungsberstdruck mit einem geforderten Mindestwert größer als 2 über dem Prüfdruck der Behälter (gemäß [8]), kann hier nach thermischer Alterung schon unterschritten werden. Allerdings sieht man auch hier die thermischen Belastungen der Behälter deutlich, so dass diese leicht durch Atemschutzgerätewarte aussortiert werden können.

Der durch eine **Schutzhülle** umhüllte Atemschutzbehälter (vgl. Abb. 31 und Abb. 32) zeigte deutlich geringere Temperaturspitzen als ein Behälter ohne Schutzhülle. Die Temperatur stieg jedoch über die gesamte Versuchsdauer kontinuierlich an und erreichte am Ende ähnliche Temperaturen auf der Behälteroberfläche wie ohne Schutzhülle. In Bezug auf eine Restfestigkeitsabnahme war keine Auffälligkeit zu erkennen. Aufgrund der geringen Datenbasis kann keine fundierte Empfehlung für oder gegen eine Verwendung der Schutzhüllen abgegeben werden. Für eine Schutzhülle spricht neben der reduzierten Temperaturspitzen sicherlich auch ein gewisser mechanischer Schutz der Atemschutzflasche. Bei diesem Fall kann die Flasche jedoch weniger schnell abkühlen und Defekte sind unter Umständen nicht sofort zu erkennen. Zusätzlich werden mögliche Gewichtsvorteile durch die leichteren Typ 4 Flaschen damit zumindest teilweise wieder aufgehoben.

In keinem der untersuchten Fälle, weder für die Behälter der Fa. Dräger noch für die der Fa. CTS, kam es infolge der thermischen Belastung zu einer Leckage des Liners und einem für die Rettungskräfte potenziell kritischen Druckabfall und daraus bedingtem Verlust von Atemluft.

Da es im realen Behälterbetrieb neben der potenziellen thermischen Belastung der Behälter noch zu anderen Belastungen der tragenden Faserverbundschichten, insbesondere durch Stoßbelastungen und Abrieb infolge des Handlings, kommen kann, ist natürlich der Atemschutzgerätewart geraten, bei sichtbaren thermischen Belastungen der Atemschutzflasche, diese sicherheitshalber außer Betrieb zu nehmen. Ein kritisches und akutes Risiko für Atemschutzgeräteträger infolge der thermischen Belastungen besteht, wie die Untersuchungen im Rahmen dieses Vorhabens zeigen, jedoch nicht. Es kann demnach zur Verwendung von leichteren Typ 4 Atemschutzflaschen geraten werden, insbesondere dann, wenn etablierte Hersteller mit einer großen und langjährigen Erfahrung gewählt werden.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen ein für die Sicherheit der Rettungskräfte sehr positives Bild. Nach aktueller Erkenntnislage ist es nicht erforderlich akute Maßnahmen zu ergreifen oder die existierende Rechtsgrundlage anzupassen, um potenziell kritische Gefahren abzuwenden. Änderungen in den relevanten Auslegungsnormen könnten allerdings sicherlich für eine höhere Akzeptanz und mehr Vertrauen sorgen.

6.2 Bewertung der Ergebnisse der Funkgeräte

Die **zyklischen Belastungen** wurden an zwei Lasthorizonten durchgeführt, bei 120°C und bei 53°C. Letzterer wurde aus den Realbrandversuchen auf dem Feuerwehrtechnischen Trainingszentrum (FTTZ) abgeleitet.

Die Ergebnisse der zyklischen Versuche an den **Funkgeräten vom Typ MTP850Ex** bei 120°C, welche für 200 Zyklen belastet wurden, zeigten keine visuell sichtbaren Schäden. Wie zu erwarten, reduzierte sich die Kapazität mit der steigenden Anzahl der Zyklen auf ein Minimum von 73% nach 200 Zyklen. Die Ergebnisse der zyklischen Belastung für die Funkgeräte MTP850Ex bei 53°C, welche ebenfalls für 200 Zyklen belastet wurden, zeigten ebenfalls keine sichtbaren Schäden. Wie zu erwarten, reduzierte sich die Kapazität auch bei diesem Belastungsprofil mit der steigenden Anzahl der Zyklen. Allerdings lagen alle Kapazitäten, selbst nach 200 Belastungen, noch weit über 90%. Bei keinem Versuch, sowohl bei 120°C als auch bei 53°C, kam es zu einem Funktionsausfall der Funkgeräte, zu keinem thermischen Durchgehen und zu keinen visuellen Schäden. Die untersuchte Funkgerät-Serie stellt anhand dieser Untersuchung keine Gefahr oder Sicherheitsrisiko dar.

