

Altreifen als Brandgut in Abfallbehandlungsanlagen

T 3362

T 3362

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0224-5

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

FORSCHUNGSVORHABEN

ALTREIFEN ALS BRANDGUT IN ABFALLBEHANDLUNGSANLAGEN

- Abschlussbericht -

Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Beratung mbH
Corneliusstr. 31
42329 Wuppertal

Bearbeiter:

Prof. Dr. Roland Goertz
Ullrich Spor, Jonathan Moser, Markus Schwer

Bergische Universität Wuppertal
Fakultät für Maschinenbau
und Sicherheitstechnik

Fachgebiet:
Chemische Sicherheit und Abwehrender Brandschutz

Juli 2018

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	IV
1. Brandgut Reifen	1
1.1. Stand der Wissenschaft und Technik	2
1.1.1. Reifenkomponenten	2
1.1.2. Geometrischer Aufbau von Reifen	6
2. Anforderungen an die Reifenlagerung	10
2.1.1. Musterbauordnung	11
2.1.2. Industriebau-Richtlinie	12
2.1.3. Kunststofflager-Richtlinie	13
2.1.4. Normative Anforderungen	14
2.1.5. Anforderungen der Sachversicherer	14
2.1.6. Branchenspezifische Anforderungen	15
2.2. Internationale Regelungen	17
2.2.1. Australien	17
2.2.2. USA	23
2.2.3. Schweiz	24
2.3. Vergleich der Anforderungen	25
3. Brandentstehung	30
3.1. Entzündungsversuche	30
3.1.1. Versuchsaufbau	31
3.1.2. Probenvorbereitung	32
3.1.3. Flüssigkeitsbrand	33
3.1.4. Benzin-Bindemittelgemisch	35
3.1.5. Schweißperlen	36
3.1.6. Platindraht	38
3.1.7. Ölgetränkte-Lappen	39
3.1.8. Grillanzünder	40
3.1.9. Lösemittelhaltiger Flüssigkleber	42
3.1.10. Brandpasten	42
3.1.11. Fettbrand	44
3.2. Zündreihenfolgen	44

3.2.1.	Maschinenteil-Holz-Reifen	44
3.2.2.	Maschinenteil-Bitumen/Dachpappe-Reifen	46
3.2.3.	Maschinenteil-Stahlwolle-Reifen	46
3.3.	Brandverhalten	48
3.4.	Fazit	57
4.	Brandausbreitung	58
4.1.1.	TGA.....	58
4.1.2.	Vergleichende Betrachtung von Winter zu Sommerreifen.....	60
4.1.3.	Vergleichende Betrachtung Neu- zu Altreifen	62
4.1.4.	Vergleichende Betrachtung von Altreifen	64
4.1.5.	Vergleichende Betrachtung von Neureifen.....	66
4.1.6.	Kritischer Wärmestrom.....	67
4.1.7.	Wärmefreisetzungsrate und Verbrennungswärme	69
4.1.8.	Fazit	74
4.2.	Brandsimulation.....	75
4.2.1.	Ergebnisse	78
4.2.2.	Fazit	79
5.	Brandbekämpfung	80
5.1.	Löschmittel.....	80
5.2.	Löschwasserversorgung	83
5.2.1.	Grundsätze.....	83
5.2.2.	Bemessung des Löschwasserbedarfs.....	84
5.2.3.	Abfließendes Löschwasser	88
6.	Zusammenfassung	90
7.	Bildverzeichnis	91
8.	Tabellenverzeichnis.....	93
9.	Anhang.....	94
	Berechnung der Gewichtsanteile.....	94
	References	95

Abkürzungsverzeichnis

FDS	Fire Dynamics Simulator
KLR	Kunststofflager – Richtlinie
MLC	Massloss-Conecalorimeter
TGA	Thermogravimetrische Analyse
DSC	Dynamic Scanning Calorimetry
EHC	Effective Heat of Combustion
HRR	Heat Release Rate
HRRPUA	Heat Release Rate Per Unit Area
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk
FwDV	Feuerwehr Dienstvorschrift
MBS	Mehrbereichsschaummittel
AFFF	Aqueous Film Forming Foam

1. Brandgut Reifen

Das Kraftfahrt-Bundesamt verzeichnet im Jahr 2016 einen Zuwachs von 1,8 % auf ca. 61,5 Millionen zugelassene Fahrzeuge in Deutschland.[34] Mit der stetig zunehmenden Anzahl an Kraftfahrzeugen steigt zum einen der Bedarf an neuer Bereifung, weshalb sowohl die Hersteller als auch die Händler entsprechend große Mengen an Neureifen in zahlreichen Lagern vorhalten müssen, zum anderen erhöht sich aber auch die Zahl der anfallenden Altreifen (Deutschland: ca. 600.000 Tonnen pro Jahr). [56] In Deutschland müssen diese zu 100 % verwertet werden, weshalb eine endgültige Deponierung anders als in anderen (nicht europäischen) Ländern verboten ist. Dennoch müssen die Altreifen zunächst meist in Lagern deponiert werden, bevor sie der stofflichen oder energetischen Verwertung zugeführt werden können.

In derlei Lagern kommt es immer wieder zu größeren Brandereignissen mit teils erheblichem Schadensausmaß. Dass mit solchen Bränden neben hohen finanziellen Schäden vor allem auch Personen- und Umweltgefährdung einhergehen, wird anhand des Brandes der größten illegalen Reifendeponie Europas in Spanien bei Seseña ersichtlich. Noch Wochen nach der Entzündung des ca. 5 Millionen Altreifen umfassenden Lagers am 13.05.2016 schwelte der Brand weiter, da die Lösversuche mit Wasser nach einigen Tagen eingestellt wurden, um zu verhindern, dass toxische Rückstände in den Boden geschwemmt werden. Die Bewohner der angrenzenden Siedlungen wurden aufgefordert, ihre Fenster und Türen geschlossen zu halten und in ihren Wohnungen zu bleiben. Zeitweise wurden ca. 1.000 Menschen aus umliegenden Siedlungen evakuiert, da die die Rauchgase von den zuständigen Stellen als sehr gesundheitsschädlich und stark krebserregend eingestuft wurden. [46] Welche Stoffe und in welchen Mengen bei einem Reifenbrand freigesetzt wurden, ist weitestgehend unbekannt. Die Ermittler gehen bei Reifenlagerbränden in der Regel von Brandstiftung aus, so auch in diesem Fall, da das Feuer an drei Stellen gleichzeitig ausbrach. [57] Welche langfristigen Schäden hierbei entstanden sind, bleibt abzuwarten. Auch in Deutschland kam es in der Vergangenheit öfters zu größeren Brandereignissen in Reifenlagern deren Ausmaße nicht so dramatisch wie in Spanien waren aber dennoch die Feuerwehren vor größere Herausforderungen stellten [1]. Aus solchen Ereignissen ergibt sich die Frage, ob es möglich ist solchen Ereignissen besser vorzubeugen und vor allem mit welchen Mitteln. Hierbei ist zu beachten, dass die Baurechtliche Einstufung von Reifenlagern nicht eindeutig geklärt ist. Häufig wird die Richtlinie über den Brandschutz bei der Lagerung von Sekundärstoffen aus Kunststoff (KLR). Da Reifen Neu oder Alt nicht direkt in den Geltungsbereich dieser Richtlinie fallen gilt es zu prüfen ob die Regelungen der Richtlinie für Reifenlager ausreichend sind oder ob die Notwendigkeit einer eigenständigen Richtlinie besteht.

1.1. Stand der Wissenschaft und Technik

1.1.1. Reifenkomponenten

1839 wurde von Charles Goodyear, bei dem Versuch die Kautschukeigenschaften zu verbessern, mehr oder weniger zufällig der chemische Prozess ausgelöst, der entsteht, wenn ein Gemenge aus Naturkautschuk und Schwefel mit hoher Temperatur beaufschlagt wird und heute als Vulkanisation bekannt ist. Im Jahr 1846 wurden dann zum ersten Mal Vollgummireifen aus einer Schwefel- Naturkautschukmischung hergestellt, welche wiederum 1898 durch serienmäßig hergestellte Luftreifen der Goodyear Tire & Rubber Company abgelöst wurden. Die hohe Nachfrage nach Naturkautschuk durch die zunehmende Industrialisierung, Militarisierung und den darauffolgenden Ersten Weltkrieg führte dazu, dass die Forschungen zur Herstellung synthetischen Kautschuks intensiviert wurden. Das erste Patent für ein Verfahren zur Herstellung von künstlichem Kautschuk wurde bereits am 12.09.1909 in Deutschland ausgegeben. [60] Der Durchbruch bei der Synthetisierung von Kautschuk gelang dem Chemiker Walther Bock im Jahre 1929, er entwickelte den heute noch gebräuchlichen Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR). [33] Um das Jahr 1920 wurde durch die Verarbeitung von Baumwolle als Karkassen Material ein weiterer bedeutender Schritt in der Reifenentwicklung vollzogen. [14]

Seit der ersten Serienmäßigen Herstellung von Vollgummireifen 1898 haben sich Reifen kontinuierlich fort entwickelt. So erfuhren Reifen seit dieser Zeit eine Vielzahl an Änderungen hier sein beispielhaft geometrische Änderungen (1904 das erste Profil) sowie zusätzliche Inhaltsstoffe (Ruß) genannt [14]. Heutzutage gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Reifen für diverse Anwendungen. Diese unterscheiden sich allein aufgrund ihrer unterschiedlichen Einsatzgebiete in der physikalischen und chemischen Zusammensetzung. So sind die Bodenhaftung und Stabilität eines Sommerreifens bei entsprechenden Temperaturen schon allein aufgrund des geringeren Naturkautschukanteils und der angepassten Profilierung besser als die eines bei gleichen Bedingungen eingesetzten Winterreifens. [22] Deshalb gibt es klar definierte Temperaturbereiche sowie Geschwindigkeitsbereiche bzw. generell Einsatzgebiete, in denen die Reifen ihre volle Leistung aufzeigen müssen. Trotz der daraus entstehenden Vielfalt an Reifenmodellen bleiben der Herstellungsprozess und somit auch der Grundaufbau eines Reifens immer nahezu gleich. Der schematische Aufbau eines schlauchlosen Autoreifens ist in der nachfolgenden Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Aufbau eines PKW-Reifens [22]

- | | | | |
|----------------|----------------------|---------------------|----------------|
| (1) Lauffläche | (3) Stahlgürtellagen | (5) Innenisolierung | (7) Kernreiter |
| (2) Bandage | (4) Gewebelagen | (6) Seitenwand | (8) Wulstkern |

Ein Autoreifen besteht grob unterteilt aus der Karkasse, die das tragende Grundgerüst eines Reifens bildet, der darauf aufgebracht Lauffläche (1), deren Gummimischung und Profil für die optimale Kraftübertragung je nach Einsatzgebiet des Reifens unterschiedlich ausgeprägt sind und der Seitenwand (6), die die Karkasse zum einen vor äußeren Einflüssen schützt und zum anderen einen für den Fahrkomfort wichtigen Federweg darstellt. Zusätzlich sind dort Produktionsinformationen des vorliegenden Reifens eingepreßt. Dazu zählen beispielsweise der Hersteller- und Modellname, das Produktionsdatum (DOT-Nummer), die Reifendimension, der Geschwindigkeitsindex, der Tragfähigkeitsindex, der Laufrichtungspfeil, Hinweise zur maximalen Belastung und zum maximalen Innendruck. Bei der DOT-Nummer stehen die ersten zwei Zahlen für die Kalenderwoche und die letzten zwei Nummern für das Jahr in dem der Reifen produziert wurde. Für den Verbraucher wichtige Informationen über die Maße eines Reifens liefert die Reifendimension. So besagt eine beispielhafte Reifendimension 195/60 R15, dass dieser Reifen eine 195 mm breite Lauffläche und eine 117 mm tiefe Seitenwand besitzt, welche als prozentualer Anteil der Lauffläche angegeben wird. Das R steht für die radiale Anordnung der Karkasse, diese verläuft quer zur Laufrichtung des Reifens, anders als bei Diagonalreifen, deren Gewebe in Laufrichtung angeordnet ist. Die darauf folgende Kennzahl beschreibt den benötigten Felgendurchmesser in Zoll. [38] Die Karkasse besteht u.a. aus einer oder mehreren gummierten Stahlgürtellagen (3), deren Auslegung die Form- und Fahrstabilität des Reifens bestimmt. Diese sind zum Schutz zur Lauffläche durch eine Bandage (2) abgetrennt, die mit einer zusätzlichen Gewebeschicht aus Nylon[®] verstärkt sein kann. Der aus verschiedenen Drähten bestehende und mit Gummi ummantelte Wulstkern (8) wird zusammen mit dem aus besonders festem Gummi bestehenden Kernreiter (7) von einer gummierten Gewebelage (4) aus Polyester oder Rayon[®] eingefasst und garantiert zusammen mit der Felgenschutzrippe (9) den festen Halt auf der Felge. Bei den heutigen Autoreifen ersetzt die Innenisolierung (5) aus luftundurchlässigem Butylkautschuk den vom Fahrrad bekannten Luftschlauch. Den nötigen Gegendruck hierzu liefern die o.g. Gewebelagen. [37, 38]

Diese Bauteile werden während der Hochzeit¹ zu einem Rohling zusammengefügt, der wenig Ähnlichkeit mit dem Endprodukt aufweist. Das noch sehr zähe Rohprodukt wird durch die enthaltenen Vulkanisationshilfsmittel (u.a. Schwefel) im Zuge der ca. 20 minütigen Vulkanisation bei etwa 170 °C in einer mehrteiligen Heizpresse zum Endprodukt Reifen verbunden. Dieser Prozess wird in der Vulkanisationsbranche als Backen bezeichnet. Nach diesem Vorgang sind alle Bestandteile untrennbar miteinander verbunden. [38] Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt einen Rohling kurz vor und einen „fertigen“ Reifen kurz nach dem Backen.



Abbildung 2: Backen eines Reifenrohlings [55]

Bei einem im Allgemeinen gleichbleibenden Reifenaufbau unterscheidet sich die chemische Zusammensetzung der Gummimischung nicht nur zwischen den verschiedenen Reifenmodellen, sondern auch innerhalb eines Reifens. Aktuell kann man davon ausgehen, dass bis zu 20 verschiedene Gummimischungen zur Produktion eines einzelnen Reifens verwendet werden. So wird der Kernreiter aus einer härteren Gummimischung hergestellt als die Seitenwand. Der Grund hierfür liegt in den spezifischen Aufgaben der jeweiligen Bauteile. Die Härte des Kernreiters ist aufgrund der schnellen Kraftübertragung ausschlaggebend für eine hohe Fahrstabilität und ein präzises Lenkverhalten. Die Seitenwand dient dem Schutz vor seitlicher Beschädigung und Witterungseinflüssen. Durch die weichere Mischung ergibt sich eine höhere Widerstandsfähigkeit und Elastizität. Die unterschiedlichen Materialeigenschaften sind insbesondere vom Ruß-Weichmacherverhältnis sowie von der Dosierung der Vulkanisationshilfsmittel abhängig. Der hier genannte Ruß entspricht nicht dem bekannten Nebenprodukt aus unvollständigen Verbrennungen, sondern viel mehr dem industriell hergestellten Ruß, welcher auch als Carbon Black bezeichnet wird. [14, 37]

¹ Fachbegriff aus der Vulkanisationsbranche: Bezeichnet den Zusammenbau des Rohlings aus den verschiedenen Rohmaterialien.

Der pneumatische Reifen unterliegt einer steten Weiterentwicklung, um den sich ständig ändernden Ansprüchen der Automobilbranche gerecht zu werden. Durch diese stetige Anpassung wurde der Reifen zu dem jetzigen Hochleistungsprodukt, was allein schon durch den komponentenreichen Aufbau ersichtlich wird. [38]

Aber nicht nur der Aufbau eines Autoreifens ist für seine Eigenschaften ausschlaggebend, sondern vor allem auch seine chemische Zusammensetzung. So wandelte sich die anfänglich simple Gummimischung aus Naturkautschuk und Schwefel zu einem hochkomplexen Gemisch aus einer Vielzahl von Zutaten. In der nachfolgenden Abbildung 3 sind exemplarisch die gängigen Zutaten eines Continental-Reifens dargestellt.



Abbildung 3: Bestandteile einer Gummimischung [37]

Natürlicher und synthetischer Kautschuk liefern das Grundmaterial für jede Mischung. Um die Widerstandsfähigkeit des Reifens gegen Abrieb zu erhöhen, werden Füllstoffe wie Ruß und Silica beigemischt. Zur Verkürzung der Vulkanisationsdauer kommen verschiedene Reaktionsbeschleuniger hinzu. Zum Schutz vor schädlicher Ozon- und Lichteinwirkung werden Alterungsschutzmittel und Lichtschutzwachs beigemischt. Um verschiedenste Eigenschaften des Reifens hervorzubringen, werden noch weitere Stoffe benötigt. [37]

Diese unterscheiden sich von Reifen zu Reifen um die je nach Modell gewünschten Eigenschaften zu erreichen. Die genauen Rezepturen werden vom jeweiligen

Hersteller der Öffentlichkeit vorenthalten somit ist es nicht möglich die Inhaltsstoffe eines Reifens genau wiederzugeben. Es ist allerdings möglich die wichtigsten Bestandteile und ihre üblicherweise vorhandenen Gewichtsanteile zu benennen, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Zusammensetzung von Reifen [37, 56]

Reifeninhaltsstoffe	Anteile [Gew. %]	Beispiele
Kautschuk	38 – 45	Natur- und Synthetikautschuk
Füllstoffe	28 – 30	Carbon Black, Kreide, Silica, ...
Festigkeitsträger	16	Stahl, Rayon, Nylon, ...
Öle und Zuschlagstoffe	11 – 16	Schwefel, Zinkoxid, Alterungsschutzmittel, Weichmacher, ...

Aus den in der Tabelle dargestellten Wertebereichen wird ersichtlich, dass ein Reifen bis zu 84 Gew.-% aus einer Mischung diverser Kautschukarten, unterschiedlicher Füllstoffe, Ölen und Zuschlagstoffen besteht. Auf diesen hauptsächlich organischen Verbindungen beruht der hohe Brennwert von bis zu 35 MJ pro kg. [20] Die 16 Gewichtsprozent der Festigkeitsträger, wie Stahl, Rayon und Nylon, haben nur einen geringen Einfluss auf den Brennwert. Der Stahl hat hierbei den höchsten Gewichtsanteil, liefert aber bei der Verbrennung des Reifens keine Energie, vielmehr nimmt er zunächst Energie auf, was sich auf das Entzündungsverhalten negativ auswirkt. Die Zersetzung von Nylon findet erst ab ca. 500 °C statt. Rayon, Nylon und die Kautschukmischung sind unter anderem für das Entstehen von stickstoffhaltigen Polymeren verantwortlich. Der darin enthaltene Schwefelanteil sorgt auch für das Ausgasen von Schwefeldioxid. [19]

1.1.2. Geometrischer Aufbau von Reifen

Ein Problem, das zu einer schnellen Brandweiterleitung führt, stellen der geometrische Aufbau der Reifen und hier insbesondere deren natürlich vorkommende Hohlräume dar.

Wie Pleß & Seliger [20] berichten, besitzen Brände bei losen Schüttungen und großen Teilen im Allgemeinen eine äußere und eine innere Oberflächenstruktur. Auf der äußeren Struktur, der Oberfläche der Schüttung, läuft der vollentwickelte Brand ab. Dieser liefert einerseits zunehmend brennbare Gase für die Flammen und kann im gleichen Zug aber auch durch die entstehende Strahlung auf die inneren Oberflächen der Körper und andere Hohlräume einwirken. In dieser sog. inneren Struktur können in der Folge neben dem sichtbaren Brand auch verdeckte Glutnester und Brände entstehen, die auch lange nach dem Vollbrand noch existieren und zu langwierigen Löscharbeiten führen können, wie auch die o.g. Beispiele zeigten.

Dieser Effekt ist auf keinen Fall zu unterschätzen und kann je nach Lageranordnung insbesondere bei der Reifenlagerung auch noch verstärkt werden. Durch die gleichmäßig runden Hohlräume innerhalb und zwischen den Reifen sowie die dadurch vorhandene ausreichende Menge an Luft zwischen den Körpern, bildet sich ein Sauerstoffangebot aus, in dessen Folge die innere Struktur mit dem Oxidationsmittel reagiert und die Ausbildung der angesprochenen innen liegenden Glutnester unterstützt wird. Diese können, auch lange nachdem die sichtbaren Flammen abgelöscht sind, zu einer erneuten Entzündung der Reifen führen. Die auftretende vertikale und horizontale Ventilation innerhalb des Lagergutes stellt also neben den sichtbaren Flammen ebenfalls einen wesentlichen Beitrag zur Brandentwicklung dar und fällt abhängig von der Anordnung der Reifen sowie dem dadurch vorhandenen Sauerstoffangebot unterschiedlich stark aus.

Dieser Zusammenhang wurde ebenfalls von Gratkowski [26] nachgewiesen. In seiner Versuchsreihe wurde ein Reifen in zwei verschiedenen Positionen, sowohl auf der Lauffläche stehend als auch auf der Seitenfläche/Flanke liegend, mit Hilfe eines Brandbeschleunigers entzündet. Hierbei wurde festgestellt, dass ein vollkommener Abbrand des stehenden Reifens in nahezu der Hälfte der Zeit im Vergleich zur liegenden Position geschieht (16 min bzw. 28,5 & 32,5 min). Als Abbrand wurde hier eine Wärmefreisetzungsrate von < 20 kW definiert, da ein Brand in dieser Größenordnung im Vergleich zu Spitzenraten von mehreren 100 kW als nicht mehr relevant angesehen werden kann. Die aus den Versuchen resultierenden unterschiedlichen Brandzeiten sind ebenfalls auf die angesprochenen Ventilationseffekte zurückzuführen. In stehender Position erfolgt eine komplette horizontale Durchströmung des Reifens von beiden Seiten, womit insgesamt mehr Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung steht. Darüber hinaus kann sich die Flamme weiter nach oben ausbreiten, was auf die Geschwindigkeit der Verbrennung ebenfalls einen positiven Effekt hat, da so die gesamte Fläche (innere und äußere Struktur) von der entstehenden Energie betroffen ist. In liegender Position hingegen wird nur eine Seite des Reifens von der Außenluft überströmt. Der Reifen brennt somit zunächst nur an der dem Sauerstoff ausgesetzten oberen Seite sowie der inneren Oberfläche und arbeitet sich entgegen der Luftströmung nach unten durch, was mit einer wesentlich langsameren Verbrennung einhergeht, da die tiefer liegenden Bereiche nur indirekt in geringerem Maße von den entstehenden Flammen und der Strahlung erfasst werden.

All diese Effekte der Ventilation wirken sich insgesamt auch auf die entstehenden Wärmestromdichten sowie die Wärmefreisetzungsraten aus, wie die folgenden Abbildungen zeigen. Hier wird deutlich, dass beide Eigenschaften in stehender Position etwa den doppelten Wert annehmen. Ebenfalls deutlich zu sehen ist auch die beschriebene Wärmesenke der Lauffläche (grüne Kurven), die bei einer Energiezufuhr an dieser Stelle in einer deutlich verspäteten Zündung des Reifens resultiert. Die blauen und violetten Kurven stehen für eine Entzündung des Reifens an der Innenseite bzw. am Wulst. Aufgrund der geringeren Materialdichte an dieser Stelle sowie der

geringeren Wärmespeicherkapazität des Stahls im Vergleich zu Kautschuk erfolgt eine Zündung hier entsprechend früher.

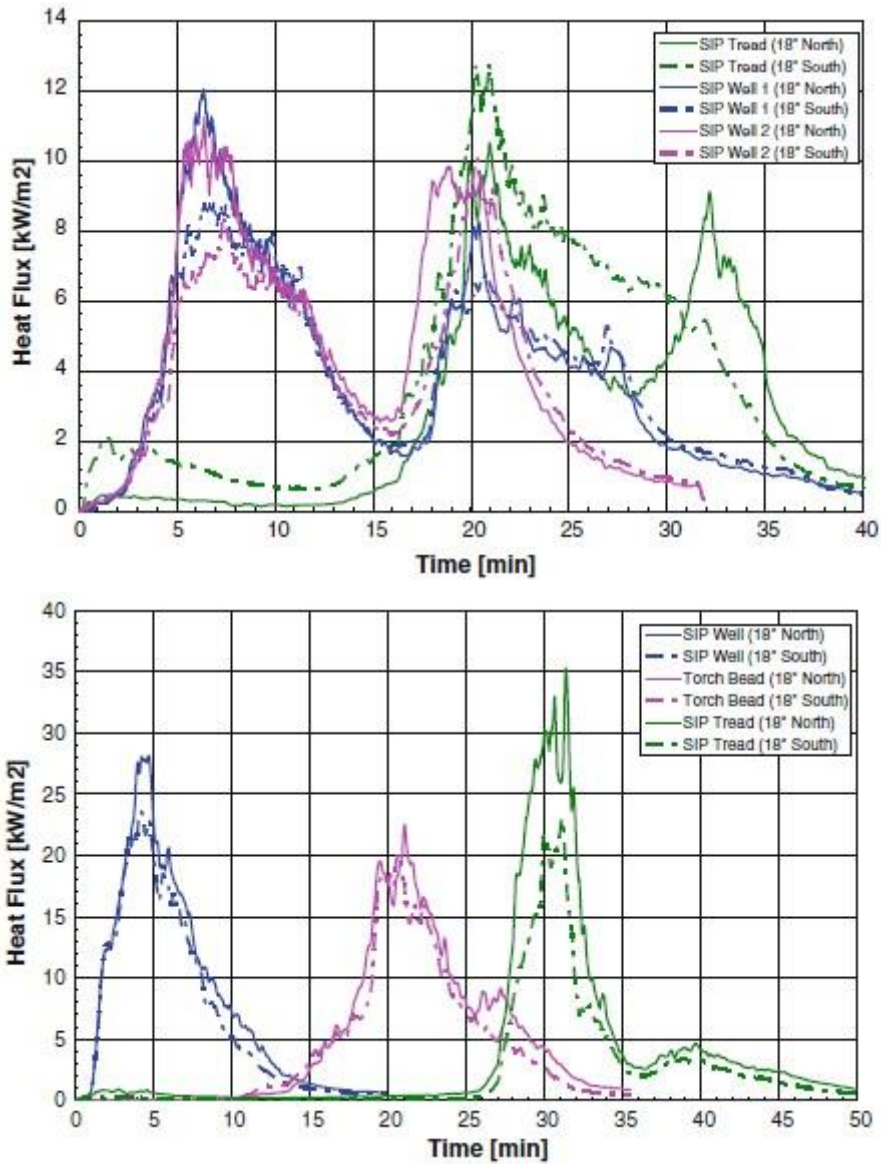


Abbildung 4 Wärmestromdichten in liegender (oben) und stehender (unten) Position [26]

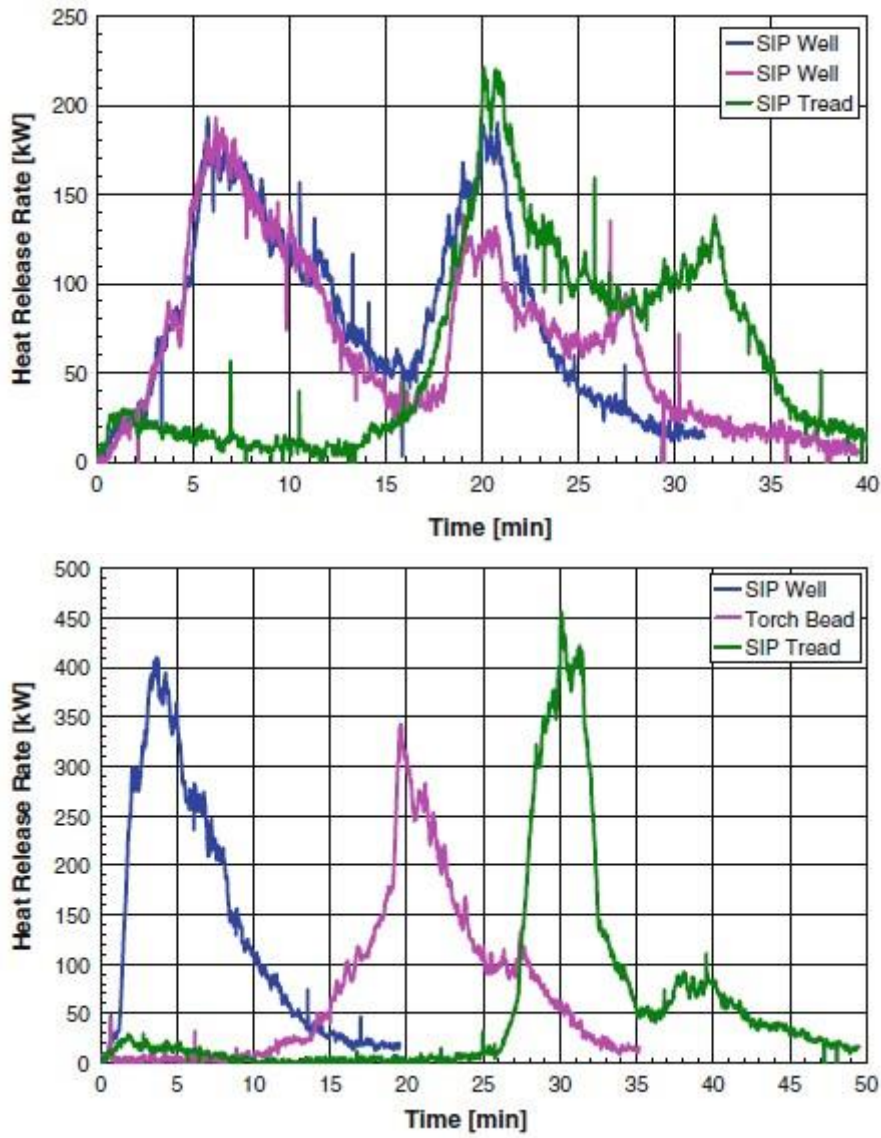


Abbildung 5: Wärmefreisetzungsrate in liegender (oben) und stehender (unten) Position [26]

2. Anforderungen an die Reifenlagerung

An Lagerplätze und speziell an Reifenlager werden sowohl in Deutschland als auch international von verschiedenen Institutionen vielseitige Anforderungen gestellt. Diese können als öffentlich-rechtliche Regelwerke oder als private Dokumente, bspw. von Sachversicherern, Normungsinstituten, Branchenverbänden oder anderen nicht-staatlichen Organisationen herausgegeben worden sein. Diese Unterscheidung spielt vor allem für die Anwendbarkeit und Durchsetzbarkeit der Vorschriften eine große Rolle, denn je nach Herausgeber differieren diese Regelungen auch in ihrem Geltungsbereich, ihrer Zielsetzung, ihrer rechtlichen Verbindlichkeit und ihrem Konkretisierungsgrad. Im Folgenden werden jedoch unabhängig davon alle Regelungen betrachtet, die thematisch mit dem Brandschutz in Reifenlagerstätten zusammenhängen können. Dadurch soll ein möglichst umfassender Überblick geschaffen werden, in welchen Regelwerken überhaupt konkrete Anforderungen genannt werden und ob diese auf den speziellen Fall der Reifenlagerung anwendbar sind.

