

Druckgasbehälter im Feuer - Auswirkungen im Versagensfall

Rico Tschirschwitz¹, Daniel Krentel¹, Martin Kluge¹

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Fachbereich 2.4 „Konstruktiver Brand- und Explosionsschutz Gase“, Berlin

Es wurden insgesamt 57 Einzelversuche zum Versagen von Druckgasbehältern durchgeführt. Untersucht wurden dabei 11-kg-Propangasflaschen, PKW-Radmuldentanks für LPG sowie CNG-Tanks vom Typ III (Compositetanks mit Aluminiumliner) und Typ IV (Compositetanks mit Polymerliner). Mit 18 hydraulischen Berstversuchen wurde das Versagensverhalten unter kalten Bedingungen charakterisiert. In 39 Unterfeuerungsversuchen mit den gefüllten LPG- und CNG-Tanks, davon 36 mit Tanks ohne Sicherheitseinrichtung, wurde das Behälterversagen durch Brandbeaufschlagung untersucht. Neben verschiedenen Behältermanteltemperaturen und dem Behälterinnendruck wurde auch die Temperatur des gespeicherten Mediums dokumentiert. Dadurch war es möglich, genau zu dokumentieren, unter welchen Bedingungen und bei welchem Zustand der Behälter versagt hat. In einem Großteil der Unterfeuerungsversuche mit Behältern ohne Sicherheitseinrichtungen kam es zur Bildung eines Feuerballs, einer massiven Druck- und Temperaturwirkung auf den Nahbereich sowie einer Vielzahl von Fragmenten im Nah- und Fernbereich. In einer Entfernung von $l = 7$ m wurden Überdrücke von bis zu $p = 0,41$ bar gemessen. In 30 Unterfeuerungsversuchen kam es zur Fragmentierung des Behälters. Dabei konnten 159 Fragmente mit Wurfweite und Masse dokumentiert werden. Die dabei maximal festgestellte Wurfweite eines Fragments lag bei $l = 311$ m.

Nomenklatur

Symbole

A	Fläche (m ²)
d	Durchmesser (mm, μ m)
f	Frequenz (Hz, fps)
h	Höhe (cm)
l	Länge (cm, m)
\dot{m}	Massenstrom (g/min)
p	Druck (bar)
t	Zeit (s, min)
T	Temperatur (Abs. °C, Diff.: K)
V	Volumen (dm ³)

Griechische Symbole

Δ	Differenz
ρ	Dichte (kg/dm ³)

Indices

B	Berst
P	Prüf

Abkürzungen

FG	Füllgrad (%)
UAV	Unmanned Air Vehicle

1 Einleitung und Voruntersuchungen

Das Projekt CoFi-ABV (Complex Fires - Auswirkung von Behälterversagen) ist ein BAM-internes Forschungsvorhaben aus dem Themenfeld Infrastruktur. Seit 2015 wurden in diesem Projekt umfangreiche Untersuchungen zu den Auswirkungen des unfallbedingten Versagens

von Treibstoffbehältern für alternative, gasbasierte Antriebe (CNG¹, LPG², H₂³) durchgeführt. Details zum Projekt wurden bereits in [1-2] beschrieben. Im Wesentlichen werden zwei verschiedene Szenarien betrachtet:

- a) Durch ein externes Feuer wird der Treibstoffbehälter wärmebeaufschlagt, die Sicherheitseinrichtung ist defekt/spricht nicht an, der Behälter versagt.
- b) Der Treibstoffbehälter hat eine Leckage, der brennbare, gasförmige Treibstoff strömt aus, dieser bildet mit dem umgebenden Luftsauerstoff ein explosionsfähiges Gemisch, welches durch eine externe Zündquelle zur Umsetzung gebracht wird.

Dieser Beitrag stellt im Weiteren die experimentellen Untersuchungen und Ergebnisse des unter a) beschriebenen Szenarios vor. Wesentliche Ergebnisse wurden bereits einzeln in [3-6] publiziert.

Die meisten Kraftfahrzeuge in Deutschland nutzen Ottokraftstoff und Diesel als Treibstoff. Darüber hinaus gibt es einen gewissen Anteil an Fahrzeugen in Deutschland, welche LPG (2018 ca. 420.000 bzw. 0,9 %) oder CNG (2018 ca. 75.000 bzw. 0,16 %) als Treibstoff nutzen [7]. Global betrachtet gibt es auch Länder mit einem deutlich höheren Anteil an gasförmigen Treibstoffen. So ist der Anteil an LPG-Fahrzeugen am Gesamtbestand an Kraftfahrzeugen in Südkorea (2017: 2.12 Mio. bzw. 10 %), der Türkei (2017: 4.6 Mio. bzw. 40 %) und in Polen (2017: 3.1 Mio. bzw. 12 %) deutlich größer [8]. Die meisten CNG-Fahrzeuge weltweit gab es 2017 in China (5.4 Mio.), im Iran (4 Mio.) sowie in Indien und Pakistan (je 3 Mio.) [9]. Immer wieder gibt es auch Unfälle, bei denen es zu einem Versagen des Gastanks kommt. Die Häufigkeit dieser Unfälle hängt hauptsächlich vom Anteil der mit gasförmigem Treibstoff betriebenen Fahrzeuge ab. So gibt es z. B. eine Vielzahl von dokumentierten Unfällen mit CNG-Fahrzeugen in Pakistan [10]. Aber auch in Deutschland bzw. Ländern mit einem vergleichbar hohen Sicherheitsstandard kommt es immer wieder zu Zwischenfällen mit dem Versagen von Tanks für alternative, gasförmige Treibstoffe (vgl. Tabelle 1).

Die in Tabelle 1 aufgeführten Unfallbeispiele zeigen, dass von wärmebeaufschlagten Behältern für alternative Treibstoffe erhebliche Gefahren ausgehen, wenn der sich aufbauende Überdruck im Behälter nicht ausreichend abgebaut werden kann, wie es etwa in komplexen Unfallszenarien durch Beschädigungen oder Deformationen der Fall sein kann. Einsatzkräfte von Feuerwehr und Rettungsdienst sind in solchen Fällen erheblichen zusätzlichen Risiken ausgesetzt. Zur Quantifizierung dieser Gefahren wurden im Rahmen von CoFi-ABV verschiedene Behälter ohne Sicherheitseinrichtung unter vergleichbaren Bedingungen unterfeuert und zum Versagen gebracht. Sowohl die Bedingungen zum Versagenszeitpunkt als auch die Konsequenzen durch das Versagen wurden betrachtet. Das übergeordnete Ziel dieser Untersuchungen ist es, die potentiellen Auswirkungen bei einem Behälterversagen in Handlungshilfen und Ausbildungsunterlagen für Feuerwehr- und Rettungskräfte einfließen zu lassen. Dadurch soll deren Risiko im Einsatzfall verringert und das Sicherheitsniveau insgesamt erhöht werden.

¹ CNG - Compressed Natural Gas, Erdgas

² LPG - Liquefied Petroleum Gas, Propan/Butan

³ H₂ - Wasserstoff

Tabelle 1: Beispiel für Unfälle, bei denen es durch externe Wärmeeinwirkung zu einem Versagen des CNG-/LPG-Tanks kam.

Unfallbeschreibung	Abbildung	Quelle
<ul style="list-style-type: none"> - 08/2014, Rohlstorf (SH), Deutschland - PKW mit LPG-Radmuldentank (Typ I) kollidiert mit einem Baum, PKW beginnt zu brennen - nach dem Eintreffen der Feuerwehr und zu Beginn der Löschmaßnahmen kommt es zum Tankversagen - fünf Feuerwehrleute erleiden schwere und fünf weitere leichte Verletzungen 		[11]
<ul style="list-style-type: none"> - 01/2015, Indianapolis (IN), USA - Brand eines mit CNG (Behälter Typ IV) angetriebenen Müllfahrzeuges - t = 33 min nach der Meldung des Feuers versagt ein Tank - ein Feuerwehrmann leicht verletzt - Trümmerwurfweiten von l = 1200 m 		[12]
<ul style="list-style-type: none"> - 03/2007, Seattle (WA), USA - Brand eines mit CNG (Behälter Typ III) angetriebenen PKW - bei Eintreffen der Feuerwehr versagt der Behälter - keine Verletzten, insgesamt zwölf PKW zerstört oder beschädigt 		[13]
<ul style="list-style-type: none"> - 06/2012, Warburg (NW), Deutschland - PKW mit LPG-Radmuldentank (Typ I) in Vollbrand - kurz vor Eintreffen der Feuerwehr kommt es zum Behälterversagen - keine Verletzten, das Dach des PKW wird vollständig abgerissen 		[14]

2 Experimentelles

2.1 Versuche

In Tabelle 2 sind alle durchgeführten Versuche aufgeführt. Insgesamt wurden 36 Versuche mit Behältern vom Typ I, 13 Versuche mit Behältern vom Typ III und 8 Versuche mit Behältern

vom Typ IV durchgeführt. Mit dem Typ wird der prinzipielle Aufbau des Behälters beschrieben. Für CNG-Behälter sind die einzelnen Typen in der ISO 11439 festgelegt. Ein Typ-1-Behälter besteht demnach vollständig aus Metall. Ein Behälter des Typs II besteht ebenfalls vollständig aus Metall, ist jedoch am zylindrischen Teil des Mantels mit Composite verstärkt. Tanks der Typen III und IV sind vollständig mit Compositematerial umwickelt, wobei bei einem Tank des Typ III der Liner (innenliegende Schicht des Behälters für die Gasdichtheit) aus Metall besteht und bei einem Typ-IV-Tank der Liner aus Kunststoff besteht [15].