Die zyklischen Versuche bei den gleichen o.g. Horizonten an der **MXP600 Serie** ergaben, dass das FTTZ-Belastungsprofil bei 53°C kaum eine Reduzierung der Kapazität bewirkt und dass der Akku 200 Zyklen quasi ohne Schäden mit einer Restkapazität von über 95% übersteht. Hingegen zeigt das Belastungsprofil bei 120°C bei dieser Serie schon nach 44 Zyklen eine Restkapazität von nur noch 56%, weswegen der Versuch nicht weiter fortgeführt wurde. Das Ergebnis ist dennoch nicht negativ zu betrachten, da die Belastung mit 120°C eine so hohe thermische Belastung darstellt, die in der Realität nur sehr selten auftreten wird und es sich dann um Einzelereignisse handeln würde. Es kann auch davon ausgegangen werden, dass bei einem solchen Brand die körperliche Belastung für die Löschtruppe so hoch wäre, dass deren aktiver Löscheinsatz keine 30 Minuten, wie bei diesen Versuchen, andauern würde. Dennoch übersteht dieser Akku den Lasthorizont von 120 °C mit einer Einsatzdauer von 30 Minuten je Zyklus für insgesamt 44 Zyklen ohne dabei thermisch durchzugehen oder funktionell auszufallen. Die Restkapazität nach 24 Zyklen und einer Belastung von 120°C betrug noch über 70%. Schon vor dieser Restkapazität sollte der Akku ausgetauscht werden. Zusammengefasst bedeutet dies also lediglich, dass der Akku früher ausgetauscht werden sollte und dass eine akute Gefahr für die Einsatzkräfte nicht besteht.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kapazitätsbestimmung als Kriterium für die Sicherheitsbewertung der Akkus herangezogen werden kann. Dabei ist zu beachten, dass die Kapazitätsmessung bei annähernd gleichbleibenden Umgebungsbedingungen stattfinden und mit dem gleichen Messgerät gemessen werden sollte. Die Umgebungstemperatur sollte möglichst annähernd 20°C betragen. Es wird weiterhin empfohlen, die Akkus ab einer Restkapazität von unter 80% auszutauschen, um einem vorzeitigen unerwarteten Funktionsausfall der Funkgeräte entgegenzuwirken.

Die **statischen Versuche am Funkgerät MTP850Ex** zeigten, dass eine einfache Sichtprüfung der Funkgeräte nach einem Brandeinsatz sinnvoll sein kann. An diesen Funkgeräten begann sich der Kunststoff an der Rückseite bei einer zu hohen thermischen Belastung (>140°C) zu verformen und es bildeten sich große Blasen. Abb. 45 zeigt das Aufblähen des Kunststoffes bei unterschiedlichen Lasthorizonten (von links: 120°C, 140°C, 160°C, 180°C) am Funkgerät MTP850Ex. Ein nach dem Einsatz derart stark verformtes Funkgerät sollte im Nachgang natürlich aussortiert und nicht weiter benutzt, geschweige denn geladen werden.



Abb. 45: Beispielhaftes Aufblähen des Kunststoffes bei den verschiedenen Lasthorizonten (von links nach rechts: 120°C, 140°C, 160°C, 180°C); Fotos von unterschiedlichen Prüfmustern des Gerätetyps MTP850Ex

Das Aufblähen der Akkurückseite resultiert nicht von einem Ausgasen der Zellen. Die Zellen hatten keine sichtbaren Schäden. Die Gase im Inneren des Akkus, die zum Aufblähen führten, kamen vermutlich vom Kunststoff selbst. Die Dokumentation der Zerlegung eines aufgeblähten Akkus ist im Anhang 8.1 Abb. 51 dargestellt. Als schnelle und sehr einfache Überprüfung kann daher eine Sichtprüfung an den FG empfohlen werden.

7 Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan

Die Ergebnisse des Vorhabens zeigen, dass keine zusätzliche Gefährdung für die Einsatzkräfte infolge der thermischen Einwirkungen auf die beiden Komponenten in den untersuchten Ausführungen entsteht. Aus diesem Grund besteht aktuell kein Handlungsbedarf, um existierende Auslegungsnormen anzupassen bzw. zu ändern. Dies heißt jedoch nicht, dass zukünftige Entwicklungen, neue Hersteller oder Änderungen im Herstellungsprozess diese nicht zukünftig bedürfen.

Auch wenn kein aktueller Bedarf existiert, um Normen anzupassen, wurde darauf geachtet, die Ergebnisse einer möglichst breiten und relevanten Öffentlichkeit zugänglich zu machen bzw. auch nach dem Ende der Projektlaufzeit dies weiterhin zu tun, um für eine Akzeptanz dieser leichteren Atemschutzflaschen und sicheren Funkgeräte zu werben und Anwendern mögliche existierende Bedenken zu nehmen bzw. diese zu mindern.

In dem nachfolgenden Kapitel sind die bereits erfolgten Veröffentlichungen und die in den kommenden Wochen und Monaten geplanten Veröffentlichungen und Vorträge, sofern bekannt, angegeben.