Da der Fokus der Arbeit auf den vorbeugenden Brandschutz gerichtet ist, werden nur die Abschnitte der Vorschriften genauer betrachtet, die sich mit dieser Thematik auseinandersetzen. Darüber hinausgehende Anforderungen, wie bspw. an den Umweltschutz, stellen natürlich ebenfalls für sich gewisse Problematiken dar, werden aber explizit nicht als Teil der vorliegenden Arbeit ausgeführt.

Nationale Vorschriften In der Bundesrepublik Deutschland fällt der Bereich des Baurechts aufgrund der föderalen Struktur in Verbindung mit der konkurrierenden Gesetzgebungskompetenz des Bundes in den Verwaltungsbereich der Länder [27]. Das bedeutet, dass die Länder von ihrer Gesetzgebungskompetenz in den in Art. 74 GG definierten Gebieten solange Gebrauch machen dürfen, solange der Bund nicht durch übergeordnete Vorschriften eingreift. Auf dieser föderalen und konkurrierenden Basis müssen auch die rechtlichen Anforderungen an die Reifenlagerung in dieser Arbeit betrachtet werden.

Die oberste baurechtliche Grundlage eines jeden Bundeslandes stellt die LBO dar. Um möglichst einheitliche bauliche Anforderungen im gesamten Bundesgebiet zu gewährleisten, basieren diese Ordnungen jedoch sowohl formal als auch inhaltlich zum größten Teil auf der von der Bauministerkonferenz herausgegebenen MBO und unterscheiden sich nur in einigen länderspezifischen Details. Um also einen möglichst umfassenden Überblick über die baulichen Anforderungen an Lagerplätze zu bieten, wird auf bauordnungsrechtlicher Seite im Folgenden auf die gültige Fassung der MBO Bezug genommen. Somit ist gewährleistet, dass die Ausführungen dieser Arbeit länderunabhängige Anwendung finden können und ggf. nur in wenigen Details überprüft oder angepasst werden müssen.

Analog dazu muss auch im Bereich der in dieser Arbeit betrachteten Richtlinien eine gewisse Besonderheit vorangestellt werden. Hier existieren für einige bauliche Gegebenheiten ebenfalls von der Bauministerkonferenz herausgegebene Musterrichtlinien, an denen sich die Länder in ihrer eigenen Gesetzgebung orientieren können. Diese Richtlinien erlangen im Baurecht der Länder jedoch erst rechtliche Verbindlichkeit, wenn sie gemäß § 3 (3) MBO durch entsprechende öffentliche Bekanntmachungen als Technische Baubestimmungen des jeweiligen Bundeslandes offiziell bauaufsichtlich eingeführt wurden. Aus dem vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) herausgegebenen Verzeichnis über die eingeführten Technischen Baubestimmungen [16] geht hervor, dass dies für alle Musterrichtlinien in allen Bundesländern der Fall ist. Lediglich im Falle der Industriebaurichtlinie ergibt sich die Besonderheit, dass momentan die aktuelle Fassung aus dem Jahr 2014 erst in sieben von 16 Bundesländern bauaufsichtlich eingeführt ist. Da jedoch davon ausgegangen werden kann, dass diese Einführung in den noch verbleibenden Ländern ebenfalls zeitnah geschehen wird, wird im Sinne einer vorausschauenden Planung diese Fassung als Grundlage für die weitere Bearbeitung verwendet.

Neben den von der Bauministerkonferenz herausgegebenen und bauaufsichtlich eingeführten Richtlinien werden auf privatrechtlicher Seite in diesem Abschnitt auch normative Vorgaben sowie Anforderungen von Sachversicherern und Branchenverbänden betrachtet.

2.1.1. Musterbauordnung

Betrachtet man den Anwendungsbereich der MBO in der Fassung vom November 2002, so gilt diese im Allgemeinen „für bauliche Anlagen und Bauprodukte“ [6]. Dieser Geltungsbereich wird weiter durch die Definition von baulichen Anlagen konkretisiert:

Bauliche Anlagen sind mit dem Erdboden verbundene, aus Bauprodukten hergestellte Anlagen; eine Verbindung mit dem Boden besteht auch dann, wenn die Anlage durch eigene Schwere auf dem Boden ruht oder auf ortsfesten Bahnen begrenzt beweglich ist oder wenn die Anlage nach ihrem Verwendungszweck dazu bestimmt ist, überwiegend ortsfest benutzt zu werden. Bauliche Anlagen sind auch [...]
2. Lagerplätze, Abstellplätze und Ausstellungsplätze,
[...].
[6]

Da ein Reifenlager als mit dem Erdboden verbunden und i.d.R. überwiegend ortsfest angesehen werden kann, fällt es laut MBO auch erklärtermaßen unter den Begriff der baulichen Anlagen. Somit finden auch die dort definierten baulichen und brandschutztechnischen Anforderungen für diesen Fall Anwendung.

In § 3 (1), MBO (2002) ist diesbezüglich zunächst definiert, dass

Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten [sind], dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden.

Neben diesen allgemeinen Schutzziele sind in § 14, MBO (2002) darüber hinaus die grundlegenden Schutzziele definiert, die speziell an den baulichen Brandschutz gestellt werden:

Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.

Diese allgemeinen Paragraphen stellen die grundlegenden brandschutztechnischen Anforderungen an Lagerplätze dar, wie sie in der MBO als bauliche Anlagen definiert sind und werden auch in den folgenden Kapiteln immer wieder aufgegriffen, wenn Probleme und Lösungsansätze diskutiert werden.

Für außen liegende Lagerplätze werden in der MBO keine weiteren konkreten Brandschutzforderungen genannt. Da bei der Freilagerung, von der in dieser Arbeit primär ausgegangen wird, auch nicht damit zu rechnen ist, dass die Lagerfläche komplett überdacht oder mit entsprechend feuerwiderstandsfähigen Bauteilen eingehaust ist und somit auch nicht als Gebäude im Sinne der MBO gilt, werden alle weiteren genannten spezifischen Anforderungen an Bauprodukte, Wände, Decken etc. in dieser Arbeit nicht explizit dargelegt. Im Falle einer Hallenlagerung sind diese Anforderungen zudem von weiteren Faktoren, wie den Lagerausmaßen, der Gebäudegeometrie, den verwendeten Baustoffen etc. abhängig und müssen in jedem Fall projektspezifisch definiert werden. Auf eine umfassende Darstellung dieser Vorgaben wird daher im Rahmen dieser Arbeit verzichtet und auf die entsprechende Quelle zur weiteren Information verwiesen.

2.1.2. Industriebau-Richtlinie

Die Muster-Industriebau-Richtlinie (MIndBauRL), die auch hier stellvertretend für alle Bundesländer herangezogen wird, ist eine nach § 3 (3) MBO als Technische Baubestimmung eingeführte Technische Regel und kann nur im Zusammenspiel mit dieser angewendet werden, da sie in sich kein abschließendes Regelwerk darstellt [5]. Sie stellt lediglich eine Ergänzung bzw. Spezifizierung der übergeordneten Bauordnung dar, weswegen viele Anforderungen hinsichtlich der Einstufung von baulichen Anlagen daher nur in Verbindung mit den dort dargelegten Definitionen betrachtet werden können. Betrachtet man den Anwendungsbereich der Richtlinie, so gilt diese für „Industriebauten [...], die keine Aufenthaltsräume in einer Höhe von mehr als 22 m [...] haben“ sowie „Industriebauten, die Aufenthaltsräume [...] in einer Höhe von mehr als 22 m [...] haben, welche nur vorübergehend zu Wartungs- und Kontrollzwecken begangen werden [...]“ [4]. In diesem Satz wird über den Begriff der

Industriebauten bereits angedeutet, dass die Richtlinie möglicherweise nur für Gebäude Anwendung findet, was sich auch im Folgenden bestätigt.

Der Begriff der Industriebauten ist nachfolgend in der Richtlinie definiert als

Gebäude oder Gebäudeteile im Bereich der Industrie und des Gewerbes, die der Produktion (Herstellung, Behandlung, Verwertung, Verteilung) oder Lagerung von Produkten oder Gütern dienen [4].

Für den in dieser Arbeit primär untersuchten Fall der Freilagerung außerhalb eines Gebäudes bzw. ohne Schutz dessen findet die Richtlinie also keine Anwendung, da ein Freilager, wie in Kapitel 2.1.1 bereits angedeutet, auch nicht in den Definitionsbereich eines Gebäudes nach MBO fällt:

Gebäude sind selbstständig benutzbare, überdeckte bauliche Anlagen, die von Menschen betreten werden können und geeignet oder bestimmt sind, dem Schutz von Menschen, Tieren oder Sachen zu dienen [6].

Für den Fall der Freilagerung ist in der MIndBauRL lediglich geregelt, dass für

*Industriebauten mit geringeren Brandgefahren, wie Industriebauten, die überwiegend offen sind, wie überdachte Freianlagen oder **Freilager**, oder die aufgrund ihres Verhaltens im Brandfall diesen gleichgestellt werden können, [...], Erleichterungen gestattet werden [können], wenn die bauordnungsrechtlichen Schutzziele erfüllt sind [4].*

Die brandschutztechnischen Anforderungen an ein Freilager können also nicht pauschal anhand der geltenden Regelwerke (LBO & IndBauRL) definiert werden. Da in diesem Fall jedoch von den Anforderungen der MIndBauRL abgewichen werden kann, sind die bauordnungsrechtlichen sowie alle weiteren Schutzziele zunächst im Brandschutznachweis, z.B. dem Brandschutzkonzept, darzulegen. Das Erreichen dieser Schutzziele mit den getroffenen Erleichterungen ist anschließend ebenfalls über das Konzept nachzuweisen bzw. ausreichend nachvollziehbar zu begründen.

2.1.3. Kunststofflager-Richtlinie

Die Kunststofflager-Richtlinie ist in ihrer aktuellen Fassung in allen 16 Bundesländern als Technische Baubestimmung bauaufsichtlich eingeführt [5]. Auch hier gilt, dass sich die Versionen im Wesentlichen an der aktuellen Muster-Fassung aus dem Jahr 1996 orientieren und nur in wenigen Details voneinander abweichen, was die Berücksichtigung dieser Version für die vorliegende Arbeit rechtfertigt.

Im Geltungsbereich der Muster-Kunststofflager-Richtlinie (MKLR) heißt es:

*Diese Richtlinie gilt für die **Lagerung von Sekundärstoffen aus Kunststoff** [...] in Lagermengen von mehr als 200 m³ in Form von Mono- oder Mischfraktionen in kompakter Form oder als Schüttgut,*

lose, in ortsfesten und ortsbeweglichen Behältern, in Lagergebäuden und im Freien [42].

Dieser Anwendungsbereich wird lediglich in der in Brandenburg bauaufsichtlich eingeführten Fassung explizit um den Begriff der Altreifen ergänzt. Aufgrund der angesprochenen bundeseinheitlichen Gültigkeit der Arbeit soll auf diesen Spezialfall jedoch nicht näher eingegangen werden, da auch ansonsten keine weiteren inhaltlichen Unterschiede bestehen. Als Sekundärstoffe aus Kunststoff werden i.A. Kunststoffe bezeichnet, die den Wirtschaftskreislauf schon einmal durchlaufen haben und nach ihrer Aufbereitung (sekundär) wieder als Rohstoffe in diesen zurückgeführt werden [61]. Für Altreifen trifft diese Definition nicht zu, da diese zum Einen nicht komplett aus Kunststoff bestehen und zum Anderen nach ihrer Nutzung auch teilweise energetisch verwertet werden. Eine stoffliche Verwertung geschieht lediglich in der Verarbeitung des Kunststoffanteils zu feinem Granulat bspw. als Zusatz für Straßenbeläge oder in der Runderneuerung der Lauffläche und dem erneuten Verkauf bzw. Export des (aufbereiteten) Reifens. Die Stahl- und Textilanteile der Reifen werden wieder in der Stahlindustrie eingesetzt bzw. verbrannt [56]. Eine Rückführung der Reifen als Gesamtes oder in Teilen als Rohstoff in den Wirtschaftskreislauf findet also nicht statt, weshalb die MKLR auch aus den o.g. Gründen für den Fall der Reifenlagerung keine Anwendung findet.

2.1.4. Normative Anforderungen

Die einzige Norm, die sich in Deutschland mit der Lagerung von Reifen auseinandersetzt, ist die DIN 7716 „Erzeugnisse aus Kautschuk und Gummi-Anforderungen an die Lagerung, Reinigung und Wartung“. Der Geltungsbereich der Norm beschränkt deren Anwendung allerdings auf die Lagerung unvulkanisierter Kautschuk-Mischungen [17]. Für den Fall der Lagerung vulkanisierter Reifen findet diese also keine Anwendung.

2.1.5. Anforderungen der Sachversicherer

Ähnlich wie in Kapitel 2.1.3 in Bezug auf die MKLR beschrieben, ergibt sich für die Anforderungen der Sachversicherer das Problem der Anwendbarkeit auf die Reifenlagerung. Die VdS-Richtlinie 2517 „Sortierung, Aufbereitung und Lagerung von Siedlungsabfällen und brennbaren Sekundärrohstoffen- Hinweise für den Brandschutz“ gilt für „Betriebe, in denen brennbare Sekundärrohstoffe und gemischte Siedlungsabfälle sortiert, aufbereitet und gelagert werden“ [25]. Darüber hinaus wird im Geltungsbereich der Richtlinie auch auf den Anwendungsbereich der MKLR Bezug genommen und auf deren Existenz als bauaufsichtliche Richtlinie verwiesen, woraus sich eine thematische Abhängigkeit und Verflechtung der beiden Regelwerke ableiten lässt.

Aus den oben beschriebenen Gründen können diese versicherungstechnischen Anforderungen also auch nicht explizit auf die Lagerung von Reifen angewendet werden. Jedoch wird im Zuge der Überprüfung der Anwendbarkeit der MKLR in Kapitel 2.1.3 auch auf diese Vorschrift Bezug genommen und eine vergleichsweise

Betrachtung angestellt, da der Sachschutz in diesem Fall eine bedeutende Rolle spielt und für die Sachversicherer von besonderer Relevanz sein dürfte.

2.1.6. Branchenspezifische Anforderungen

Konkrete Anforderungen an den Brandschutz in Reifenlagern werden in Deutschland lediglich von der Industrie selbst festgelegt. Der Bundesverband Reifenhandel und Vulkaniseurhandwerk e.V. (BRV) definiert branchenspezifische Kriterien für die Zertifizierung von Altreifenentsorgungsbetrieben [11]. Die dort genannten Anforderungen beziehen sich explizit auf den Fall der Freilagerung und definieren hierbei auch konkrete Grenzwerte u.a. für die Ausmaße der Lagerflächen. Das Dokument ist jedoch nicht allgemein gültig, sondern es wird zunächst zwischen zwei Arten von Betrieben unterschieden, an die, abhängig von der Art der gelagerten Abfälle und ihrer daraus folgenden baurechtlichen Genehmigung, verschiedene Brandschutzanforderungen gestellt werden:

1. „Betriebe mit einer Genehmigung nach 4. BImSchV, Nr. 8.11, Spalte 2 müssen die in der Genehmigung geforderten Brandschutzanforderungen erfüllen.“ [11].

In diesem Fall muss allerdings beachtet werden, dass sich das Dokument des BRV auf eine mittlerweile veraltete Fassung der 4. BImSchV aus dem Jahr 1997 bezieht. Die dort im Anhang 1 unter Nr. 8.11, Spalte 2, aufgeführten Betriebe sind

- a) *Anlagen zur **Behandlung von überwachungsbedürftigen Abfällen**, auf die die Vorschriften des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes Anwendung finden, mit einem Durchsatz von 10 Tonnen je Tag oder mehr*
- b) *Anlagen, die der Lagerung von 100 Tonnen oder mehr **überwachungsbedürftiger Abfälle**, auf die die Vorschriften des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes Anwendung finden, dienen, ausgenommen die zeitweilige Lagerung – bis zum Einsammeln – auf dem Gelände der Entstehung der Abfälle [10]*

Für diese Betriebe finden die Anforderungen des BRV keine Anwendung, da Altreifen nicht als überwachungsbedürftige bzw. gefährliche Abfälle im Sinne des § 48 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes eingestuft sind, für die i.d.R. höherwertige spezielle Vorgaben gestellt werden [9].

Die zweite Gruppe von Betrieben, für die die Vorgaben des BRV jedoch gelten, sind

2. „Betriebe, die lediglich eine Baurechtliche Genehmigung bzw. Anzeige nach § 67 Abs. 2 BImSchG [Übergangsvorschriften] vorgelegt haben“ [11].

Für diese Betriebe gelten die folgenden Mindestanforderungen [11]:

- Jeder Betrieb hat eine verantwortliche Person für die Belange des Brandschutzes zu benennen. Brandschutzübungen bzw. Begehungen durch die örtliche Feuerwehr sollen in regelmäßigen Abständen (längstens zwei Jahre) erfolgen. Diese Übungen und Begehungen sind schriftlich zu dokumentieren.

-
- Diese Anforderung gilt auch für Betriebe mit überwachungsbedürftigen Abfällen nach Punkt 1.
 - Ein Brandschutzplan nach DIN 14095 muss vorgelegt werden.
 - Das Lager muss eine Zufahrt für die Feuerwehr haben. Lager von mehr als 3.200 m² sollten wenn möglich eine Feuerwehrumfahrt besitzen.
 - Die Belange des Brandschutzes sind durch eine benannte, qualifizierte interne oder externe Person wahrzunehmen (Absolvierung eines Brandschutzlehrgangs und Vorlage eines Sachkundenachweises, bzw. Nachweis über fundierte Erfahrung in Fragen des Brandschutzes). Der Brandschutzbeauftragte muss von seiner Stellung und von seinem Wissensstand her in der Lage sein, Kenntnisse und Erfahrungen an Mitarbeiter weiterzugeben.
 - Aus Gründen des vorbeugenden Brandschutzes ist das Lager in Brandabschnittsflächen zu unterteilen. Die einzelnen Brandabschnittsflächen sind in Teillagerflächen von maximal 400 m² zu unterteilen. Die Teillagerflächen sind durch fünf Meter breite Brandschneisen zu trennen. Anstelle der Freiflächen können auch Wände in der Bauart von Brandwänden angeordnet werden. Die Lagerguthöhe darf maximal 4 m bei Blocklagerung und 5 m bei Schüttlagerung betragen.
 - Mittels organisatorischer Maßnahmen muss dafür gesorgt werden, dass beim Abladen, Umladen, Sortieren und Lagern die oben genannten Anforderungen eingehalten werden (siehe: Brandschneisen, Größe der Teillagerflächen etc.). Hierzu ist eine Arbeitsanweisung zu erstellen und ggf. fortzuschreiben. Den Mitarbeitern muss diese Arbeitsanweisung bekannt sein, dies ist zu dokumentieren.
 - Zur Behebung von Schäden, die aus einem Brand resultieren (z.B. Kontaminierung des Erdreichs), muss ein ausreichender Versicherungsschutz nachgewiesen werden.

Auch wenn in diesem Dokument quantifizierte Anforderungen an die Reifenlagerung genannt werden, sei noch einmal explizit darauf hingewiesen, dass auch diese Regelungen keine allgemeine Gültigkeit bzw. rechtliche Verbindlichkeit besitzen. Diese sind privatwirtschaftlich vom BRV für die Branche der Altreifenentsorgungsbetriebe herausgegeben und dienen lediglich als Nachweiskriterien für deren Zertifizierung nach der Entsorgungsfachbetriebsverordnung. Eine brandschutztechnische Erfüllung der bauordnungsrechtlich definierten Schutzziele an solche Betriebe kann allein auf Basis dieser Maßnahmen nicht nachgewiesen werden.

2.2. Internationale Regelungen

Wie in Kapitel 2.1 gezeigt wurde, werden in Deutschland lediglich von privatwirtschaftlicher Seite konkrete Anforderungen an die Reifenlagerung gestellt. Die öffentliche Hand nennt hier bestenfalls allgemeine Schutzziele, wie sie z.B. in der MBO definiert sind. Allein aus diesem Grund erscheint es bereits notwendig, über den nationalen Tellerrand hinauszuschauen und die Anforderungen anderer Staaten zu betrachten. Auch wenn diese selbstverständlich nicht eins zu eins in das deutsche Baurechtssystem überführt werden können, bieten sie doch möglicherweise einen Anhaltspunkt darüber, wie man eine Reifenlagerfläche möglichst brandsicher gestalten kann.

Im Folgenden werden aus diesem Grund beispielhaft die Anforderungen betrachtet, wie sie in Australien, den USA und der Schweiz an Reifenlager, und auch hier insbesondere an die Freilagerung, gestellt werden. Hinsichtlich der Übertragbarkeit auf deutsche Verhältnisse sei vorweg gesagt, dass die Reifenlagerung in den USA und Australien nur bedingt mit der nationalen Situation vergleichbar ist. Die dortigen Flächen beherbergen teilweise mehrere Hunderttausend Reifen in anderen Lagerdimensionen, was sich quantitativ auch in der Auslegung und Konkretisierung der Regelwerke widerspiegelt, da eine solche Menge natürlich auch ein anderes Gefahrenpotenzial beherbergt, als man es möglicherweise aus Deutschland kennt. Des Weiteren sind viele Lagerbedingungen und Probleme, auf die in diesen Ländern Rücksicht genommen werden muss, wie z.B. die teils mangelnde Wasserversorgung und dessen Qualität, in Deutschland in dieser Form nicht vorhanden. Diese lokalen Besonderheiten sind in den folgenden Ausführungen zur besseren Unterscheidung kursiv dargestellt. Nichtsdestotrotz können unabhängig dieser Besonderheiten ähnliche Probleme bei der Lagerung und im Brandfall entstehen, weswegen die Vorschriften durchaus als Orientierungsmaßstab herangezogen werden können.

2.2.1. Australien

Der Betrachtung der australischen Regelwerke sei, ähnlich wie in Deutschland, vorweggenommen, dass viele Vorschriften auch dort nur in einzelnen Bundesstaaten gelten und keinen rechtlichen oder behördlichen Anspruch erheben. So auch die „Fire Service Guideline- open air storage of new or used tyres“, die im Bundesstaat Victoria von der Metropolitan Fire Brigade (MFB) und der Country Fire Authority (CFA), also den städtischen und ländlich zuständigen Feuerwehren, herausgegeben wurde. Diese Regelungen haben lediglich einen beratenden und empfehlenden Charakter der Feuerwehren zur sicheren Freilagerung von neuen und gebrauchten Reifen und sind in keinsten Weise rechtlich bindend [41]. Die wesentlichen Anforderungen an die Reifenlagerung aus diesem umfassenden Regelwerk sind nachfolgend zusammengefasst.

Die Regelungen von MFB und CFA zielen im Wesentlichen auf fünf Kernpunkte des vorbeugenden Brandschutzes ab:

-
- Mindestabstände zu Grundstücksgrenzen und Gebäuden, um das Risiko eines Feuerüberschlags zu minimieren
 - Begrenzung der empfangenen Wärmestromdichte durch Waldbrände auf max. 12,5 kW/m²
 - Begrenzung der Größe der einzelnen Reifenstapel sowie Feuerwehrezufahrten zwischen den Stapeln
 - Effektive vorbeugende Maßnahmen und Übungen um das Brandrisiko zu verringern
 - Schutz der Umwelt im Brandfall

Um diese Kernpunkte möglichst effektiv umzusetzen, werden vorwiegend bauliche und organisatorische Empfehlungen zu verschiedenen Bereichen gegeben:

Auswahl des Lagerplatzes

- Einbeziehung aller relevanten Behörden und Organisationen bei der Auswahl
- Vermeidung der Kontamination von Trinkwasser
- Möglichst flacher Untergrund
- Salzfrees Grundwasser
- Zugang zu salzfreier Wasserversorgung
- Lagerung außerhalb von Waldbrandgebieten
- Beachtung der allgemein üblichen Windverhältnisse in Bezug auf die Ausbreitung von Rauch, toxischen Gasen und Flammen
- Keine Lagerung in tief gelegenen Gebieten, wie stillgelegte Steinbrüche etc.
- Schutz des Bodens durch Lagerung auf einer undurchdringlichen Schicht

Größe der Reifenstapel und Sicherheitsabstände

- Stapel sollten möglichst klein gehalten werden
- Langgezogene Stapel sollten quadratischer Ausdehnung vorgezogen werden
- Maximale Ausdehnung der Stapel: 20 m x 6 m x 3 m (L x B x H)
- Möglichst große Abstände zwischen den Stapeln, 20 m werden empfohlen
- Höhe der Stapel sollte 3 m nicht übersteigen
- Abstand zu nicht ausreichend feuerwiderstandsfähigen Gebäuden min. 20 m

Vermeidung von Zündquellen

- Erlaubnisschein für feuergefährliche Arbeiten
- Regelmäßige Wartung und Reparaturen elektrischer Geräte
- Rauchverbot
- Vermeidung von offenem Feuer
- Keine Lagerung weiterer brennbarer Materialien innerhalb von 30 m Umkreis um die Lagerfläche
- Beachtung aller Sicherheitsabstände zu Gebäuden und Grundstücksgrenzen

Security

- Umzäunung des Geländes oder andere Security-Maßnahmen, um unbefugten Zutritt zu verhindern

Verhinderung der Brandausbreitung

- Ausreichende Vorhaltung von Löschgeräten wie Feuerlöscher etc.
- Ausreichende Anzahl an Hydranten

Wasserversorgung

- Benötigte Mengen an Löschmittel sowie eventuelles Equipment sollten mit der Feuerwehr abgestimmt und in einem Plan definiert werden
- Bei unzureichender Wasserversorgung werden zwei Tanks à 250.000 l in diagonal versetzten Positionen empfohlen
- Um die Bildung von Dioxinen zu vermeiden, sollte Trink- oder salzfreies Wasser verwendet werden

Löschwasserrückhaltung

- Lagerung auf undurchlässigem Untergrund
- Umwandlungen oder Gruben sollten geschaffen werden, um das Löschwasser aufzufangen

Feuerwehrezufahrt

- Ausgedehnte Lagerplätze sollten mindestens zwei separate, gegenüberliegende Feuerwehrezufahrten haben

Organisatorische Maßnahmen

- Durchführung einer Risikobewertung gemeinsam mit der zuständigen Brandschutzbehörde und externen Beratern
 - Erarbeitung der Brandgefahren
 - Erarbeitung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Brandereignis eintritt
 - Erarbeitung der Konsequenzen für Menschenleben, Sachen und Umwelt
- Erstellung eines Notfallplans
- Erstellung eines taktischen Feuerwehrplans mit Standorten aller notwendigen brandschutztechnischen Einrichtungen, Zufahrten sowie gefährlicher Stoffe und Materialien auf dem Lagergelände
- Entwicklung von Notfallmaßnahmen
 - Alarmierungsmittel
 - Details zur Kontaktierung von Feuerwehr, Umweltschutzbehörde etc.
 - Aufgaben der Mitarbeiter im Brandfall
 - Abläufe zum Einsatz von technischen Geräten wie Radlader etc. zur Trennung der Reifenstapel
 - Erwartungen der Lagerbetreiber an die Maßnahmen der Einsatzkräfte
- Vorhaltung von technischem Gerät zur Trennung der Reifenstapel im Brandfall

- Einweisung der eigenen Mitarbeiter im Umgang mit den technischen Geräten und persönlicher Atemschutzausrüstung

Ähnliche Regelungen wie diese existieren auch in weiteren australischen Staaten, bspw. in New South Wales und South Australia. Da sich die Anforderungen dort und in anderen Staaten jedoch nur unwesentlich voneinander unterscheiden, wird an dieser Stelle auf eine ausführliche Darstellung verzichtet und auf die entsprechende Literatur verwiesen [23]. Es sei an dieser Stelle lediglich im Sinne der Lagerorganisation darauf hingewiesen, dass in New South Wales, im Gegensatz zu den Vorgaben in Victoria, eine andere Form der Lagerorganisation im Sinne einer quadratischen Anordnung der Reifenstapel unter Einhaltung vorgegebener Abstände und Ausdehnungen bevorzugt wird. Die genauen Vorgaben an die Maße der Lagerung und dessen Organisation sind nachfolgend auch aufgrund der Ausführlichkeit und der sehr übersichtlichen Darstellung bildlich zusammengefasst.

Die maximale Höhe eines Lagerabschnitts beträgt 3,7 m, die maximale Fläche 60 m² und das maximale Gewicht 12,5 t (s. Abbildung 6 und Abbildung 7).

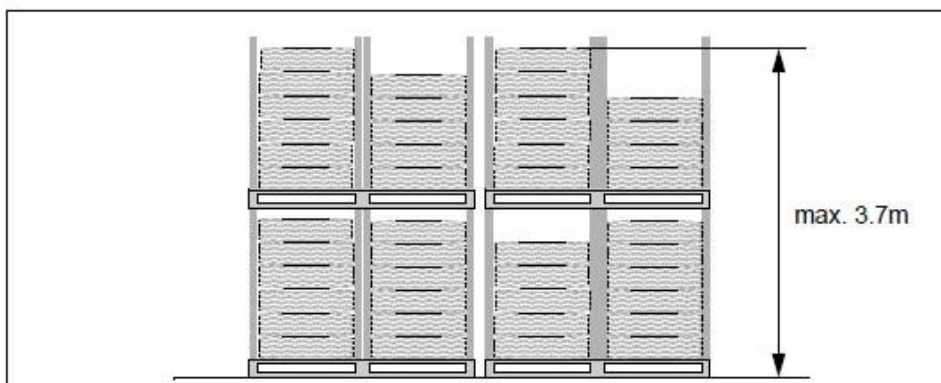


Abbildung 6 Seitenansicht eines Lagerabschnitts [23]

Maximal vier dieser Lagerabschnitte können so zu einem Brandabschnitt zusammengefasst werden. Der minimale Abstand zwischen den Lagerabschnitten beträgt 2,5 m (s. Abbildung 7). Aus brandschutztechnischer Sicht dürfte diesem geringen Abstand jedoch keine allzu große Bedeutung beigemessen werden. Hier stehen wohl eher logistische Aspekte bei der Lagerorganisation und dem Transport im Vordergrund.