Tabelle 2: Durchgeführte Versuche zum Versagen von Behältern für alternative Treibstoffe durch Brandbeaufschlagung mit und ohne Sicherheitseinrichtung.

Nr. der Versuchsreihe	1	2	3	4
Behälter	11-kg-Propangasflasche (Typ I)	LPG-Radmuldentank (Typ I)	CNG-Tank Typ III	CNG-Tank Typ IV
Abmessungen [cm]	h = 60,0 d = 30,0	d = 65,4 (außen) h = 24,5	l = 82,0 d = 40,0	l = 80,5 d = 31,1
Bruttovolumen [dm ³]	27,2	63,8	49,0	46,0
Nettogewicht Tank [kg]	11,5	26,4	20,5	15,0
Maximale Füllmenge	11 kg C ₃ H ₈	25,5 kg C ₃ H ₈	12,2 Nm ³ CH ₄	11,2 Nm ³ CH ₄
Hydraulische Berstversuche [Anzahl]	5	3	5	5
Versuche Unterfeuerung mit Sicherheitseinrichtung [Anzahl x Füllgrad in %]	-	1 x 100% 1 x 60% 1 x 20%	-	-
Versuche Unterfeuerung ohne Sicherheitseinrichtung [Anzahl x Füllgrad in %]	15 x 100% ¹	5 x 100% ¹ 5 x 20% ¹	5 x 100% 3 x 20%	3 x 100%
Σ Versuche	20	16	13	8
	57			

¹ 100 % Füllgrad bei Flüssiggas: Das Volumen des Tanks ist real zu 80 % gefüllt.

2.2 Aufbau

2.2.1 Vorversuche zur Unterfeuerungsart

Vor den eigentlichen Versuchen zur Behälterunterfeuerung wurden in einer Versuchsreihe drei verschiedene Unterfeuerungsmethoden hinsichtlich des effektiven Wärmeeintrages miteinander verglichen. Dazu wurde ein wasserdurchströmter Flaschendummy ($V = 94 \text{ dm}^3$) über der Feuerquelle positioniert. Neben dem Massenstrom des durchströmenden Wassers wurde die Temperatur am Ein- und Austritt des Flaschendummys aufgezeichnet. Die zu vergleichenden Unterfeuerungsarten waren dabei ein Holzfeuer in Anlehnung an den UN-6-(c)-Test [16] ($A = 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, Volumen Holz $V = 0,85 \text{ m}^3$, Abb. 1, links), ein Poolfeuer ($A = 1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$, $V = 100 \text{ dm}^3$ Benzin, Abb. 1, mittig) und ein Gasfeuer (20 Brennerdüsen, Propanmassenstrom pro Düse $\dot{m} = 180 \text{ g/min}$, Abb. 1, rechts).

Wesentliche Erkenntnisse dieser Vorversuche sind, dass das Holzfeuer einen ca. doppelt so hohen Energieeintrag in den Flaschendummy liefert gegenüber dem gewählten Pool. Die

Leistung des Gasfeuers liegt etwas oberhalb des Poolfeuers, jedoch auch noch deutlich geringer als die des Holzfeuers. Ein weiterer wichtiger Punkt im Vergleich der verschiedenen Unterfeuerungsarten ist der Beginn der eigentlichen Unterfeuerung. Sowohl beim Pool- als auch beim Gasfeuer ist direkt nach der Entzündung eine homogene Wärmequelle über die gesamte Feuerungsfläche vorhanden. Hingegen ist beim Holzfeuer eine gewisse, auch von den Umgebungsbedingungen abhängende Ausbreitungszeit notwendig, bis der gesamte Holzstapel entzündet ist und die Wärmeabgabe über die volle Fläche erfolgen kann.



Abbildung 1: Quantifizierung verschiedener Unterfeuerungsmethoden, Holzfeuer (links), Benzinpoolfeuer (mittig), Gasfeuer (rechts), je mittig hängend im Feuer der wasserdurchströmte Flaschendummy.

Um die in dieser Vorversuchsreihe gewonnenen Erkenntnisse zu verifizieren, wurden in der Versuchsreihe 1 (vgl. Tabelle 2) je 5 Versuche mit den drei verschiedenen Methoden unter ansonsten identischen Versuchen durchgeführt. Um die Entwicklungszeit des Holzfeuers nach der Entzündung zu berücksichtigen, wurde für die Auswertung als Beginn der Unterfeuerung ein Temperaturschwellenkriterium von $\Delta T = 5 \text{ K}$ an der Unterseite des Behälters definiert. Unter diesem Aspekt war kein signifikanter Einfluss der Unterfeuerungsart auf das Tankversagen feststellbar. Daher wurde für die Versuchsserien 2-4 (vgl. Tabelle 2) als Unterfeuerungsart der Benzinpool gewählt. Gerade bei einem Szenario eines Verkehrsunfalles bei dem ein Fahrzeug mit Gasantrieb mit einem Fahrzeug mit konventionellem Antrieb (z. B. Benzin, Diesel) zusammenstößt und der flüssige Treibstoff sich entzündet, stellt das Poolfeuer die realistischste Unterfeuerungsalternative dar.

2.2.2 Hydraulische Berstversuche

Neben den Unterfeuerungsversuchen wurden in jeder der vier Versuchsserien auch hydraulische Berstversuche durchgeführt. Ziel war es hier zum einen, im Nachgang der Versuche den Einfluss des Wärmeeintrages bei der Unterfeuerung näher zu betrachten (Vergleich warmes und kaltes Versagen). Zum anderen soll mit diesen Versuchen nachgewiesen werden, dass die in den Versuchsserien verwendeten LPG-Tanks den Vorgaben der Regelung UN-ECE R67 entsprechen. Demnach müssen die Tanks einem Prüfdruck von $p_P = 30 \text{ bar}$ Stand halten, ohne dass es zu einer dauerhaften Verformung oder Leckagen kommt. Der Berstdruck darf nicht geringer als das 2,25-fache des Prüfdrucks sein, also $p_B = 2,25 \times 30 \text{ bar} = 67,5 \text{ bar}$ [17]. Die Regelungen der ECE-R67 betreffen eigentlich nur LPG-Fahrzeugtanks (Versuchsreihe 2, vgl. Tabelle 2). Jedoch wurden die Berstdrücke der Propangasflaschen (Versuchsreihe 1, vgl. Tabelle 2) auf die gleiche Weise bestimmt. Dabei wird der zu prüfende Behälter mit Wasser gefüllt, entlüftet und mit einer kontinuierlich arbeitenden Druckerzeugungsanlage verbunden. Der Druck wird an der Zuleitung zum Behälter gemessen (Messbereich Druckaufnehmer $p = 500 \text{ bar}$, Genauigkeit 0,13 % bezogen auf den Messbereichsendwert). Die Druckanstiegsgeschwindigkeit während der Versuche lag bei $dp/dt = 10 \text{ bar/min}$.

Für die CNG-Tanks in den Versuchsreihe 3 und 4 (vgl. Tabelle 2) wurden die hydraulischen Berstversuche auf Grundlage der UN-ECE R110 durchgeführt [18]. Der prinzipielle Versuchsablauf stimmt mit dem bereits beschriebenen Versuchsablauf überein. Jedoch wurde ein Druckaufnehmer mit einem Messbereichsendwert von $p = 3000 \text{ bar}$ und einer Genauigkeit von

0,23 % bezogen auf den Messbereichsendwert verwendet. Die Druckanstiegsgeschwindigkeit in diesen Versuchen lag bei $dp/dt = 1 \text{ bar/min}$. Sämtliche Versuche wurden bei einer Temperatur von $T = 20 \pm 5 \text{ °C}$ durchgeführt.

2.2.3 Unterfeuerungsversuche

Für alle 39 Unterfeuerungsversuche sah der prinzipielle Versuchsaufbau gleich aus. Die zu unterfeuernden Tanks hatten keine Sicherheitseinrichtung, welche dem Aufbau eines Überdrucks bis zum Versagen entgegenwirkte. Die Tanks wurden auf Achsstützen in eine Stahlwanne (A = 1,5 m x 1,5 m) positioniert, welche im Weiteren mit $V = 100 \text{ dm}^3$ Benzin gefüllt wurde. Der jeweilige Tank befand sich in einer Höhe von $h \approx 25 \text{ cm}$ über dem Flüssigkeitslevel. An jedem Tank wurden 3 Thermoelemente (unten, mittig, oben, je Typ K, je $d = 1,5 \text{ mm}$) schweißtechnisch auf der Oberfläche angebracht, um die Behältermanteltemperatur zu messen (vgl. Abb. 3, Nr. 2). Weitere drei Thermoelemente wurden jeweils in einem Abstand von $l = 3 \text{ cm}$ von der Behälteroberfläche angebracht (unten, mittig, oben, je Typ K, je $d = 3 \text{ mm}$), um die Flammentemperatur aufzuzeichnen (vgl. Abb. 3, Nr. 3). In jeden Behälter wurde ein Thermoelement (Typ K, $d = 1,5 \text{ mm}$) in den Behälter eingebracht, um die Innentemperatur während des Versuches zu messen (vgl. Abb. 3, Nr. 4). In den Versuchsreihen 1 und 2 wurde das Thermoelement so positioniert, dass zu Beginn des Versuches die Temperatur der Flüssigphase gemessen wurde. Weiterhin wurde während der Versuche der Behälterinnendruck aufgezeichnet (piezoresistiver Druckaufnehmer, Versuchsserie 1 und 2 Messbereich $p = 100 \text{ bar}$, Genauigkeit 0,5 % bezogen auf Messbereichsendwert, Versuchsserie 3 und 4 Messbereich $p = 400 \text{ bar}$, Genauigkeit 0,5 % bezogen auf Messbereichsendwert).