7.1 Veröffentlichungsverzeichnis

- [A] Eric Duffner, Sebastian John, Anita Schmidt, Björn Drousch, Derek Loechner; „DGUV-Forschungsvorhaben CoLiBri: Sicherheitstechnische Bewertung thermischer Betriebsbelastung auf sicherheitskritische Ausrüstung am Beispiel von Composite-Atemluftflaschen und Lithiumbatterien“; Themenfeldtag Energie 2022
- [B] Chalid el Dsoki, Björn Drousch, Derek Loechner, „DGUV-Forschungsvorhaben CoLiBri: Sicherheitstechnische Bewertung thermischer Betriebsbelastung auf sicherheitskritische Ausrüstung am Beispiel von Composite-Atemluftflaschen und Lithiumbatterien“; Themenfeldtag Energie 2023
- [C] Sebastian John, Eric Duffner, „Ermittlung thermischer Betriebslasten auf die persönliche Schutzausrüstung von Feuerwehr-Einsatzkräften - Teil 1: Temperaturmessungen von Umgebung und sicherheitskritischer Ausrüstung während eines Rollover-Szenarios“; Deutsche Feuerwehr-Zeitung Brandschutz“, 2023
- [D] Chalid el Dsoki „Hitzebeständigkeit von Funkgeräten“, Fachbeitrag, Feuerwehr-Magazin 12 /2023
- [E] Chalid el Dsoki, Björn Drousch, Derek Loechner: Zur Sicherheit von akkubetriebenen Funkgeräten beim Löscheinsatz: Teil 1: Maximale thermische Belastbarkeit der Akkus bzw. der Funkgeräte“ Fachbeitrag vfdb Zeitschrift 1/2024
- [F] Eric Duffner, Sebastian John, „Ermittlung thermischer Betriebslasten auf die persönliche Schutzausrüstung von Feuerwehr-Einsatzkräften - Teil 2: Sicherheitstechnische Bewertung thermisch beanspruchter Typ IV-Atemluftbehälter“; Deutsche Feuerwehr-Zeitung Brandschutz“, **geplant 2024**
- [G] Chalid el Dsoki, Björn Drousch, Derek Loechner: Zur Sicherheit von akkubetriebenen Funkgeräten beim Löscheinsatz: **Teil 2: Zur zyklischen Belastbarkeit der Akkus bzw. der Funkgeräte“**; Fachbeitrag vfdb Zeitschrift **geplant in 2024**
- [H] Eric Duffner, Chalid el Dsoki, Sebastian John, Björn Drousch, Derek Loechner, “Vorstellung Ergebnisse des DGUV-Vorhaben FP462 - CoLiBri“; Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb) Tagung des Referat 8 in Berlin, 09.04.2024

7.2 Danksagung

Einen herzlichen Dank an die **DGUV Forschungsförderung**, die dieses Vorhaben durch die Mittelbereitstellung und konstruktive Beratung über die gesamte Vorhabenlaufzeit hinweg überhaupt erst möglich gemacht hat.

Auch den Teilnehmer*innen des **projektbegleitenden Lenkungsausschusses**, die uns mit ihrer Zeit, wertvollen Hinweise aus der Praxis und insbesondere mit ihrer hohen Fachexpertise unterstützt haben und wesentlich zum Gelingen dieses Vorhabens beigetragen haben, möchten wir an dieser Stelle unseren herzlichen Dank aussprechen.

Und „last but not least“ sei allen **Mitarbeiter*innen dieses Vorhabens** für die sehr gute und konstruktive Zusammenarbeit im Rahmen dieses Vorhabens herzlichst gedankt!

8 Anhang/Anhänge

8.1 Ergänzende Informationen zu den untersuchten Funkgeräten



Abb. 46: Anordnung und Position der vier Temperatursensoren T1(rechts) bis T4(links) am Beispiel der MXP600-Serie



Abb. 47: Rückseite Akku MXP600-Serie inklusive Lötfähnchen

Tab. 10: Hersteller-Angaben der in MTP850Ex und in MXP600 eingebauten Zellen

Zellspezifikation	MTP850Ex	MXP600
Akku Nennkapazität ⁽¹⁾	Min. 1150 mAh [29]	Min 3200 mAh [30]
Akku Kapazität ⁽²⁾	Min. 1150 mAh Typ. 1200 mAh	Min 3200 mAh Typ: 3400 mAh
Nennspannung U_{Nenn}	3,7 V	3,8 V
Anzahl Zellen	2 (Reihe)	4 (Parallel)
Aufladen	CC-CV; Std. 1150 mA; 4,20 V; 3,0 h	CC-CV, Std. 1820 mA; 4,5 V;
Gewicht (max.) einer Zelle	22,3 g	15,5 g
Temperatur	Laden: 0 bis +45°C Entladen: -20 bis +60°C Lagern: -20 bis +50°C	Laden 10 bis 45°C Entladen: - 10 bis 60°C Lagern: - 40 bis 85°C
Energiedichte einer Zelle	Volumetrisch: 455 Wh/l Gravimetrisch: 191 Wh/kg	Volumetrisch: 458 Wh/l Gravimetrisch: 196 Wh/kg
Abbildung		

(1)Bei T=20°C ; (2)Bei T=25°C



Abb. 48: Schrittweise Zerlegung eines MTP850Ex (oben) und eines MXP600 (unten) Akkus