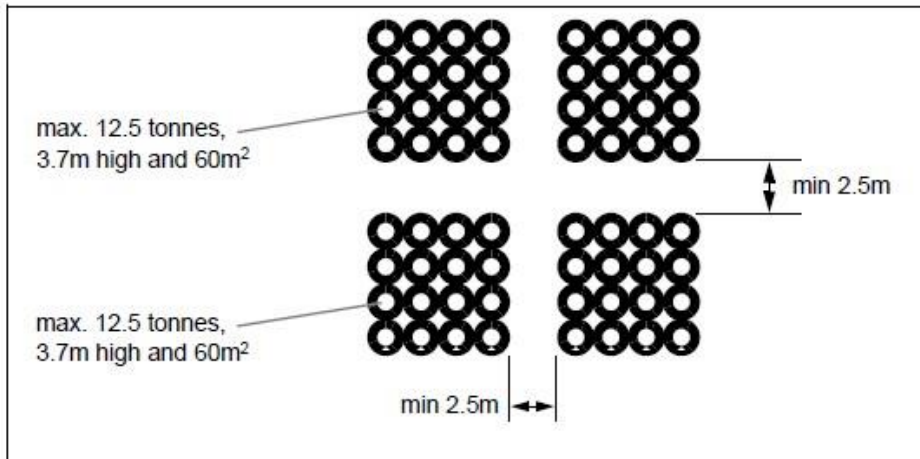


Abbildung 7 Zusammenfassung der Lagerabschnitte zu einem Brandabschnitt [23]

Zwischen den Brandabschnitten wiederum wird ein Mindestabstand von 18 m gefordert (s. Abbildung 8).

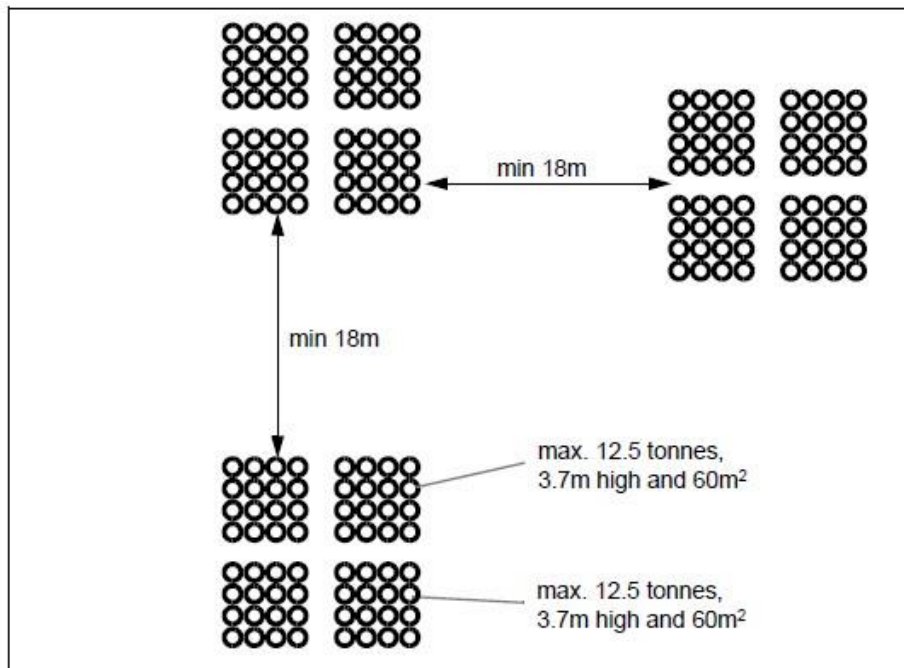


Abbildung 8 Mindestabstände zwischen den Brandabschnitten [23]

Lagerflächen mit höchstens einem Brandabschnitt (Gewicht der Reifen ≤ 50 t) werden als „kleine“ Lagerfläche bezeichnet. Die Abstände zu Gebäuden sollten hier min. 6 m bei nicht-brennbaren und min. 18 m bei brennbaren Außenwänden betragen (s. Abbildung 8).

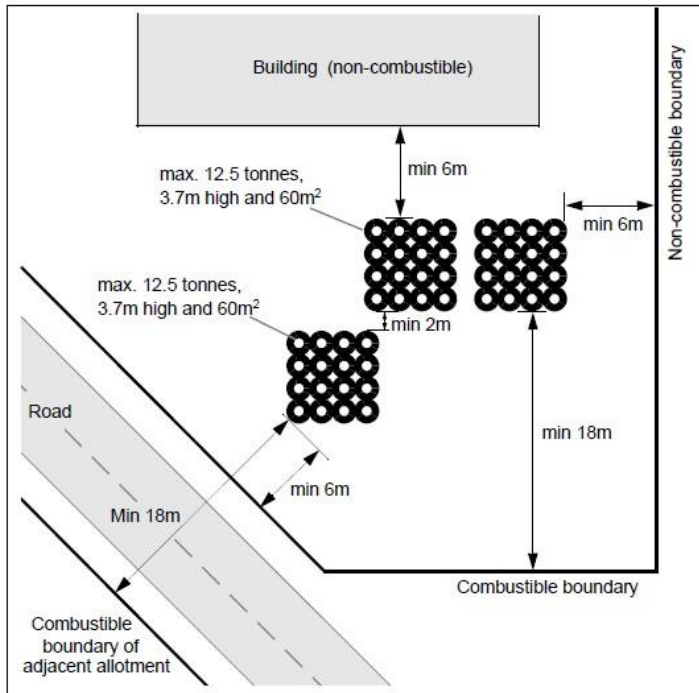


Abbildung 9 Minimalabstände bei kleinen Lagerflächen [23]

Bei „großen“ Lagerflächen hingegen (mehr als ein Brandabschnitt; Gewicht der Reifen > 50 t) beträgt der Abstand unabhängig von der Brennbarkeit min. 18 m zu Gebäuden und Grundstücksgrenzen (s. Abbildung 9).

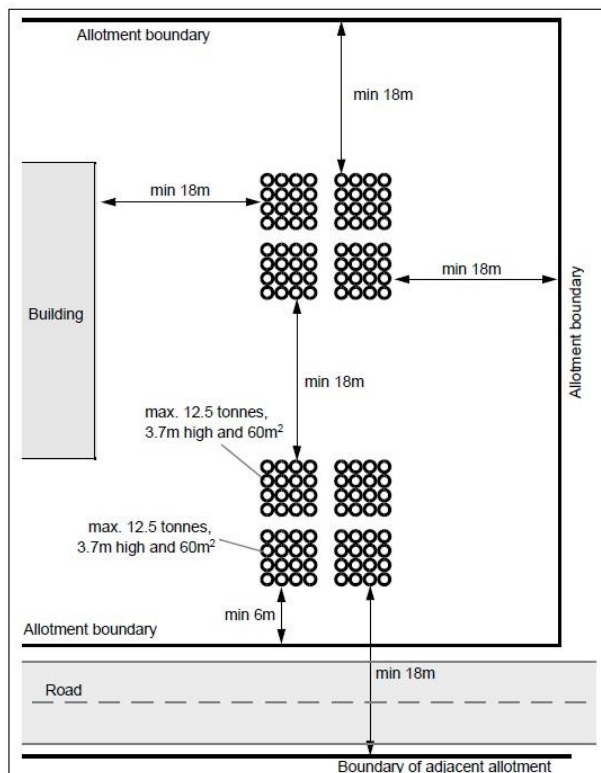


Abbildung 10 Minimalabstände bei großen Lagerflächen [23]

Alle Freilager sollten unabhängig von der Lagermenge mindestens zwei Feuerwehrzufahrten von min. 4 m Breite besitzen (s. Abbildung 10).

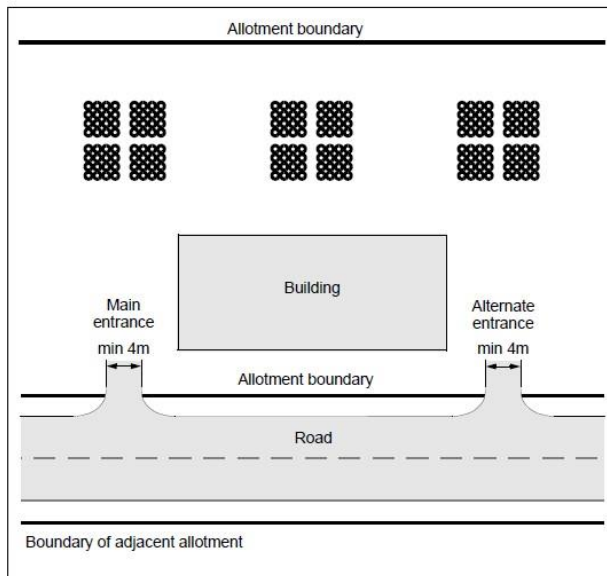


Abbildung 11 Darstellung der Feuerwehrzufahrten [23]

Hier wird in einem ersten Vergleich bereits deutlich, dass sowohl die Vorgaben des BRV in Deutschland als auch die australischen Regelwerke, v.a. in New South Wales, eine ähnliche Lagerorganisation verfolgen. Nach der dort vorgesehenen Lageranordnung können und sollten die Reifen ebenfalls zu einzelnen Lager- und Brandabschnitten² zusammengefasst werden, um ein Übergreifen des Feuers möglichst zu verhindern und das Vorgehen der Einsatzkräfte auch durch möglichst große Freiflächen zwischen den Abschnitten zu unterstützen. Dasselbe Konzept wird auch in der MKLR verfolgt, wie der Vergleich der internationalen Regelwerke in Kapitel 2.3 zeigt.

2.2.2. USA

In den USA existieren ähnliche Regelungen wie in Australien mit ähnlichen Vorgaben, da auch dort viele Lager eine ähnliche Größe annehmen, in denen diese Anforderungen auf praktikable Weise umgesetzt werden können. Aus diesem Grund wird auf eine umfassende Darstellung der Anforderungen verzichtet. Der Vollständigkeit halber seien jedoch auch hier beispielhaft die wesentlichen Forderungen kurz dargelegt, wie sie bspw. im Bundesstaat Nebraska verlangt werden:

- Lagerung der Reifen in mehreren Stapeln
- Freiräume zur Trennung der Stapel und als Feuerwehrzufahrt min. 13,5 m
- Ausreichende Abstände zu umliegenden Gebäuden

² Die Begriffe Lagerabschnitt und Brandabschnitt werden hier analog zu den Regelungen des BRV verwendet, da eine ähnliche Systematik in der Lagerung und Trennung der Reifen vorliegt, die auch eine Übertragung der Begrifflichkeiten rechtfertigt.

- Keine brennbaren Materialien innerhalb der Lagerfläche (auch Büsche, Gras, sonstige Pflanzen)
- Rauchverbot innerhalb der Lagerfläche
- Vermeidung von Zündquellen durch Schweißen, offenes Feuer etc.
- Lagerung auf möglichst ebenem Untergrund
- Kontrollierter Zugang zum Lager, Beleuchtung abends und nachts
- Perimetersicherheit durch min. 1,80 m hohen Zaun
- Maximale Stapelgröße: 15 m x 15 m x 3,6 m (L x B x H)
- Wasserversorgung für Feuerwehr mindestens 37.000 l
- Jeder Stapel sollte von einem 0,7 m hohen Damm umgeben sein
- Maximal 18 Stapel pro Lagerfläche
- Maximal 300.000 Reifen

[45]

2.2.3. Schweiz

Die Anforderungen zur Reifenlagerung in der Schweiz können, was die Dimensionen der Lagerung und die resultierenden Vorgaben angeht, vermutlich eher mit der Situation in Deutschland verglichen werden, weswegen auch die eidgenössischen Regelungen an dieser Stelle kurz betrachtet werden. Konkrete Anforderungen zur Lagerung von Reifen werden u.a. in einem Merkblatt von der Gebäudeversicherung – Kantonale Feuerpolizei im Kanton Zürich herausgegeben. Dort sind folgende Punkte für die Freilagerung (Lager ohne Witterungsschutz und mit einer Überdachung ohne seitliche Wände) vorgeschrieben:

- Maximale Lagerfläche (Lagerfläche plus Freiräume):
für überdachte Lager 1.200 m², für Freiluftlager 2.400 m²
- Maximale Fläche pro Lagerabschnitt: 100 m²
- Abstand zwischen Lagerabschnitten min. 10 m oder Trennwände der Qualität REI 90 (nicht brennbar)
- Ausreichende Anzahl an Hydranten
- Abstand zwischen Lagerflächen und Gebäuden ohne weitere Maßnahmen:
10 m

[24]

Auch hier zeigt sich, dass die qualitative Ausrichtung der Lagerorganisation mit den Vorgaben aus Australien und den USA übereinstimmt. Dies zeigt auch der folgende abschließende Vergleich der Regelwerke, in dem auch auf die Vorgaben der MKLR näher eingegangen wird.

2.3. Vergleich der Anforderungen

In einem abschließenden Vergleich der Anforderungsniveaus zeigt sich, wie bereits angedeutet wurde, dass andere Länder hinsichtlich des Sicherheitsniveaus und des offensichtlich vorhandenen Bewusstseins über die Gefahrenpotenziale von Reifenbränden wesentlich besser aufgestellt sind, als es hingegen hierzulande das deutsche Baurecht vermuten lässt. Die einzigen quantifizierten Anforderungen an die Reifenlagerung werden hierzulande vom BRV als baurechtlich nicht bindende Zertifizierungskriterien gestellt. Was die öffentliche Hand angeht, sind aus der MBO und der IndBauRL lediglich allgemeine Schutzziele sowie Vorgaben für die Lagerung innerhalb von Gebäuden abzuleiten. Die MKLR enthält zwar konkrete Anforderungen an außen liegende Lagerflächen, kann jedoch ausdrücklich nicht für die Reifenlagerung angewendet werden. Wie jedoch im folgenden Kapitel anhand mehrerer Fallbeispiele gezeigt wird, sind gerade diese frei liegenden und öffentlich zugänglichen Lagerflächen in Sachen vorbeugender Brandschutz problematisch und besonders schützenswert. In anderen Ländern wie den USA und Australien scheint diese Tatsache in den vergangenen Jahrzehnten erkannt worden zu sein. Da es auch dort immer wieder zu verheerenden Bränden mit teils mehreren Millionen Reifen kam, wurden und werden Richtlinien und Standards entwickelt, anhand derer vorbeugende Brandschutzmaßnahmen in Reifenlagern umgesetzt und die zuständigen Feuerwehren entsprechend trainiert werden (müssen). Auch die Aufstellung von Feuerwehrplänen und gemeinsame Absprachen zwischen Lagerbetreibern und Brandschutzbehörden spielen in den Regelwerken dieser beiden Länder eine wesentliche Rolle, so dass der bauliche und organisatorische Brandschutz zu einer möglichst wirksamen Einheit verschmelzen. Auch wenn die Dimensionen der dortigen Lagerplätze meist nicht mit den Verhältnissen in Deutschland vergleichbar sind, so können sich doch einige vorwiegend organisatorische und bauliche Maßnahmen hinsichtlich der qualitativen Lagergestaltung übertragen lassen. Auch ein Blick in ein beispielhaftes Regelwerk der Schweiz zeigt ein ähnliches Lagerkonzept, wie es in Australien und den USA gehandhabt wird. Dort wird ebenfalls der Hintergedanke verfolgt, die Lagerfläche möglichst kleingliedrig zu gestalten und gleichzeitig möglichst große Freiflächen zu schaffen. Damit soll einerseits ein Brandüberschlag auf angrenzende Gebäude und Lagerabschnitte verhindert sowie andererseits den Einsatzkräften möglichst viel Bewegungsfläche für den Löschangriff geboten werden. Die Brandbekämpfung wird baulich und organisatorisch durch ausreichende Feuerwehrezufahrten sowie die Vorhaltung von notwendigen Löschmitteln und die Anfertigung von Brandschutz- und Feuerwehreinsatzplänen unterstützt.

Da in dieser Arbeit auch die Frage beantwortet werden soll, ob und wie vergleichbare Regelungen in Deutschland umgesetzt werden können, sind in einem ersten Schritt in der nachstehenden Tabelle die Anforderungen der MKLR den Vorgaben aus Australien und der Schweiz gegenübergestellt. Die dort genannten Kategorien beziehen sich auf den schematischen Aufbau der MKLR und sollen einen möglichst umfassenden Blick auf die dort genannten Anforderungen vor dem Hintergrund derer Umsetzung in anderen Staaten gewährleisten. Mit dieser Gegenüberstellung soll noch einmal deutlich hervorgehoben werden, welche Gemeinsamkeiten aber auch Unterschiede zwischen den Regelwerken auf den einzelnen Ebenen des vorbeugenden Brandschutzes (baulich, technisch, organisatorisch) bestehen. Darüber hinaus zeigt Abbildung 12 einen grafischen Vergleich der Lagerorganisation, insbesondere der Abstandsflächen, wie sie in den einzelnen Ländern gefordert sind.

	MKLR	Australien (Victoria)	Schweiz (Zürich)
Ziel der Richtlinie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausbreitung von Feuer vorbeugen und wirksame Löscharbeiten ermöglichen ▪ Übergeordnete Brandschutzziele aus der MBO (§ 14) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Empfehlungen und Hilfestellungen zur sicheren Reifenlagerung auf Freiflächen ▪ Unterstützung für die Einsatzkräfte zur Einschätzung der Gefahren (Bewusstsein schaffen) 	Kein konkretes Ziel benannt
Geltungsbereich	Lagerung von Sekundärstoffen aus Kunststoff in Lagermengen > 200 m ³ in Behältern, Lagergebäuden und im Freien	Freilagerung von Neu- und Altreifen	Planung, Bau und Betrieb von Lager für Reifen und ihren Folgeprodukten mit einer Menge >20 t
Flächen für die Feuerwehr	Schaffung von geeigneten Zufahrten sowie Aufstell- und Bewegungsflächen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schaffung von Feuerwehruzufahrten, die den nationalen Regelungen entsprechen ▪ Bei ausgedehnten Flächen: Mindestens zwei unabhängige, gegenüberliegende Zufahrten 	Der Feuerwehreinsatz muss sichergestellt sein
Lagerflächen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Brandabschnitte: max. 2000 m² ▪ Unterteilung in Lagerabschnitte: max. 400 m² <u>Maximale Lagertiefen:</u> - 40 m, wenn zwei gegenüberliegende Seiten zur Brandbekämpfung zugänglich sind - 20 m, wenn nur eine Seite zur Brandbekämpfung zugänglich ist	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maximale Abschnittsausdehnung: 20 m x 6 m = 120 m² ▪ Keine Forderung weiterer Unterteilungen ▪ Langgezogene Abschnitte werden empfohlen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überdachte Lager: max. 1200 m² ▪ Freiluftlager: max. 2400 m² ▪ Unterteilung in Lagerabschnitte: max. 100 m²
Lagerguthöhe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bei Schüttung: max. 5 m ▪ Bei Blocklagerung: max. 4 m 	Max. 3 m (Stabilität muss zu jeder Zeit – auch im Brandfall – gewährleistet sein)	Keine Anforderungen
Abstandsflächen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ zwischen Brandabschnitten: min. 10 m Freifläche oder 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zwischen Lagerabschnitten: min. 20 m 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zwischen Lagerabschnitten: min. 10 m oder standfeste

	feuerbeständige Wand (nicht brennbar) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zwischen Lagerabschnitten: min. 5 m Freifläche oder feuerbeständige Wand (nicht brennbar) ▪ Zu Grundstücksgrenzen: min. 10 m Freifläche oder feuerbeständige Wand ohne Öffnungen (nicht brennbar) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zu angrenzenden Gebäuden: min. 20 m, wenn deren Außenhaut nicht ausreichend feuerwiderstandsfähig ist. Ansonsten kann der Abstand reduziert werden ▪ Zu Grundstücksgrenzen: min. 20 m 	Schirmmauer in Qualität REI 90 (nbb) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zwischen Lagerabschnitten und Gebäuden: min. 10 m
Feuerlöscheinrichtungen	Bereitstellung von geeigneten tragbaren Feuerlöschern in ausreichender Anzahl zur Bekämpfung von Entstehungsbränden	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bevorratung von Wasser- und Schaumlöschern sowie Schlauchwägen (Wasser + Schaum) ▪ Schulung des Personals im Umgang mit den Geräten ▪ Ausreichende Anzahl an Hydranten 	Keine Anforderungen
Löschwasserversorgung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Min. 192 m³ = 192.000 l ▪ Förderleistung min. 1600 l/min 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Löschwassermenge muss im Rahmen einer Risikobewertung standortabhängig bestimmt werden ▪ Bei ungenügender städtischer Versorgung: ortsfeste Wassertanks (2 x 250.000 l), diagonal versetzt angeordnet 	Lager sind mit ausreichend Hydranten zu versehen

In Abbildung 12 sind die Anforderungen, insbesondere im Hinblick auf die geforderten Abstandsflächen zwischen den Lagereinheiten, grafisch gegenübergestellt. Hier zeigt sich auch bildlich, dass alle Regelwerke dasselbe Organisationskonzept verfolgen. Aus australischer Sicht wird hier aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit die Organisation betrachtet, wie sie in New South Wales verwendet wird und bereits ausführlich dargelegt wurde.

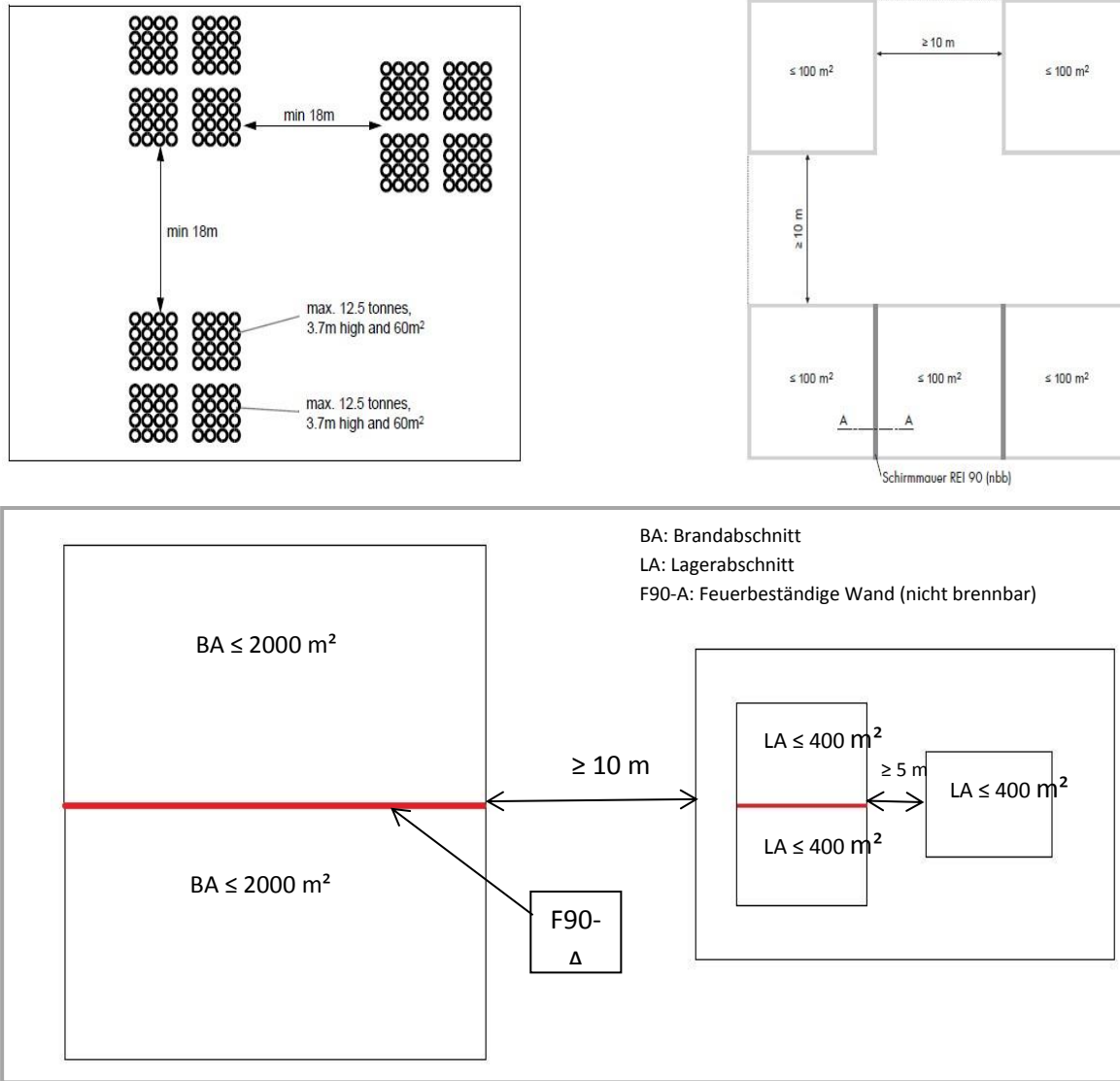


Abbildung 12 Vergleich der Lagerorganisationen: Australien (o.l.), Schweiz (o.r.), MKLR (u.)

3. Brandentstehung

Um Brände nachhaltig verhindern zu können ist es notwendig mögliche Zündquellen zu identifizieren und anschließend ihr Vorhandensein auszuschließen. Eine Zündung kann entweder vom Brandgut selber ausgehen oder von außen herbeigeführt werden. Während bei der Lagerung von Heu- oder Stroh eine Selbstentzündung der gelagerten Materials nicht ausgeschlossen werden kann ist bei die Wahrscheinlichkeit, dass es innerhalb eines Reifenlager zur Selbstentzündung kommt unwahrscheinlich. Zum einen sind die Ventilationsbedingungen innerhalb des Lagers für eine Selbstentzündung ungünstig zum anderen würden die erreichten Temperaturen voraussichtlich nicht ausreichen einen Reifen zu entzünden [20]

Somit bedarf es einer näheren Betrachtung der Zündquellen die von außen auf ein Reifen oder ein Reifenlager einwirken. Im Bereich der Umwelteinflüsse ist ein bekanntes Phänomen, dass es infolge von Blitzeinschlägen zu Bränden kommen kann, diese Gefahr ist für Freilager ebenfalls unwahrscheinlich und bei überdachten Lägern kann hier mittels gängiger Blitzschutzanlagen entgegengewirkt werden. Australische Regelwerke gehen auf die Gefahr der Entzündung durch vorangegangene Waldbrände ein. Zwar sind Teile der Bundesrepublik in der höchsten europäischen Waldbrandrisikoklasse eingestuft dennoch sind die Waldbrandereignisse in Australien häufiger. [49] Dennoch sollte dieser Punkt bei der Planung und Genehmigung von Lagerflächen beachtet werden. Aus der Brandursachenstatistik des IFS geht hervor, dass ein großer Teil der 2015 untersuchten Brände auf Elektrizität, Menschliches Fehlverhalten, Brandstiftung, Feuergefährliche Arbeiten, etc. zurückzuführen sind. [32]. Zwar ist diese Quelle für Reifenlager per Se nicht repräsentativ dennoch geht aus ihr hervor, dass diese Punkte häufige Brandursachen darstellen.

3.1. Entzündungsversuche

Aufgrund der vorangegangenen Überlegungen soll anhand von Versuchen getestet werden welche denkbaren Zündquellen zu einer Entzündung einer Reifenprobe führen können.

3.1.1. Versuchsaufbau

Im Folgenden wird der verwendete Versuchsaufbau vorgestellt. Dieser wurde in einzelnen Fällen abgeändert, worauf an entsprechender Stelle hingewiesen wird.

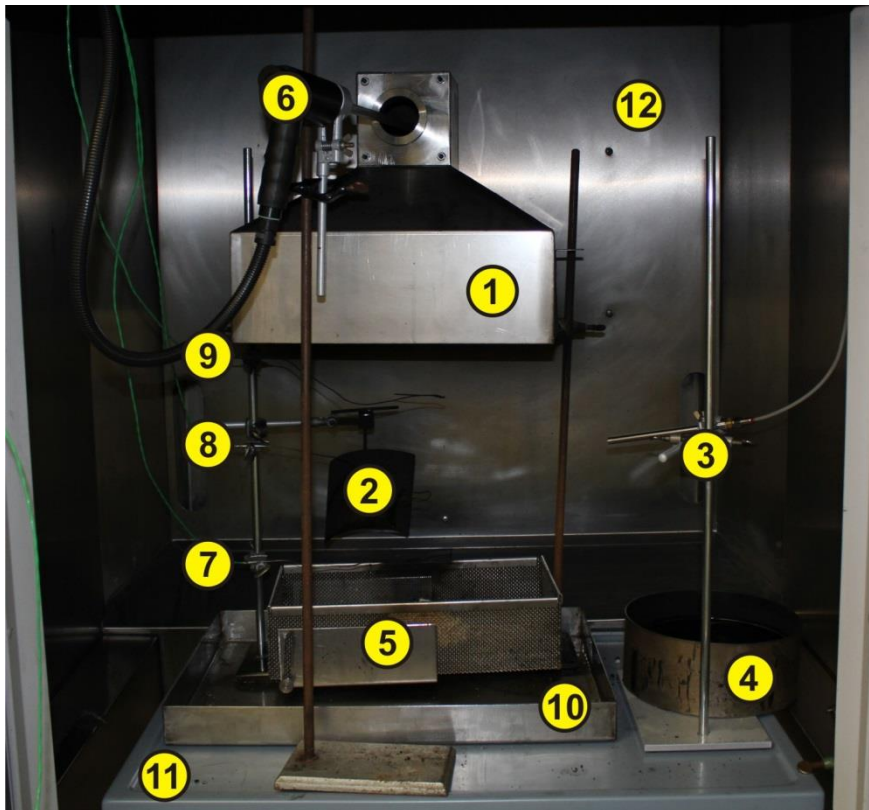


Abbildung 13 Versuchsaufbau Entzündungsversuche

- | | | |
|-------------------------------------|----------------------|---------------------|
| (1) Abzugsesse | (5) Probenkorb | (9) Thermoelement 3 |
| (2) Prallblech | (6) Gasentnahmesonde | (10) Auffangwanne |
| (3) Schaumstrahlrohr | (7) Thermoelement 1 | (11) Labortisch |
| (4) Behälter für
Brandrückstände | (8) Thermoelement 2 | (12) Laborabzug |

Der Versuchsaufbau steht auf einem rollbaren Labortisch (11) mit feuerbeständiger Oberfläche, welcher sich wiederum unter einem Laborabzug (12) mit einer Abzugsleistung von bis zu 700 m³/h befindet. Die unterste Schicht bildet eine Wanne aus Edelstahl (10), die in erster Linie dazu dient, das Löschwasser und eventuelle Brandrückstände aufzufangen. In dieser steht, ebenfalls aus Edelstahl, ein feinmaschiger Probenkorb (5), in den zur besseren Probenaufgabe zwei Drähte jeweils 2 cm parallel zur Längsseite horizontal eingezogen wurden. Zusätzlich zu diesen beiden Behältnissen wurde im Abzug noch eine mit Wasser befüllte Wanne (4) für die Zwischenlagerung von heißen, noch ausgasenden Brandrückständen positioniert, um eine Verunreinigung der Raumluft zu vermeiden. Um bei einem möglichen Vollbrand des Probenstücks den wirksamen Brandschutz sicherstellen zu können, wurde mit Hilfe einer Schaumbox ein miniaturisierter Löschangriff aufgebaut. Die Abgabe des Löschschaums erfolgt mittels Schwertschaumstrahlrohr (3) auf ein sich über dem Probenkorb befindliches Prallblech (2), wodurch der Löschmittelstrahl umgelenkt wird

und somit indirekt aufgebracht wird. Das birgt den Vorteil, dass ein direktes Eingreifen in den Abzug, um das Strahlrohr zu bewegen und somit einen Löscherfolg zu erzielen, vermieden und dadurch das Verletzungsrisiko minimiert wird. Außerdem tritt durch die Flutung der Probenwanne ein schnellerer Löscherfolg ein, als durch die direkte Aufgabe des Löschmittels auf die Probe. Dies begründet sich in der für die Brandbekämpfung ungünstigen geometrischen Form der Reifen, weshalb unter Umständen nicht alle brennenden Oberflächen auf direktem Weg beaufschlagt werden können.

