

Stellen metallische Berstscheiben in Sauerstoffanlagen ein mögliches Sicherheitsrisiko dar?

Thomas Kasch¹, Christian Binder¹, Thomas Brock¹, Olaf Hesse¹, Nico Treisch¹

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Fachbereich 2.1 „Gase, Gasanlagen“, Berlin

Die meisten Sauerstoffarmaturen und -anlagenteile bestehen aus Metallen und enthalten nichtmetallische Materialien als Sitz- und Dichtungswerkstoffe. Die Gefahr eines Ausbrands ist grundsätzlich vorhanden, jedoch relativ gering, wenn neben der richtigen Konstruktion geeignete metallische und nichtmetallische Materialien für die vorgesehenen Betriebsbedingungen gewählt werden. Aus sicherheitstechnischer Sicht sollten Sauerstoffarmaturen und -anlagenteile, die komplett aus metallischen Materialien gefertigt und abgedichtet werden, ein noch geringeres Risiko eines Ausbrands aufweisen. Bei einer Versuchsreihe auf dem BAM-TTS-Freiversuchsgelände brannte unerwartet ein rein metallisches Anlagenteil komplett ab. Bei dieser Versuchsanordnung platzt eine metallische Berstscheibe bei einem bestimmten Sauerstoffdruck auf. Die anschließenden Untersuchungen konzentrierten sich auf die Frage, wie es bei diesem Versuch zu einem Ausbrand des massiven Anlagenteils kommen konnte. Im Vortrag werden die Ergebnisse der Untersuchungen diskutiert und die Sauerstoffverträglichkeit der verwendeten Metalle auf Grundlage des Abbrandverhaltens nach ASTM G 124-95 verglichen. Es wird versucht, die Frage zu beantworten, ob der Einsatz metallischer Berstscheiben zu einer Erhöhung der Brandgefahr in Sauerstoffanlagen führen kann.

1 Einleitung

Um die Ausbrennsicherheit für Sauerstoff-Armaturen und -Anlagenteilen zu gewährleisten, sollten grundsätzlich nur nichtmetallische und metallische Materialien verwendet werden, die für die Betriebsbedingungen geeignet sind. Darüber hinaus hat auch die Konstruktion selber einen großen Einfluss auf die Ausbrennsicherheit.

Aus sicherheitstechnischer Sicht sollte für Armaturen und Anlagenteile, die komplett aus metallischen Materialien bestehen, eine geringere Gefahr eines Ausbrandes bestehen, da häufig die nichtmetallischen Dichtungswerkstoffe die Ursache für den Ausbrand sind. Doch auch bei metallischen Materialien gibt es Unterschiede hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Eignung für Sauerstoff. So haben Zabrenski et.al. [1] sowie Stolfus et.al. [2] gezeigt, dass die Zündfähigkeit von Aluminium in Sauerstoff viel höher ist als etwa die von Kupfer oder Monel. Auch das Brandverhalten von Aluminium unterscheidet sich deutlich von dem anderer metallischer Materialien in Sauerstoff, worüber u.a. Chiffolleau et. al. [3] sowie Tillack et. al. [4, 5] berichteten.

Grundsätzlich müssen drei Dinge vorhanden sein, damit ein Brand auftreten kann: ein brennbares Material (Brennstoff), eine Zündquelle und Sauerstoff. Dieser Zusammenhang lässt sich auch im allgemein bekannten Feuertreieck (Abbildung 1) darstellen.

Während einer Versuchsreihe auf dem BAM Testgelände Technische Sicherheit (TTS) mit hochverdichtetem Sauerstoff brannte ein Anlagenteil aus, das aus Edelstahl (1.4301) bestand und metallisch gedichtet war. Bei diesen Versuchen geht es darum, durch das Aufplatzen einer metallischen Berstscheibe einen einzelnen Sauerstoff-Druckstoß zu erzeugen. Als Berstscheiben wurden nur metallische Materialien eingesetzt, die bereits zuvor nach ASTM G124-95 untersucht worden waren.



Abbildung 1: Feuerdreieck

Für diese Versuche lassen sich zwei der drei Seiten des Feuerdreiecks leicht identifizieren:

- der hochverdichtete Sauerstoff und
- die metallischen Materialien als potentieller Brennstoff.

Auf den ersten Blick ist für diesen Fall zunächst aber keine Zündquelle festzustellen. Bei den darauffolgenden Untersuchungen sollte daher geklärt werden, welche Zündquelle den Ausbrand initiierte.