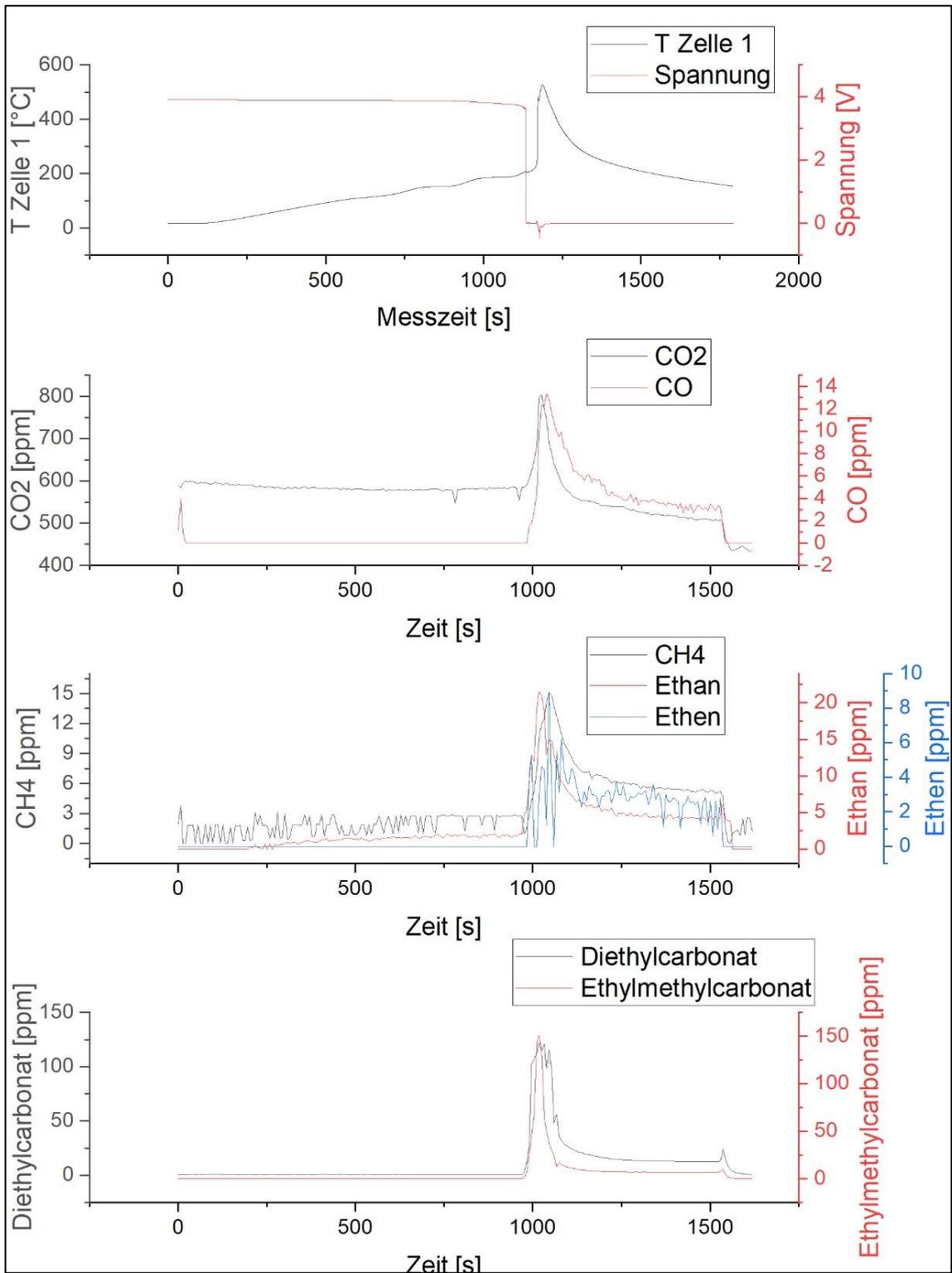


Abb. 49: Mittels FTIR gemessene Gaskonzentrationen beim thermischen Durchgehen des MTP850 Akku