Zur Analyse der Verbrennungsprodukte und Aufnahme der Rauchgastemperatur wurde zum Stauen der Verbrennungsgase eine Abzugsesse (1) über dem Probenkorb installiert, durch deren Öffnung die Gasentnahmesonde mit beheiztem Vorfilter (6) des portablen Infrarot-Multigasanalytoren [MGA 5] eingeführt wurde. Zur Ermittlung der im Rauchgasstrom vorherrschenden Temperaturen wurden Thermoelemente des Typ K an drei unterschiedlichen Höhen über der Probe angebracht. Der Sensor des ersten Thermoelements (7) wurde direkt auf der Probenoberfläche, der des Zweiten (8) etwa mittig zwischen Abzugshaube und Probenkorb und der des Dritten (9) direkt an der Unterkante der Abzugshaube positioniert.

3.1.2. **Probenvorbereitung**

Die Entzündungsversuche wurden mit drei verschiedenen Reifenmodellen durchgeführt, um Sommerreifen mit Winterreifen und Neureifen mit Altreifen in ihrer Entzündbarkeit vergleichen zu können. Zu diesem Zweck wurden Proben aus den Reifen Debica Frigo (N1), Debica Passio (N2) und Fulda Carat Progresso (A1) entnommen.

Da der Hauptaspekt der Brandversuche auf der Ermittlung möglicher Zündquellen lag, wurde mehr Wert auf die Vergleichbarkeit der geometrischen Form der Proben gelegt, als auf das Gewicht. Das mittlere Gewicht der Reifenproben liegt bei 251,08 g. Die Standardabweichung beträgt 69,55 g. Das maximale Probengewicht betrug 413,50 g, wobei dieses im Vollbrand die Kapazität des verwendeten Laborabzuges überstieg. Die Reifenproben wurden deswegen meist direkt nach erfolgreicher Entzündung abgelöscht, wenn ein Vollbrand der Probe absehbar war.

Die zwei Neureifen, der Winter- und der Sommerreifen der Firma Debica, und der Altreifen Fulda Carat Progresso wurden senkrecht zur Laufrichtung in etwa 10 cm breite Streifen zerteilt. Der zuerst vorbereitete Altreifen wurde zusätzlich noch in der Mitte der Lauffläche geteilt. Da im Rahmen der Vorversuche ersichtlich wurde, dass die Positionierung der Probe ebenfalls einen Einfluss auf die Entzündbarkeit hat und ein kompletter Querschnitt mehr Variationen bietet, wurde bei den folgenden Probenvorbereitungen auf eine Halbierung verzichtet. Die folgende Abbildung 14 zeigt die unterschiedlichen Probenformen.



Abbildung 14 Vergleich von Alt- (l.) und Neureifenprobe (r.)

In diesem Abschnitt werden die während der Brandversuche eingesetzten Zündquellen genannt sowie deren Wahl begründet und diskutiert. Zunächst wurden denkbare betrieblich vorhandene Zündquellen betrachtet und im späteren Verlauf wurden Möglichkeiten der Brandstiftung betrachtet.

Zündquelle In diesem Abschnitt werden die während der Brandversuche eingesetzten Zündquellen genannt sowie deren Wahl begründet und diskutiert. Die Reihenfolge ergab sich durch den Realitätsbezug und die Wahrscheinlichkeit der Zündquellen im Alltag, beginnend mit vorstellbaren „natürlichen“ Ereignissen, wie beispielsweise einem Betriebsmittelbrand. Da in dieser Arbeit auch diskutiert werden soll, ob Reifenlagerbränden eher eine natürliche oder eine gezielt herbeigeführte Entzündung zugrunde liegt, werden auch letztere Szenarien untersucht. Der Versuchsaufbau entsprach hierbei grundsätzlich dem in Abschnitt 3.1 dargestellten. Falls der Aufbau durch Komponenten erweitert wurde, werden diese im jeweiligen Kapitel erläutert.

3.1.3. Flüssigkeitsbrand

An dieser Stelle soll zunächst Ethanol als mögliche Zündquelle betrachtet werden. Diese weit verbreitete, leichtentzündliche Flüssigkeit dient als beispielhafte Zündquelle für einen Standardflüssigkeitsbrand mit geringen chemischen Eigenemissionen. Die brandtechnologischen Kennwerte können der folgenden Tabelle 2 entnommen werden und sollen hier beispielhaft für flüssige Betriebsstoffe stehen.

Tabelle 2: Relevante brandtechnologischen Kennwerte von Ethanol [13, 39]

Flammpunkt [°C]	Zündtemperatur [°C]	Verbrennungs- enthalpie [kJ/mol]	Verbrennungs- enthalpie [kJ/g]
12,00	425,00	-1.368,00	-29,69

Dies können beispielhaft Kraft- oder Schmierstoffe, Reinigungsmittel sein deren Vorhandensein auf Betriebsgeländen mehr als wahrscheinlich ist. Die Praxis zeigt, dass auch ein Produktaustritt nicht unwahrscheinlich ist. Die Zündquelle wurde, wie in der folgenden Abbildung 15 dargestellt, unter der Probe positioniert, da an dieser Position mit einer maximalen Energieübertragung zu rechnen ist.

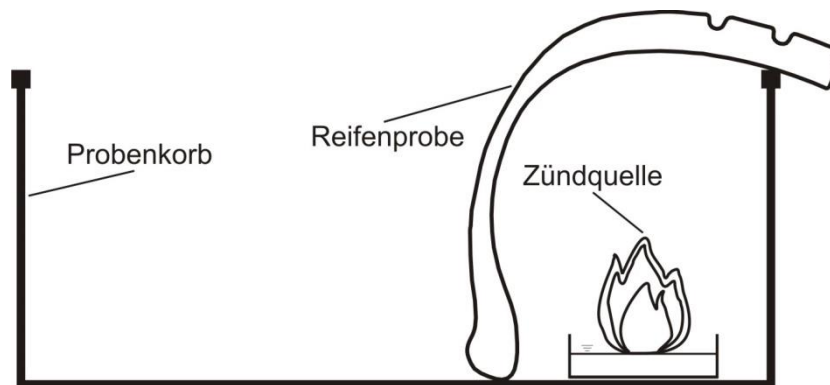


Abbildung 15: Probenanordnung Zündquelle Ethanol

Um eine definierte Oberfläche und somit bei einer gleichbleibenden Menge Ethanol eine reproduzierbare Vorbrennzeit zu erhalten, wurde bei der Versuchsdurchführung eine Edelstahlwanne verwendet. Die in der folgenden Tabelle 3 aufgeführten Versuche dienten der Ermittlung der Menge an Ethanol, mit der eine Entzündung einer Reifenprobe sicher erreicht werden kann.

Tabelle 3: Aufzählung der mit Ethanol durchgeführten Entzündungsversuche

Versuch	Menge [ml]	Probengewicht [g]	Entzündung
1	100	130	Ja
2	50	313	Ja
3	25	85	Ja
4	15	190	Ja

Begonnen wurde mit 100 ml Ethanol. Hierbei kam es noch vor dem Erlöschen des Stützfeuers zur Entzündung der Reifenprobe, weshalb die Menge an Ethanol für den nächsten Versuch auf 50 ml halbiert wurde. Auch hier erfolgte sowohl die Entzündung als auch der Vollbrand der Reifenprobe noch bevor die Zündquelle erlosch. Deshalb wurde die Menge an Ethanol auf 25 ml reduziert. Auch damit kam es zum Vollbrand der Reifenprobe. Obwohl 25 ml Ethanol bereits eine sehr geringe Menge darstellen, wurde der Versuch noch einmal mit 15 ml wiederholt, um auszuschließen, dass die Entzündung der Probe nur aufgrund ihres niedrigen Gewichts von 85 g erfolgte. Auch hierbei kam es noch zur Entzündung der Probe. Auf eine weitere Reduzierung wurde aufgrund der bereits sehr geringen Ethanol Menge verzichtet. Es kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei Ethanol um eine sichere Zündquelle handelt.

Bei den in der folgenden Tabelle 4 aufgeführten Versuchen 5 – 10 wurden wiederum 25 ml Ethanol als Zündquelle verwendet, um sicher gehen zu können, dass mit dieser Menge eine Entzündung unabhängig von Gewicht und Art der Reifenprobe erfolgt.

Tabelle 4: Aufzählung der Versuche mit 25 ml Ethanol als Zündquelle

Versuch	Menge [ml]	Probengewicht [g]	Reifenart	Entzündung
5	25	275	N2	Ja
6	25	310	N1	Ja
7	25	315	N1	Ja
8	25	370	A1	Ja
9	25	375	N2	Ja
10	25	415	N1	Ja

Eine 275 g schweren Neureifenprobe des Sommerreifens Debica Passio wurde durch die 25 ml Ethanol ohne Probleme entzündet, weshalb das Gewicht der weiteren Proben desselben Reifens auf 375 g gesteigert wurde. Auch hier kam es zur Entzündung. Zum Vergleich zwischen Winterreifen und Sommerreifen wurde der Winterreifen Debica Frigo auf dieselbe Weise getestet. Hierbei kam es sowohl bei einer 310 g als auch bei einer 315 g sowie bei einer 415 g schweren Reifenprobe ebenfalls zur Entzündung. Des Weiteren wurde eine 370 g schwere Altreifenprobe des Fulda Carat Progresso auf dieselbe Weise getestet. Auch hier kam es zur Entzündung der Probe. Das Gewicht der Reifenproben konnte nicht weiter gesteigert werden, da der Brandabzug bei diesen Versuchen bereits seine maximale Abzugsleistung von 700 m³/h erreichte.

Bei den Versuchen wurde festgestellt, dass Neureifen bei selber Ausgangsposition augenscheinlich schneller brennen als Altreifen. Das Gewicht der Proben spielt hingegen kaum eine Rolle, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass der Brand einer leichtentzündlichen Flüssigkeit bei o.g. Position der Lache zur Entzündung eines Autoreifens bzw. Lagers ausreichen würde. Nichtsdestotrotz sollte beachtet werden, dass die Ethanol Oberfläche bei den durchgeführten Versuchen begrenzt war und dies bei einem unkontrollierten Austritt nicht der Fall wäre. Bei gleichbleibender Menge würde das Ethanol hierbei also aufgrund der größeren Oberfläche deutlich schneller abbrennen, als das im Versuchsaufbau durch die Edelstahlwanne eingefasste.

3.1.4. Benzin-Bindemittelgemisch

Als eine weitere Zündquelle wurde ein Benzin-Bindemittelgemisch ausgewählt. Die Begründung der Auswahl ist der des Ethanols sehr ähnlich bietet aber eine vergrößerte Oberfläche, die es der Flüssigkeit ermöglicht schneller in die Gasphase überzugehen. Somit können Flüssigkeiten mit einem höheren Flammpunkt, wie z.B. Dieselkraftstoff, bei einer kleineren Zündenergie schneller anfangen zu brennen, als es bei einer Lache der Fall wäre. Für die brandtechnologischen Kennwerte von Benzin können nur ungefähre Bereiche dargestellt werden, da Benzin ein Sammelbegriff für verschiedene Ottokraftstoffe ist und deren chemische Zusammensetzung variiert (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Brandtechnologischen Kennwerte von Ottokraftstoffen [13]

Flammpunkt [°C]	Zündtemperatur [°C]	Verbrennungs- enthalpie [kJ/mol]	Verbrennungs- enthalpie [kJ/g]
> -21	200 - 300	-3.440 bis -4.730	-43

Das für diese Versuchsreihe verwendete Benzin-Bindemittelgemisch besaß einen Benzinanteil von ca. 25 %. Die in der obenstehenden Tabelle genannten Werte sind somit für das Gemisch anteilig zu betrachten. Hiervon wurden jeweils 30 g abgewogen und im Probenkorb positioniert. Verglichen werden sollte hierbei, ob und wie sich die Position der Zündquelle zum Reifen auf die Entzündung auswirkt. Beim ersten Versuch wurde das Benzin-Bindemittelgemisch auf ein Stück Alufolie unterhalb des Reifens verteilt. Für die Versuche wurde die Zündquelle vor der Seitenwand der Reifenproben platziert. Beide Anordnungen sind in der nachfolgenden Abbildung 16 dargestellt.

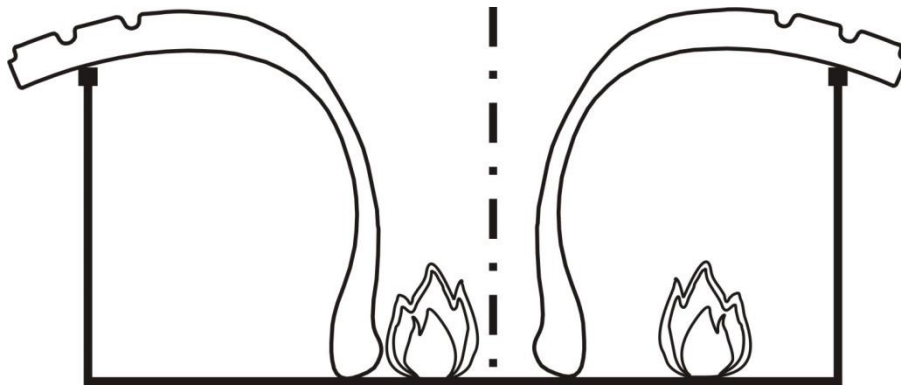


Abbildung 16: Probenanordnung Zündquelle Benzin-Bindemittelgemisch

In beiden Fällen führte es zur Entzündung der Probenstücke. Ein wesentlicher Unterschied konnte hierbei nicht festgestellt werden.

Somit stellt ein Gemisch aus Bindemittel und einer brennbaren Flüssigkeit eine Zündquelle dar.

3.1.5. Schweißperlen

Etwa ein Drittel aller Brände in der Industrie sind auf feuergefährliche Arbeiten zurück zu führen [50]. Hierzu gehört unter anderem das Schweißen, das oftmals auch bei Instandhaltungsarbeiten durchgeführt werden muss. Je nach Verfahren kann es während des Schweißvorgangs zur Freisetzung von Schweißperlen kommen. Es besteht die Gefahr, dass diese glühenden Metallperlen durch ihre hohe Temperatur von bis zu 1.000 °C bei einer unsachgemäßen Arbeitsplatzvorbereitung leichtbrennbare Materialien schnell entzünden können. [7]

Aus sicherheitstechnischen Gründen konnte kein herkömmliches Schweißgerät in den Versuchsaufbau mit aufgenommen werden. Daher wurden Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 5 mm mithilfe des in der nachfolgenden Abbildung 17 dargestellten Pelletanzünder ca. 2 Minuten auf ca. 1.000 °C erwärmt und über eine Kippvorrichtung auf die Reifenprobe fallen gelassen.

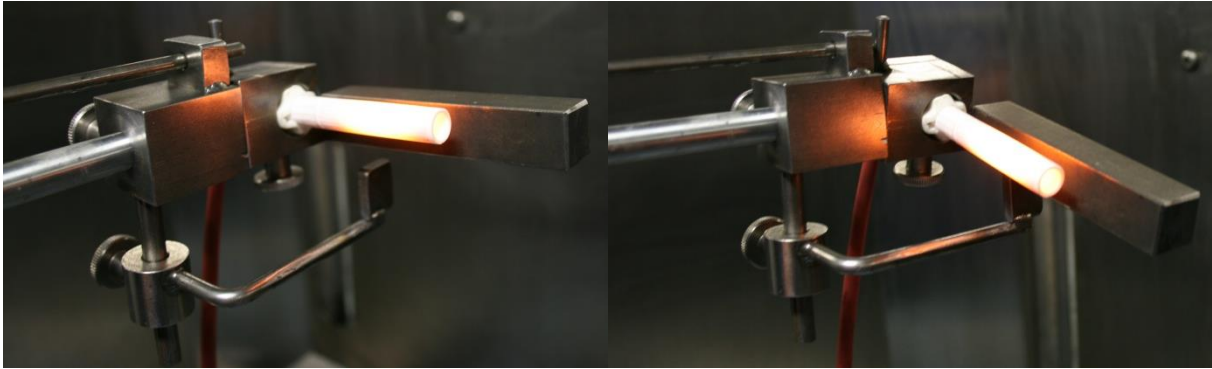


Abbildung 17: Pelletanzünder mit Kippvorrichtung

Die Versuche wurden mehrere Male, auch mit bis zu drei Kugeln gleichzeitig, wiederholt. Hierbei blieben die Stahlkugeln aber meist nicht auf der Probenoberfläche liegen, da die Kugeln bei ihrem Auftreffen versprangen. Um eine begrenzte Fläche zu erhalten, wurde ein Rahmen aus Alufolie auf die Probe gelegt. Aber selbst mit dieser Begrenzung kam es zu keiner Entzündung des Reifens, nur zu einer oberflächlichen thermischen Veränderung am Aufprallort. Die Stahlkugeln verloren beim Fall bereits zu viel Wärmeenergie, was bereits an der Änderung der Farbe von rotglühend in einen dunkleren Farbton ersichtlich wurde.

Da diese Methode zur Nachbildung bzw. Erzeugung von Schweißperlen augenscheinlich ungeeignet war, wurde der Versuch mit dem energiereicheren aluminothermischen Schweißverfahren wiederholt. Bei diesem, im Schienenbau gebräuchlichen Verfahren, wird eine Mischung aus Eisenoxid- und Aluminiumpulver mittels hoher Temperatur entzündet. Diese Mischung befindet sich in einem nach unten hin geöffneten Behältnis. Die durch die Reaktion entstandene Eisenschmelze fließt dann mit einer Temperatur von über 2.400 °C durch das Loch auf die gewünschte Stelle.[53] Bei den Versuchen wurden zwei verschiedene Mengen an Thermit getestet. Die erste (13 g) wurde in einer Aluschale mit einem Durchmesser von ca. 3,5 cm direkt auf der Probe positioniert. Die hierfür benötigte hohe Zündenergie lieferte 1 g Magnesium. Diese führte nur zu einer kurzen Stichflamme und einer darauffolgenden thermischen Oberflächenveränderung der Probe. Die zweite Mischung (100 g) wurde 10 cm über der Probenoberfläche in einem kleinen Tontopf gegeben, dessen Bodenöffnung mit Wachs versiegelt wurde. Entzündet wurde das Thermit wiederum mit 1,5 g Magnesium. Die abtropfende Eisenschmelze entzündete den Reifen beim Auftreffen sofort. Ein Großteil der produzierten Schweißperlen floss an der Probe vorbei. Somit war nur ein kleiner Teil der 100 g für die Entzündung verantwortlich.

Die Perlen des Aluminothermischen Schweißens stellen zwar eine gute Zündquelle dar, sind aber nur für wenige, seltene Vorgänge bzw. Schweißverfahren repräsentativ. Aus den Versuchen mit dem Pelletanzünder konnte nicht nachgewiesen werden, dass Schweißperlen in der Lage sind Reifen zu entzünden. Dennoch dürfen diese Schweißperlen nicht außer Acht gelassen werden, da diese als Zündquelle für leichtentflammbareres Material (Papier, Stoff, Holz) dienen könnten, die wiederum das Stützfeuer für die Entzündung eines Reifens bilden können.

3.1.6. Platindraht

In dieser Versuchsreihe sollte untersucht werden, ob ein heißes Maschinenteil in der Lage ist, einen Reifen beim direkten Kontakt zu entzünden. Das Maschinenteil wurde im Rahmen der Versuche durch einen Platindraht, siehe Abbildung 18 dargestellt.

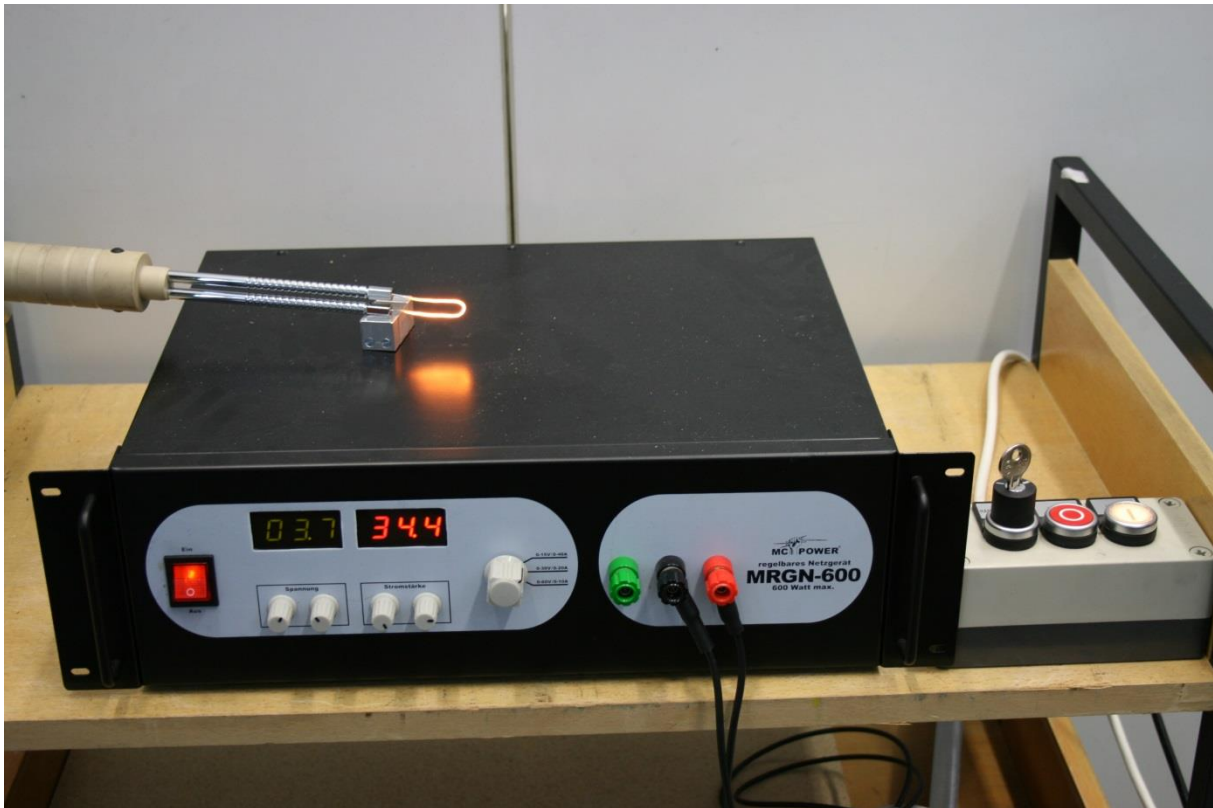


Abbildung 18: Elektrisch erhitzter Platindraht mit Steuereinrichtung

Die Temperatur des Platindrahts kann durch Regelung der Stromstärke variiert werden und kann auf über 1.000 °C erwärmt werden. Für die Versuche wurde eine Vorglühzeit des Drahtes von 20 Sekunden festgesetzt bevor der Platindraht auf den Reifen für je 10, 30 und 60 Sekunden aufgelegt wurde. Dabei wurden die Stromstärke von 34,4 A und die daraus resultierende Spannung von 3,7 V aufrechterhalten was einer ungefähren Temperatur von 1000 °C entspricht.

Der erste Versuch wurde mit einem Altreifen durchgeführt, der sich stehend im Probenkorb befand. Der Platindraht wurde für die oben definierten Zeiten an die Seitenwand gehalten. Dabei wurden für die drei Durchführungen immer getrennte Stellen an der Probe gewählt. Bei 10 und 30 Sekunden Einwirkdauer konnte nach der Penetration mit dem erhitzten Platindraht keine thermische Oberflächenveränderung ohne Flammenbildung festgestellt werden. Durch die 60 Sekunden Beaufschlagung konnte eine Entzündung der Reifenprobe erreicht werden, wobei der örtlich begrenzte Brand nach ca. 6 Minuten selbständig erlosch. Dieser Versuch wurde mit einer Neureifen Probe wiederholt. Hierbei kam es bei 10 und 30 Sekunden zu keiner Entzündung der Probe, nach den 60 Sekunden jedoch schon. Dabei breitete sich das Feuer im Gegensatz zum Altreifen langsam aus und brannte mit einer Dauer von ca. 17 Minuten deutlich länger. Die Energie reichte jedoch wieder nicht für einen Vollbrand

aus. Hierbei gilt es allerdings zu berücksichtigen, dass die Versuche in einem Abzug mit konstanter Absaugung durchgeführt wurden. In einem Reifenlager wäre nicht auszuschließen, dass ein angrenzender Reifen durch die freigesetzte Energie gezündet würde.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass mit der Nachbildung eines heißen Maschinenteils kein Vollbrand ausgelöst wurde, obwohl die Versuchssituation dadurch begünstigt war, dass die Temperatur des Platindrahts während der Beaufschlagung konstant gehalten wurde. Dies entspricht keinem aus Versehen fallengelassenen heißen Metallteil, da dieses ähnlich wie die Schweißperlen kontinuierlich an Energie verliert. Dennoch sollte ein überhitztes Maschinenteil als Zündquelle für ein Stützfeuer in Betracht gezogen werden.

3.1.7. Ölgetränkte-Lappen

Die Selbstentzündung von Reifenlager ist eher unwahrscheinlich wohingegen mit Öl verunreinigte Lappen aufgrund von freigesetzter Wärme bei aushärte Prozessen zur Selbstentzündung neigen. Um zu überprüfen, ob ein mit Öl getränkter Lappen nach seiner Selbstentzündung als Zündquelle für einen Reifen ausreicht, wurde ein Baumwolltuch in 10 x 10 cm Stücke geschnitten. Diese wurden dann mit einer Mischung aus Leinöl (100 ml) + Paraffin (50 ml) getränkt. Durch dieses Mischungsverhältnis sollen beliebige Öle abgebildet werden. Positioniert wurde der Lappen zuerst unterhalb der Probe auf dem Korbboden. Da die Zeit bis zur Selbstentzündung eines ölgetränkten Lappens nicht definiert ist und die Versuchszeit begrenzt war, wurden die Tücher mit einem Feuerzeug entzündet. Nach dem Verstreichen von ca. eineinhalb Minuten erfolgte die Entzündung des Reifens, wenig später stand das Probenstück im Vollbrand. Als Zweites wurde ein Lappen auf das Reifenstück gelegt, sodass die Lauffläche komplett und die Seitenwand zur Hälfte bedeckt war. Nach ca. 4 Minuten brannte der Reifen, erlosch aber nach ca. 11 Minuten selbständig. Bei einem weiteren Versuch wurde eine Neureifenprobe so positioniert, dass die Seitenwand auf dem Boden des Probenkorbs stand. Auf die Innenisolierung wurde ein weiterer ölgetränkter Lappen gelegt und entzündet. Nach ca. 1 Minute wurde der Reifen entzündet und befand sich wenig später im Vollbrand. In der nachfolgenden Abbildung 19 sind die verschiedenen Positionen der ölgetränkten Lappen abgebildet.

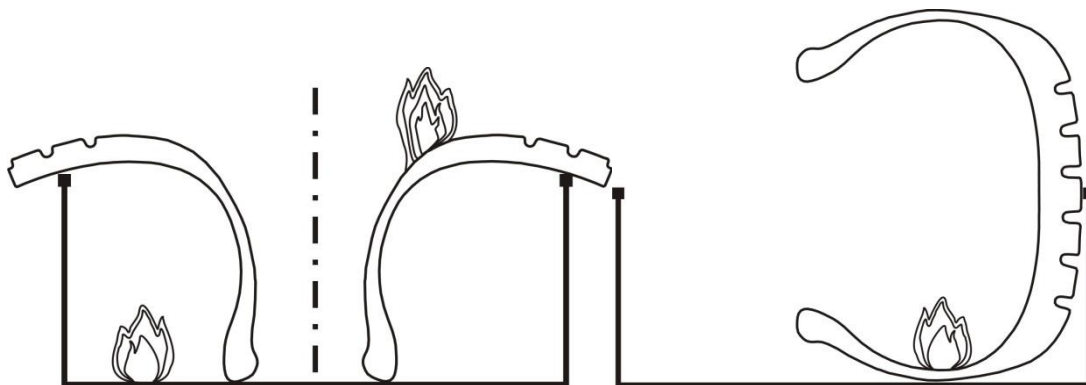


Abbildung 19: Probenanordnung Zündquelle Ölgetränkte Lappen

Zusätzlich wurde untersucht, unter welchen Umständen es zur Entzündung eines solchen Lappens kommen kann, falls keine Selbstentzündung eintritt. Hierzu wurden jeweils eine glühende Zigarette und ein brennendes Streichholz auf einen ausgebreiteten Lappen fallen gelassen. Beim Streichholz brannte der Lappen sofort an. Bei der Zigarette mussten mehrere Versuche durchgeführt werden, da der Lappen zuerst zu feucht war und die Zigarette ablöschte, weswegen der Versuch mit einem weniger feuchten Lappen wiederholt wurde. Ob eine Entzündung durch eine Zigarette erreicht werden kann, hängt von der Brenndauer der Zündquelle und der Ölsättigung des Lappens ab.

Somit bilden ölige Tücher eine gute Zündquelle für Reifen, selbst wenn es nicht zur Selbstentzündung kommen sollte, denn diese können bereits durch geringe Energiezufuhr entzündet werden. Zu beachten ist auch die Position des Reifens zur Zündquelle.

3.1.8. Grillanzünder

Etwa jedes zehnte Brandschadensereignis ist auf Brandstiftung zurückzuführen.[32] Dazu zählen auch zahlreiche Berichte über Brandanschläge auf Kraftfahrzeuge. Insider berichten, dass es u.a. ausreiche, Grillanzünder auf einen Reifen zu legen und diesen zu entzünden. Nach wenigen Minuten brenne der Reifen und wenig später das ganze Fahrzeug. Oftmals bleibe nichts außer der stählernen Karosserie übrig.[28] Auf diesen Berichten beruhend soll anhand der folgenden Versuchen überprüft werden, ob Grillanzünder, als Vertreter der festen Brandbeschleuniger, zur Entzündung eines Reifens ausreicht, auch wenn sich dieser nicht mehr an einem Fahrzeug befindet, also z.B. in einem Lager.