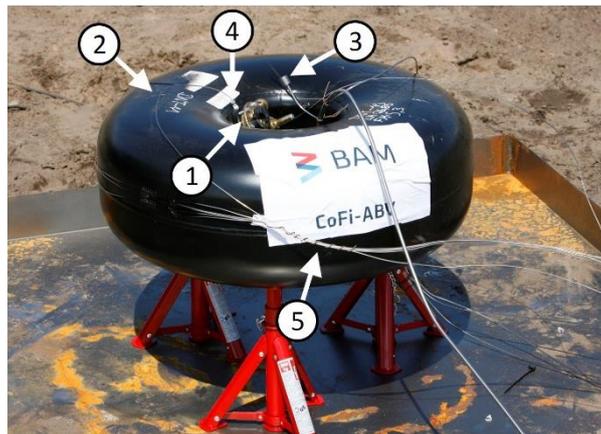


Abbildung 2: Versuchsaufbau im Detail mit einem vorbereiteten LPG-Radmuldentank (Versuchsserie 2, vgl. Tabelle 2), positioniert in einer Stahlwanne für die Unterfeuerung mit einem Benzinpool, am Radmuldentank: Adapterplatte (1) für das Ventil (nicht installiert), Thermoelement Behältermanteltemperatur Oberseite (2), Thermoelement Flammentemperatur Oberseite (3), Thermoelement Flüssigphasentemperatur im Tank (4) sowie die weiteren Thermoelementleitungen für die Behältermanteltemperaturen mittig und unten sowie die Flammentemperaturen mittig und unten.

Um die Auswirkungen des Behälterversagens auf die Umgebung zu quantifizieren, wurden in Abständen von $l = (7; 9; 11) \text{ m}$ sowohl der auftretende Überdruck als auch die Temperaturwirkung gemessen (vgl. Abb. 3). Für die Druckmessung wurden piezoresistive Druckaufnehmer (Messbereichsendwert $p = 2 \text{ bar}$, Genauigkeit 0,25 % bezogen auf den Messbereichsendwert) verwendet. Die Membranen dieser Druckaufnehmer haben einen Durchmesser von $d = 15 \text{ mm}$ und waren in den Versuchen orthogonal zu einer auftretenden Druckwelle orientiert. Für die Temperaturmessung wurden Thermoelemente (Typ K, $d = 1,5 \text{ mm}$) verwendet, deren Messspitzen entmantelt wurden, wodurch die effektive Messspitze einen Durchmesser von $d = 160 \text{ }\mu\text{m}$ hatte. Sämtliche verwendeten Thermoelemente hatten eine Genauigkeit entsprechend der EN 60584 [18].

Für die Messwertaufzeichnung wurden zwei identische Messkarten (Agilent U2355A) verwendet. Mit einer Messkarte wurden mit einer Abtastrate von $f = 100$ Hz die Temperaturen des Behältermantels und der Flammen um den Behälter sowie die Temperatur im Behälter gemessen. Mit der zweiten Messkarte und $f = 1000$ Hz wurden die Drücke und die Temperaturen in der Umgebung (entmantelte Thermolemente) aufgezeichnet. Jeder Versuch wurde mit 7 verschiedenen Kameras aufgezeichnet. Neben Kameras im Nahbereich ($l = (9; 11)$ m) wurden weitere Kameras in $l = 100$ m sowie zwei Kameras in $l = 200$ m positioniert. Ebenfalls in einer Entfernung von $l = 200$ m wurde eine High-Speed-Kamera mit $f = 1000$ fps verwendet. Für die Gesamtübersicht kam eine weitere Kamera an einem UAV zum Einsatz.

Abweichend von dem bisher beschriebenen experimentellen Aufbau wurden in einigen Versuchen Teile des Versuchsaufbaus abgeändert. Dies waren:

- In der Versuchsserie 1 wurden nur 5 Behälter mit einem Poolfeuer unterfeuert. Je 5 weitere Versuche wurden mit einem Holzfeuer (vgl. Abb. 3) und je 5 Versuche mit Gasfeuer durchgeführt (vgl. auch Abschnitt 2.2.1).
- In der Versuchsserie 2 wurde 3 Versuche mit LPG-Radmuldentanks mit Sicherheitseinrichtung durchgeführt.
- In der Versuchsserie 1 betrug die Abstände der Stative für die Druck- und Temperaturmessung in der Umgebung $l = (5; 7; 9)$ m anstatt $l = (7; 9; 11)$ m.



Abbildung 3: Genereller Aufbau der Unterfeuerungsversuche, im Hintergrund eine 11-kg-Propangasflasche mit einem vorbereiteten Holzfeuer (Versuchsserie 1, vgl. Tabelle 2), im Vordergrund 3 Stative mit Druck- und Temperatursensoren für die Messung der Wirkung des Behälterversagens auf die Umgebung.

3 Ergebnisse

3.1 Hydraulische Berstversuche

Es wurden insgesamt 18 hydraulische Berstversuche durchgeführt. In der Tabelle 3 sind die Berstdrücke für die Einzelversuche je nach Versuchsreihe aufgeführt. Die Behälter der Versuchsserien 1 und 2 weisen deutlich geringere hydraulische Berstdrücke auf, als die Behälter der Serien 3 und 4. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass es sich bei den Behältern der Serien 1 und 2 um Behälter für Flüssiggas handelt. Propan, als Hauptkomponente von LPG [20], hat bei $T = 20$ °C einen Dampfdruck von $p = 8,4$ bar [21]. Hingegen sind die CNG-Tanks der Versuchsserien 3 und 4 für einen Fülldruck von $p = 200$ bar ausgelegt.

Tabelle 3: Berstdrücke der einzelnen hydraulischen Berstversuche je Versuchsreihe.

Nr. Versuchsserie (Behältertyp)	1 (11-kg-Propan-gasflasche)	2 (LPG-Radmuldentank)	3 (CNG Typ III)	4 (CNG Typ IV)
Berstdrücke der Einzelversuche [bar]	107	90	1028	586
	111	94	1008	586
	109	89	975	576
	107		841	564
	107		992	577

3.2 LPG-Radmuldentanks mit Sicherheitseinrichtung

Im Rahmen der Versuchsserie 2 wurden drei Einzelversuche mit LPG-Radmuldentanks, die mit Mehrfachventilen als Sicherheitseinrichtung ausgestattet waren, durchgeführt (vgl. Tabelle 2). Diese Mehrfachventile besitzen sowohl ein TPRD (thermal pressure relief device, dt.: Druckentlastungseinrichtung) als auch ein PRV (pressure relief valve, dt.: Druckentlastungsventil). Der Ansprechdruck des PRD wird mit $p = 27$ bar angegeben. Das TPRD soll bei einer Temperatur von $T = 120 \text{ °C} \pm 10 \text{ K}$ öffnen. In Abbildung 4 sind die Druck-Zeit-Kurven der drei Versuche aufgeführt. In allen drei Versuchen hat das Mehrfachventil den durch den Wärmeeintrag generierten Überdruck zuverlässig abgeführt. Es ist gut zu sehen, dass in allen drei Versuchen zunächst das PRV anspricht (bei ca. $p = 25$ bar) und zunächst mehrfach öffnet und schließt und dadurch den Druckanstieg begrenzt. Im weiteren Verlauf öffnet die das TPRD durch die weitere Erwärmung und führt zu einer Entleerung des Behälters auf Umgebungsdruck. Es wurden Versuche mit drei unterschiedlichen Füllgrade (20%, 60%, 100 %) durchgeführt. Erwartungsgemäß öffnen die PRV in allen drei Fällen nahezu beim identischen Druck. Die Abblasedauer nach Öffnen des TPRD nimmt mit steigendem Füllgrad entsprechend zu.

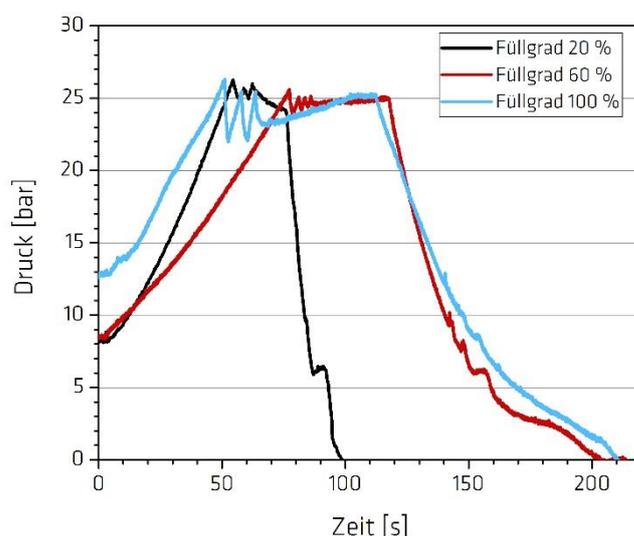


Abbildung 4: LPG-Radmuldentanks im Feuer, Tanks ausgestattet mit Mehrfachventilen als Sicherheitseinrichtung (PRD und PRV), Tankinnendruck über der Zeit.