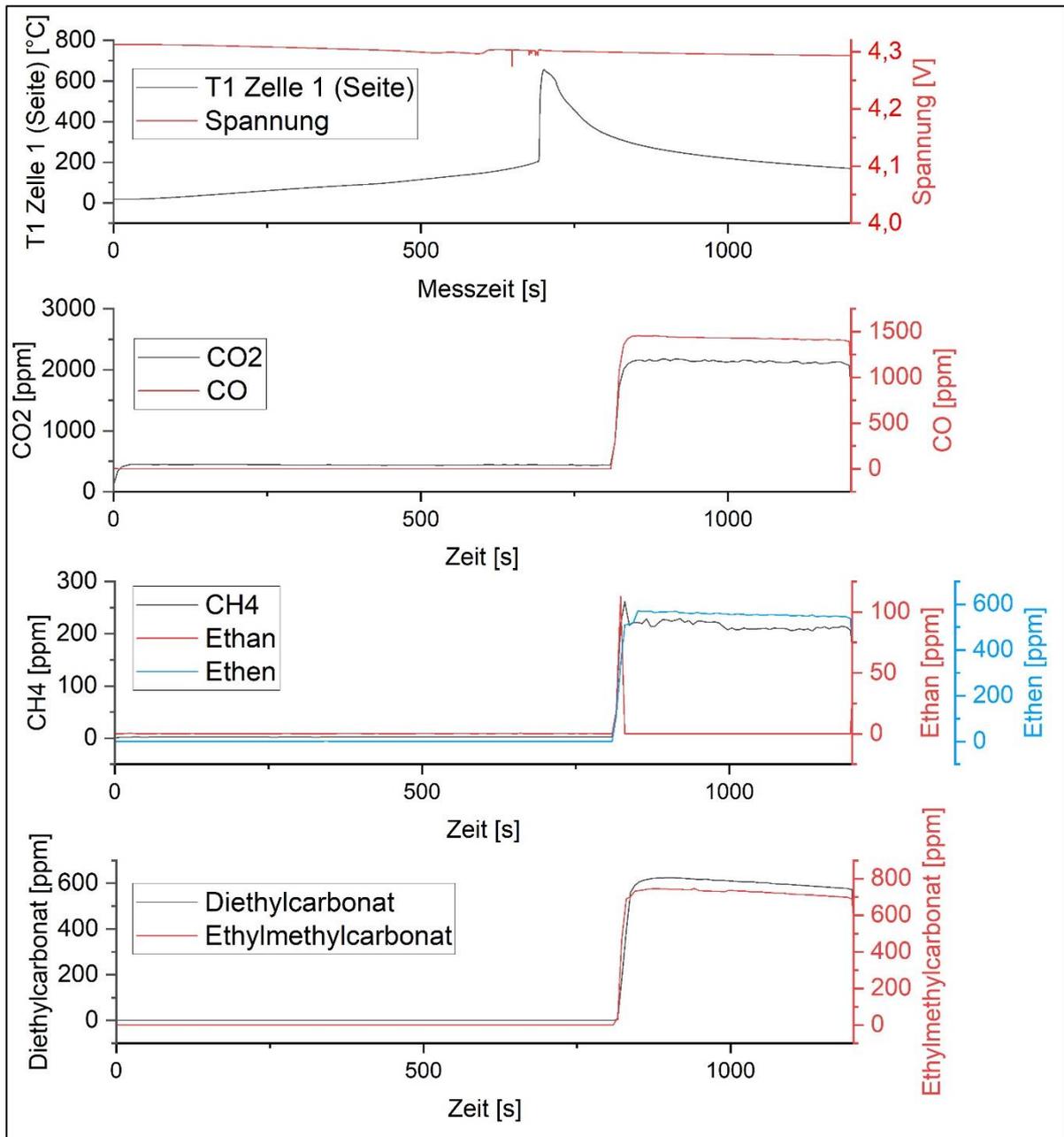


Abb. 50: Mittels FTIR gemessene Gaskonzentrationen beim thermischen Durchgehen des MXF600 Akku. TR Zelle bei Zelle 1 und Zelle 2 von vier.