2 Versuchsaufbau und Unfallbeschreibung

2.1 Untersuchungen nach ASTM G124-95

Die Untersuchung nach ASTM G124-95 (2003) [6] gestattet die Untersuchung des Reaktions- und Abbrandverhaltens metallischer Materialien in hochverdichtetem Sauerstoff nach eingeleiteter Zündung. Dabei wird der Sauerstoffgrenzdruck bestimmt, bei dem ein Abbrand des untersuchten Materials gerade nicht mehr erfolgt. Im Fall einer Reaktion wird die Abbrandgeschwindigkeit bestimmt und mit der anderer metallischer Materialien verglichen.

Der metallische Probestab hat im Regelfall einen Durchmesser von $(3,2 \pm 0,3)$ mm und eine sichtbare Länge von 150 mm. Die Zündpille wird über das untere Ende des Probestabs geschoben und kann aus verschiedenen Materialien, wie z.B. Aluminium, Magnesium sowie Mischungen mit Zirkonium bestehen. Die Zündpille wird zu Versuchsbeginn elektrisch gezündet. Mittels berührungsloser Temperaturmessung durch IR- Sensoren und gleichzeitiger Kameraaufzeichnung werden das Abbrandverhalten des metallischen Probestabs sowie die Abbrandgeschwindigkeit bestimmt. Die Temperatur und der Druck im Versuchsautoklav werden gemessen und aufgezeichnet.

Als Kriterium für eine Nichtzündung des Probestabs wird ein Selbstverlöschten des Probestabs nach einer Abbrandlänge von maximal 5 cm verwendet. Eine Nichtzündung muss durch wenigstens vier weitere Versuche bei gleichen Bedingungen bestätigt werden.

Grundsätzlich sind bei diesen Versuchen für Kupfer, Nickel, nickelbasierende Stähle, Messing etc. nach Einleitung der Zündung selbstverlöschende Eigenschaften selbst bei hohen Sauerstoffdrücken von über 250 bar festzustellen. Dagegen können Aluminium und Aluminiumlegierungen ein sehr heftiges Abbrandverhalten selbst bei geringen Sauerstoffdrücken von unter 10 bar aufzeigen.

2.2 Untersuchungen auf dem BAM Testgelände Technische Sicherheit (TTS)

In vielen Fällen reichen die Ergebnisse aus Laborversuchen oder Modellrechnungen mit Simulationsprogrammen nicht aus oder die Ergebnisse lassen sich nur schwer übertragen. Daher sind spezielle Versuchsanlagen erforderlich. Das BAM Testgelände Technische

Sicherheit ist ein Freiversuchsgelände, auf dem Großversuche durchgeführt werden können. Mit der Sauerstoffprüfanlage kann die Brandgefahr von Armaturen, Anlagenteilen und Materialien in hochverdichtetem und bei strömendem Sauerstoff unter industrienahen Bedingungen untersucht und beurteilt werden.

Abbildung 2 zeigt das Versuchsgebäude und eine Übersicht über die Sauerstoffversorgung. In Abbildung 3 ist das Rohrsystem von 70 m Länge und mit Rohrdurchmessern zwischen 12,5 mm und 50 mm ($\frac{1}{2}$ " bis 2") dargestellt.



Abbildung 2: Sauerstoffversorgungsanlage und Versuchsgebäude



Abbildung 3: Rohrsystem zur Freiversuchsplatte

Ein neu entwickelter Versuchsaufbau gestattet es, Sauerstoffarmaturen und -anlagenteile im industriellen Maßstab einem einzelnen Sauerstoffdruckstoß mittels Berstscheibe auszusetzen. Das Ergebnis dieser Prüfung auf Ausbrennsicherheit ermöglicht eine praxisnahe sicherheitstechnische Beurteilung.

Im ersten Schritt wurden Berstscheiben aus verschiedenen metallischen Materialien und mit unterschiedlichen Dicken gefertigt, um unterschiedliche Berstdrücke realisieren zu können. Dabei wurden nur metallische Materialien verwendet, die zuvor nach ASTM G124-95 untersucht worden waren. Für statistische Zwecke wurde jeder Versuch insgesamt 10-mal durchgeführt. Abbildung 4 zeigt die technische Zeichnung des Berstscheibenhalters.