Begonnen wurde mit ökologischem Grillanzünder aus gepresster Holzfaser und pflanzlichem Öl mit einem Gewicht von ca. 50 g und einer Brenndauer von ca. 7 Minuten. Sowohl bei der Positionierung des Grillanzünders auf als auch unter der Reifenprobe kam es bei der o.g. Zeit nicht zur Entzündung dieser. Die Reifenstücke waren an den Einwirkstellen nur etwas verrußt. Um die Produktpalette gesamt zu betrachten, wurden auch Versuche mit einem Grillanzünder auf Petroleumbasis (ca. 80 %) durchgeführt, dessen Flammenbildung und freigesetzte Energie augenscheinlich sehr viel höher als die des biologischen Grillanzünders war. Die brandtechnologischen Kennwerte von Petroleum können der folgenden Tabelle 6 entnommen werden. Hierbei ist zu beachten, dass keine Verbrennungsenthalpie in kJ/mol angegeben werden kann, da Petroleum kein chemisch reiner Stoff ist und dadurch für dieses keine allgemeingültige molare Masse existiert.

Tabelle 6: Brandtechnologische Kennwerte von Petroleum [31]

Flammpunkt [°C]	Zündtemperatur [°C]	Verbrennungs- enthalpie [kJ/mol]	Verbrennungs- enthalpie [kJ/g]
>60 – 93	220	-	-

Beim ersten Versuch wurden ca. 5 g des Grillanzünders unter der Probe positioniert. Nach ca. 4 Minuten erlosch dieser, ohne die Probe zu entzünden. Um zu überprüfen, welchen Einfluss die Probenpositionierung auf das Entzündungsverhalten hat, wurde die Reifenprobe beim nächsten Versuch mit der Laufseite nach unten in selber Höhe hängend angebracht. Beide Anordnungen sind in der nachfolgenden Abbildung 20 dargestellt. Die Menge des Zündmittels wurde beibehalten.

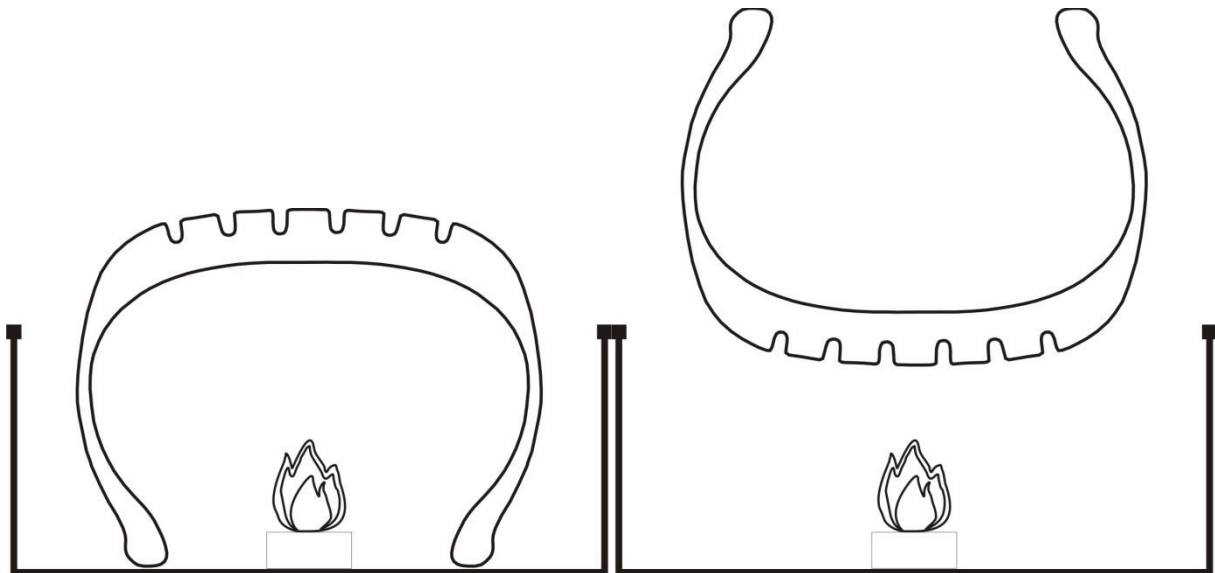


Abbildung 20: Probenanordnung Zündquelle Grillanzünder

Nach ca. 30 Sekunden griffen die Flammen auf die Probe des Neureifens über und führten zum Vollbrand. Der erste Versuch wurde zusätzlich noch mit 8 g des chemischen Grillanzünders durchgeführt. Hierbei kam es nach wenigen Sekunden zur Entzündung der Reifenprobe. Des Weiteren wurde Grillanzünder bei einem folgenden Versuch auf die Lauffläche eines stehenden Reifenstücks aufgelegt. Aus den Vorversuchen ging hervor, dass hierfür eine Menge von 5 - 8 g Grillanzünder aufgrund der ungünstigen Position nicht ausreicht, weshalb ca. 150 g verwendet wurden, um zu demonstrieren, dass mit einer sehr großen Menge an Zündmaterial die Position des Reifens bzw. der Zündquelle keinen allzu großen Einfluss mehr aufweist. Nach ca. 6 Minuten konnte der restliche Grillanzünder entfernt werden, da der Reifen zu diesem Zeitpunkt schon im Vollbrand stand.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass Feststoffbrandbeschleuniger ebenfalls eine mögliche Zündquelle darstellen. Hierbei konnte beobachtet werden, dass bei einer gleichbleibenden Menge an Grillanzünder die Position der Reifenprobe die Entzündbarkeit beeinflusst. So lässt sich die Lauffläche leichter entzünden, als die Innenisolierung. Das liegt vermutlich zum einen daran, dass die Lauffläche durch ihr Profil mehr Angriffsfläche bietet, zum anderen daran, dass der Stahlgürtel durch die dicke Gummischicht weiter entfernt ist und zu Beginn weniger Energie abführt und somit mehr Energie zur Entzündung verbleibt.

3.1.9. Lösemittelhaltiger Flüssigkleber

Ebenfalls als mögliche Zündquelle wurde lösemittelhaltiger Flüssigkleber untersucht, da eine Mehrzahl an Lösungsmittel feuergefährlich ist. Bei offener Anwendung des Produkts verdampft ein Großteil des enthaltenen Lösemittels. Diese Gase sind aufgrund ihres meist niedrigen Flammpunktes sehr leichtentzündlich.

In einem ersten Versuch wurde zunächst ca. 6 g des Kraftklebers Pattex Colle De Contact unterhalb des Reifenstücks in einer Schale aus Aluminiumfolie mit einem Durchmesser von ca. 3,5 cm positioniert. Hierbei kam es zur Entzündung der Reifenprobe. In einem weiteren Versuch wurden die Profilirinnen der Lauffläche eines Neureifens mit ca. 6 g Flüssigkleber ausgefüllt. Diese Aufbringungsart führte aber nicht zum Vollbrand des Reifenstücks. Es wird vermutet, dass der Kleber aufgrund der seitlichen Begrenzung nicht vollständig ausgasen konnte und der für die Verbrennung nötige Sauerstoff aus demselben Grund ebenfalls nicht ausreichte und die Zündquelle selbst frühzeitig erlosch. Deswegen wurden ca. 6 g des Kraftklebers im darauffolgenden Versuch auf die beiden Seitenwände verteilt aufgetragen. Beide Aufbringungsarten wurden in der nachfolgenden Abbildung 21 graphisch dargestellt.

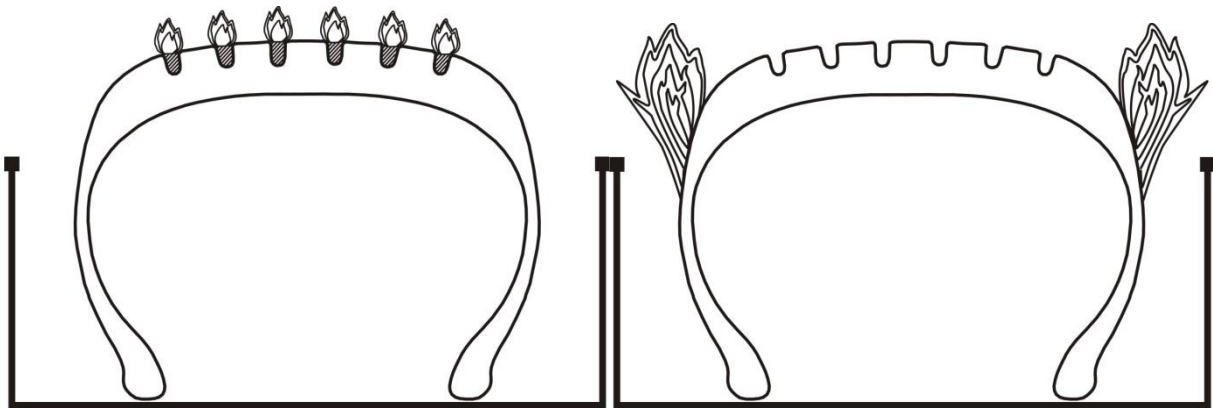


Abbildung 21: Probenanordnung Zündquelle Flüssigkleber

Bei der seitlichen Auftragung griffen die Flammen nur auf einer Seite auf den Reifen über und führten zum Vollbrand dessen. Hierbei wird vermutet, dass die Entzündung nur aufgrund der begünstigten Form der Reifenprobe erfolgte; die Entzündung erfolgte an der Schnittfläche der Probe, was wiederum bei einem ganzen Reifen nicht möglich wäre.

Dennoch wird lösemittelhaltiger Flüssigkleber als eine mögliche Zündquelle angesehen. Allerdings müsste hier das Mengenverhältnis angehoben werden, um eine sichere Entzündung herbeiführen zu können.

3.1.10. Brandpasten

Stellvertretend für jegliche Art von Brandpasten bzw. flüssigen Brandbeschleunigern wurde ein Gemisch aus Benzin, Benzol und Polystyrol hergestellt, welches ein zähflüssiges Gemisch mit guten Hafteigenschaften bildet. Die zu erwartende Verbrennungstemperatur liegt bei bis zu 1300 °C auf. [48] Die brandtechnologischen

Kennwerte von Benzin und Benzol können der nachfolgende Tabelle 7 entnommen werden.

Tabelle 7: Brandtechnologischen Kennwerte von Benzin und Benzol [30, 36, 52]¹

	Flammpunkt [°C]	Zündtemperatur [°C]	Verbrennungs- enthalpie [kJ/mol]	Verbrennungs- enthalpie [kJ/g]
Benzin	< -40 °C	220 °C	-3.440 bis -4.730	-46,7
Benzol	-11	540 °C	-3.257,6	-40,0

In einem ersten Schritt wurden 10 g Brandpaste unterhalb der Probe in einer Wanne positioniert und entzündet. Nach ca. 2 Minuten erlosch das Stützfeuer. Deshalb wurden im zweiten Schritt 24 g des Gemisches auf dieselbe Weise aufgebracht und entfacht. Hier kam es nach ca. 1 Minute zur Entzündung der Reifenprobe und einem anschließenden Vollbrand. In einem weiteren Versuch wurden ca. 15 g Brandpaste auf die Lauffläche eines Reifenstücks aufgetragen. Ca. 3 Minuten nach der Entzündung des Gemischs brennt die Oberfläche der Lauffläche nur an den Stellen weiter, an denen sich keine Rückstände der Brandpaste befanden. Nach ca. 10 Minuten örtlichen Brennens erlischt das Reifenstück von selbst. Es wird vermutet, dass die Brandrückstände eine luftundurchlässige Schicht bilden und somit die Sauerstoffzufuhr unterbindet. Deshalb wurde auf die Seitenwand einer zweiten Probe ca. 25 g des Brandbeschleunigers aufgetragen. Um die vermutlich nach unten laufende Brandpaste aufzufangen wurde die Reifenprobe, wie in der nachfolgenden Abbildung 22 dargestellt, auf ein weiteres Reifenstück gestellt.

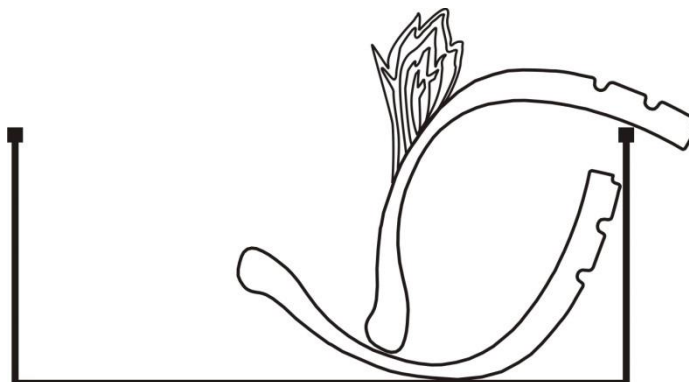


Abbildung 22: Probenanordnung Zündquelle Brandpaste

Das an der Probe hinabgeflossene Gemisch entzündete den liegenden Reifen ebenfalls. Nach ca. 4 Minuten befanden sich beide Reifenstücke im Vollbrand.

Somit eignet sich flüssiger bzw. zäher Brandbeschleuniger ebenfalls zur Entzündung eines Reifens, da sich die Zündquelle durch die entwickelte Wärme vertikal selbstständig verteilt und somit eine größere Fläche entzündet. Zusätzlich wird die Entzündung des Reifens durch die Lage der Zündquelle begünstigt, da die aufsteigenden Flammen, und damit die Energie, den Reifen direkt beaufschlagen können. Dies verhielt sich bei der Entzündung der Lauffläche anders, hier wurde die

Energie in die Umgebung abgestrahlt. Wiederum ist anzumerken, dass nicht nur die Position sondern ebenfalls die Menge der Zündquelle entscheidend ist.

3.1.11. Fettbrand

Wenn ein Teelicht lang genug erhitzt wird und das verflüssigte Wachs etwa 250 C erreicht, kann es zum vollflächigen Brennen der Oberfläche führen, da das Kerzenwachs zum Großteil aus Paraffinen besteht. Um einen solchen Fettbrand darzustellen, wurden vier Teelichter nebeneinander stehend so lange erhitzt, bis sich das Wachs komplett verflüssigt hat und entzündet. Nach ca. 15 Minuten erfolgte keine Entzündung des Reifens. Zur Realisierung eines solchen Fettbrandes müssten vermutlich mehr und größere Kerzen eingesetzt werden.

Falls ein großflächiger Fettbrand zustande kommen würde, ist es sehr wahrscheinlich, dass eine Entzündung des Reifens erfolgt. Zur Entzündung des Reifens durch eine Kerzenflamme oder vergleichbarem müsste der Abstand zwischen Reifen und Zündquelle sehr gering gehalten werden, sodass die Flamme die Reifenoberfläche direkt beaufschlagt. Aber selbst dann wäre eine Entzündung des Reifens nicht garantiert.

3.2. **Zündreihenfolgen**

Da nicht zwangsläufig davon ausgegangen werden soll und kann, dass es sich bei der Ursache eines Reifenlagerbrands immer um Brandstiftung handelt, sollen zusätzlich zu den oben genannten Szenarien mögliche Zündreihenfolgen getestet werden. Hierbei soll untersucht werden, ob eine Verkettung einzelner Umstände zu einer nicht vorsätzlichen Entzündung führen können. Als Ausgangssituation wurde für die nachfolgenden Versuche immer ein heißes Maschinenteil als Zündquelle betrachtet. Dieses wurde wiederum durch den o.g. Platindraht dargestellt. Der Versuchsaufbau entspricht hierbei dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen.

3.2.1. Maschinenteil-Holz-Reifen

Die erste betrachtete Reihenfolge sieht vor, dass ein heißes Maschinenteil am Boden liegende Holzspäne entzünden welche wiederum die benachbarten Reifen in Brand setzen.

Für das erste Szenario befanden sich die Holzspäne gehäuft unterhalb der stehenden Reifenprobe. Die Holzspäne wurden jeweils mit dem Platindraht entzündet, der zu diesem Zweck 1 - 2 Sekunden seitlich an den Haufen Späne gehalten wurde. Um eine gleiche Temperatur des Drahtes von 1.000 C zu erhalten, wurde dieser bei einer Stromstärke von 34,4 A über 20 Sekunden vorgeheizt. Die nachfolgende Tabelle 8 zeigt die Annäherung an die Menge an Holzspänen an, welche für die Entzündung der Reifenprobe nötig ist.

Tabelle 8: Annäherung an die für die Entzündung benötigte Mindestmenge an Holzspänen

Lfd. Nr.	Menge [g]	Probengewicht [g]	Entzündung
1	125	180,00	Ja
2	50	181,42	Ja
3	25	179,18	Ja
4	20	187,77	Ja
5	15	181,33	Nein
6	10	187,77	Nein

Die Versuche 1 - 6 wurden jeweils mit ca. 180 g schweren Altreifenproben durchgeführt. Der Abstand zwischen Reifenprobe und Zündquelle betrug 5 cm. Begonnen wurde mit 125 g Holzspänen. Die Menge an Holzspänen wurde in drei Schritten auf 20 g reduziert, da es jeweils zur Entzündung der Reifenprobe kam. Auch mit 20 g Holzspänen als Stützfeuer kam es noch zur Entzündung des Reifenstücks, weshalb in einem nächsten Versuch 15 g getestet wurden. Hierbei brannten die Holzspäne zwar 7 min eigenständig, aber die freigesetzte Energie reichte nicht aus, um die Altreifenprobe zu entzünden. Um eine Ausnahme auszuschließen, wurde der Versuch noch mit 10 g Holzspänen durchgeführt, auch hierbei kam es zu keiner Entzündung.

Um zu untersuchen, ob die Art, das Gewicht und die Position der Reifenproben einen Einfluss auf das Entzündungsverhalten haben, wurden die in der folgenden Tabelle 9 aufgelisteten Versuche 7 – 11 mit der als zur Entzündung ausreichend ermittelten Menge an Holzspänen von 20 g durchgeführt.

Tabelle 9: Entzündungsversuche mit 20 g Holzspänen

Lfd. Nr.	Probengewicht [g]	Reifenart	Lauffläche	Entzündung
7	197,94	A1	oben	Nein
8	197,94	A1	oben	Nein
9	197,94	A1	oben	Ja
10	363,47	N1	oben	Ja
11	343,36	N1	unten	Ja

Begonnen wurde wiederum mit einem Reifenstück des Fulda Carat Progresso, das mit ca. 200 g etwas schwerer als die Vorherigen war. Die Anordnung entsprach ebenfalls der der vorausgegangenen Versuche und sollte den Nachweis erbringen, dass 20 g Holzspäne als Stützfeuer ausreichen. Dieser erfolgte aber erst nach der dritten Versuchsdurchführung (Versuch 9). Bei den Versuchen 7 und 8 kam es nicht zur Entzündung der Reifenprobe, das lag unter anderem daran, dass die Holzspäne durch das eingesetzte Löschmittel feucht geworden, weshalb der Probenkorb zunächst getrocknet werden musste. Die Entzündung der Reifenprobe bei Versuch 9 wurde zusätzlich durch das Abrutschen dieser in den Holzspänehaufen begünstigt.

Dieselbe Probenanordnung wurde noch einmal mit einem ca. 365 g deutlich schwereren Neureifenprobenstück des Debica Frigo wiederholt. Hierbei kam es nach

ca. 4 Minuten zur Entzündung der Reifenprobe. Um zu überprüfen, welchen Einfluss die Position des Reifenstücks hat, wurde eine weitere Probe des Debica Frigo mit einem Gewicht von ca. 345 g mit der Lauffläche nach unten über dem Spänehaufen positioniert, wobei der Abstand zwischen Probe und Zündquelle ein wenig geringer war, als der des stehenden Neureifens. Die Entzündung der Neureifenprobe erfolgte mit ca. 1,5 Minuten wesentlich schneller als bei Versuch Nummer 10. Dies liegt zum einen an dem geringeren Abstand zur Zündquelle. Zum anderen wird vermutet, dass der Abstand zum Stahl durch die dickere Gummischicht und die vergrößerte Angriffsfläche durch die Profilrillen diese schnellere Entzündung begünstigen.

Für das zweite Szenario wurde ein Altreifenstück direkt in den Holzspänehaufen (ca. 125 g) gelegt. Dieser wurde ebenfalls mit dem vorgeheizten Platindraht entzündet. Durch das direkt aufliegende Probenstück breitete sich das Feuer innerhalb der Späne nur schlecht aus. Dennoch reichte die freigesetzte Energie zur Entzündung der ca. 180 g schweren Probe aus. Es wird vermutet, geringere Mengen an Holzspänen bei dieser Anordnung aufgrund der schlechten Sauerstoffzufuhr nicht zur Entzündung des Reifens ausreichen.

Durch die Versuche 1 – 6 konnten 20 g Holzspäne als gerade noch ausreichend ermittelt werden, diese Menge wurde durch die Versuche 7 – 11 verifiziert. Wobei sich Neureifen bei gleichen Ausgangsbedingungen besser entzünden lassen als Altreifen. Auch die Position der Reifenprobe ist ein Faktor, der die Entzündung beeinflusst. Zusammenfassend ist zu sagen, dass Holz ein mögliches Glied einer Zündkette darstellt und bereits geringe Mengen davon zur Entzündung eines Reifens führen können.

3.2.2. Maschinenteil-Bitumen/Dachpappe-Reifen

Als initiale Zündquelle wird ebenfalls ein heißes Maschinenteil betrachtet. Anstatt der Holzspäne wurde nun Dachpappe aus Bitumen als nächstes Glied der Zündreihenfolge benutzt.

Es wurden ca. 10 g aufgerollte Dachpappe unter der Reifenprobe positioniert und mit dem Platindraht entzündet. Das Bitumen erlosch nach ca. 2,5 Minuten und führte nicht zur Entzündung des Reifens. Es wurde auf weitere Versuche verzichtet, da davon ausgegangen wurde, dass wiederum eine größere Menge an Bitumen als Stützfeuer zur Entzündung ausreichen würde. Diese Vermutung beruht auf der Erfahrung aus den vorangegangenen Versuchen, dass eigentlich jede Zündquelle einen Reifenbrand verursachen kann, wenn die Menge erhöht wird und somit genug Energie freigesetzt wird. Auch eine Positionsänderung der Zündquelle, z.B. an Seitenwand angelehnt, könnte zum Erfolg beitragen.

3.2.3. Maschinenteil-Stahlwolle-Reifen

Ebenfalls darf handelsübliche Stahlwolle nicht außer Acht gelassen werden. Es gilt, je feiner diese ist, desto leichter entzündlich ist sie auch. Zur Entzündung reichen aufgrund der großen Oberfläche bereits sehr niedrige Energien aus. Als häufige

Brandursache wird die Zusammenlagerung und gemeinsame Entsorgung von Batterien und Stahlwolle genannt. Hierbei können Plus- und Minuspol der Batterie durch die Stahlwolle verbunden werden, wodurch es zum Stromfluss kommt. Dadurch beginnt die Stahlwolle mit bis zu 1000 °C zu glühen. [2] Somit kann durch die Stahlwolle nahezu jedes heiße und selbsterwärmende Metall dargestellt werden. Als Zündquelle kann jegliche Art von hohem Energieeintrag dienen.

Für den nachfolgenden Versuch wurde wiederum der Platindraht, der ein heißes Maschinenteil darstellt, als Zündquelle gewählt. Dieser wurde ca. 1 - 2 Sekunden an die 10 g schwere Stahlwolle gehalten, die unterhalb des Reifenstücks positioniert wurde. Diese begann sofort zu glühen. Nach ca. 3,5 Minuten ist die Oxidation der Stahlwolle abgeschlossen, ohne dass eine Entzündung des Reifenstücks erfolgte.

Somit ist Stahlwolle als direkte Zündquelle für einen Reifen nicht ausreichend. Dennoch könnte die Stahlwolle als ein untergeordnetes Glied einer Zündreihenfolge zu tragen kommen. So könnte die glimmende Stahlwolle z.B. Papier entzünden, welches wiederum z.B. Holzspänen als Zündquelle dienen würde. Zündreihenfolgen lassen sich um beliebig viele Stufen erweitern, bis die Letzte den Brand entfacht. Somit sind die Zündreihenfolgen nicht auf die hier aufgeführten Beispiele begrenzt, sondern um viele Stoffe und Kombinationen erweiterbar.

3.3. Brandverhalten

In diesem Abschnitt soll anhand der in den vorherigen Abschnitten gewonnenen Daten exemplarisch das Brandverhalten eines Autoreifens dargestellt werden. Diese Darstellung beruht auf den mit dem MGA 5 und den Thermoelementen aufgenommenen Daten. Hierbei wurden nur Daten von ausgewählten Versuchen verwendet. Denn nur wenn die Probestücke die Vollbrandphase erreicht haben und nicht zuvor abgelöscht wurden, können die aufgenommenen Daten miteinander verglichen werden. Das verfrühte Ablöschen ist auf die begrenzte Absaugleistung des verwendeten Abzuges zurückzuführen. Ob und wann diese Phase eingetreten ist, kann anhand der Temperatur-Zeit-Diagramme festgestellt werden. Die Vollbrandphase des Reifenstücks ist eingetreten, wenn die maximale Temperatur erreicht wurde und danach ein kontinuierlicher Temperaturabfall eintrat. Als Beispiel dienen die Daten des Versuchs 10 der Zündreihenfolge mit Holzspänen. Hierbei wurden 20 g Holzspäne unter einer ca. 365 g schweren Neureifenprobe des Debica Frigo entzündet (vgl. Abschnitt 3.2). Die Datenausgabe des MGA5s erfolgt zum einen als Datensatz zum anderen als Diagramm, das nachfolgend exemplarisch dargestellt ist (vgl. Abbildung 23).

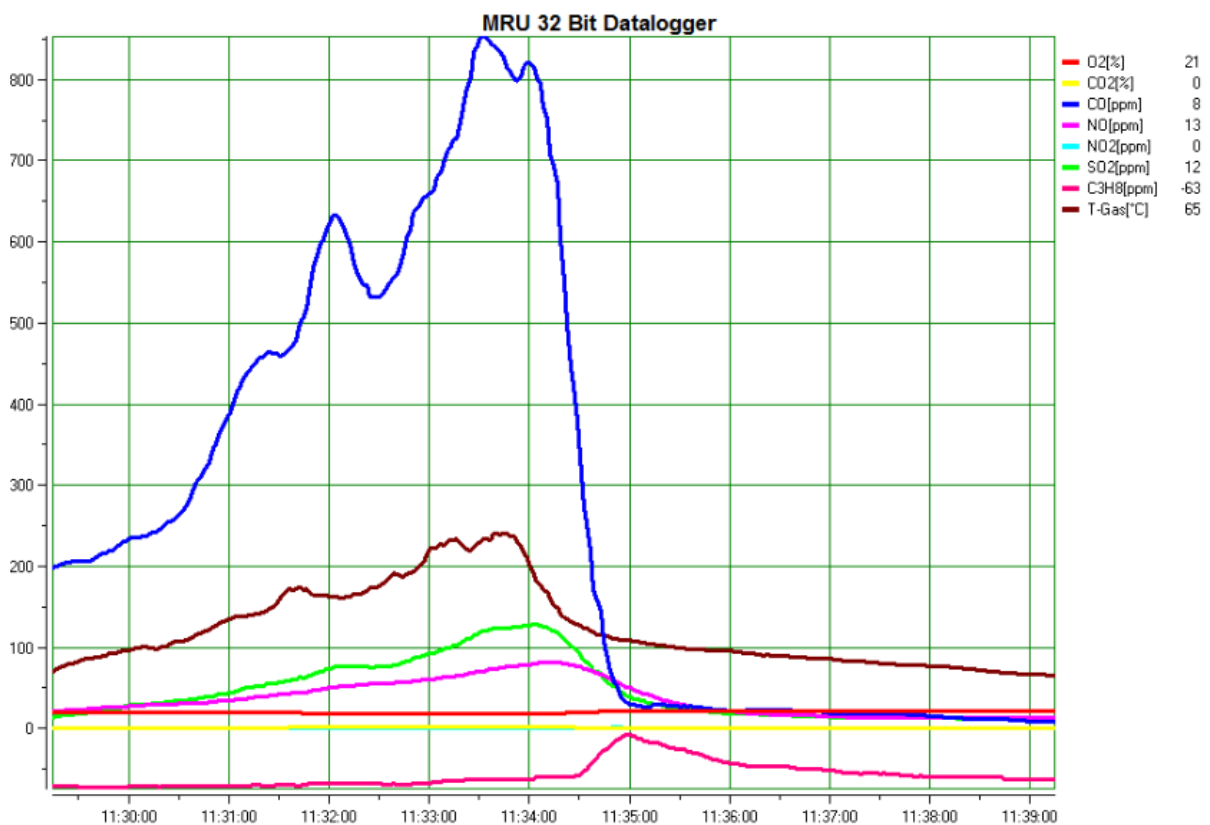


Abbildung 23: MGA5 Diagramm Versuch 10

Die Auswertung der Daten erfolgte über den ausgegebenen Datensatz, somit konnten mehrere Kurven gegeneinander verglichen und die Übersichtlichkeit erhöht werden.

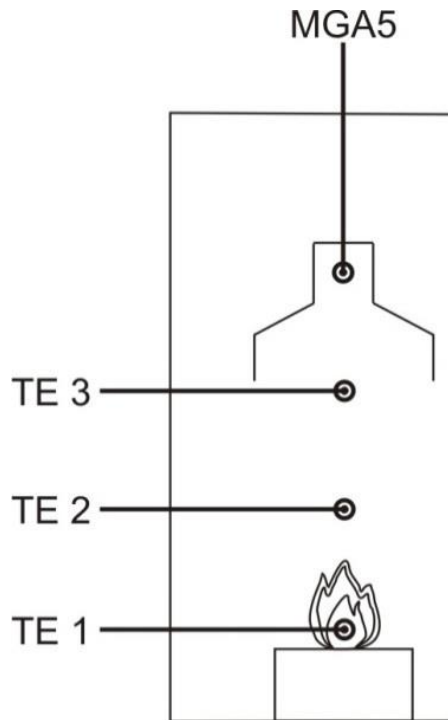


Abbildung 24: Skizze Anbringung Sensoren

Zuerst folgt die Darstellung des Temperaturverlaufs des oben genannten Versuchs. Der Temperaturverlauf ergibt sich aus den gemessenen Temperaturen des MGA 5s und der Thermoelemente, die an den in der obenstehenden Abbildung 24 dargestellten Positionen angebracht waren. Anhand dieser Skizze wird auch ersichtlich weshalb das Thermoelement 1 mit ca. 730 °C beim Versuch 10 eine deutlich höhere Maximaltemperatur aufzeichnet als die anderen Sensoren. Dies liegt daran, dass die Messstelle direkt oberhalb der Probe lag und somit Wärmestrahlung als auch Konvektion sowie Wärmeleitung zu tragen kamen. Durch das aufsteigende Rauchgasgemisch kommt es innerhalb und direkt unterhalb der Abzugsesse zum Wärmestau, weshalb sich die Messwerte des Thermoelements 3 und die des MGA 5s während des Brandes der Reifenprobe sehr ähneln. Hierbei beträgt die maximal gemessene Temperatur für beide ca. 240 °C. Der maximal aufgezeichnete Wert des Thermoelements 2 von ca. 385 °C ist mit den gemessenen Daten der anderen Vollbrandversuche nicht vergleichbar. Diese variieren unter anderem aufgrund von Verwirbelungen sowie uneinheitlicher Positionierung des Sensors.