3.3 Behälterversagen

3.3.1 Zeit bis zum Versagen

In der Serie 1 wurden 15 Propangasbehälter auf drei verschiedene Arten unterfeuert. Die Zeit bis zum Versagen liegt dabei in einem Bereich von $t = (70 - 152)$ s. Für die Startzeit bei der Holzunterfeuerung wurde nicht der eigentliche Entzündungszeitpunkt verwendet, sondern ein Temperaturkriterium, ab dem die Unterfeuerung vergleichbar zu den anderen Feuerarten entwickelt war, vgl. Abschnitt 2.2.1. In dieser Serie ist eine Abhängigkeit der Versagensdauer von der Art der Unterfeuerung nicht feststellbar. Daraufhin wurden die weiteren Untersuchungen mit einem Benzin-Poolfeuer durchgeführt.

Tabelle 4: Dauer bis zum Versagen sowie durchschnittliche Dauer bis zum Versagen für alle Versuche einer Serie unter den gleichen Bedingungen (Unterfeuerungstyp, Füllgrad (FG)).

Serie 1 (11-kg-Propangasflaschen)			Serie 2 (LPG-Radmuldentanks)			Serie 3 (CNG Typ III)			Serie 4 (CNG Typ IV)		
Feuer/FG	t [s]	Ø t [s]	Feuer/FG	t [s]	Ø t [s]	Feuer/FG	t [s]	Ø t [s]	Feuer/FG	t [s]	Ø t [s]
Holz/ 100%	152	115	Pool/ 100%	293	210	Pool/ 100%	202	229	Pool/ 20%	- 1	-
	123			168			257			- 1	
	101			246			228			- 1	
	97			191			232			- 1	
	100			152			224				
Pool/ 100%	148	120	Pool/ 20%	219	238	Pool/ 20%	- 1	-			
	138			250			759				
	70			252			817				
	108			223							
	138			246							
Gas/ 100%	107	131									
	142										
	143										
	146										
	115										

¹ kein klassisches Behälterversagen

Sowohl für die Radmuldentanks in der Serie 2 als auch die zu 100 % gefüllten CNG-Tanks vom Typ III der Serie 3 liegen die Versagenszeiten im Bereich $t = (152-293)$ s. Die zu 20 % gefüllten Typ-3-Tanks haben nicht auf die gleiche Art und Weise versagt. In zwei Fällen hat in einer Zeit von $t = (759-817)$ s ein Gewindeverschluss an einer der Endkappen versagt und den Behälter entlastet. Beim dritten Versuch unter diesen Bedingungen kam es im Verlaufe der Unterfeuerung zu einer geringen Undichtigkeit an einem der Gewindeverschlüsse mit einem latenten Druckabfall. Dieser Versuch wurde im weiteren Verlauf abgebrochen. In der Serie 4 haben die drei untersuchten Behälter nicht im klassischen Sinne versagt. Durch das Wegschmelzen des Polymerliners kam es hingegen zu einer großflächigen Undichtigkeit mit einem Austritt des Behälterinhaltes über einen längeren Zeitraum.

3.3.2 Zustand zum Zeitpunkt des Versagens

In Tabelle 5 sind die durchschnittlichen Temperaturen an der Behälterunterseite, an der Behälterflanke (mittig) und an der Behälteroberseite zum Versagenszeitpunkt dargestellt. In den Versuchen der Serie 1 sowie den zu 100 % gefüllten Radmuldentanks der Serie 2 ist die Behälterwandung an der Oberseite deutlich heißer als an der Flanke oder der Unterseite. Bei den übrigen Versuchen ist der Temperaturgradient umgekehrt, mit einer teilweise deutlich heißeren Unterseite im Vergleich zur Oberseite.

Tabelle 5: Temperatur des Behälters zum Versagenszeitpunkt an drei verschiedenen Positionen (oben, mittig, unten), Durchschnitt für alle Versuche einer Serie unter den gleichen Bedingungen (Unterfeuerungsart, Füllgrad (FG)).

Serie	Feuer/ FG	Ø T [°C] oben	Ø T [°C] mittig	Ø T [°C] unten
Serie 1 (11-kg-Propan- gasflaschen)	Holz/ 100%	393	164	141
	Pool/ 100%	308	192	258
	Gas/ 100%	379	166	166
Serie 2 (LPG-Rad- muldentanks)	Pool/ 100%	391	243	249
	Pool/ 20%	400	456	496
Serie 3 (CNG Typ III)	Pool/ 100%	485	704	710
	Pool/ 20% ¹	501	688	740
Serie 4 (CNG Typ IV)	Pool/ 100%	- ²	- ²	- ²

¹ Drei Versuche, davon einer ohne Versagen, für den Durchschnitt die Temperatur beim Versuchsabbruch

² Kein Versagen im klassischen Sinne

Dass die Unterseite kälter ist als der obere Teil des Behälters, obgleich die Beflammung an der Unterseite deutlich intensiver ist, liegt am Zustand des Propan/LPG als druckverflüssigtes Gas. Während im oberen Teil des Behälters der Inhalt als Gasphase vorliegt, befindet sich im unteren Teil Flüssigphase. Die Flüssigphase weist eine deutlich höhere Wärmekapazität im Vergleich zur Gasphase auf. Zudem erwärmt sie sich zunächst nur bis zur Siedetemperatur entsprechend dem jeweiligen Innendruck. Die zugeführte Energie (Flamme) wird jetzt für die Verdampfung benötigt, wodurch die Wandung im Bereich der Flüssigphase deutlich kühler bleibt als der Gasraum. Die Flüssigphase im unteren Behälterteil kühlt somit die Wandung.

Lediglich bei den zu 20 % gefüllten Radmuldentanks der Serie 2, obwohl mit LPG gefüllt, ist die Unterseite heißer. Dies lässt sich jedoch mit dem geringen Füllgrad erklären. Die 20 % Füllmenge ist bereits nach kurzer Zeit verdampft, sodass nur noch Gasphase vorhanden ist. Eine „Kühlung“ der Wandung durch die Flüssigphase entfällt folglich. Bei den CNG-Behältern ist der Behälterinhalt von vornherein gasförmig. Daher ist der Temperaturgradient der Wandung auch proportional zur Intensität der Beflammung (unten intensivere Beflammung, daher Behälterwandung auch heißer als oben).

Neben der Temperatur der Behälterwandung wurde auch der Innendruck der unterfeuerten Behälter aufgezeichnet. In der Tabelle 6 sind die Werte für die einzelnen Versuchsserien dargestellt. Sowohl die 11-kg-Propangasflaschen als auch die LPG-Radmuldentanks haben einen Berstdruck im Bereich von $p \approx 80$ bar ($p = (69-91)$ bar). Der Ausgangsdruck vor der Unterfeuerung (Dampfdruck Propan bei $T = 20^\circ\text{C}$) lag bei $p \approx 8,4$ bar.

Der Startdruck der zu 100 % gefüllten CNG-Tanks vom Typ III lag bei $p = 200$ bar. Der Versagensdruck hingegen lag in einem Bereich von $p = (291-333)$ bar. Der Anfangsdruck der zu 20 % gefüllten Tanks lag bei $p = 40$ bar, der Versagensdruck im Mittel bei $p = 61$ bar.

Tabelle 6: Druck beim Versagen sowie durchschnittlicher Druck beim Versagen für alle Versuche einer Serie unter den gleichen Bedingungen (Unterfeuerungsart, Füllgrad (FG)).

Serie 1 (11-kg-Propangasflaschen)			Serie 2 (LPG-Radmuldentanks)			Serie 3 (CNG Typ III)			Serie 4 (CNG Typ IV)		
Feuer/FG	p [bar]	Ø p [bar]	Feuer/FG	p [bar]	Ø p [bar]	Feuer/FG	p [bar]	Ø p [bar]	Feuer/FG	t [s]	Ø t [s]
Holz/100%	80,0	79,3	Pool/100%	- ¹	74,5	Pool/100%	291	317	Pool/20%	- ²	-
	86,5			75,9			305			- ²	
	79,7			75,1			330			- ²	
	75,7			69,3			325			- ²	
	74,6			77,6			333		- ²		
Pool/100%	86,2	81,4	Pool/20%	78,5	79,2	Pool/20%	- ²	61,0			
	82,1			78,1			68,4				
	70,7			79,8			53,6				
	86,9			81,0							
	80,4			78,4							
Gas/100%	90,9	88,7									
	81,1										
	86,8										
	98,2										
	86,4										

¹ Ausfall Drucksensor

² kein klassisches Behälterversagen

3.3.3 Behälterversagen: Auswirkungen auf die Umgebung

Schwerpunkt der gesamten Untersuchungen war die Betrachtung der Auswirkungen bei einem Behälterversagen auf die Umgebung. Dazu wurden neben der Druck- und Temperaturwirkung auf die Umgebung auch ein Großteil der Fragmente dokumentiert. In der Tabelle 7 sind die Druckwerte für je drei verschiedene Abstände aufgeführt. Zum Schutz der Messtechnik wurde nach der Serie 1 der Abstand vom unterfeuerten Behälter zum ersten Stativ um $\Delta l = 2$ m vergrößert. Über alle Versuche ist sehr gut zu erkennen, dass sich die Druckwirkung auf die Umgebung mit Vergrößerung des Abstandes verringert. Ein Vergleich zwischen den unterschiedlichen Unterfeuerungsarten der Serie 1 zeigt auch, dass in geringer Distanz ($l = 5$ m) ein deutlicher Unterschied feststellbar ist, welcher jedoch mit Vergrößerung der Entfernung abnimmt. Es ist auch gut zu erkennen, dass die Druckwerte für die zu 100 % gefüllten Radmuldentanks in der gleichen Größenordnung liegen, wie die Werte der 11-kg-Propangasflaschen. Die mehr als doppelt so große Menge an Brenngas hat also keinen Einfluss auf die Druckwirkungen. Hingegen ist der auftretende Überdruck beim Versagen bei den zu 20 % gefüllten Radmuldentanks mehr als doppelt so groß als der Druck bei den zu 100 % gefüllten Tanks. Die höhere Druckwirkung der zu 20 % gefüllten Radmuldentanks ergibt sich daraus, dass zum Versagenszeitpunkt das gesamte flüssige Propan bereits verdampft ist und damit eine größere Menge an komprimiertem Gas gespeichert ist.