Während einer Versuchsreihe mit einer Aluminium- Berstscheibe kam es zu einem unerwarteten Ausbrand. Ein lauter Knall, begleitet von einem großen Feuerball, zeigte die starke Reaktion mit Sauerstoff. Der Hauptteil (Abbildung 5), das Gegenstück des Berstscheibenhalters (Abbildung 6) und die Schutzwand (Abbildung 7) zeigten anschließend typische Anzeichen eines Metallabbrands. Die Aluminium- Berstscheibe wurde vollständig verbrannt. Das Gegenstück des Berstscheibenhalters wurde in fast 70 m Entfernung gefunden, es war dort gegen den Schutzzaun geschleudert worden. Die Versuchsbedingungen sind in Tabelle 1 angegeben.

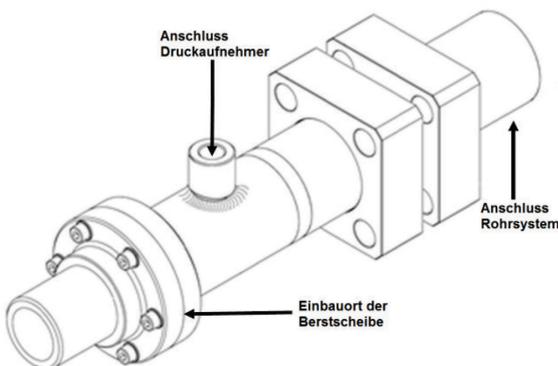


Abbildung 4: Berstscheibenhalter



Abbildung 5: Berstscheibenhalter, Ansicht entgegen der Strömungsrichtung



Abbildung 6: Berstscheibenhalter,



Abbildung 7: Schutzwand mit Brandbild Gegenstück

Tabelle 1: Versuchsbedingungen beim Unfall mit einer Aluminium- Berstscheibe

Material der Berstscheibe	Aluminium (AlMg5)
Rohrdurchmesser in mm	DN50 (76,1 x 12,5)
Durchmesser der Berstscheibe in mm	80,0
Dicke der Berstscheibe in mm	1,5
Sauerstoffgehalt in Vol-%	≥ 99,5
Berstdruck in bar	171

3 Untersuchungen zur Unfallaufklärung - was war die Zündquelle?

Als mögliche Zündquellen können in Zusammenhang mit Sauerstoff grundsätzlich Verunreinigungen, Reibung durch die Strömung, Wärme, externe Einwirkungen wie Feuer, künstliche Zündung etc. in Frage kommen. Mit zeitaufwändigen Untersuchungen wurde begonnen, doch wurde kein Hinweis dafür gefunden, dass eine dieser möglichen Zündquellen den Unfall verursacht hatte.

So sollten Verunreinigungen als mögliche Zündquelle ausgeschlossen werden können, da einerseits die entfettete Aluminium- Berstscheibe immer mit weißen Handschuhen montiert wurde und andererseits immer darauf geachtet wurde, dass keine Verschmutzungen in die Versuchsanlage gelangten. Im Rohrleitungssystem wurden bis heute weder Partikel noch Rost oder andere Verschmutzungen gefunden. Sowohl der gasförmige Sauerstoff wie auch der Berstscheibenhalter hatten Umgebungstemperatur und wurden nicht beheizt. Bei diesem Versuchsaufbau gab es auch keine künstlichen Zündquellen.

Eine weitere vorstellbare Zündquelle könnten aber auch die beim Aufplatzen der Berstscheibe entstehenden Fragmente der Sollbruchstelle sein. Sollten diese Fragmente komplett von der metallischen Berstscheibe abreißen, so könnten sie durch den ausströmenden Sauerstoff gegen den metallischen Berstscheibenhalter prallen. Auf diese Weise könnte z.B. ein Funke entstehen, der als Zündung dienen könnte.

Da das Gegenstück des Berstscheibenhalters nur ca. 5 cm lang ist, erscheint dies allerdings sehr unwahrscheinlich. Trotzdem wurde bei nachfolgenden Versuchen ein neuartiges, verkürztes Gegenstück des Berstscheibenhalters verwendet.

Jedoch wurde beim Öffnen der Aluminium- Berstscheibe ein Lichtblitz beobachtet. Abbildung 8 stellt beispielhaft vier Bilder aus der Videosequenz eines solchen Versuchs dar. Bei $t = 0$ s

platzt die Berstscheibe auf, anschließend bildet sich ein erkennbares Profil des strömenden Sauerstoffs aus.