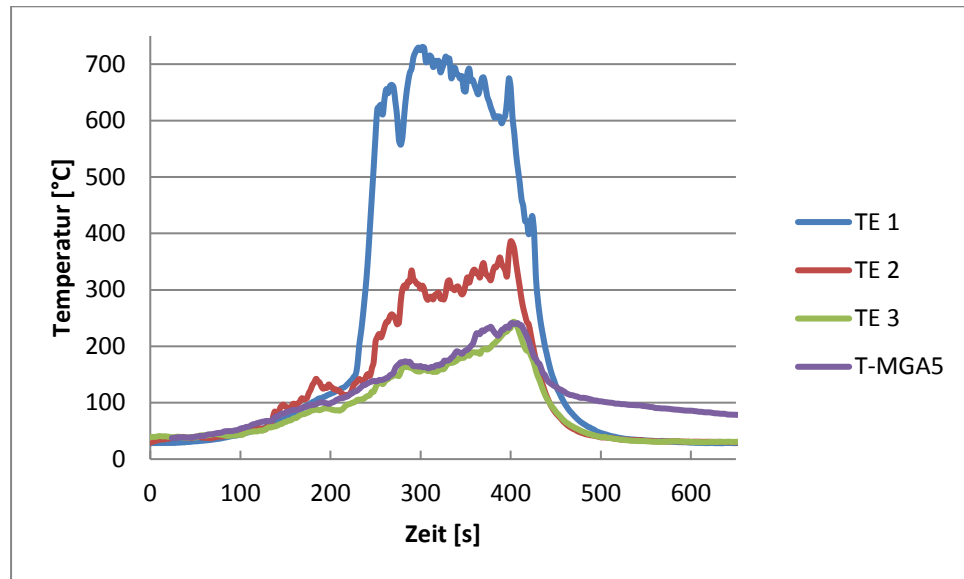


Abbildung 25: Temperaturverlauf Versuch 10

Der obenstehenden Abbildung 25 können auch die einzelnen Brandphasen des Versuchs entnommen werden. In den ersten 180 Sekunden breitet sich das Feuer während der Zünd- und Schwelbrandphase in den Holzspänen aus. Diese erwärmen und entzünden den Reifen. Nach etwa 60 Sekunden des weiteren Entstehungsbrandes steht die Reifenprobe für ca. 160 Sekunden im Vollbrand. Bevor sie nach insgesamt ca. 400 Sekunden Versuchsdauer abgelöscht wird. Hierbei detektiert das MGA5 aufgrund des Wärmestaus in der Abzugsesse einen langsameren Temperaturabfall als die freiliegenden Thermoelemente.

In der folgenden Abbildung 26 sind die durch das MGA5 aufgezeichneten Konzentrationen der Schadgase Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂), Schwefeldioxid (SO₂) und Propan (C₃H₈) in ppm über die Zeit und auf die Temperatur abgebildet. C₃H₈ steht hierbei nicht allein für Propan, sondern für sämtliche durch das MGA5 messbare Kohlenwasserstoffe. Die gemessene Konzentration von C₃H₈ ist hierbei als eine Art Indikator für die Vollständigkeit der Verbrennung zu betrachten. Je geringer die Kohlenwasserstoffkonzentration, desto vollständiger ist die Verbrennung. So stieg die Konzentration während der Phase des Entstehungsbrandes leicht an und sank mit zunehmender Temperatur wieder. Nach Erreichen der maximalen Temperatur stieg die Konzentration als Gegenbewegung zur fallenden Temperatur kontinuierlich an (vgl. TE 1 in Abbildung 25). Mit zeitlicher Verzögerung zum Ablöschen der Probe erreichte die Konzentration an Kohlenwasserstoffe ihr Maximum von ca. 65 ppm durch einen unmittelbaren Anstieg.

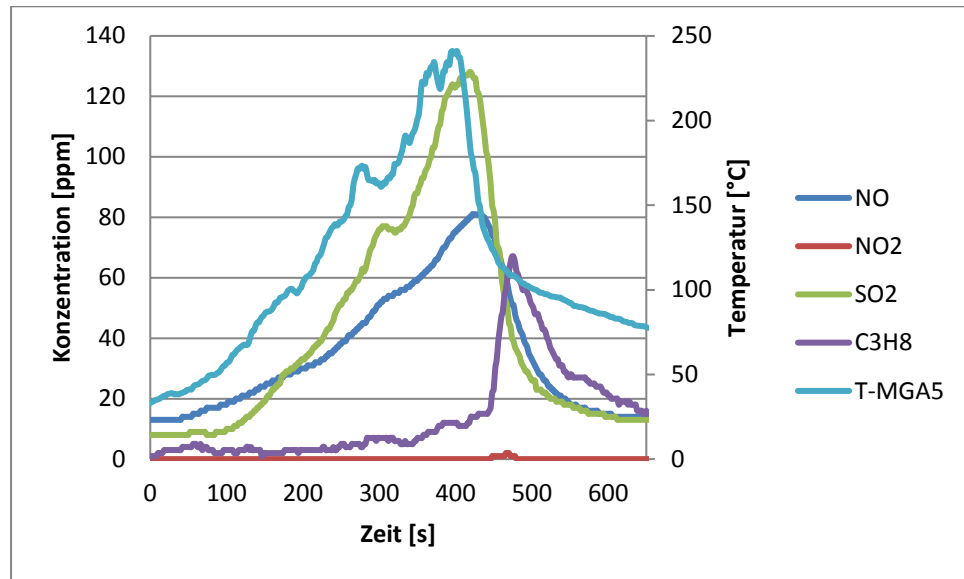


Abbildung 26: Schadgaskonzentrationen Versuch 10

Ebenfalls nach dem Ablöschen der Reifenprobe stieg die NO_2 Konzentration kurzzeitig auf maximal 2 ppm an, die Änderung fand innerhalb von 30 Sekunden statt. Zuvor und danach lag die Konzentration bei 0 ppm. Die Konzentrationen von NO und SO_2 steigen äquivalent zur Temperatur an. Die maximale Konzentration an NO beträgt ca. 80 ppm. Die maximale Konzentration von ca. 130 ppm des Schwefeldioxid ist auf den für die Vulkanisation benötigten hohen Schwefelanteil in der Gummimischung zurückzuführen. Die Freisetzung dieser beiden Gase ist somit ebenfalls stoffabhängig.

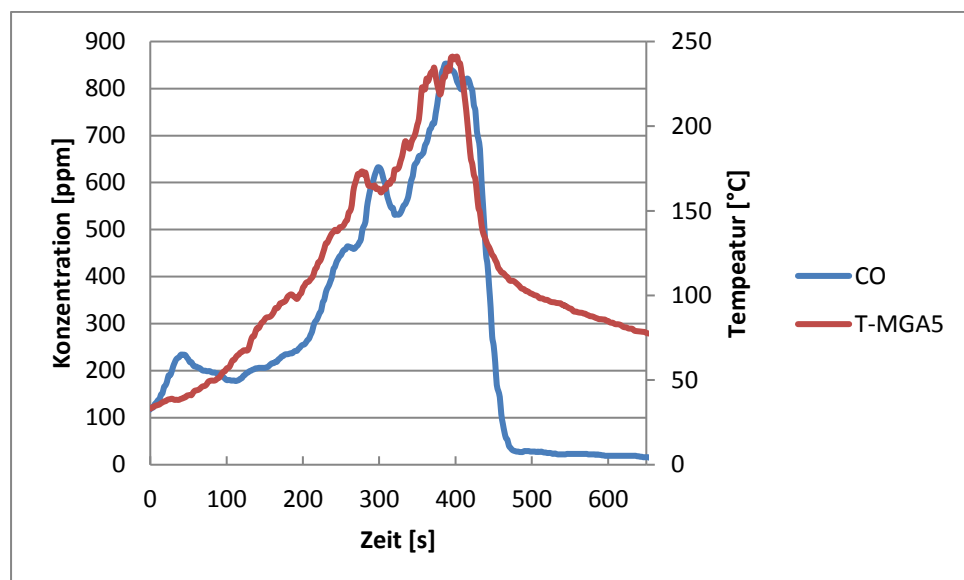


Abbildung 27: CO Konzentration Versuch 10

In der obenstehenden Abbildung 27 wurde die CO Konzentration über die Zeit und auf die Temperatur separat abgebildet, da die maximale Konzentration von ca. 850 ppm die der anderen Schadgase weit übersteigt und somit die Übersichtlichkeit bewahrt wird. Kohlenstoffmonoxid ist ebenfalls wie C_3H_8 ein Indikator für die Vollständigkeit einer Verbrennung. Der Rückgang der Konzentration bei ca. 320 Sekunden ist auf das

bei ca. 300 Sekunden Erreichen der Maximaltemperatur zurückzuführen. Nach dem Ablöschen der Reifenprobe fällt zeitlich versetzt zur Temperatur auch die CO Konzentration ab.

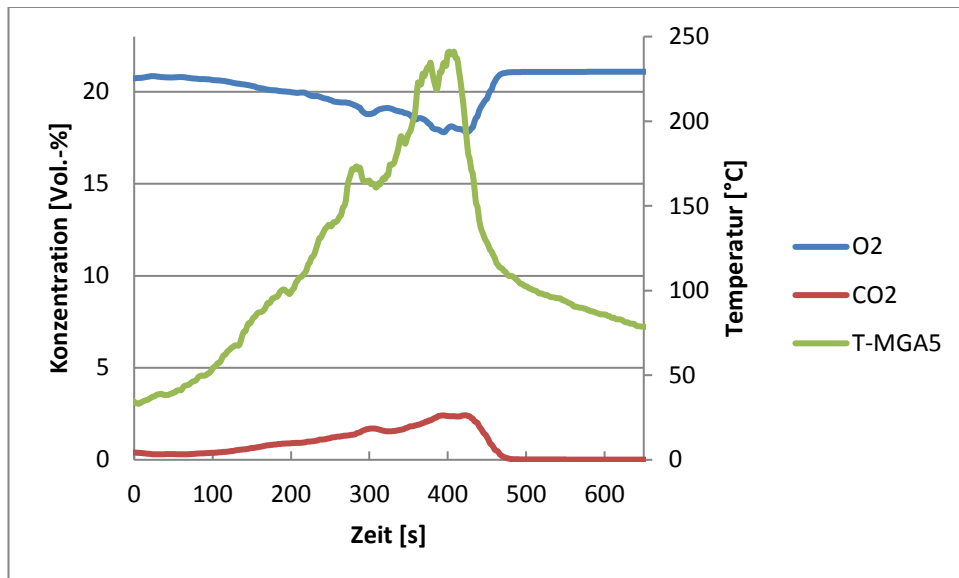


Abbildung 28: Sauerstoff-Kohlenstoffdioxidkonzentration Versuch 10

Die Sauerstoff- und Kohlenstoffdioxidkonzentration stehen im direkten Zusammenhang mit dem Brandverlauf. So sinkt bei steigender Temperatur die Sauerstoffkonzentration und äquivalent dazu steigt die CO₂ Konzentration. Das jeweilige Maximum (negativ sowie positiv) wird mit ca. 18 Vol.-% O₂ und ca. 3 Vol.-% CO₂ kurz vor dem Zeitpunkt des Ablöschens der Reifenprobe erzielt.

Im direkten Vergleich zum oben genannten Versuch steht der Versuch 11 der Zündreihenfolge mit Holzspänen, bei dem ebenfalls 20 g Holzspäne unter einer ca. 345 g schweren Neureifenprobe positioniert wurden. Der Unterschied liegt hierbei in der Anordnung der Reifenprobe, welche mit der Lauffläche nach unten über der Zündquelle aufgehängt wurde. Es soll anhand der MGA5 Daten untersucht werden, ob hierbei Unterschiede im Brandverhalten und der Stofffreisetzung bestehen. Die gemessenen maximalen Konzentrationen der freigesetzten Schadgase NO mit ca. 80 ppm, NO₂ mit 2 ppm und SO₂ mit ca. 140 ppm bleiben weitestgehend dieselben. Nur die Konzentrationsverläufe haben sich dem Brandverlauf entsprechend angepasst. Die CO und C₃H₈ Werte haben sich als Indikator für die Vollständigkeit der Verbrennung aufgrund des veränderten Brandverlaufs geringfügig verändert. Für CO wurde eine maximale Konzentration von ca. 900 ppm, für C₃H₈ ca. 50 ppm gemessen. Der größte Unterschied besteht im Brandverlauf, dieser ist zusammen mit der O₂ und CO₂ Verlauf in der folgenden Abbildung 29 dargestellt.

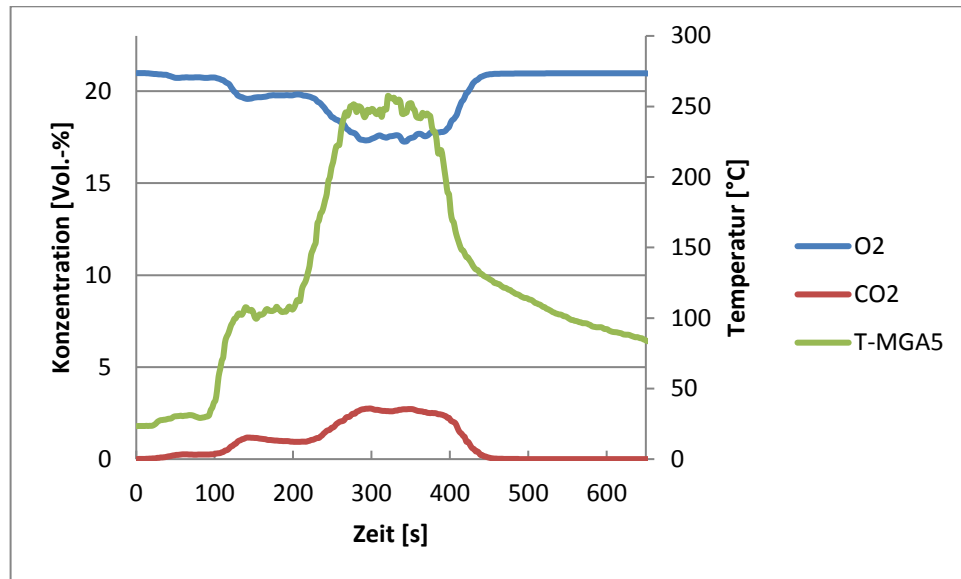


Abbildung 29: Sauerstoff-Kohlenstoffdioxidkonzentration Versuch 11

Es wird ersichtlich, dass die Entzündung der Reifenprobe in zwei wesentliche Schritte unterteilt werden kann. Zunächst kommt es nach ca. 90 Sekunden zunächst zur örtlich begrenzten Entzündung der Lauffläche durch die zuvor entfachten Holzspäne. Innerhalb der nächsten 40 Sekunden zündet die Lauffläche der Reifenprobe durch und brennt für ca. 80 Sekunden bei gleichbleibender Temperatur weiter, bis sich die Seitenwände entzünden. Während der folgenden Brandausbreitung kommt es über ca. 60 Sekunden zur deutlichen Temperatursteigerung. Nach insgesamt ca. 270 Sekunden steht das Reifenstück für ca. 110 Sekunden bei gleichbleibender Temperatur im Vollbrand, bevor es abgelöscht wird. Die maximal durch das MGA5 gemessene Temperatur beträgt hier ca. 255 °C. Das jeweilige Maximum (negativ sowie positiv) von O₂ und CO₂ wird mit ca. 17,5 Vol.-% bzw. ca. 3 Vol.-% während der Vollbrandphase erreicht.

Somit besteht der Hauptunterschied der beiden Versuche in den Brandverläufen. Die Maximalwerte bleiben hingegen im Wesentlichen gleich.

In den zwei nachfolgenden Diagrammen sind die gemittelten Maximalwerte der Versuche, bei denen die Vollbrandphase erreicht wurde, zusammen mit der jeweiligen Standardabweichung abgebildet. Die zugrundeliegenden sieben Versuche sind in der folgenden Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle 10: Versuche mit Vollbrandphase

Lfd. Nr.	Menge, Zündquelle, Nr.	Reifen	VP-Nr.
1	15 ml, Ethanol, 4	A1	17
2	25 ml, Ethanol, 6	N1	5
3	20 g, Holzspäne, 9	A1	13
4	20 g, Holzspäne, 10	N1	14
5	20 g, Holzspäne, 11	N1	15
6	25 g, Holzspäne, 3	A1	9
7	165 g, Grillanzünder, 1	N2	24

Das erste der beiden Diagramme beinhaltet die Mittelwerte der an den verschiedenen Sensoren gemessenen maximalen Temperaturen (vgl. Abbildung 30). Allerdings variieren die zugrundeliegenden Temperaturen sehr, sodass es zu einer jeweils sehr hohen Standardabweichung kommt. Sehr weit streuende Messwerte liefert vor allem das Thermoelement 2, dies liegt unter anderem an den unterschiedlichen Versuchsanordnungen, Verwirbelungen in den Rauchgasströmen, der aufbaubedingt variierenden Positionierung des Temperatursensors sowie eventuellen Messfehlern.

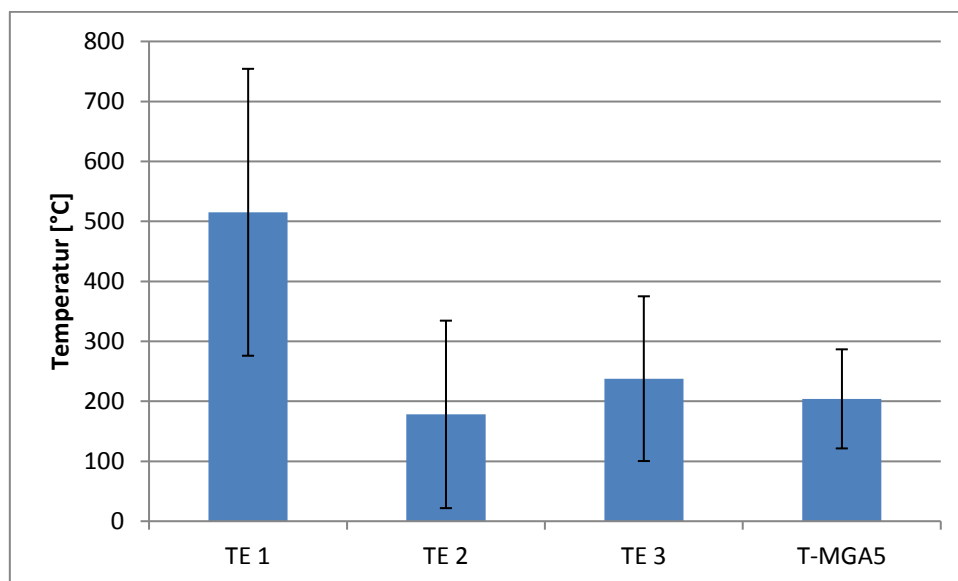


Abbildung 30: Gemittelte Maximaltemperaturen Vollbrandphase

Die höchste Temperatur wird mit einem Schnitt von ca. 515 °C durch das Thermoelement 1 gemessen. Durch den Wärmestau direkt unter und in der Abzugsesse folgen die gemittelten maximal Werte des Thermoelements 3 mit ca. 240 °C und des MGA5s mit ca. 200 °C vor dem des Thermoelements 2 mit ca. 180 °C.

Das zweite Diagramm zeigt die gemittelten maximal Konzentrationen der messbaren Schadstoffe an (vgl. Abbildung 31). Hierbei wurde CO mit 621,00 ppm und einer Standardabweichung von 338,03 ppm aus Gründen der Übersicht auf einer extra Skala abgebildet. Die gemittelte NO Konzentration beträgt 67,86 ppm mit einer

Standardabweichung von 19,54 ppm. Die niedrigste Konzentration von 1,57 ppm besitzt NO_2 mit einer Streuung von 0,73 ppm. Bei SO_2 beträgt die gemittelte Maximalkonzentration 88,29 ppm und die Standardabweichung 47,28 ppm. Die maximale C_3H_8 Konzentration beträgt im Mittel 37,29 ppm mit einer Standardabweichung von 18,64 ppm.

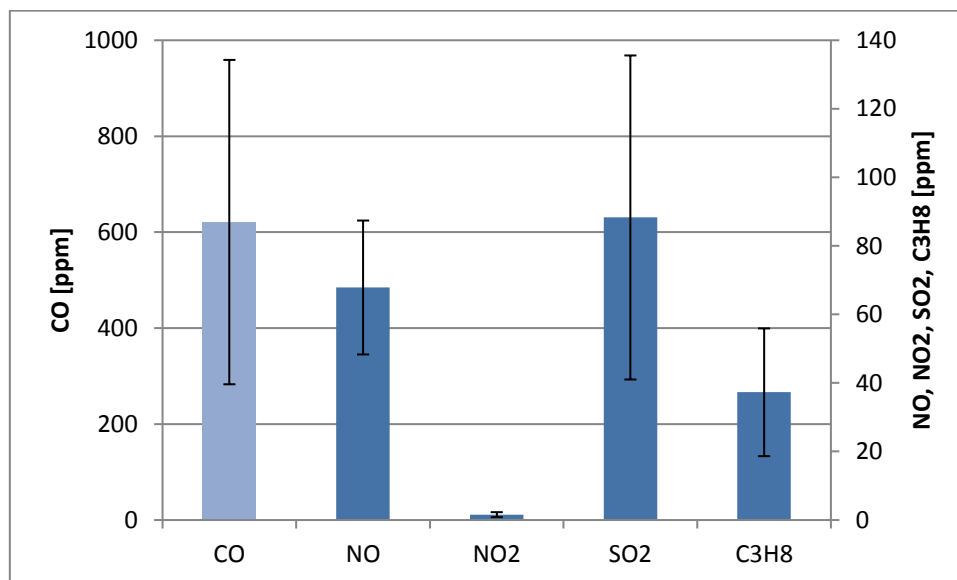


Abbildung 31: Gemittelte maximale Schadgaskonzentrationen Vollbrandphase

Die Mittelwerte sollen dazu dienen, eine Abschätzung für die Schadstofffreisetzung bei einem theoretischen Vollbrand eines Reifens zu liefern. Hierzu wird das jeweilige Verhältnis von Mittelwert der maximalen Schadgaskonzentrationen und Mittelwert des Gewichts der Reifenproben gebildet. Das mittlere Gewicht der verwendeten Proben beträgt 265,31 g und die zugehörige Standardabweichung 74,42 g. Das berechnete Verhältnis beschreibt die maximale Schadstofffreisetzung eines Reifens im Vollbrand pro Gramm Reifen. Für einen 9 kg schweren Reifen, derselben Zusammensetzung wie das gemittelte Probenstück, ergibt sich im Vollbrand somit theoretisch die in der folgenden Tabelle 11 berechnete maximale Schadstoff-freisetzung.

Tabelle 11: Berechnung Schadgaskonzentration Autoreifen (9 kg)

	CO	NO	NO ₂	SO ₂	C ₃ H ₈
Mittelwert [ppm]	621,00	67,86	1,57	88,29	37,29
[ppm / g]	2,341	0,256	0,006	0,333	0,141
[ppm / 9 kg]	21.069	2.304	54	2.997	1.269

Bei dieser Hochrechnung handelt es sich nur um eine Abschätzung, da für eine genauere Berechnung mehrere Faktoren beachtet werden müssen. So kann es keine allgemein gültige Hochrechnung für Autoreifen geben, da je nach deren Zusammensetzung auch die Stofffreisetzung variiert. Unter anderem müsste die längere Branddauer, die höhere Temperatur berücksichtigt werden.

Der Arbeitsplatzgrenzwert [AGW] stellt die durchschnittliche Konzentration eines Stoffes in der Umgebungsluft eines Arbeitsplatzes dar, bei der keine Gefährdung der Gesundheit des Beschäftigten innerhalb der Arbeitszeit von 8 Stunden zu erwarten ist. Falls es für einen Stoff keinen AGW gibt, kann die Maximale Arbeitsplatz-Konzentration [MAK], welche der Vorgänger des AGWs ist und die selbe Definition besitzt, verwendet werden. Zusätzlich zu diesen allgemeingültigen Grenzwerten gibt es noch Separate für die Anwendung im Feuerwehreinsatz, die so genannten Einsatztoleranzwerte [ETW]. Hierbei gibt es eine Unterscheidung in ETW-4, für eine maximal vierstündige Exposition und ETW-1, für eine maximal einstündige Exposition. Unterhalb des ETWs ist eine Gefährdung der Leistungsfähigkeit der Einsatzkräfte ohne Atemschutz durch den Stoff weder während noch in der Folgezeit der entsprechenden Einsatzzeit auszuschließen. Sobald der ETW überschritten wird, muss der der Exposition ausgesetzte Trupp umgebungsluftunabhängigen Atemschutz tragen. [8, 54, 54]

Für CO liegt der AGW bei 30 ppm, der ETW-4 bei 33 ppm. Bei einer Expositionsdauer von 60 Minuten wirkt eine Dosis von 1500ppm tödlich, aber auch deutlich niedrigere Konzentrationen führen zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen wie Kopfschmerzen, Schwindel, Übelkeit oder Krämpfen. Bei wiederholter und längerer Exposition können auch geringere Konzentrationen zum Tod führen. [8, 31, 54]

Die MAK-Werte der Stickoxide (NO_x) liegen bei je 0,5 ppm, wobei NO_2 weit toxischer als NO ist. Der ETW-4 liegt hingegen für NO_2 bei 8,2 ppm. Die NO_x greifen die Schleimhaut der Atmungsorgane an und bilden die Grundlage für chronische Atemwegserkrankungen. Dies kann zu erhöhtem Atemwiderstand, Atemnot, Lungenentzündung sowie Krebs und damit unter Umständen zum Tod führen. Bereits kleine Mengen an NO_x sind umweltschädlich. So führen Stickoxide in der Atmosphäre ab einer gewissen Menge zur Bildung sauren Regens, welcher sich negativ auf das gesamte Ökosystem auswirkt, ein Beispiel sei das charakteristische Waldsterben [15, 54, 58]

Der AGW für SO_2 liegt bei 1 ppm, der ETW-4 unterschreitet diesen mit 0,75 ppm. Ab 8 -10 ppm treten Rachen- und Augenreizungen auf. Ab 100 ppm – 250 ppm ist Schwefeldioxid bei andauernder Exposition durch akute Vergiftungserscheinungen, wie Atemnot und Entzündungen im Atemtrakt lebensgefährlich. Schwefeloxide führen ebenso zu Umweltschäden. [8, 31, 54]

Da C_3H_8 hierbei für alle organischen Bestandteile in der Verbrennungsluft steht, ist es nicht möglich einen allgemeingültigen Grenzwert festzusetzen. Dennoch sind diese nicht außer Acht zu lassen. Da unter anderem polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe [PAK] und Nitrosamine freigesetzt werden können, welche zum Großteil hochgradig kanzerogen und reproduktionstoxisch sind.

3.4. Fazit

Betrachtet man ein Reifenlager so ist, berücksichtigt man die Ergebnisse der durchgeführten Versuche, eine Entzündung sehr unwahrscheinlich. Die Realität zeigt, dass dennoch mit gewisser Regelmäßigkeit Brände in Reifenlagern vorkommen. Die Zündquelle muss, da Selbstentzündung ausgeschlossen ist, von außen dem Lager zugeführt werden. Die Zündung durch heiße Oberflächen, wie etwa heiß gelaufene Maschinenteile oder glimmende Zigaretten konnten ausgeschlossen werden, auch die Zündung durch Heißarbeiten ist unwahrscheinlich, da eine Zündung erst durch Thermit nachgestellt werden konnte. Erst die Versuche mit flüssigen Brennstoffen, Benzin-Bindemittel Gemischen und ölhaltiger Lappen konnten zur Entzündung eines Reifens führen. Ebenso konnten geringe Mengen an brennenden Holzspänen die Prüfstücke entzünden. Daher lässt sich ableiten, dass eine Brandlastfreie Umgebung sowie rudimentäre Anforderungen an Ordnung und Sauberkeit ausreichend sind um eine Entzündung Reifenlagern vorzubeugen.

Unterstellt man den vorhandenen Betrieben, dass Sie diese Anforderungen heute schon erfüllen bleiben als mögliche Zündquellen entweder ein Unfall oder das gezielte Herbeiführen eines Brandes. Die These der Unfälle wird durch die Entzündungsversuche mit Kraftstoffen sowie diversen Berichten über die Entzündung durch brennende Flurförderfahrzeuge gestützt. [40, 47] Die Versuche mit diversen Brandbeschleunigern zeigten beim entzünden Erfolg, sodass davon ausgegangen werden kann, dass mit wenig krimineller Energie und einfachen Mitteln ein Reifenlagerbrand zu realisieren ist. Ist der Schadensfall eingetreten und das Reifenlager brennt, ist es für die Einsatzkräfte unerlässlich die Gefahren für die Bevölkerung und die eigenen Kräfte einschätzen zu können. Hierfür ist eine Abschätzung und Bewertung der zu erwartenden Schadgase notwendig. Betrachtet man die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Kapitel so zeigt sich, dass bereits die gemittelten Maxima der Schadgaskonzentrationen alle entsprechenden AGW bzw. MAK und ETW Werte übersteigt. Hiervon ausgenommen sind die NO_2 - Konzentrationen, deren Werte unterhalb des ETWs bleiben.

Somit kann mit Sicherheit gesagt werden, dass bei Kontakt zu den Verbrennungsgasen eines Reifenbrandes eine Gesundheitsgefährdung besteht. Das zu erwartende Schadensausmaß hängt hierbei natürlich von der Expositionsdauer ab. Aber nicht nur für den Menschen besteht eine Gefahr, sondern auch für die Umwelt. Durch die Freisetzung von Stickoxiden und Schwefeldioxid kann es nach einem Reifenlagerbrand zur Versauerung von Boden und Gewässern in der direkten Umwelt oder anderen Umweltschäden an Pflanzen und Tieren kommen.

4. Brandausbreitung

Auch wenn aus dem vorangegangenen Kapitel ersichtlich wird, dass die Entzündung von Reifen einen deutlichen Energieeintrag benötigt zeigt die Praxis, dass es dennoch zu ausgedehnten Bränden in Reifenlagern kommt. Hierbei zeigt sich häufig, dass die Ausbreitung von Reifenbränden, auch über Lagerabschnitte hinweg schwer zu vermeiden ist. Um die Prozesse der Brandausbreitung sowie für die Simulationen zur Überprüfung der notwendigen Lagerabstände nachvollziehen zu können werden unterschiedliche PKW-Reifen auf Energiegehalt, Wärmefreisetzungsrate sowie den kritischen Wärmestrom untersucht.

4.1.1. TGA

Zur Ermittlung des Massenverlustes und der daraus resultierenden Energiefreisetzung der Reifenproben wurde die Thermogravimetrische Analyse [TGA] zusammen mit der Dynamic Scanning Calorimetry [DSC] angewandt.