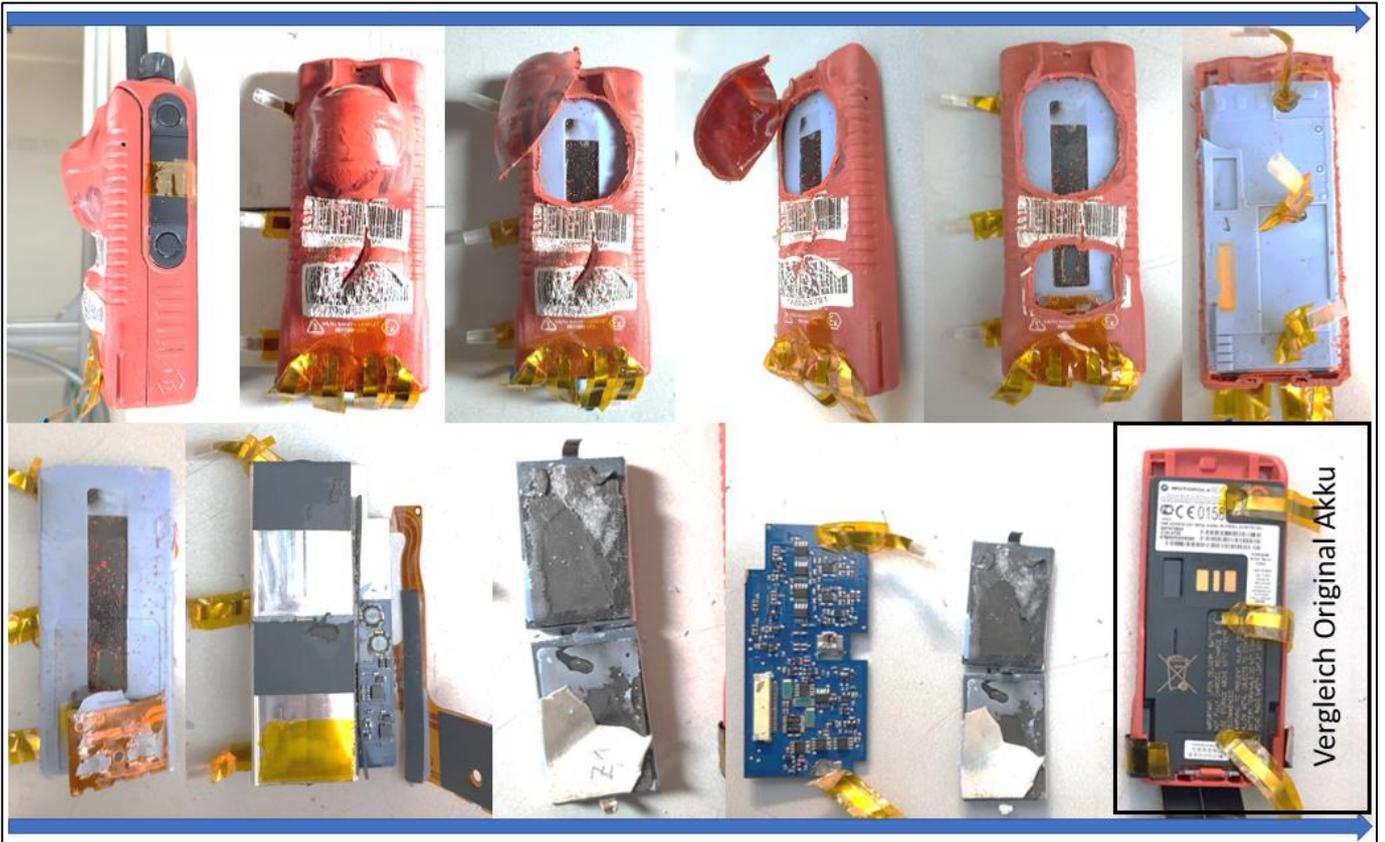


Abb. 51: Bildokumentation der Zerlegung eines defekten Akkus am Funkgerät B10

8.2 Literatur-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

- [1] Gefahrgutbeförderungsgesetz (GGBefG), in der Fassung der Bekanntmachung vom 06. August 1975 (BGBl. I S. 2121), zuletzt geändert durch Artikel 5 des Gesetzes vom 26. Juli 2016 (BGBl. I S. 1843).
- [2] Ortsbewegliche-Druckgeräte-Verordnung (ODV), in der Fassung der Bekanntmachung vom 29. November 2011 (BGBl. I S. 2349), zuletzt geändert durch Artikel 491 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474).
- [3] Richtlinie: 2010/35/EU, des europäischen Parlaments und des Rates über ortsbewegliche Druckgeräte, Europäisches Komitee für Normung, 2010.
- [4] European Agreement: Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route (ADR), Economic Commission for Europe, New York, Geneva: United Nations Publication, 01.2015
- [5] Richtlinie: 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt, 2014
- [6] Produktsicherheitsgesetz (ProdSG), in der Fassung der Bekanntmachung vom 08. November 2011 (BGBl. I S. 2178, 2179, 2012, 131), zuletzt geändert durch Artikel 435 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474).
- [7] Druckgeräteverordnung (14. ProdSV), in der Fassung der Bekanntmachung vom 13. Mai 2015 (BGBl. I S. 692), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 06. April 2016 (BGBl. I S. 597).
- [8] DIN EN 12245: 2022-08-01, Ortsbewegliche Gasflaschen – Vollumwickelte Flaschen aus Verbundwerkstoffen, DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin: Beuth Verlag, 2022.
- [9] Grabski, R.; Brein, D.; Pasch, U.; Neske, M.; Kunkelmann, J.: Forschungsbericht Nr. 161 - Anforderungen und Prüfmethode für die Persönlichen Schutzausrüstungen der Feuerwehreinsatzkräfte im Brandeinsatz unter besonderer Berücksichtigung des Atemschutzes (Persönliche Schutzausrüstung - PSA) – Teilschritt 1, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie, ISSN 170-0060, März 2010
- [10] Starke, H.; Neske, M.: Forschungsbericht Nr. 168 - Anforderungen und Prüfmethode für die Persönlichen Schutzausrüstungen der Feuerwehreinsatzkräfte im Brandeinsatz unter besonderer Berücksichtigung des Atemschutzes (Persönliche Schutzausrüstung - PSA) – Teilschritt 2, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, ISSN 170-0060, September 2013
- [11] Starke, H.; Neske, M.: Forschungsbericht Nr. 179: Untersuchung von nicht fabrikneuen Atemschutzgeräten der Feuerwehren, Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge, Abteilung Forschung - Institut der Feuerwehr -, ISSN 170-0060, September 2014
- [12] Neske, M.: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Modellierung zu den Auswirkungen von Wärmeexposition auf Pressluftatmer, Vollmasken und Lungenautomaten, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2015
- [13] Schönfelder, „Einfluss thermischer Betriebsbelastungen auf die Sicherheit von Typ-III-Druckgasbehältern“, Dissertation, Bergischen Universität Wuppertal, 2016
- [14] EN 136: 1998, Atemschutzgeräte – Vollmasken – Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung, Europäisches Komitee für Normung, Berlin: Beuth Verlag, 1998
- [15] EN 137: 2006, Atemschutzgeräte – Behältergeräte mit Druckluft (Pressluftatmer) mit Vollmaske – Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung, Europäisches Komitee für Normung, Berlin: Beuth Verlag, 2006
- [16] Mair, „Safety Assessment of Composite Cylinders for Gas Storage by Statistical Methods“, Springer International Publishing, ISBN 978-3-319-49710-5, 2017
- [17] Mair, Sicherheitsbewertung von Composite-Druckbehältern. Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-662-48131-8, DOI 10.1007/978-3-662-48132-5.
- [18] Verordnung (EU) 2016/425 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2016 über persönliche Schutzausrüstungen und zur Aufhebung der Richtlinie 89/686/EWG
- [19] Hübner „Gefahrenquelle Lithium-Ionen-Akkus in der PSA“ 25.2.2019, <https://www.git-sicherheit.de/topstories/safety/gefahrenquelle-lithium-ion-en-akkus-der-psa>

- [20] ADR Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, aktuelle Fassung 2019
- [21] Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung für Einsätze bei der Feuerwehr, DGUV Information 205-014, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) Sept. 2016
- [22] Kunkelmann, BRANDSCHUTZFORSCHUNG DER BUNDESLÄNDER BERICHT 175 Untersuchung des Brandverhaltens von Lithium-Ionen- und Lithium-Metall-Batterien in verschiedenen Anwendungen und Ableitung einsatztaktischer Empfehlungen, ISSN 0170-0060, 2015 mit Überarbeitung 2016
- [23] DRAFT ISO/WD 19016:2020(E) "Gas cylinders — Cylinders and tubes of composite construction — Modal acoustic emission (MAE) testing for periodic inspection and testing", 2020
- [24] Composite Technical Systems S.p.A., Products for Firefighting and Rescue, URL: <https://sites.google.com/ctscyl.com/composite-technical-systems/products/firefighting-and-rescue> (Stand 19.01.2024)
- [25] Dräger Safety AG & Co. KGaA, Atemschutzflaschen für die Feuerwehr, URL: https://www.draeger.com/de_de/Products/Compressed-Air-Breathing-Cylinders (Stand 19.01.2024)
- [26] Composite Technical Systems S.p.A., Products for Firefighting and Rescue, URL: <https://sites.google.com/ctscyl.com/composite-technical-systems/products/firefighting-and-rescue> (Stand 19.01.2024)
- [27] Motorola Solutions, Inc. MTP850Ex TETRA ATEX PORTABLE TWO-WAY RADIO, URL: [MTP850Ex TETRA ATEX Two-Way Radio - Motorola Solutions EMEA](#) (Stand 20.01.2024)
- [28] Motorola Solutions, Inc. MXP600 TETRA-Handsprechfunkgerät, URL: [MXP600: Das einsatzkritische TETRA-Handsprechfunkgerät - Motorola Solutions Deutschland](#) (Stand 20.01.2024)
- [29] Sanyo Energy (U.S.A.) Corporation, Data Sheet: Panasonic Lithium Ion UF553450Z, URL: [UF553450Z Schematic - Panasonic Battery \(datenblatt-pdf.com\)](#) (Stand 20.01.2024)
- [30] Panasonic Industry, CGA463443XA : Lithium-ion Batteries, URL: [CGA463443XA - Lithium-ion Batteries - Secondary Batteries \(Rechargeable Batteries\) - Panasonic](#) (Stand 20.01.2024)
- [31] Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung: Empfehlungen für die BEFÖRDERUNG GEFÄHRLICHER GÜTER Handbuch über Prüfungen und Kriterien Siebente überarbeitete Ausgabe, ST/SG/AC.10/11/Rev.7/Amend.1 VEREINTE NATIONEN New York und Genf, 2019 Deutsche Übersetzung, 2023 Geänderte und ergänzte Fassung