Gegenüber den Versuchen der mit Flüssiggas gefüllten Behälter ergeben sich deutlich höhere Überdrücke in der Umgebung beim Versagen der Typ-III-CNG-Behälter. Der Maximalwert in einer Entfernung von $l = 7$ m lag bei $p = 0,41$ bar, der Durchschnitt über vier Versuche bei $p = 0,30$ bar. In den übrigen Versuchen mit CNG-Behältern (zu 20 % gefüllte Typ-III-Behälter, zu 100 % gefüllte Typ-IV-Behälter) kam es entweder zu keiner messtechnisch erfassten Überdruckwirkung oder der Behälter hat nicht im klassischen Sinne versagt, sondern wurde über eine Undichtigkeit entlastet.

Tabelle 7: Durchschnitt des maximal gemessenen Drucks nach Behälterversagen in einer Entfernung von $l = (5; 7; 9)$ m bzw. $l = (7; 9; 11)$ m für alle Versuche einer Serie unter den gleichen Bedingungen (Unterfeuerungsart, Füllgrad (FG)).

Serie	Feuer/ FG	$l = 5$ m $\bar{\sigma}_p$ [bar]	$l = 7$ m $\bar{\sigma}_p$ [bar]	$l = 9$ m $\bar{\sigma}_p$ [bar]	$l = 11$ m $\bar{\sigma}_p$ [bar]
Serie 1 (11-kg-Propan- gasflaschen)	Holz/ 100%	0,07	0,06	0,05	-
	Pool/ 100%	0,16	0,11	0,07	-
	Gas/ 100%	0,11	0,09	0,06	-
Serie 2 (LPG-Rad- muldentanks)	Pool/ 100%	-	0,10	0,05	0,04
	Pool/ 20%	-	0,20	0,12	0,09
Serie 3 (CNG Typ III)	Pool/ 100%	-	0,30 ¹	0,20 ¹	0,12 ¹
	Pool/ 20%	-	- ²	- ²	- ²
Serie 4 (CNG Typ IV)	Pool/ 100%	-	- ²	- ²	- ²

¹ Durchschnitt aus 4 Versuchen, beim 5. Versuch abweichender Abstand

² Kein Druckpeak feststellbar

Neben dem Druck wurde an den gleichen Stellen je auch die instantane Temperatur gemessen. Hierfür wurden Thermoelemente mit einem Durchmesser von $d = 1,5$ mm verwendet, deren Messspitze entmantelt wurde. Die gemessenen Temperaturwerte an diesen drei Punkten streuen sehr stark zwischen den einzelnen Versuchen unter gleichen Bedingungen. Als Beispiel sind hier die Versuche mit den zu 100 % gefüllten Radmuldentanks zu nennen. In einer Entfernung von $l = 9$ m wird zwei Mal ein maximaler Wert von $T < 70$ °C und zwei Mal ein maximaler Wert von $T > 800$ °C erreicht. Diese differierende Temperaturwirkung zeigt sich auch bei den zu 20 % gefüllten Radmuldentanks (z. B. $l = 7$ m: zwei Mal $T > 850$ °C, drei Mal $T < 100$ °C) und den zu 100 % gefüllten CNG-Behältern vom Typ III (z. B. $l = 7$ m: zwei Mal $T > 1000$ °C, drei Mal $T < 110$ °C). Hauptursache für diese uneinheitliche Temperaturwirkung auf die Umgebung ist die Art und Weise wie bzw. die Richtung, in der der Behälter sich öffnet. Dadurch kann es sein, dass der Behälterinhalt genau in die Richtung des Messstative freigesetzt wird bzw. der entstehende Feuerball die Stative erfasst oder aber das die Stative nicht erfasst werden. Jedoch geben die in den Einzelversuchen teilweise erreichten Temperaturwerte einen Hinweis darauf, welche Temperaturwirkung auf die Umgebung möglich ist.

Eine weitere zentrale Größe zur Bewertung der Auswirkungen sind die Anzahl und Wurfweiten der Fragmente sowie deren Masse. In Abbildung 5 ist exemplarisch die Fragmentierung direkt nach dem Behälterversagen für einen zu 20 % gefüllten Radmuldentank zu sehen.



Abbildung 5: Fragmentierung direkt nach Behälterversagen, Radmuldentank, Füllgrad 20 %.

In der Tabelle 8 sind als Übersicht dargestellt, wie viele Fragmente aus einer Serie wiedergefunden und dokumentiert wurden. In den Serien, in denen Flüssiggasbehälter unterfeuert wurden, wurden je ca. 90 % der ursprünglichen Masse als Fragment im Nachgang dokumentiert. Diese Quote ist für die 5 Versuche der Serie 3, bei denen der Behälter fragmentierte, mit 65,4 % geringer. Dafür gibt es zwei wesentliche Ursachen. Zum einen besteht ein nicht unerheblicher Anteil der unterfeuerten Behälter aus Compositfasern, welche im Versuchsverlauf verbrannt sind, folglich nach dem Versuch nicht mehr als Masse vorhanden sind. Zum anderen lässt sich anhand von UAV-Aufnahmen vermuten, dass mehr Fragmente eine Wurfweite von $l > 250$ m haben und damit nicht mehr auf dem Sprengplatz, sondern im umgebenden Wald niedergegangen sind. Diese Fragmente wurden dann zum großen Teil nicht wiedergefunden und konnten nicht dokumentiert werden.

Tabelle 8: Anzahl der Fragmente einer jeden Versuchsserie, Anteil der dokumentierten Fragmente an der ursprünglichen Masse der Behälter, max. Wurfweite je Serie sowie Gewicht des Fragments mit der max. Wurfweite.

Serie	Anzahl der Unterfeuerungsversuche	Anzahl der dokumentierten Fragmente	Anteil der dokumentierten Fragmente an der Gesamtmasse	max. Wurfweite [m] (Gewicht des Fragments [kg])
Serie 1 (11-kg-Propan-gasflaschen)	15	60	90,0 %	238 (1,4 kg)
Serie 2 (LPG-Radmuldentanks)	10	50	88,7 %	255 (26,0 kg)
Serie 3 (CNG Typ III)	5 (FG 100 %)	49	65,4 %	311 (1,3 kg)
	3 (FG 20 %)			
Serie 4 (CNG Typ IV)	3		- 1	

¹ Behälter nach Versuch nicht fragmentiert

Wenn es in einer Versuchsserie zu einer Fragmentierung der unterfeuerten Behälter kam, dann lag die maximal dokumentierte Wurfweite je $l > 200$ m. Besonders erwähnenswert in diesem Zusammenhang ist, dass in einem Versuch der Serie 2 ein Radmuldentank mit einem Füllgrad von 100 % aufgerissen und als Gesamtes (Ausgangsgewicht vor Versuch = Fragmentgewicht = 26 kg) über eine Entfernung von $l = 255$ m befördert wurde.

In der Tabelle 9 sind noch einmal die Verteilung aller Fragmente nach Wurfweite und nach dem Gewicht aufgeführt. Es ist deutlich zu erkennen, dass in den Versuchen mit den LPG-Radmuldentanks deutlich mehr Fragmente über $l > 100$ m geflogen sind (38 %, 19 Fragmente) als in den übrigen Versuchsserien (je 18 %). Bei den Versuchen mit den Flüssiggastanks (Serie 1 und 2) ist eine etwa gleichgroße Verteilung der Fragmente festzustellen. Hingegen gibt es bei den CNG-Versuchen deutlich mehr Fragmente mit $m < 1$ kg, in der Summe 78 % bzw. 38 Fragmente. Ursache dafür ist die große Anzahl an Compositestücken, welche über eine große Fläche verteilt worden sind.

Tabelle 9: Verteilung der Fragmente nach Wurfweite und Masse je Versuchsserie.