Als Temperaturprogramm wurde für alle Proben einheitlich ein kontinuierlicher Temperaturanstieg festgelegt: Jede Probe wurde von 25 °C auf 1000 °C mit 5 K pro Minute erhitzt.

Durch die Einrichtung zur Erzeugung einer definierten Atmosphäre wurde im Probenraum unter kontinuierlicher Zuführung der Inert- und Reaktionsgase, in diesem Fall Stickstoff [N₂] (33ml/min) und Sauerstoff [O₂] (7ml/min), die Umgebungsluft bei 21 Vol.-% O₂ konstant gehalten. Zur Probenaufnahme wurden Tiegel aus Aluminiumoxid mit einem Fassungsvermögen von 70 µl verwendet

Für die Untersuchung wurden jeweils zwei Proben aus der Lauffläche, Seitenwand sowie der Innenisolierung näher betrachtet. Bei der Probennahme war es nicht möglich klare Schichten oder Gummimischungen auszumachen. Daher wurde den untersuchten Proben unterstellt repräsentativ für einzelne Bauteile des Reifens zu sein. Die Proben aus der Lauffläche stammen jeweils aus den Profilstollen. Bei den Proben aus der Innenisolierung wurde darauf geachtet, dass keine Rückstände der Karkasse an den Proben anhafteten. Gleiches gilt für die Proben aus der Seitenfläche. Bei den untersuchten Reifen handelt es sich um Modelle mit unterschiedlicher Laufleistung von zum Teil unterschiedlichen Herstellern, vgl. Tabelle 12.

Tabelle 12 Reifendaten

	Reifen N1	Reifen N2	Reifen A1	Reifen A2	Reifen N3
Hersteller	Debica	Debica	Fulda	Michelin	Michelin
Profil	Frigo	Passio	Carat Progresso	Energy Saver	Energy Saver
DOT	n.b.	n.b.	5010	0312	0616
Reifendimension	155/80 R13	135/80 R13	195/60 R15	195/65 R15	195/65 R15
Reifenart	Winterreifen	Sommerreifen	Sommerreifen	Sommerreifen	Sommerreifen
Zustand	Neureifen	Neureifen	Altreifen	Altreifen	Neureifen

Im Vergleich zeigen die doppelt bestimmten Proben zueinander gute Übereinstimmungen, sodass davon ausgegangen werden konnte, dass homogene Proben untersucht wurden. Abbildung 32 zeigt exemplarisch vorhandene Abweichungen zwischen den doppelt bestimmten Proben. Aufgrund der Abweichungen des Probengewichts unterschiedlichen Positionen der Probe im Tiegel können solche Abweichungen nicht vermieden werden.

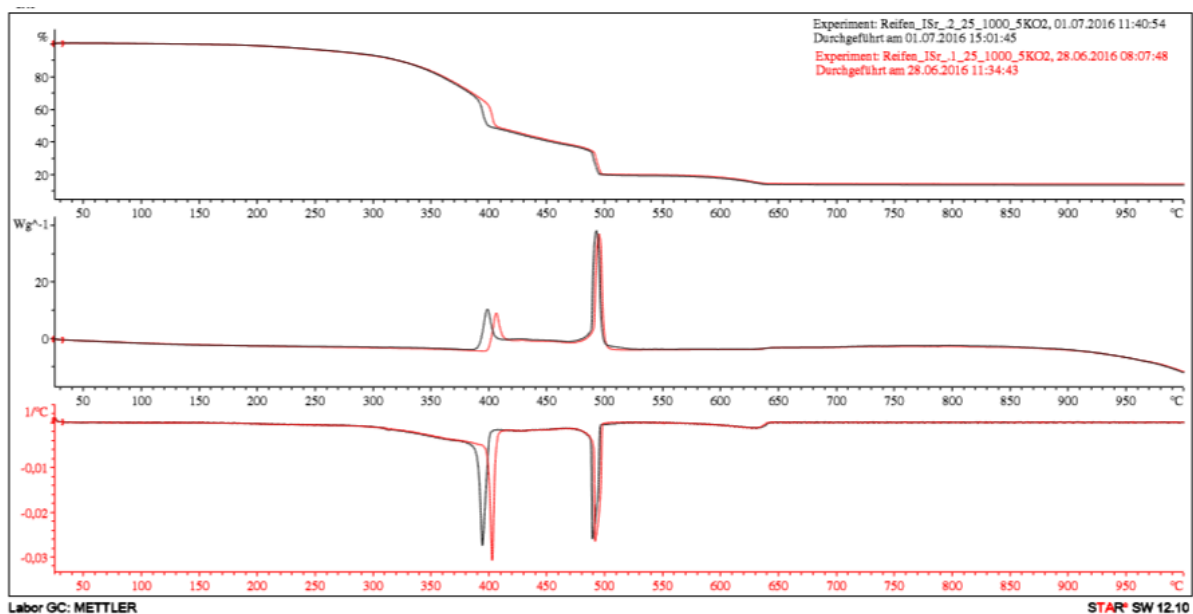


Abbildung 32 Vergleich Innenisolierung Sommerreifen Debica

Über die TGA – Funktion sollte untersucht werden ob und welche Unterschiede sich im Vergleich der Reifen zueinander ergeben.

Für die Berechnung der Gesamtenergien mussten Annahmen bezüglich der Gewichtsanteile eines Reifens getroffen werden. Im Folgenden werden Reifen als vereinfachtes System aus Lauffläche (52,8 Gew.-%), Seitenwand (27,2 Gew.-%) sowie Innenisolierung (20 Gew.-%). Die Abschätzung der prozentualen Anteile beruht auf Daten von Leister und Heißing [29] und wird im Anhang erläutert.

4.1.2. Vergleichende Betrachtung von Winter zu Sommerreifen

Für den Vergleich zwischen Winter und Sommerreifen wurde Proben aus zwei Neureifen der Firma Debica genutzt um herstellerepezifische Unterschiede ausschließen zu können. Im Vergleich zeigt sich, dass der Winterreifen geringfügig mehr Energie freisetzt als der Sommerreifen, vergleiche Tabelle 13. Der Unterschied beträgt etwa 8,25% (577,31 J/g). Wobei die Abweichungen zwischen Innenisolierung (2,59 %) und Seitenfläche (2,21 %) eher auf Messunsicherheiten zurückzuführen sind als auf Unterschiede in der Zusammensetzung. Der direkte Vergleich der Kurven verdeutlicht die gute Übereinstimmung, siehe Abbildung 33 bis Abbildung 35. Die Lauffläche des Winterreifens weist 14,4 % mehr an freigesetzter Energie auf. Dies spiegelt die Erwartung, dass unterschiedliche Gummimischungen direkte Auswirkungen auf die Energiefreisetzung haben wieder. Die TGA-Kurve der Laufflächen in Abbildung 35 zeigt, dass im Bereich von 540°C bis 570°C mehr Energie vom Sommerreifen freigesetzt wird. Der darauf folgende Anstieg ist auf Messfehler der DSC – Funktion des Messgeräts zurück zu führen, da in diesem Bereich kein Massenverlust stattfindet. Bei der Betrachtung der Energien wurde dieser Bereich nicht berücksichtigt.

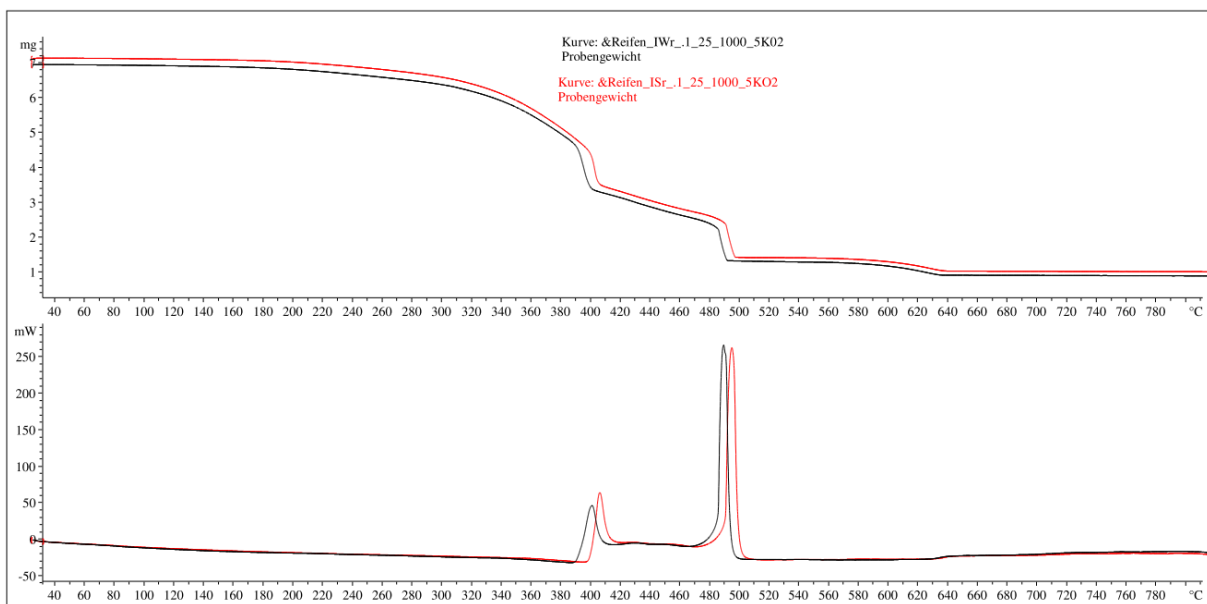


Abbildung 33 Vergleich Innenisolierung Sommer- Winterreifen

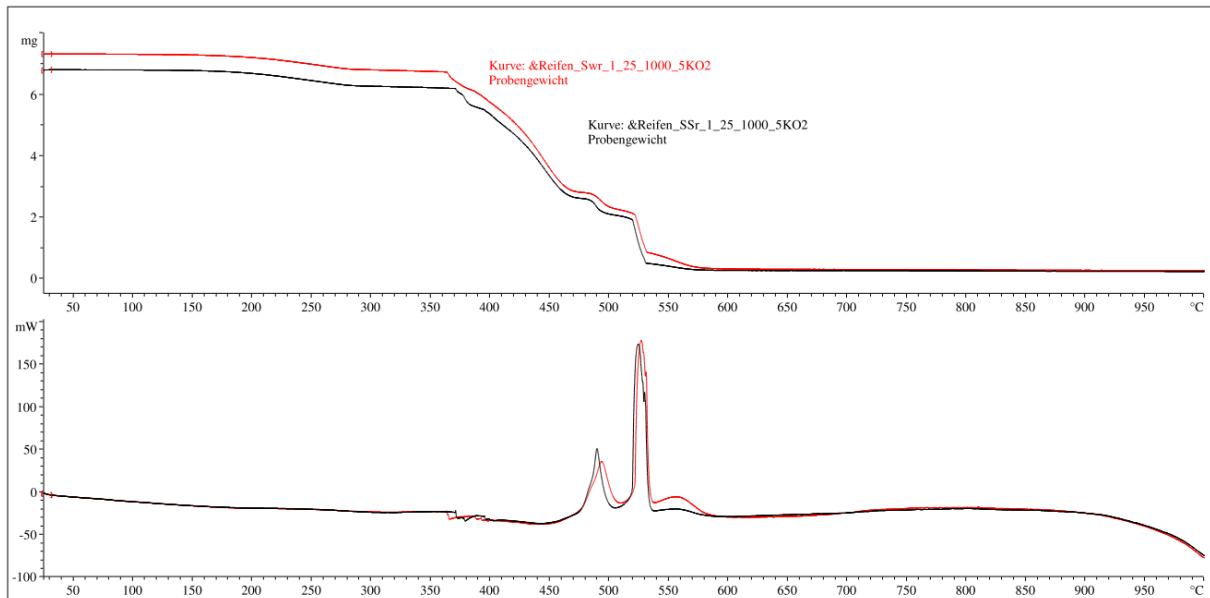


Abbildung 34 Vergleich Seitenflächen Sommer- Winterreifen

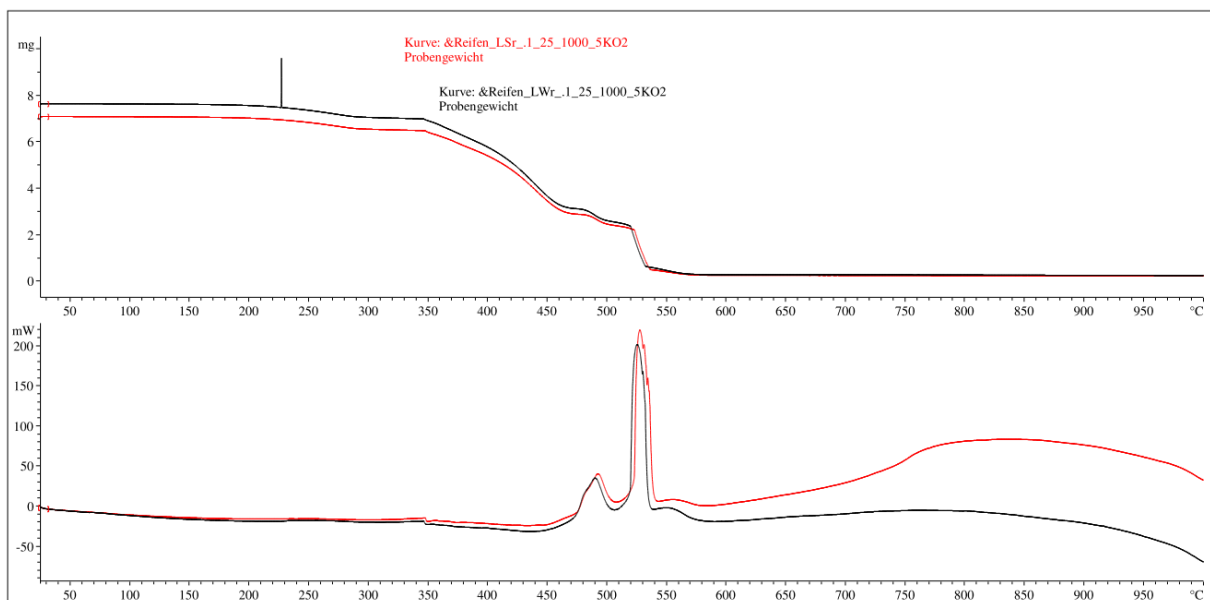


Abbildung 35 Vergleich Laufflächen Sommer- Winterreifen

Tabelle 13 Energien Winter- Sommerreifen

	Energien Winterreifen			Energien Sommerreifen		
Name	Energie [J/g]	Peak [°C]	Anteil [J/g]	Energie [J/g]	Peak [°C]	Anteil [J/g]
Innenisolierung	7667.27	500.47	1533.45	7473.67	506.14	1494.73
Seitenfläche	7827.23	537.15	2129.01	7657.62	537.97	2082.87
Lauffläche	7406.24	534.41	3910.37	6473.31	534.51	3417.91
Gesamt			7572.83			6995.51

4.1.3. Vergleichende Betrachtung Neu- zu Altreifen

Um den Einfluss der Alterung auf einen Reifen bewerten zu können wurden Proben aus unterschiedlichen alten Reifen gleichen Modells Proben genommen und gegenüber gestellt. Der verwendete Altreifen wurde im Januar 2012 produziert, der Neureifen stammte aus der Produktion von Februar 2016. Der Vergleich der Energien zeigt, dass der Altreifen weniger energetisch ist als der verglichene Neureifen, siehe Tabelle 14. So hat die Innenisolierung etwa 14 % ihrer ursprünglichen Energie verloren. Der größte Unterschied, etwa 22 %, zeigt sich bei der Seitenfläche. Die geringsten Einbußen weist die Lauffläche mit 10,6 % weniger Energie auf. Im Vergleich der Energiekurven zeigt die Innenisolierung beider Reifen einen deutlichen Peak im Bereich zwischen 500°C - 510 °C auf. Vorher weist der Neureifen einen Peak bei 430 °C auf, dieser ist bei dem Altreifen nicht zu erkennen. Dafür weist der Altreifen eine Peak bei 380 °C auf, siehe Abbildung 36.

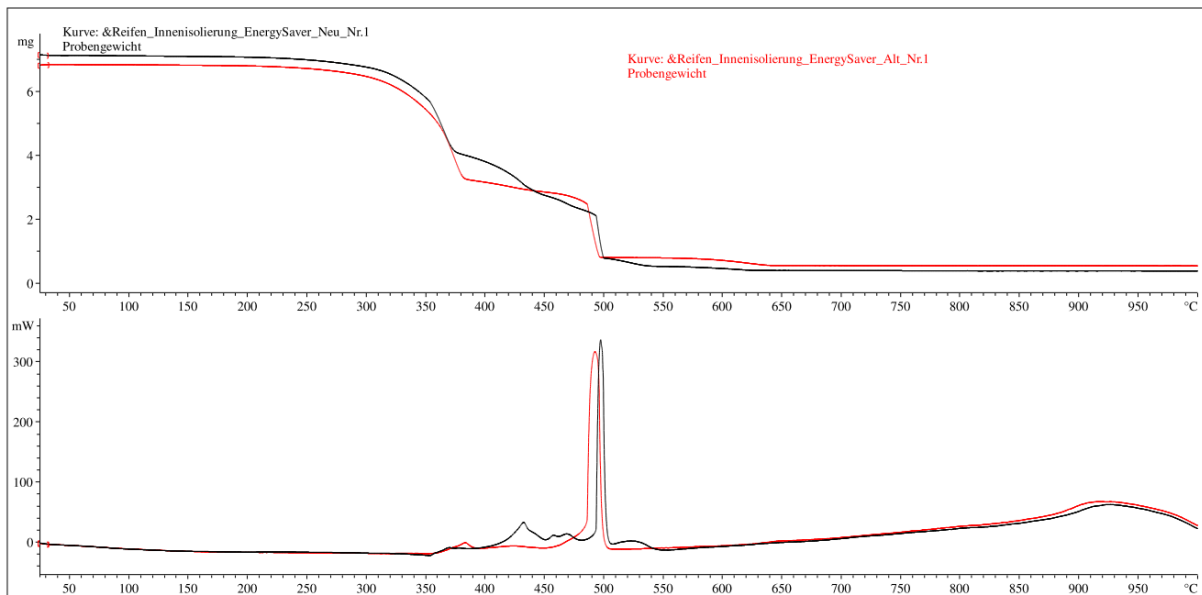


Abbildung 36 Vergleich Innenisolierung Energy Saver

Die Kurven der Seitenflächen weisen zwei deutliche Spitzen, bei 480 °C und 540 °C auf. Nach dem Peak bei 540 °C fällt die Kurve des Altreifens ab, wohingegen beim Neureifen ein kurzer Anstieg der freigesetzten Energie zu verzeichnen ist, siehe Abbildung 38.

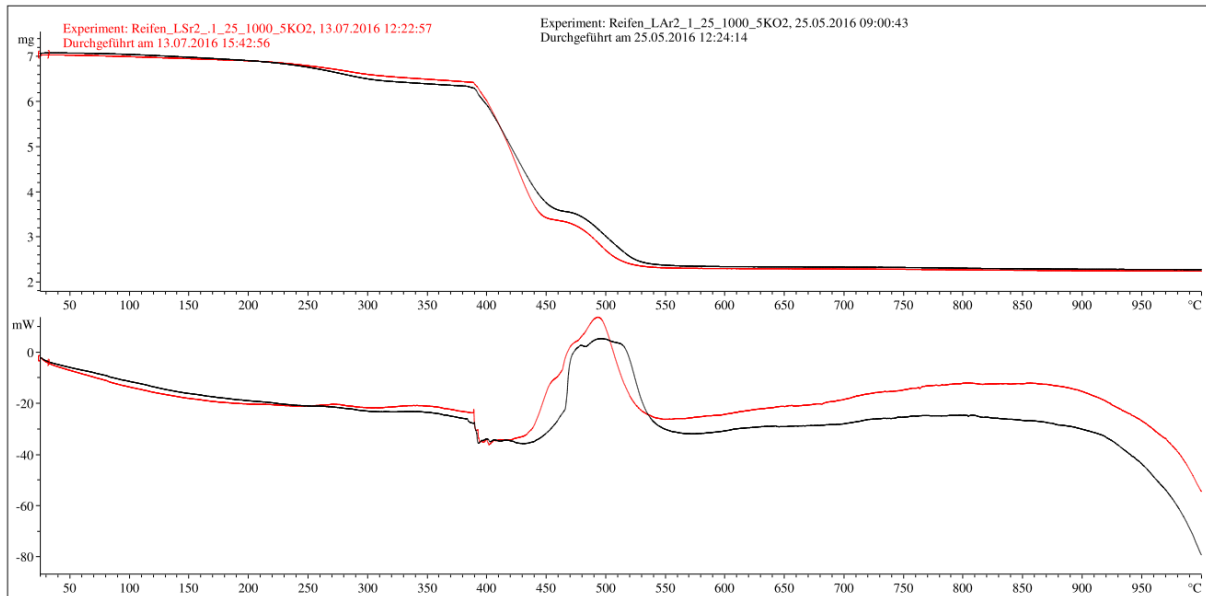


Abbildung 37 Vergleich Lauffläche Energy Saver

Lauffläche des Altreifens bildet ein Plateau zwischen 470 °C und 520 °C aus, wohingegen der Neureifen bis zu einer Temperatur von 500 °C ansteigt und danach stark abfällt, siehe Abbildung 37.

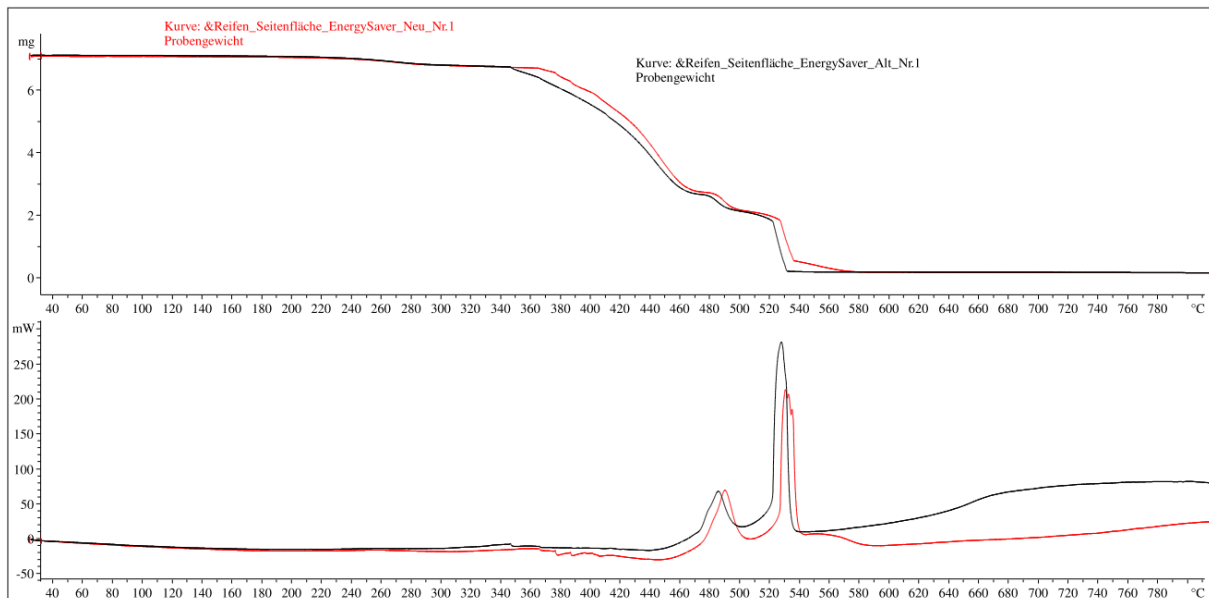


Abbildung 38 Vergleich Seitenflächen Energy Saver

Tabelle 14 Vergleich Energien Energy Saver

Name	Alt		Neu		Abweichung [%]
	Energie [J/g]	Anteil [J/g]	Energie [J/g]	Anteil [J/g]	
Innenisolierung	8859.94	1771.99	10130.00	2026.00	14.3
Seitenfläche	7298.35	1985.15	8925.04	2427.61	22.3
Lauffläche	3926.8	2073.35	4343.83	2293.54	10.6
Gesamt		5830.49		6747.15	

4.1.4. Vergleichende Betrachtung von Altreifen

Es wurden zwei gebrauchte Reifen unterschiedlichen Alters gegeneinander getestet. Zum einen wurde das Modell Carat Progresso, produziert im Februar 2010, des Herstellers FULDA getestet zum anderen ein Energy Saver vom Januar 2012 der Firma Michelin. Die Unterschiede bei den beiden gemessenen Altreifen fallen gering aus. Wobei das Modell der Firma FULDA tendenziell weniger Energie freisetzt als der Reifen der Firma Michelin. Auffällig ist die geringe Abweichung der freigesetzten Energien der Innenisolierung beider Reifen. Diese liegen bei unter einem Prozent, siehe Tabelle 15. Die Abweichung der Seitenfläche beträgt etwa 2 %. Die größte Abweichung zeigt sich in den Laufflächen mit etwa 8 %. Die Kurvenverläufe der DSC spiegeln dies Ergebnis wieder Position und Ausdehnung der Peaks ähneln sich stark wobei die Kurve des Energy Savers ein wenig über der des Carat Progressos verläuft. Eine Ausnahme stellen die Kurven der Lauffläche da, hier steigt die freigesetzte Energie des FULDA Reifens früher an bildet aber ein kürzeres Plateau als der Reifen der Firma Michelin.

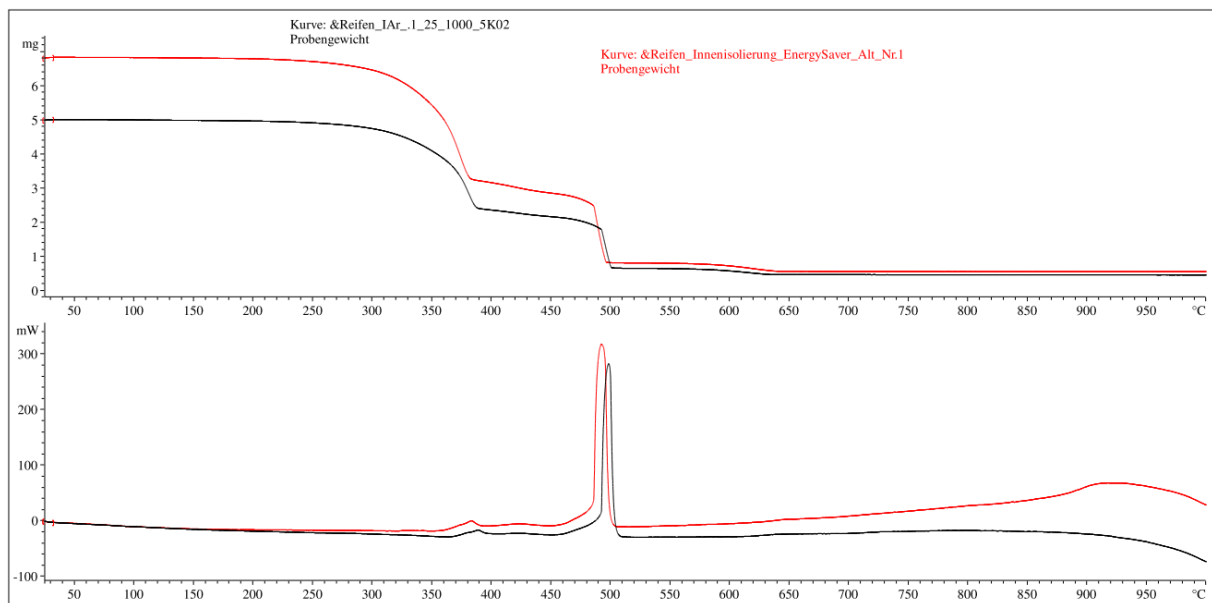


Abbildung 39 Vergleich Innenisolierung Altreifen

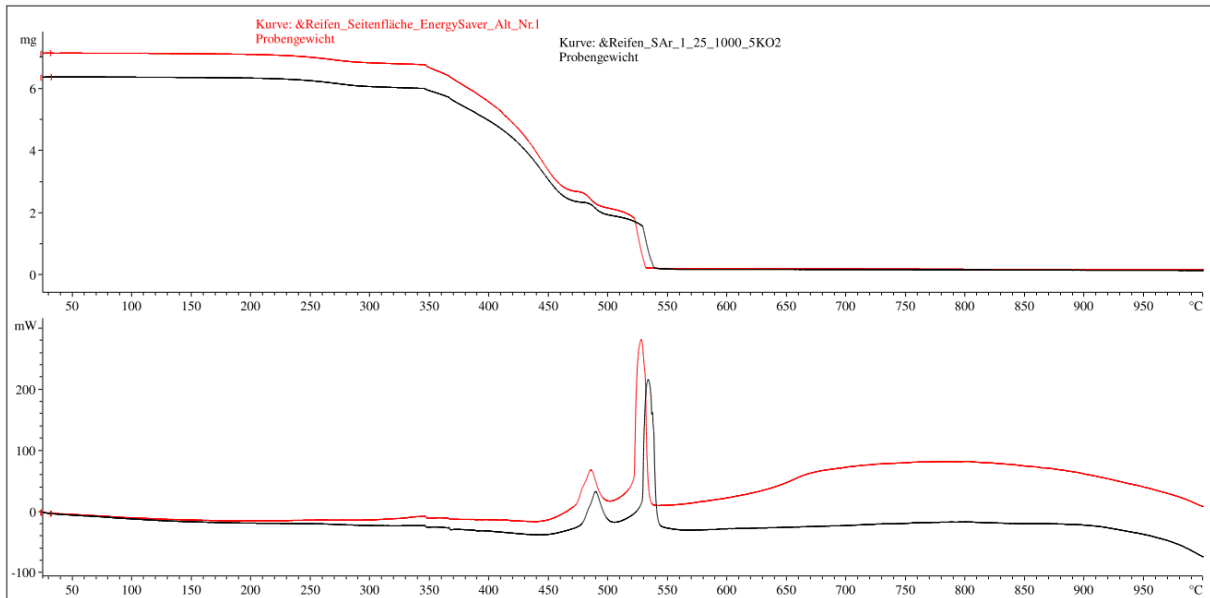


Abbildung 40 Vergleich Seitenflächen Altreifen

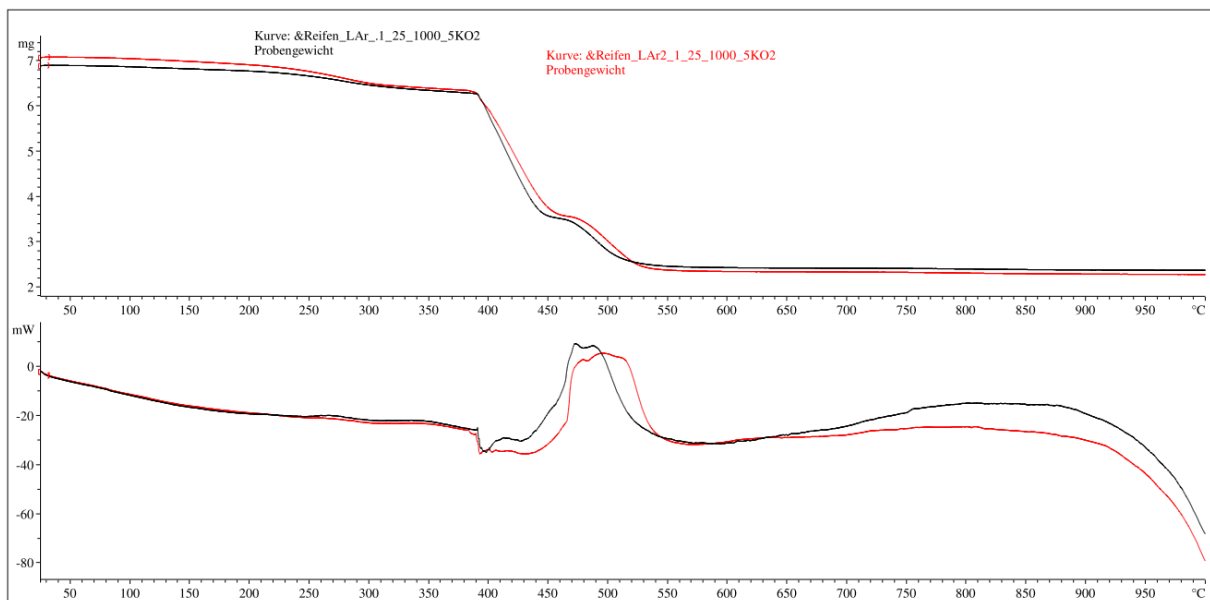


Abbildung 41 Vergleich Laufflächen Altreifen

Tabelle 15 Energien Altreifen

Bauteil	Fulda Carat Progresso		Michelin Energy Saver	
	Energie [J/g]	Peak [°C]	Energie [J/g]	Peak [°C]
Innenisolierung	8827.3	1765.46	8859.94	1771.99
Seitenfläche	7449.13	2026.16	7628.57	2074.97
Lauffläche	3670.99	1938.28	3981.68	2102.33
Gesamt		5729.91		5949.29

4.1.5. Vergleichende Betrachtung von Neureifen

Beim Vergleich der Neureifen zueinander zeigt sich, dass die einzelnen Bauteile Herstellerübergreifend einen großen Unterschied aufweisen, siehe Tabelle 16 Energien Neureifen. So setzt die Innenisolierung des Debica Sommerreifens etwa 26 % weniger Energie frei als die Innenisolierung des Michelin Reifens. Dieser weist aber eine recht energiearme Lauffläche, 32 % weniger als der Debica Sommerreifen, auf. Dadurch werden die Unterschiede der Gesamtenergien ausgeglichener. So ist der energiereichste Reifen der Debica Winterreifen mit 7572,96 J/g der energieärmste Reifen ist der Michelin Energy Saver mit etwa 11 % weniger Energie. Die TGA Kurven zeigen, mit Ausnahme der Laufflächen gute Übereinstimmungen, siehe Abbildung 42 und Abbildung 43. Bei der Betrachtung der Innenisolierung zeigen die Reifen der Fa. Debica zwei charakteristische Peaks bei 400 °C und bei 490°C. Der Reifen der Fa. Michelin weist ein früheren Anstieg der freigesetzten Energie auf dafür ist der erste deutliche Peak weniger ausgeprägt und erst später, bei 430 °C, zu erkennen. Der zweite Peak ist ebenfalls bei 490°C. Ebenso unterscheiden sich die Verläufe des Massenverlustes. Der Energy Saver beginnt früher Masse umzusetzen und weist am Ende deutliche weniger anorganische Reste auf.