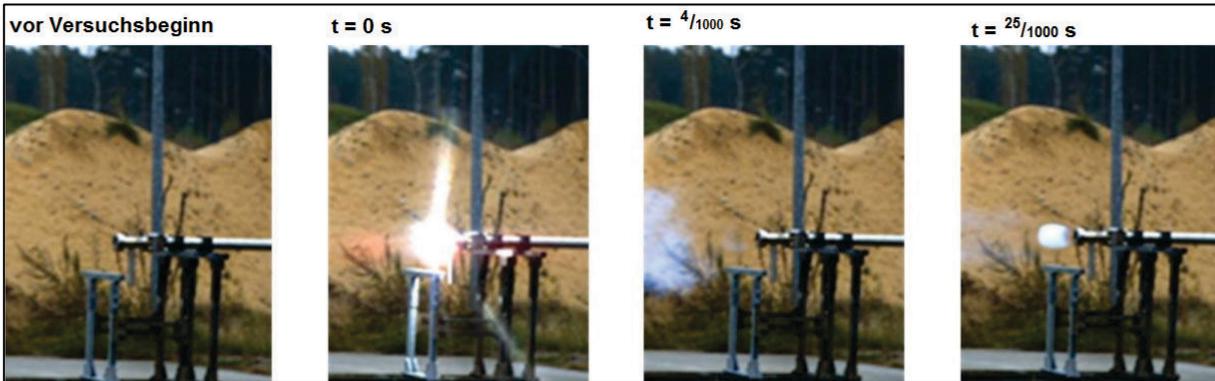


Abbildung 8: Öffnen einer Aluminium- Berstscheibe mit Lichtblitz

Bei dem gezeigten Versuch öffneten sich alle vier vorgekerbten Fragmente der Berstscheibe, rissen aber nicht ab (Abbildung 9). Bei anderen Versuchen mit Aluminium- Berstscheiben allerdings kam es auch zu einem teilweisen oder sogar zu einem vollständigen Abreißen der vorgekerbten Fragmente (Abbildung 10).



Abbildung 9: Berstscheibe mit vollständig abgerissenen Fragmenten



Abbildung 10: Beispiele für Berstscheiben mit nicht abgerissenen Fragmenten und teilweise abgerissenen Fragmenten

Die weiteren Untersuchungen konzentrierten sich daher auf die Frage, ob das Aufplatzen der Aluminium- Berstscheibe selbst in der Lage sein könnte, so viel Energie zu produzieren, um metallische Materialien zu entzünden. Für ZerreiBversuche wurde daher ein standardisiertes Zugprofil aus dem gleichen Aluminium hergestellt.

Üblicherweise ist der ZerreiBversuch eine standardisierte, mechanische Werkstoffprüfung, bei der das Zugprofil bis zum ZerreiBen belastet wird. Dabei werden Werkstoffparameter wie Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Elastizitätsmodul bestimmt. Im Rahmen der Untersuchungen zur Unfallaufklärung wurde der ZerreiBversuch durchgeführt, um die Temperatur in der Bruchzone zu bestimmen. Dazu wurde eine Hochgeschwindigkeits-Infrarot- Kamera eingesetzt.

Abbildung 11 stellt beispielhaft drei Bilder aus der Videosequenz eines solchen ZerreiBversuchs dar. Die Dehnung führt zunächst zu einer Erwärmung in einem größeren Bereich des Zugprofils. Kurz vor dem ZerreiBen konzentriert sich die Erhitzung auf die Bruchzone. Nach dem ZerreiBen sind die höchsten Temperaturwerte an den scharfen Kanten beider Profilteile zu finden.