Serie	Anzahl der Unterfeuerungsversuche	Anteil (Anzahl) Fragmente mit Wurfweite			Anteil (Anzahl) Fragmente mit Gewicht		
		l < 50 m	l = (50-100) m	l > 100 m	m < 1 kg	m = (1-5) kg	m > 5 kg
Serie 1 (11-kg-Propangasflaschen)	15	55 % (33)	27 % (16)	18 % (11)	25 % (15)	60 % (36)	15 % (9)
Serie 2 (LPG-Radmuldentanks)	10	18 % (9)	44 % (22)	38 % (19)	20 % (10)	58 % (29)	22 % (11)
Serie 3 (CNG Typ III)	5 (FG 100 %)	49 % (24)	33 % (16)	18 % (9)	78 % (38)	14 % (7)	8 % (4)
	3 (FG 20 %)	- 1			- 1		
Serie 4 (CNG Typ IV)	3	- 1			- 1		

¹ Behälter nach Versuch nicht fragmentiert

4 Diskussion

4.1 Ergebnisse der hydraulischen Berstversuche

In der Tabelle 3 sind alle Ergebnisse der einzelnen hydraulischen Berstversuche aufgeführt. Für die 11-kg-Propangasflaschen wird der minimale Berstdruck durch die EN 1442 vorgegeben. Demnach müssen diese Behälter einen Berstdruck von mindestens dem 2,25-fachen des Berechnungsdrucks standhalten. Der Berechnungsdruck ist der Dampfdruck des Mediums bei $T = 65 \text{ °C}$, abzüglich $\Delta p = 1 \text{ bar}$. Für Propan ist demnach der Berechnungsdruck $p = 22,25 \text{ bar}$ (Dampfdruck Propan bei $T = 65 \text{ °C}$: $p = 23,25 \text{ bar}$ [21]). Demnach ist der minimal zulässige Berstdruck $p = 2,25 \times 22,25 \text{ bar} = 50,1 \text{ bar}$ [22]. Dieser Wert wird in allen fünf Einzelversuchen der Serie 1 erreicht (vgl. Tabelle 3). Die für die Unterfeuerungsversuche verwendeten 11-kg-Propangasflaschen entsprechen somit den Anforderungen der EN 1442.

Für die Radmuldentanks der Serie 2 ergibt sich der zulässige minimale Berstdruck aus der UN-ECE R67. Darin wird der Einstufungsdruck für die LPG-Tanks mit $p = 30 \text{ bar}$ angegeben. Der minimal zulässige Berstdruck entspricht dem 2,25-fachen des Einstufungsdrucks, folglich $p = 2,25 \times 30 \text{ bar} = 67,5 \text{ bar}$ [17]. Auch die drei identischen Radmuldentanks in den hydraulischen Berstversuchen haben diesen Mindestwert übertroffen (vgl. Tabelle 3).

Die UN-ECE R110 definiert die Anforderungen an die CNG-Automobiltanks. Der minimale Berstdruck muss demnach $p = 450 \text{ bar}$ sein [18]. Diese Anforderung wird ebenfalls durch die verwendeten Tanks, sowohl Typ III als auch Typ IV, in den hydraulischen Berstversuchen erfüllt (vgl. Tabelle 3).

4.2 Fragmentwurf

Die Betrachtung der Fragmente ist eine der zentralen Größen bei den Untersuchungen zu den Auswirkungen. Bei einem Behälterversagen stellen Fragmente mit das größte Risiko für Menschen dar. Während aus dem Überdruck eher im Nahbereich ($l \approx 10 \text{ m}$) eine Gefährdung resultiert (vgl. Tabelle 7), stellen Fragmente auch noch in einer Entfernung von $l > 200 \text{ m}$ eine Gefahr dar (vgl. Tabelle 8). Sowohl was die maximale Wurfweite (vgl. Tabelle 8) als auch die Verteilung der Fragmente über die Wurfweite angeht (vgl. Tabelle 9), lässt sich keine eindeutige Aussage treffen, dass einer der untersuchten Behältertypen der Serien 1-3 bei einem Versagen ein geringeres Gefährdungspotential besitzt.

In den einzelnen Versuchsserien wurden noch verschiedene Beobachtungen bzgl. des Trümmerwurfs gemacht. In einem Versuch mit einem zu 20 % gefüllten Radmuldentank kam es zu einer massiven Fragmentierung des Behälters in insgesamt 6 Hauptteile mit einer Masse von $m = (6,2; 4,6; 4,6; 2,9; 2,8; 1,1)$ kg. Bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist, dass drei dieser Fragmente eine Wurfweite im Bereich von $l = (50-100)$ m hatten, jedoch durch eine sehr steile Parabelflugbahn Flugzeiten von $t = (7; 9; 17)$ s hatten. Diese sehr langen Zeiten stellen ein zusätzliches Risiko dar, da auch nach dem Bersten eines Behälters noch für einen verhältnismäßig langen Zeitraum eine Gefährdung gegeben ist.

Besonders weite Flugbahnen wurden in den Versuchen durch Phänomene erreicht, welche mitunter als „rocketing“ und „frisbeeing“ bezeichnet werden. Mit „rocketing“ ist in diesem Zusammenhang gemeint, dass ein mit einem druckverflüssigten Gas gefüllter Tank partiell aufreißt, der Tankinhalt jetförmig austritt und dabei verdampft und dadurch der Tank, oder große Teile des Tanks, als solches beschleunigt. Dieses Phänomen wurde bereits mehrfach in der Literatur beschrieben [23; 24; 25]. In zwei von fünf Versuchen mit 100 % gefüllten Radmuldentanks kam es zu einem solchen „rocketing“ (vgl. Abbildung 6).



Abbildung 6: "Rocketing" von Fragmenten, Radmuldentanks, FG 100 %, angetrieben durch verdampfendes und freigesetztes Flüssiggas.

Im ersten Fall (Abbildung 6, links) betrug die Wurfweite $l = 255$ m für einen gesamten Tank mit einer Masse von $m = 26,0$ kg. Im zweiten Fall (Abbildung 6, rechts) ist der Behälter quer aufgerissen und das Haupttrümmerstück ($m = 17,9$ kg) ist ebenerdig über eine Distanz von $l = 162$ m befördert worden.

Mit „frisbeeing“ ist gemeint, dass ein Trümmerstück sehr stark hinsichtlich der Rotation um die eigene Achse beschleunigt wird und dadurch eine sehr große Flugweite erzielt [23]. Dies war z. B. in einem Versuch der Serie 1 der Fall. Dabei betrug die Wurfweite für das Fragment ($m = 1,4$ kg) $l = 238$ m (vgl. Abbildung 7).



Abbildung 7: "Frisbeeing" eines Fragments, Nr. 1 das Fragment, Nr. 2 Unterfeuerung bzw. Ort des Behälterversagens.

Bei der Betrachtung der Fragmentierung der LPG-Radmuldentanks sind deutliche Unterschiede zwischen den zu 20 % gefüllten Tanks und den Tanks mit einem Füllgrad von 100 % festzustellen. In Tabelle 10 sind noch einmal einige Kenngrößen zu den Fragmenten aus den Versuchen mit den LPG-Radmuldentanks, aufgeschlüsselt nach Füllgrad, aufgeführt.

Tabelle 10: Fragmentierung der LPG-Radmuldentanks differenziert nach den Versuchen mit einem Füllgrad von 20 % und 100 %.

Anzahl Versuche	FG [%]	Σ Fragmente aus allen Versuchen	\emptyset Fragmente pro Versuch	Σ der wiedergefundenen Masse [kg] (Originalmasse aus 5 Versuche: 132,0 kg)	\emptyset Masse pro Fragment [kg]
5	100	16	3,2	130,0 (\triangleq 98,5 %)	8,1
5	20	34	6,8	102,3 (\triangleq 78,8 %)	3,0

Aus diesen Daten wird klar ersichtlich, dass die Tanks mit einem Füllgrad von 20 % in deutlich mehr Trümmerstücke fragmentieren. Während die zu 100 % gefüllten Tanks im Durchschnitt in 3,2 Fragmente pro Versuch zerlegt werden, kommt es bei den Versuchen mit einem Füllgrad von 20 % im Durchschnitt zu 6,8 Fragmenten. Es muss jedoch angenommen werden, dass der Wert „Fragmente pro Tank“ für die zu 20 % gefüllten Tanks noch größer ist, da 21,2 % der Originaltankmasse nicht wiedergefunden werden konnte. Bei den vollen Tanks wurde hingegen nahezu die gesamte ursprüngliche Tankmasse dokumentiert (98,5 %). Ursache für das unterschiedliche Fragmentierungsverhalten ist die deutlich höhere Temperatur des Behältermantels zum Versagenszeitpunkt bei den zu 20 % gefüllten Tanks. Sowohl mittig als auch an der Unterseite ist die Temperatur um mehr als $\Delta T = 200 \text{ °C}$ größer (vgl. Tabelle 5). Für Stahl sinkt in diesem Bereich die Zugfestigkeit von $\sigma_M = 167 \text{ N/mm}^2$ ($T = 250 \text{ °C}$) auf $\sigma_M = 133 \text{ N/mm}^2$ ($T = 400 \text{ °C}$) [26], wodurch sich Risse über den Behältermantel deutlich schneller ausbreiten können. Der Druck beim Versagen ist hingegen ähnlich (vgl. Tabelle 6). Wenn man davon ausgeht, dass die Hauptgefahr beim Behälterversagen von Fragmenten ausgeht, lässt sich zusammenfassen, dass eine größere Gefährdung von Flüssiggastanks aus Stahl mit einem geringeren Füllgrad ausgeht, im Vergleich zu komplett gefüllten Flüssiggasstahltanks (im Bereich FG 20-100%).