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Li-Ionen-Batterien in einem Laptop beim thermischen Durchgehen nach Erhitzen auf einer Herdplatte.....	8
Abb. 2: Von der BF Karlsruhe während eines Übungsbrandeinsatzes an der PSA gemessene Temperaturverläufe [9]	11
Abb. 3: Anforderungsprofil für Menschenrettung und Brandbekämpfung aus [9]	12
Abb. 4: Abgeleitetes thermisches Anforderungsprofil für die Versuchsstandauslegung (BAM)	12
Abb. 5: Motorola MTP850Ex-Funkgerät (links) und Dräger Typ 4 Atemschutzflaschen (rechts).....	13
Abb. 6: Anordnung von Versuchs- (A) und Messcontainer (B) sowie der Gasfülleinheit (C1 & C2) auf dem BAM TTS	14
Abb. 7: Versuchsaufbau mit Prüfmuster und den umgebenden IR-Strahlern im Versuchscontainer	15
Abb. 8: links: Verteilung der Temperatursensoren auf der Behälteroberfläche, rechts: Voruntersuchungen über den Einfluss von Positionierung und Ausrichtung der T-Sensoren auf die Messung der Oberflächentemperatur ...	16
Abb. 9: Einfluss der Sensorpositionierung auf den gemessenen Temperaturverlauf.....	16
Abb. 10: Schematische Darstellung des Temperaturprofils einer Versuchseinheit am Behälter D37	17
Abb. 11: Darstellung des Temperaturverlaufs dreier aufeinanderfolgender Versuchseinheiten (3x3 Belastungszyklen); gemessen auf der Behälteroberfläche in mittlerer Position (vgl. Abb. 8) am Behälter D37	18
Abb. 12: Darstellung des Temperaturprofils einer Versuchseinheit am Behälter D32	18
Abb. 13: Darstellung des FE-Simulationsmodells mit dem applizierten thermischen Temperaturprofil auf einem Teil der Mantelfläche	19
Abb. 14: Vergleich des mittels FE-Simulation ermittelten Temperaturverlaufs auf der Behälteroberfläche und Behälterinnenseite (Liner)	20
Abb. 15: Prüfstand für thermische Belastung an Ausrüstungsteilen mit Lithiumbatterien, Konstruktionsmodell des Prüfstandes (links) und fertiger Prüfstand (Mitte und rechts).....	21
Abb. 16: Rückseite des Akkus inklusive angeschweißte Lötflächen (links), Position der freigelegten Kontaktierungsstellen (Mitte) und angeschweißte Lötflächen (rechts).....	22
Abb. 17: Haltevorrichtung des Funkgeräts (links) und Position des Funkgeräts im Prüfstand (rechts).....	22
Abb. 18: Übersicht über die einzelnen Phasen des thermischen Belastungsprofils	23
Abb. 19: Brand- und Versuchsraum des Übungscontainers.....	24
Abb. 20: Seitenansicht von Brand- und Versuchsraum sowie Anordnung der Temperatursensoren zur räumlichen Erfassung der Umgebungstemperatur.	25
Abb. 21: Auszug eines Temperaturverlaufs der am dritten Versuchstag gemessenen Rauminnentemperaturen. ...	26
Abb. 22: Sensor- und Messpunkte zur Temperaturmessung an der Atemluftflasche.	27
Abb. 23: Auszug des erfassten Temperaturverlaufs ausgewählter Messstellen auf einer Atemluftflasche, gemessen am dritten Versuchstag.	27
Abb. 24: Anordnung und Position der vier Temperatursensoren T1(links) bis T4(rechts) am Beispiel der MTP850Ex- Serie	28
Abb. 25: Auszug des während einer Rauchgasdurchzündung am Funkgerät 1 gemessenen Temperaturverlaufs, aufgenommen im FTZ am Versuchstag 3.	29
Abb. 26: Temperaturverlauf von Sensor T2 aus den Realbrandversuchen im FTZ	29
Abb. 27: Ergebnisse der Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. Dräger für die Vergleichsreferenz, die zwei unterschiedlichen thermischen Belastungsprofile sowie einen Behälter mit Schutzhülle.....	32
Abb. 28: Stichprobenauswertung der Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. Dräger für die Vergleichsreferenz und die zwei unterschiedlichen thermischen Belastungsprofile.....	33
Abb. 29: Prüfmuster der Fa. Dräger nach mittlerer thermischer Bestrahlung ($T_{\text{Grund}}=80^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{Max}}=110^{\circ}\text{C}$) (oben) und Detailansicht (unten)	34