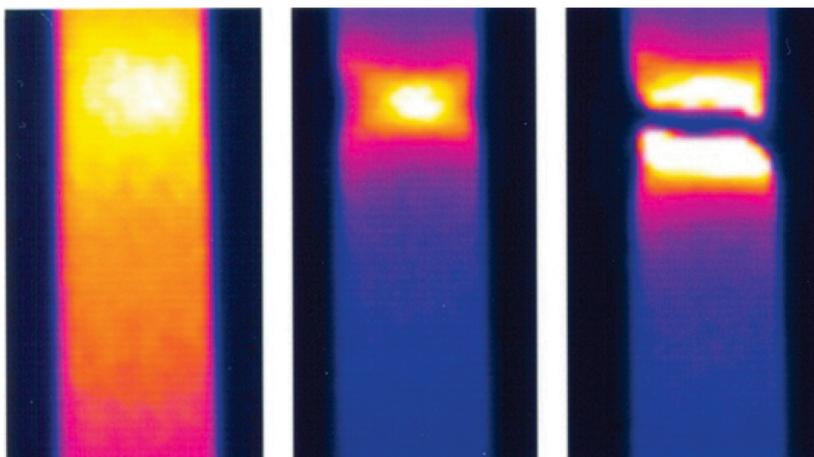


Abbildung 11: Temperaturanstieg in der Bruchzone

Es wurden zahlreiche Zerreißversuche durchgeführt, um die Bildfrequenz, die Bildauflösung und den messbaren Temperaturbereich der Kamera zu variieren. Trotz der Verwendung der Hochgeschwindigkeits- IR- Kamera geben die aufgezeichneten Daten nur Temperaturwerte an, die über die Aufzeichnungszeit und über die Pixelgröße gemittelt sind. Daher ist es nicht verwunderlich, dass die derart bestimmten Temperatur- Mittelwerte in der Bruchzone nur ca. 130 °C betragen. Nach Angaben der Experten für diese Zerreißversuche geht dieser Temperaturwert- Mittelwert einher mit maximalen Temperaturwerten von einigen hundert Grad Celsius an den scharfen Kanten der Bruchzone.

Zeitgleich zu den Untersuchungen zur Unfallaufklärung wurden weitere Versuche mit Berstscheiben aus anderen metallischen Materialien durchgeführt. Während einer Versuchsreihe, diesmal mit einer Stahl- Berstscheibe, kam es zu einem weiteren Ausbrand.

Die Versuchsbedingungen sind in Tabelle 2 angegeben, die Unterschiede zu den Versuchsbedingungen mit der Aluminium- Berstscheibe sind fett hervorgehoben. Der Hauptteil (Abbildung 12) und das Gegenstück des Berstscheibenhalters (Abbildung 13) zeigten auch hier die typischen Anzeichen eines Metallabbrands.

Im direkten Vergleich zum Ausbrand mit der Aluminium- Berstscheibe sind Unterschiede hinsichtlich der Heftigkeit der Reaktion erkennbar. Übereinstimmend bei den Versuchsreihen mit Stahl und Aluminium sind hingegen die Lichtblitze beim Platzen der Berstscheibe, die bei keinen anderen Materialien festgestellt wurden.

Tabelle 2: Versuchsbedingungen beim Unfall mit einer Stahl- Berstscheibe

Material der Berstscheibe	Stahl (1.0038)
Rohrdurchmesser in mm	DN50 (76,1 x 12,5)
Durchmesser der Berstscheibe in mm	80,0
Dicke der Berstscheibe in mm	1,0
Sauerstoffgehalt in Vol-%	≥ 99,5
Berstdruck in bar	233



Abbildung 12: Berstscheibenhalter,



Abbildung 13: Berstscheibenhalter,
Ansicht entgegen der Strömungsrichtung
Gegenstück

4 Zusammenfassung

Die Vorfälle während der Versuchsreihen auf dem BAM-TTS- Freiversuchsgelände haben gezeigt, dass es sogar bei Anlagenteilen, die komplett aus Edelstahl bestehen und metallisch gedichtet sind, beim Aufplatzen einer Berstscheibe aus Aluminium bzw. aus Stahl zu einem Ausbrand kommen kann.

Es ist allgemein bekannt, dass es für Aluminium aus sicherheitstechnischer Sicht nur begrenzte Anwendungsmöglichkeiten in hochverdichtetem Sauerstoff gibt. Dies spiegelt sich auch bei den Untersuchungsergebnissen nach ASTM G124-95 wider. Dies gilt jedoch nicht für den beim Ausbrand als Berstscheibe verwendeten Stahl, der bei den Untersuchungen nach ASTM G124-95 nach eingeleiteter Zündung selbstverlöschende Eigenschaften bis ca. 40 bar Sauerstoffdruck und bei höheren Drücken eine im Vergleich zu anderen metallischen Materialien eher eine geringe Abbrandgeschwindigkeit von ca. 1 cm/s aufweist.

Die Untersuchungen zur Unfallaufklärung, v.a. die Frage, was die Zündquelle war, sind noch im Gange. Dabei wird zurzeit das Hauptaugenmerk auf die charakteristischen Lichtblitze beim Platzen der Berstscheiben aus Aluminium und Stahl gelegt, da diese Lichtblitze bisher bei keinen Berstscheiben aus anderen metallischen Materialien auftraten.