4.3 Druckwirkung auf die Umgebung

In einer Entfernung von $l = 7 \text{ m}$ liegen die gemittelten Druckwerte für die einzelnen Versuchsserien im Bereich von $p = (0,06-0,30) \text{ bar}$ (vgl. Tabelle 7). Im Vergleich treten die höchsten Drücke beim Bersten eines Typ-III-Behälters auf. Ursache dafür ist, dass die Überdruckwirkung in erster Linie abhängig sind vom Behältervolumen und dem zum Berstzeitpunkt

vorliegenden Druck des gasförmigen Mediums. Die Drücke zum Versagenszeitpunkt liegen bei den Typ-III-CNG-Behältern (FG 100 %) im Bereich von $p \approx 300$ bar, wohingegen in den Versuchen mit den Flüssiggasbehältern der Serie 1 und 2 die Drücke zum Versagenszeitpunkt im Bereich $p \approx (70-90)$ bar liegen (vgl. Tabelle 6). Ein Vergleich der Videoaufzeichnung mit den Druckkurven zeigt auch deutlich, dass das nachverdampfende Propan keinen Beitrag zur Überdruckwirkung auf die Umgebung hat. Der Verdampfungsprozess dauert deutlich länger als die gemessenen Überdrücke detektierbar sind.

Drücke im Bereich $p = (0,06-0,30)$ haben das Potential deutliche Schädigungen beim Menschen hervorzurufen (z. B. Trommelfellriss, Umstoßen von Personen) bzw. auch zu signifikanter Beschädigung von Infrastruktur zu führen (z. B. Bruch von Scheiben, Zerstörung von 24er Mauerwerk) [27]. Die in Tabelle 7 aufgeführten Werte sind Durchschnittswerte. In zwei Einzelversuchen der Serie 3 wurden auch noch Werte von $p > 0,30$ bar gemessen, $p = (0,31; 0,41)$ bar. Ein Druck von $p = 0,41$ bar ist ausreichend, um unbewehrte Betonwände mit einer Stärke von $d = (0,2-0,3)$ m zu zerstören [28].

4.4 Versagensmechanismus der LPG-Radmuldentanks

Betrachtet man den Versagensmechanismus der Radmuldentanks, muss man klar zwischen den Versuchen mit einem Füllgrad von 20 % und 100 % unterscheiden. In den Versuchen mit einem Füllgrad von 20 % haben die Tanks zum Zeitpunkt des Versagens eine homogene Behältermanteltemperatur von $T = (400-550)$ °C (vgl. Tabelle 5). Zum Zeitpunkt des Versagens beträgt die durchschnittliche Temperatur im Tank $T = 346$ °C. Die ursprüngliche Messstelle im Tank war in der Flüssigphase. Unter der Berücksichtigung, dass der kritische Punkt für Propan bei $p = 42,5$ bar und $T = 96,75$ °C erreicht ist [29], kann man davon ausgehen, dass zum Zeitpunkt des Versagens der 20 % gefüllten Radmuldentanks keine Flüssigphase mehr vorhanden ist. Der Behälterinhalt zum Versagenszeitpunkt kann somit als überkritisch angesehen werden. Das Bersten dieser Behälter wird folglich durch zwei gegenläufige Faktoren beeinflusst. Durch die steigende Temperatur des Behältermantels sinkt die Zugfestigkeit des Behälterstahls. Zum anderen steigt der Druck im Behälter durch die fortschreitende Erwärmung des überkritischen Fluids. Dass im Zeitraum direkt vor dem Versagen keine Verdampfung einer potentiell vorhandenen Flüssigphase mehr stattfindet, lässt sich anhand der Drucksteigerungsraten belegen. Während die Drucksteigerungsraten für den gesamten Zeitraum im Bereich $dp/dt = (0,27-0,33)$ bar/s liegen ($\bar{dp/dt} = 0,29$ bar/s), sind die Drucksteigerungswerte in den 10 s vor dem Behälterversagen in einem Bereich von $dp/dt = (0,02-0,15)$ bar/s ($\bar{dp/dt} = 0,08$ bar/s). Es wird als deutlich, dass die Druckanstiegsgeschwindigkeit zu Beginn deutlich größer sind, da es zum einen zu einer Überhitzung der Dampfphase im Vergleich zum Phasengleichgewicht kommt und gleichzeitig ein vermehrter Phasenübergang von flüssig zu gasförmig stattfindet. Gegen Ende ist keine Flüssigphase mehr vorhanden, die Druckanstiegsgeschwindigkeit wird nur noch durch die Erwärmung des homogenen Mediums bestimmt.

Das Volumen der zu 100 % gefüllten Tanks ist real nur zu 80 % gefüllt (vgl. Tabelle 2). Die Füllmasse Propan betrug $m = 25,5$ kg (bei $T = 20$ °C, flüssiges Propan $\rho = 0,501$ kg/dm³ [21]). Bereits eine Temperaturerhöhung auf $T = 73$ °C bewirkt eine Ausdehnung der Flüssigphase auf mehr als $V = 63,8$ dm³, was dem Volumen des Tanks entspricht (bei $T = 73$ °C, flüssiges Propan $\rho = 0,397$ kg/dm³) [21]. Bei dieser Überlegung muss jedoch auch das Phasengleichgewicht berücksichtigt werden, dass entsprechend die Dichte der Gasphase zunimmt. Der dadurch erzeugte zusätzliche Druck führt vermutlich bei drei der fünf Versuche zu einem kleineren, partiellen Riss des Behältermantels und einem geringen Druckverlust im Bereich $\Delta p = (10-15)$ bar, verbunden mit einem Flammenstrahl. Nach kurzer Zeit beginnt der Druck wieder zu steigen und nach einer Zeitspanne von $\Delta t = (60-103)$ s nach dem partiellen Riss kommt es zu einem kompletten Versagen des Tanks. In den anderen zwei Versuchen kam es direkt zu einem Komplettersagen des Tanks. Die drei Versuche mit einem initialen partiellen Riss haben mit $t = (293, 246, 191)$ s auch eine deutlich längere Dauer bis zum Versagen (vgl. $t = 168, 152$ s) und durch diesen Zeitunterschied mit $T = (157, 141, 128)$ °C auch zum Versagenszeitpunkt eine höhere Temperatur der Flüssigphase (vgl. $T = (96, 98)$ °C) zur Folge.

Auch direkt nach dem Tankversagen ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Behältern mit den unterschiedlichen Füllgraden zu erkennen. Der Behälterinhalt der zu 20 % gefüllten Tanks hat keinerlei Flüssigphase mehr und ist thermisch derart aufbereitet, dass dieser nach Durchmischung mit dem Luftsauerstoff direkt in Form des deutlich sichtbaren Feuerballs umgesetzt wird. Der Behälterinhalt der zu 100 % gefüllten Tanks ist ebenfalls überhitzt, muss aber direkt nach dem Behälterversagen noch verdampft werden. Dies ist dadurch visuell feststellbar, dass in den Versuchen mit den 100 % gefüllten Tanks direkt nach dem Öffnen des Behälters eine weiße Propanwolke zu erkennen ist (vgl. z. B. Abbildung 6). Insgesamt läuft die thermische Umsetzung des Behälterinhaltes bei den zu 20 % gefüllten Tanks deutlich schneller ab.

4.5 Versagen der CNG-Tanks

Es wurden sowohl Versuche mit CNG-Tanks vom Typ III (Aluminiumliner) als auch vom Typ IV (Polymerliner) durchgeführt (vgl. Tabelle 2). In den fünf Versuchen mit zu 100 % gefüllten Typ-III-Behältern kam es immer zu einer Fragmentierung des Behältermantels beim Versagen. Auch die zu 20 % gefüllten Typ-III-Tanks haben in zwei von drei Fällen versagt, indem einer der Gewindeanschlüsse herausgedrückt wurde. Im Gegensatz dazu haben die drei Typ-IV-Tanks eher großflächig den Behälterinhalt freigesetzt. Ursache dafür war das Wegschmelzen des Polymerliners bei gleichzeitigem thermischen Versagen der Compositematrix. Ausgehend von diesem Versagensmechanismus könnte man die Schlussfolgerung ziehen, dass Typ-IV-Tanks bei einer Wärmebeaufschlagung durch eine Flamme sicherer sind als Typ III Tanks, da diese nicht abrupt mit einer Behälterfragmentierung versagen. Es sind jedoch auch Fälle bekannt, wo Behälter des Typs IV auf diese Weise (Druckwelle, massiver Fragmentwurf) versagten. Ein solcher Unfall ist in Tabelle 1, Beispiel Nr. 2 aufgeführt, als bei einem brennenden Müllfahrzeug in Indianapolis einer der Typ-IV-CNG-Tanks versagt [12]. Dass es zu einem solchen Versagen kam, und nicht zu einem Wegschmelzen des Liners, kann z. B. darin begründet liegen, dass die Beflammung des Tanks nicht direkt und großflächig wie in den dargestellten Versuchen, sondern eher indirekt und möglicherweise nur punktuell durch eine etwas weiter entfernte Wärmequelle stattgefunden hat. Dadurch wurde der Behälter zwar erwärmt und der Druck stieg. Die Temperaturerhöhung hat jedoch nicht dazu ausgereicht, dass der Liner an sich schmilzt und die Compositematrix versagt. Dafür spricht auch, dass es bei diesem Unfall mit $t = 33$ min relativ lange bis zum Versagen gedauert hat (ausgehend von der Meldung des Feuers), verglichen mit den Zeiten der Unterfeuerungsversuche, bei denen es zu einem direkten Behälterversagen kam (vgl. Tabelle 4).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden insgesamt 57 Einzelversuche durchgeführt, davon 39 Unterfeuerungsversuche. Dabei wurden 11-kg-Propangasflaschen, LPG-Radmuldentanks für PKW sowie CNG-Tanks vom Typ III und Typ IV untersucht. Es wurden eine Vielzahl von experimentellen Daten erhoben, die sowohl das Behälterversagen unter kalten (hydraulische Berstversuche) als auch unter heißen Bedingungen (Unterfeuerungsversuche) charakterisieren. 36 der 39 Unterfeuerungsversuche wurden mit Behältern ohne Sicherheitseinrichtung durchgeführt. In diesen Versuchen wurden der innere Zustand des Behälters und auch die Auswirkungen des Versagens (z. B. Druck-, Temperaturwirkung Nahbereich, Fragmente) dokumentiert. Diese Ergebnisse können dazu dienen, Einsatzkräften von Feuerwehr und Rettungsdienst zu zeigen, welche Auswirkungen ein solches Behälterversagen haben kann. Weiterhin sollen daraus Hinweise für die Einsatztaktik erarbeitet bzw. diese angepasst werden. Mit den Ergebnissen aus den Versuchen zu den 11-kg-Propangasflaschen wurde bereits mit der DGUV (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung) und weiteren Partnern ein Merkblatt erarbeitet [30]. Für die Fahrzeugtanks sollen weitere Einsatzhinweise publiziert werden. Dadurch soll auch das Sicherheitsniveau von Einsatzkräften bei Zwischenfällen mit alternativen gasförmigen Antrieben erhöht werden.