Abb. 30: Prüfmuster der Fa. Dräger nach hoher thermischer Bestrahlung ($T_{\text{Grund}}=110^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{Max}}=150^{\circ}\text{C}$) (oben) und Detailansicht (unten)	34
Abb. 31: Vergleichsversuche am Behälter D74 mit Schutzhülle und an dem Funkgeräten MTP850EX in der Jackentasche der Schutzkleidung	35
Abb. 32: Ergebnisse der Vergleichsversuche an Prüfmuster D74 (s. Abb. 31), links: erst Versuchsreihe mittiger Ausrichtung des Funkgerätes in der Jackentasche, rechts: zweite Versuchsreihe mit mittiger Ausrichtung der Atemschutzflasche.....	36
Abb. 33: Ergebnisse der kombinierten Alterung- und Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. Dräger für die Vergleichsreferenz und die zwei unterschiedlichen thermischen Belastungsprofile	37
Abb. 34: Stichprobenauswertung der kombinierten Alterung- und Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. Dräger für die Vergleichsreferenz und die zwei unterschiedlichen thermischen Belastungsprofile	38
Abb. 35: Ergebnisse der Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. CTS für die Vergleichsreferenz und die zwei unterschiedlichen thermischen Belastungsprofile.....	39
Abb. 36: Stichprobenauswertung der Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. CTS für die Vergleichsreferenz und die zwei unterschiedlichen thermischen Belastungsprofile.....	39
Abb. 37: Prüfmuster C52 der Fa. CTS nach hoher thermischer Bestrahlung ($T_{\text{Grund}}=110^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{Max}}=150^{\circ}\text{C}$)	40
Abb. 38: Qualitative Darstellung der Versuchshalterung zum thermischen Durchgehen an Zelle 1 am Beispiel des MXP600 Models.....	42
Abb. 39: Belastungskurve für Akku D17 bei $T_1= 180^{\circ}\text{C}$ und die gemessenen Temperaturen T_2 bis T_4	43
Abb. 40: Erreichen des Abbruchkriteriums von Zellspannung 2 und Abschaltung des Versuchs (Akku D17 bei 180°C)	44
Abb. 41: Anfangs- und Restkapazitäten der der MTP850Ex Akkus nach den verschiedenen statischen Belastungsstufen	44
Abb. 42: Wiederholungsprüfungen der Anfangs- und Restkapazitäten der MTP850Ex Akkus nach den verschiedenen statischen Belastungsstufen	46
Abb. 43: Anfangs- und Restkapazitäten der MTP850Ex Akkus bei der FTTZ-Belastung und bei einer Belastung von 120°C	48
Abb. 44: Anfangs- und Restkapazitäten der MXP600 Akkus bei der FTTZ-Belastung und bei einer Belastung von 120°C	48
Abb. 45: Beispielhaftes Aufblähen des Kunststoffes bei den verschiedenen Lasthorizonten (von links nach rechts: 120°C , 140°C , 160°C , 180°C); Fotos von unterschiedlichen Prüfmustern des Gerätetyps MTP850Ex.....	53
Abb. 46: Anordnung und Position der vier Temperatursensoren T_1 (rechts) bis T_4 (links) am Beispiel der MXP600-Serie	56
Abb. 47: Rückseite Akku MXP600-Serie inklusive Lötfähnchen	56
Abb. 48: Schrittweise Zerlegung eines MTP850Ex (oben) und eines MXP600 (unten) Akkus	57
Abb. 49: Mittels FTIR gemessene Gaskonzentrationen beim thermischen Durchgehen des MTP850 Akku.....	58
Abb. 50: Mittels FTIR gemessene Gaskonzentrationen beim thermischen Durchgehen des MXP600 Akku. TR Zelle bei Zelle 1 und Zelle 2 von vier.	59
Abb. 51: Bilddokumentation der Zerlegung eines defekten Akkus am Funkgerät B10.....	60

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Status des Projektzeitplanes zum Ende des Projektes	10
Tab. 2: Übersicht und Spezifikation aller beschafften Atemschutzflaschen	13
Tab. 3: Übersicht und Spezifikation aller beschafften Funkgeräte.....	14
Tab. 4: Übersicht der durchgeführten Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. Dräger mit und ohne thermische Belastung.....	31
Tab. 5: Übersicht der durchgeführten kombinierten Alterung- und Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. Dräger mit und ohne thermische Belastung.....	37
Tab. 6: Übersicht der durchgeführten Restfestigkeitsuntersuchungen an Typ 4 Behältern der Fa. CTS mit und ohne thermische Belastung	38
Tab. 7: Übersicht der durchgeführten Untersuchungen mit entsprechenden Temperaturhorizonten an den Akkumodellen MTP850Ex und MXP600	41
Tab. 8: Raumtemperaturen bei denen die Kapazitätsmessungen stattgefunden haben	45
Tab. 9: Übersicht der einzelnen Lasthorizonte, den maximalen Temperaturen am Sensor T2 sowie dem Temperatur-Zeit-Integral.....	47
Tab. 10: Hersteller Angaben der in MTP850Ex und in den MXP600 eingebauten Zellen	57