Die Zerreißversuche sollen mit Aluminium- Zugprofilen wiederholt und um Versuche mit Stahl- Zugprofilen ergänzt werden. Dabei ist beabsichtigt, die lokalen Maximaltemperaturen an der scharfen Bruchkante genauer zu bestimmen. Zusätzlich sollen diese Maximaltemperaturen zusammen mit den Experten für die Zerreißversuche mittels theoretischer Ansätze berechnet bzw. mittels numerischer Simulation bestimmt werden.

Sollte beim Aufplatzen von Berstscheiben aus Aluminium bzw. Stahl tatsächlich ausreichend Energie für eine Zündung des metallischen Materials entstehen, was die bisherigen Untersuchungen sowie die charakteristischen Lichtblitze vermuten lassen, so könnte dies die gesuchte Zündquelle sein. Alle drei Voraussetzungen des Feuerdreiecks wären in diesem Fall identifiziert.

In der Vergangenheit war die BAM schon öfter in Unfalluntersuchungen z.B. für Luftzerlegungs- oder Verdampfer-Anlagen und Sauerstoff-Kompressoren involviert, bei der die Unfallursache nicht eindeutig feststellbar war. In diesen Anlagen wurden teilweise Berstscheiben eingesetzt, teilweise wurden die eingesetzten metallischen Materialien in Form von dünnen Blechen verwendet. Diese Unfälle und die während der Versuchsreihen auf dem BAM-TTS- Freiversuchsgelände haben gemeinsam, dass dabei die metallischen Materialien Aluminium bzw. Stahl derart verwendet wurden, dass ein Aufplatzen der entsprechenden Berstscheiben bzw. der dünnen Bleche nicht ausgeschlossen werden kann.

Die Frage, ob metallische Berstscheiben in Sauerstoff-Anlagen ein mögliches Sicherheitsrisiko darstellen, lässt sich auf Grund ausstehender Untersuchungen noch nicht

abschließend beantworten. Es hat sich aber bei den Versuchen auf dem BAM-TTS-Freiversuchsgelände herausgestellt, dass es bisher nur bei Berstscheiben aus Aluminium und Stahl zu Ausbränden kam. Von daher ist es sicherlich interessant zu wissen, dass der Großteil der üblicherweise kommerziell erhältlichen Berstscheiben aus Aluminium oder Stahl gefertigt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Zabrenski, J. S., Werley, B. L., and Slusser, J. W.; Pressurized Flammability Limits of Metals; ASTM STP 1040, Philadelphia, 1989
- [2] Stoltzfus, J. M., Homa, J. M., Williams, R. E., and Benz, J. B.; ASTM Committee G-4 Metals Flammability Test Program: Data and Discussion; ASTM STP 986, Philadelphia, 1988
- [3] Chiffolleau, G., Newton, B., Holroyd, N. J. H., and Havercroft, S.; Surface Ignition of Aluminum in Oxygen; ASTM STP 1479, West Conshohocken, PA, 2006
- [4] Tillack, T., Binder, Chr., Brock, T., Beck, U., Weise, M., and Sahre, M.; Promoted Combustion Testing of Pure und Ceramic-Coated Metals in High Pressure Oxygen by the Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM); ASTM STP 1479, West Conshohocken, PA, 2006
- [5] Tillack, T., Binder, Chr., Brock, T., Beck, U., Weise, M., and Sahre, M.; Combustion Tests under High Pressure Oxygen: Promoted Ignition Combustion Test versus Metallic Disk Ignition Test; ASTM STP 1479, West Conshohocken, PA, 2006
- [6] ASTM G124-95, Standard Test Method for Determining the Combustion Behavior of Metallic Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres, 2003

Terms of Use

Any party may pass on this Work by electronic means and make it available for download under the terms and conditions of the Digital Peer Publishing License (DPPL) Version 3.0. The text of the license may be accessed and retrieved via Internet at <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-dppl-v3-en8>.

Beyond the conditions of the DPPL, the data which is contained in this catalog May only be used by any party for signal processing if the data is inserted into the source code of the program together with a reference to the catalog and if the program documentation (if available) also contains a reference to this catalog.

Exclusion of Liability

Deviating from paragraphs 12 and 13 of the DPPL Version 3.0, a comprehensive exclusion of liability applies. This states: This catalog is made available without any special or implied guarantee, which – among others – includes the implicit guarantee of the use of the catalog for a certain purpose. Under no circumstances is PTB responsible for any direct or indirect damage, independent of how it arose, through the use of the catalog. This also applies to damage due to errors of the catalog, which were already known at the occurrence of the damage.