Perspektivisch sind noch weitere Auswertungen der erhobenen Daten und auch weitere Versuche geplant. In allen Unterfeuerungsversuchen wurde die zeitabhängige Wärmestrahlung des Feuerballs nach dem Versagen mit Bolometern gemessen. Diese Daten werden aktuell noch ausgewertet. Weiterhin wurden bereits je drei Versuche mit LPG-Tanks und CNG-Tanks ohne Sicherheitseinrichtung, eingebaut in einem PKW, durchgeführt. Ziel war es hier, die Auswirkungen des Versagens unter noch realistischeren Bedingungen abzubilden. Diese Versuche werden aktuell ebenfalls ausgewertet und im Anschluss publiziert.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Krentel, R. Tschirschwitz, M. Kluge et al.: „Auswirkungen von unfallbedingtem Behälterversagen bei alternativen Pkw-Antrieben - Teil 1: Problemstellung, Stand der Technik und Voruntersuchungen“, Technische Sicherheit, Band 6 (2016), Nr. 9, 39-46.
- [2] P. P. Neumann, H. Kohlhoff, D. Hüllmann et al.: „Auswirkungen von Behälterversagen bei alternativen Pkw-Antrieben - Teil 2: UAV-basierte Fernerkundung von Gaswolken“, Technische Sicherheit, Band 6 (2016), Nr. 11/12, 23-28.
- [3] R. Tschirschwitz, D. Krentel, M. Kluge et al.: „Mobile gas cylinders in fire: consequences in case of failure“, Fire Safety Journal, Band 91 (2017), 989–996.
- [4] R. Tschirschwitz, D. Krentel, M. Kluge et al.: „Auswirkungen von Behälterversagen bei alternativen Pkw-Antrieben - Teil 3: Auswirkungen des Versagens von 11-kg-Propangasbehältern im Feuer“, Technische Sicherheit, Band 7 (2017), Nr. 11/12, 25-32.
- [5] R. Tschirschwitz, D. Krentel, M. Kluge et al.: „Experimental investigation of consequences of LPG vehicle tank failure under fire conditions, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Band 56 (2018), 278–288.
- [6] R. Tschirschwitz, D. Krentel, M. Kluge et al.: „ Hazards from failure of CNG automotive cylinders in fire“, Journal of Hazardous Materials, Band 367 (2019), 1–7.
- [7] Kraftfahrt-Bundesamt: “Bestand an Pkw in den Jahren 2009 bis 2018 nach ausgewählten Kraftstoffarten“, https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/b_umwelt_z.html, abgerufen: 30.01.2019.
- [8] WLPGA - World LPG Association: „Autogas Incentive Policies - A country-by-country analysis of why and how governments encourage Autogas & what works“, <https://autogas.net/wp-content/uploads/2018/09/Autogas-Incentive-Policies-report-FINAL.pdf>, abgerufen: 30.01.2019.
- [9] Statista: “Global number of natural gas vehicles in operation in 2017, by major country“, <https://www.statista.com/statistics/787068/global-sales-of-natural-gas-vehicles-by-country/>, abgerufen: 30.01.2019.
- [10] M.I. Khan, T. Yasmin, N.B. Khan: “Safety issues associated with the use and operation of natural gas vehicles: learning from accidents in Pakistan“, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Band 38 (2016), 2481–2497.
- [11] HFUK, "PKW explodiert nach Verkehrsunfall - Erkenntnisse und Schlussfolgerungen," Sicherheitsbrief: Gemeinsame Schrift der Hanseatischen Feuerwehr-Unfallkasse Nord (HFUK Nord) und der Feuerwehr-Unfallkasse Mitte (FUK Mitte), Band 36 (2014), pp. 4-6.
- [12] J. Krebsbach, Indianapolis Fire Department: https://www.ctif.org/sites/default/files/2017-10/indianapolis_gas_cylinder_explosion.pdf, abgerufen: 21.02.2019
- [13] R. Hansen: "Firefighter near Miss - Auto Fire with Compressed Natural Gas (CNG) Fuel Tank Explosion", Seattle Fire Department (2007), Seattle, USA.
- [14] Feuerwehr Warburg: <http://www.feuerwehr-warburg.de/php/einsatzliste.php?elD=852&pic=1>, abgerufen: 21.02.2019.

- [15] ISO 11439: „Gas cylinders — High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles”, First ed. (2000).
- [16] Vereinte Nationen: „Empfehlungen für die Beförderung gefährlicher Güter Handbuch über Prüfungen und Kriterien“, Sechste überarbeitete Ausgabe (2017), ISBN 978-3-9817853-2-6.
- [17] UN-ECE Regulation No. 67: “Uniform provisions concerning the approval of: I. Approval of specific equipment of vehicles of category M and N using liquefied petroleum gases in their propulsion system. II. Approval of vehicles of category M and N fitted with specific equipment for the use of liquefied petroleum gases in their propulsion system with regard to the installation of such equipment”, Revision 3 (2012).
- [18] UN-ECE Regulation No. 110: “Uniform provisions concerning the approval of: I. Specific components of motor vehicles using compressed natural gas (CNG) in their propulsion system; II. Vehicles with regard to the installation of specific components of an approved type for the use of compressed natural gas (CNG) in their propulsion system”, Revision 2 (2013).
- [19] DIN EN 60584: “Thermocouples - Part 2: Tolerances”, Beuth (1994), Berlin, Germany.
- [20] DIN 51622: “Liquefied Petroleum Gases; Propane, Propene, Butane, Butene and their Mixtures; Requirements.” Beuth (1985), Berlin, Germany.
- [21] C.L. Yaws: “Chemical Properties Handbook - Physical, Thermodynamic, Environmental, Transport, Safety, and Health related Properties for organic and inorganic Chemicals”, Mc-Graw-Hill (1999), New York, USA.
- [22] EN 1442: “Flüssiggas-Geräte und Ausrüstungsteile - Ortsbewegliche, wiederbefüllbare, geschweißte Flaschen aus Stahl für Flüssiggas (LPG) - Gestaltung und Konstruktion“, DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2008), Berlin, Deutschland.
- [23] Center for Chemical Process Safety: “Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs”, American Institute of Chemical Engineers (1994), New York, NY, USA.
- [24] W.E. Baker, J.J. Kulesz, R.E. Ricker, P.S. Westine, V.B. Parr, L.M. Vargas, P.K. Moseley: „Workbook for estimating effects of accidental explosions in propellant ground handling and transport systems”, Technical Report NASA-CR-3023, REPT-02-4778 (1978), Southwest Research Inst., San Antonio, TX, USA.
- [25] A.M. Birk, M.H. Cunningham: “Liquid temperature stratification and its effect on BLEVEs and their hazards”, Journal of Hazardous Materials, Band 48 (1996), 219–237.
- [26] U. Fischer, M. Heinzler: „Tabellenbuch Metall“, Verlag Europa-Lehrmittel, 40. überarbeitete und erweiterte Auflage (1997).
- [27] M. Steidinger, B. Krüning: „Mustersicherheitsanalyse nach §7 StörfallV für eine Sprengstofffabrik“, Forschungsbericht 104 09 211, UBA-FB 92-026 (1991), Berlin.
- [28] S. Glasstone, P.J. Dolan: “The effects of nuclear weapons”, United States Department of Defence, Third ed. (1977), Washington, USA.
- [29] VDI Gesellschaft: “VDI Wärmeatlas”, Springer (2005), Berlin, Heidelberg, Deutschland.
- [30] DGUV Information 205-030: „Umgang mit ortsbeweglichen Flüssiggasflaschen im Brandeinsatz“, DGUV-Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2018), Berlin, Deutschland.