Tabelle 16 Energien Neureifen

Name	Energy Saver		Sommer		Winter	
	Energie [J/g]	Anteil [J/g]	Energie [J/g]	Anteil [J/g]	Energie [J/g]	Anteil [J/g]
Innenisolierung	10130	2026.00	7473.67	1494.73	7667.27	1533.45
Seitenfläche	8925.04	2427.61	7657.62	2082.87	7827.23	2129.01
Lauffläche	4343.83	2293.54	6473.31	3417.91	7406.24	3910.49
Gesamt		6747.15		6995.51		7572.96

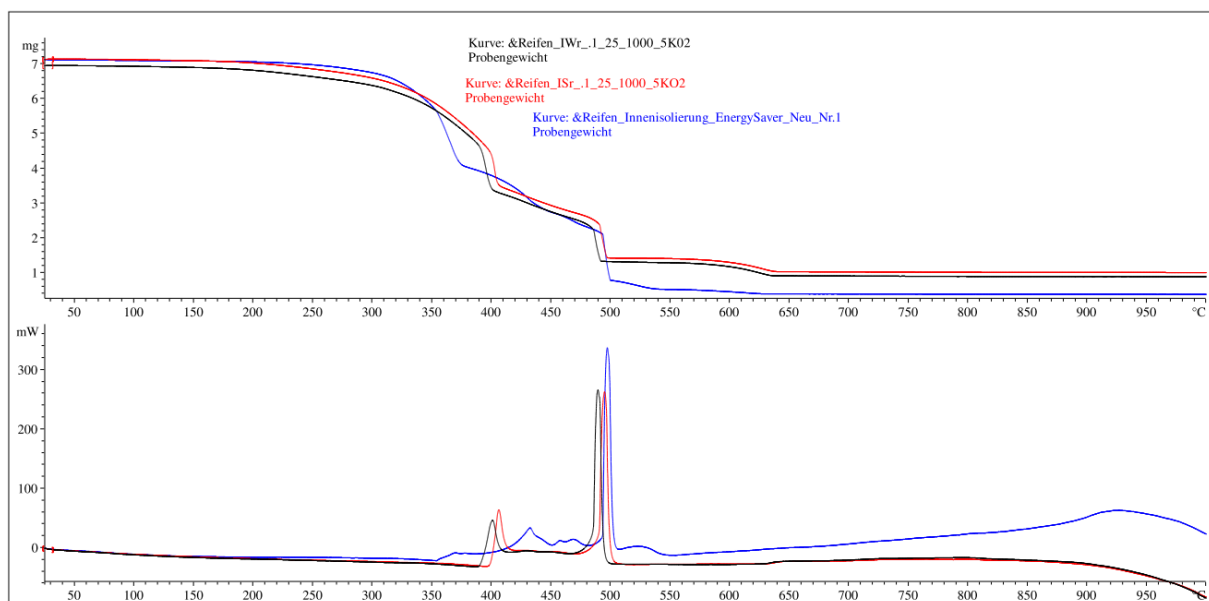


Abbildung 42 Vergleich Innenisolierung Neureifen

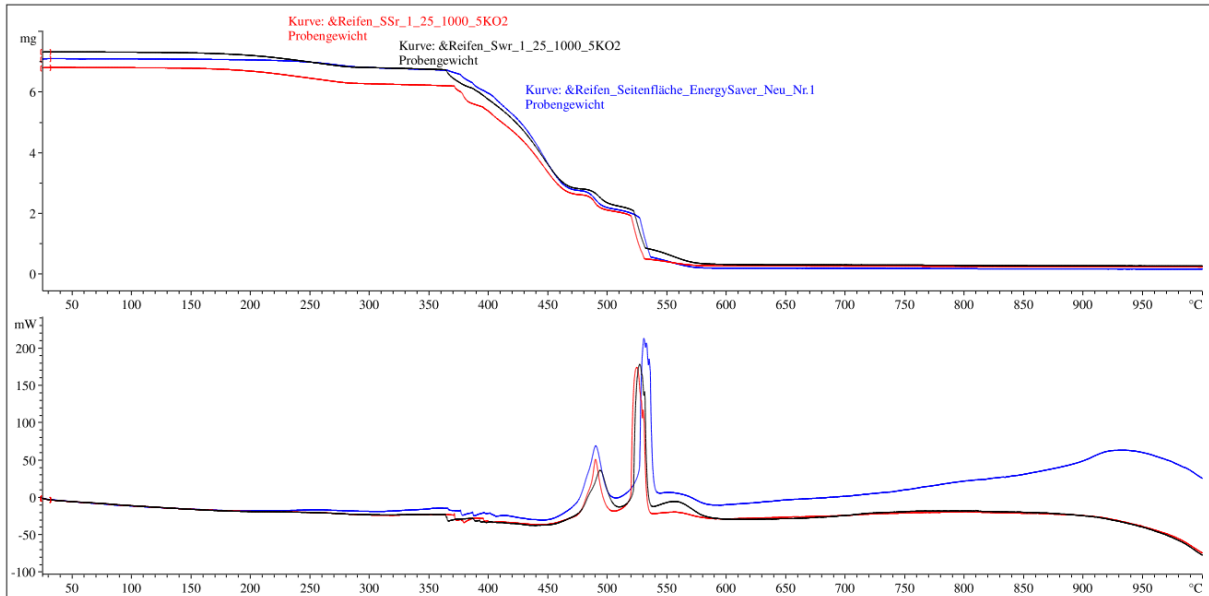


Abbildung 43 Vergleich Seitenwände Neureifen

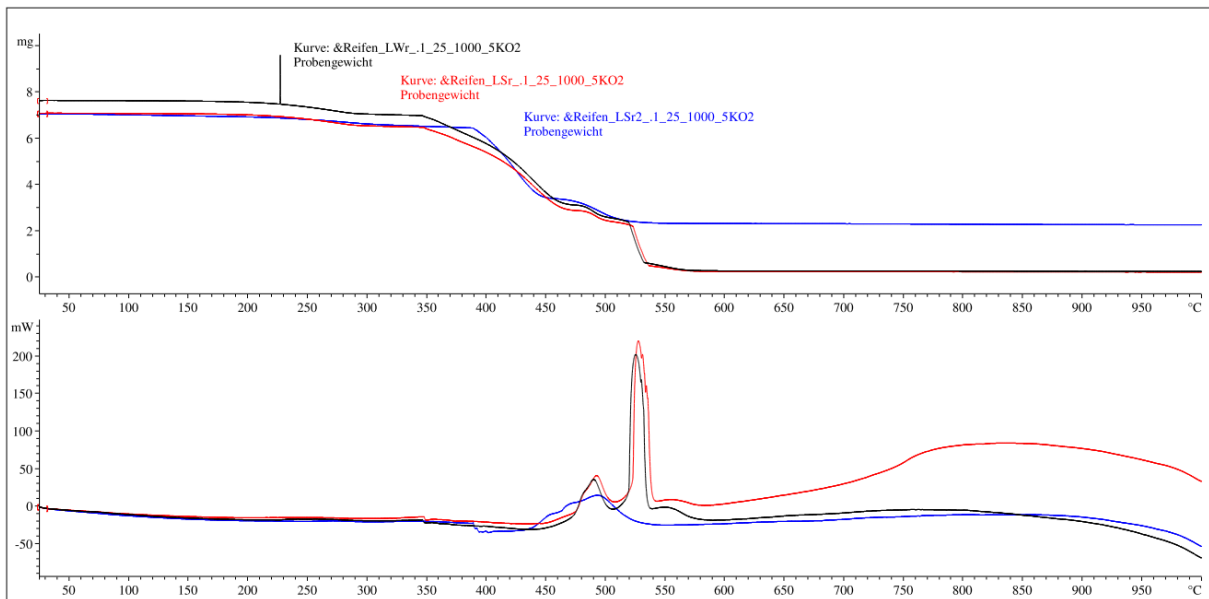


Abbildung 44 Vergleich Laufflächen Neureifen

4.1.6. Kritischer Wärmestrom

Die Ermittlung des für die Entzündung kritischen Wärmestroms wurde anhand von Proben aus der Lauffläche eines Altreifens (Carat Progresso) durchgeführt. Die Ermittlung wurde in Anlehnung an die DIN EN ISO 13927 durchgeführt. Abweichen von der Norm wurde die Prüfung mit Halterahmen sowie 1 mm Stahldraht durchgeführt. Da sich die Proben verformen und zu befürchten stand, dass die Proben an den Shutter bzw. in den Bereich der Spiralen reinragen würde.

Die Proben wurden nacheinander unterschiedlichen Wärmeflüssen ausgesetzt, um den Wert zu ermitteln bei dessen Bestrahlung innerhalb von 15 Minuten gerade keine Entzündung mehr stattfand. Begonnen wurde bei einer Bestrahlungsstärke von 25 kW/m². Diese wurde in 5 kW schritten abgesenkt bis, bei 15 kW, keine Zündung mehr erreicht wurde. Anschließend wurde beginnend bei 17 kW/m² der kritische Wärmestrom in 1 kW Schritten angenähert. Aus den Messungen ging hervor, dass der Wert bei dem gerade keine Zündung mehr erreicht wird bei 15 kW/m² liegt und bei 16 kW/m² mit einer Zündung gerechnet werden kann, siehe Tabelle 17. Somit ergibt sich ein kritischer Wärmestrom von 15,5 kW/m². Im Sinne eines konservativen Ansatzes wird im weiteren Verlauf der kritische Wärmestrom für Reifen mit 15 kW/m² angesetzt. Dieser Wert entspricht denen in der Literatur für SBR beschriebenen Werten. [18]

Tabelle 17 Ermittlung des kritischen Wärmeflusses

Proben Nr.	Bestrahlungsstärke [kW/m ²]	Zeitpunkt der Zündung [s]	Probengewicht [g]	Besonderheiten
1	25	128,3	128,4	Abbruch da Probe sich stark wölbte
2	20	431	127,7	Draht zur Probensicherung
3	15	-	126,0	-
4	15	-	126,0	-
5	17	675	1224	-
6	17	481	128,5	-
7	16	528	127,1	-
8	16	-	127,6	-
9	16	777	128,4	-

Es wurde eine Messreihe (n=10) zur Bestimmung des Zündzeitpunktes durchgeführt um durch Messgerät spezifische Schwankungen ermitteln zu können. Die Ergebnisse des Zündzeitpunktes weisen eine Standardabweichung von 2,37 s um den Wert 30,5 s auf. Die ermittelten Zündzeitpunkte sind in Abbildung 45 dargestellt.

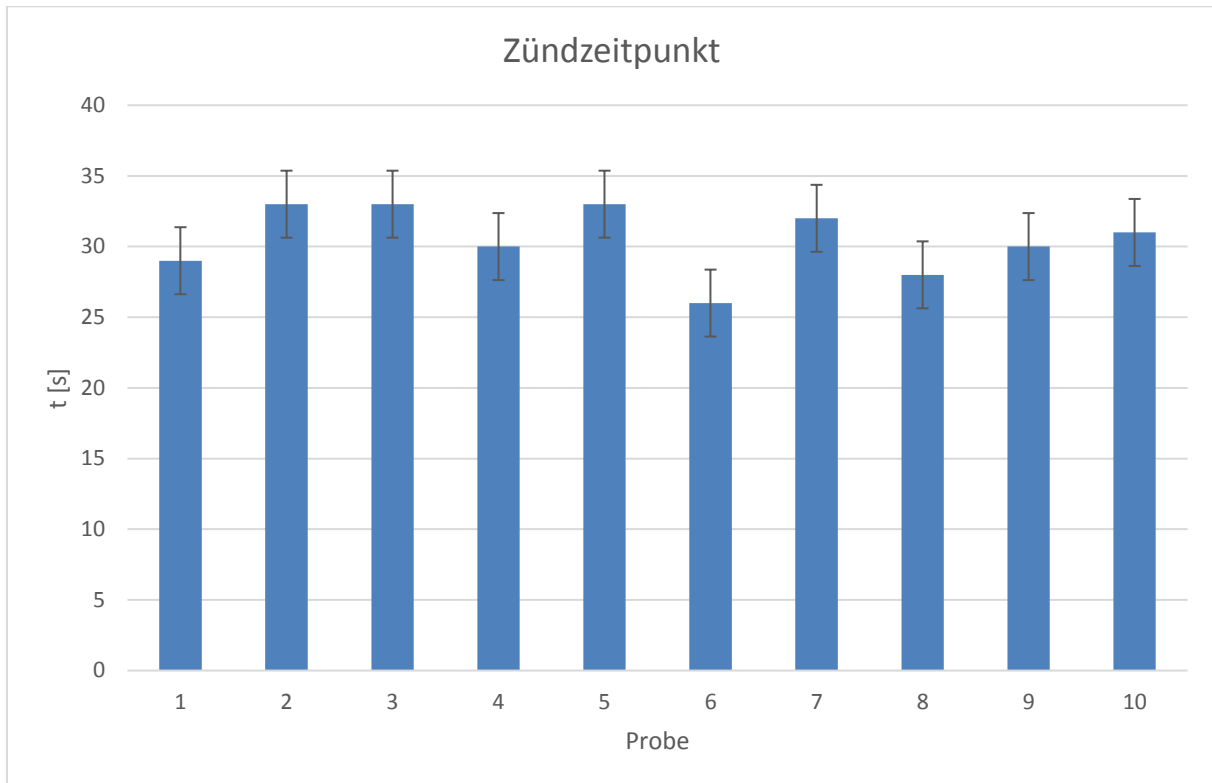


Abbildung 45 Fehlerbestimmung des Zündzeitpunkts

4.1.7. Wärmefreisetzungsrate und Verbrennungswärme

Für die Ermittlung der Wärmefreisetzungsrate wurden Teile der Lauffläche sowie der Seitenwand des Altreifens 1 (Carat Progresso), Altreifen 2 und Neureifen 3 mittels des Massenverlustkalorimeters mit Thermosäule getestet. Die Prüfung der Lauffläche fand analog zur Bestimmung des kritischen Wärmestroms mit Halterahmen und Stahldraht als Lagesicherung statt. Für die Prüfung der Seitenwand wurde aufgrund der geringen Größe, ein Halterahmen mit einer freien Prüffläche von 6,5 cm x 6,5 cm verwendet. Die Bestrahlungsstärke wurde auf 50 kW/m² festgelegt. Die Messung der Wärmefreisetzungsrate erfolgte über vier, in der Thermosäule integrierte, Thermoelemente. Die gemessenen Verläufe der Wärmefreisetzungsraten sind in Abbildung 46 und Abbildung 47 dargestellt. Die geringere Probengröße bei den Seitenflächen spiegelt sich in der kürzeren Prüfdauer wieder.

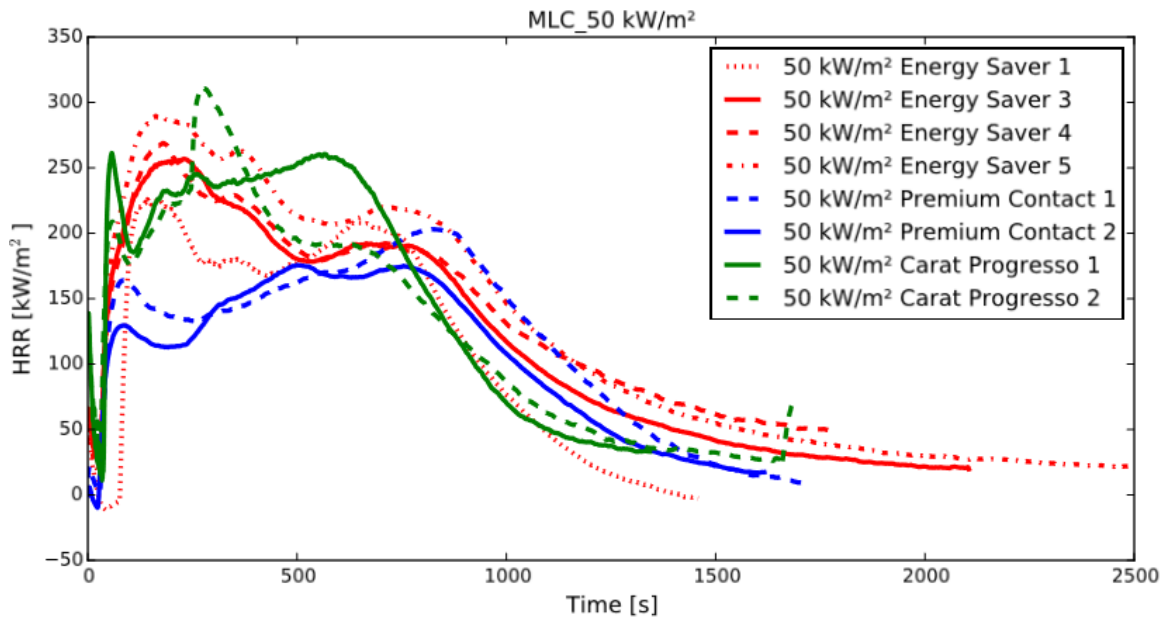


Abbildung 46 Verlauf der Wärmefreisetzungsraten von Laufflächen

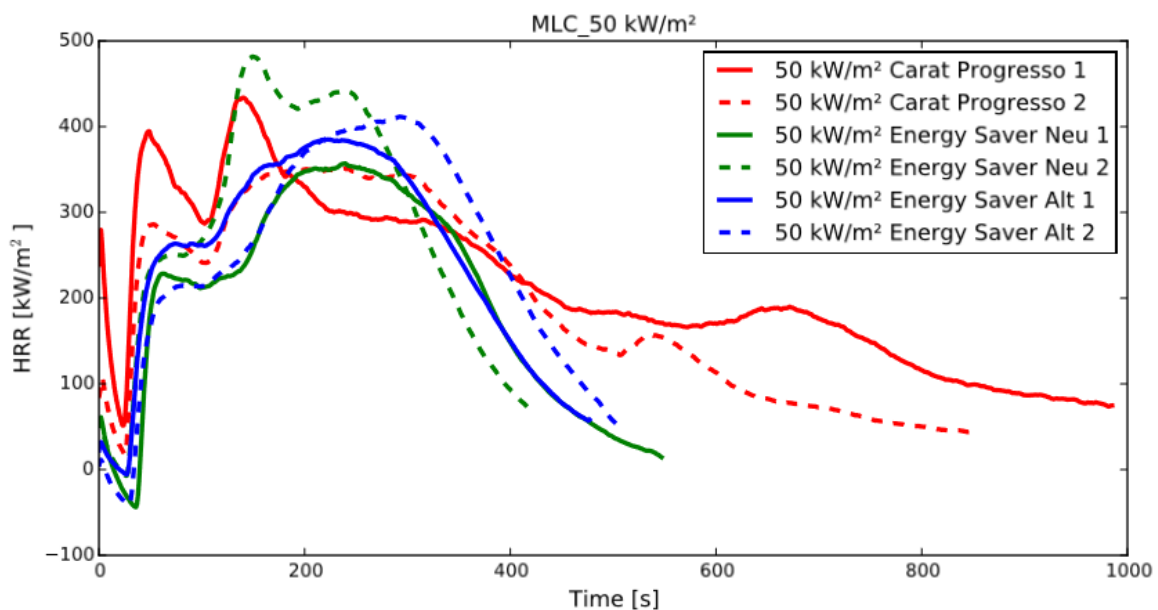


Abbildung 47 Verlauf der Wärmefreisetzungsraten von Seitenflächen

Es zeigt sich, dass die Wärmefreisetzungsraten der Laufflächen niedriger sind als die der Seitenfläche, liegt die durchschnittliche Wärmefreisetzungsrate von Laufflächen im Mittel bei $220,1 \text{ kW/m}^2$ zeigen die Seitenflächen im Schnitt einen Wert von $302,4 \text{ kW/m}^2$. Die Werte für die Maximale Wärmefreisetzung bestätigen ebenfalls dieses Bild, der Wert der Laufflächen liegt gemittelt bei $128,1 \text{ kW/m}^2$ bei Seitenflächen bei $403,4 \text{ kW/m}^2$. Die einzelnen Wärmefreisetzungsrate sind in Abbildung 48 und Abbildung 49 dargestellt.

Der Vergleich der Verbrennungswärme hingegen spiegelt diesen Trend nicht wieder. Die ermittelten Werte liegen hier nah beieinander wobei die der Seitenfläche tendenziell geringer ausfallen als die der Lauffläche. So liegen die Werte der

gemittelten durchschnittlichen Verbrennungswärme bei 22,6 MJ/kg für Laufflächen und 20,5 MJ/kg für Seitenflächen, siehe Tabelle 18. Die Maximalwerte der Lauffläche liegen im Mittel bei 79,22 MJ/kg und bei Seitenflächen in 76,72 MJ/kg. Allerdings weichen die so ermittelten Durchschnittswerte Werte von den in der Literatur 35 MJ/kg erwähnten deutlich ab [20].

Tabelle 18 Vergleich der gemittelten Verbrennungswärme

Effective Heat of Combustion [MJ/kg]			
Seitenflächen		Laufflächen	
Ø Max	Ø Mean	Ø Max	Ø Mean
77.43	21.26	79.22	22.65

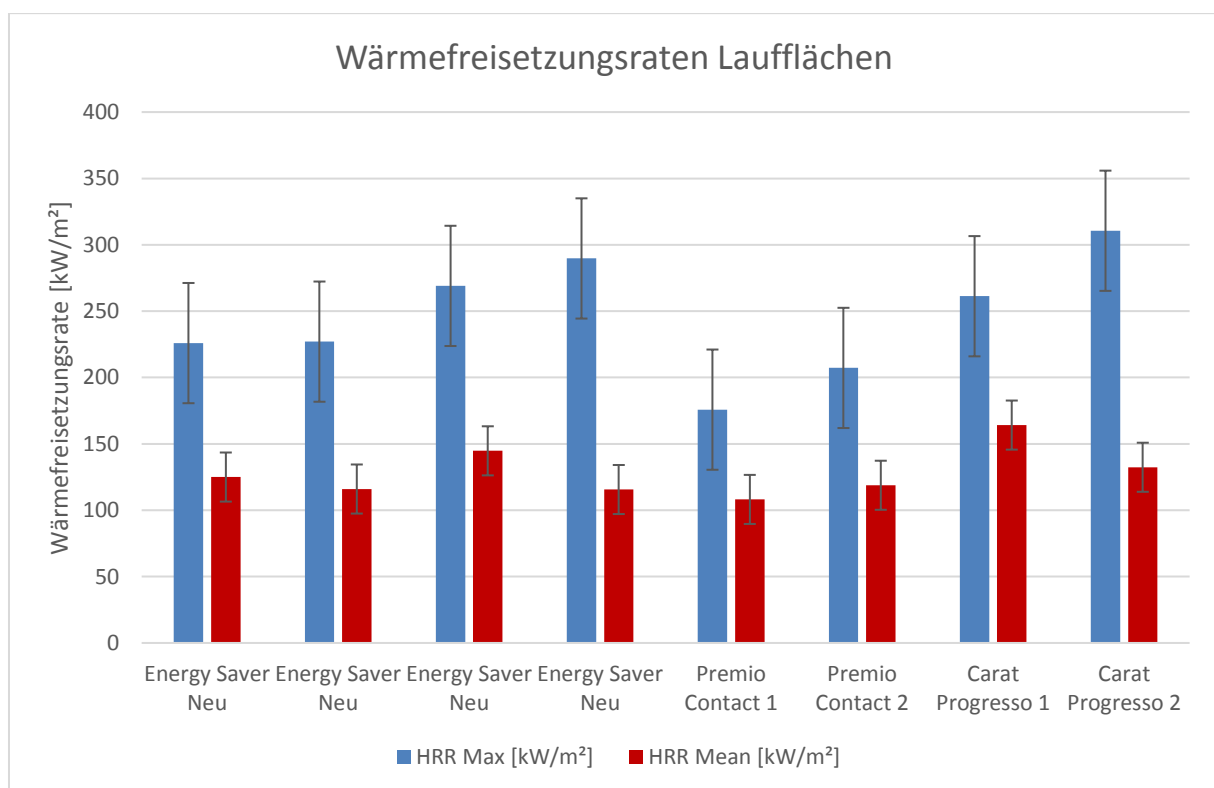


Abbildung 48 Wärmefreisetzungsraten Lauffläche

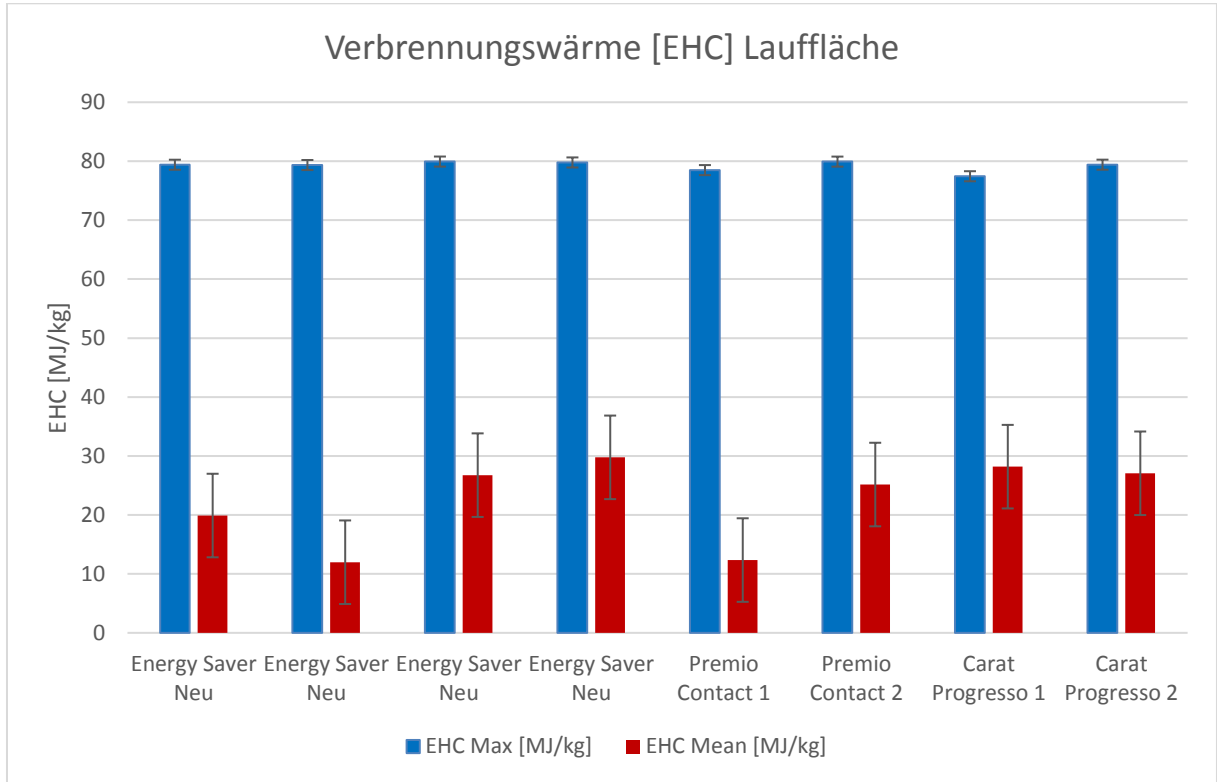


Abbildung 49 Verbrennungswärme Lauffläche

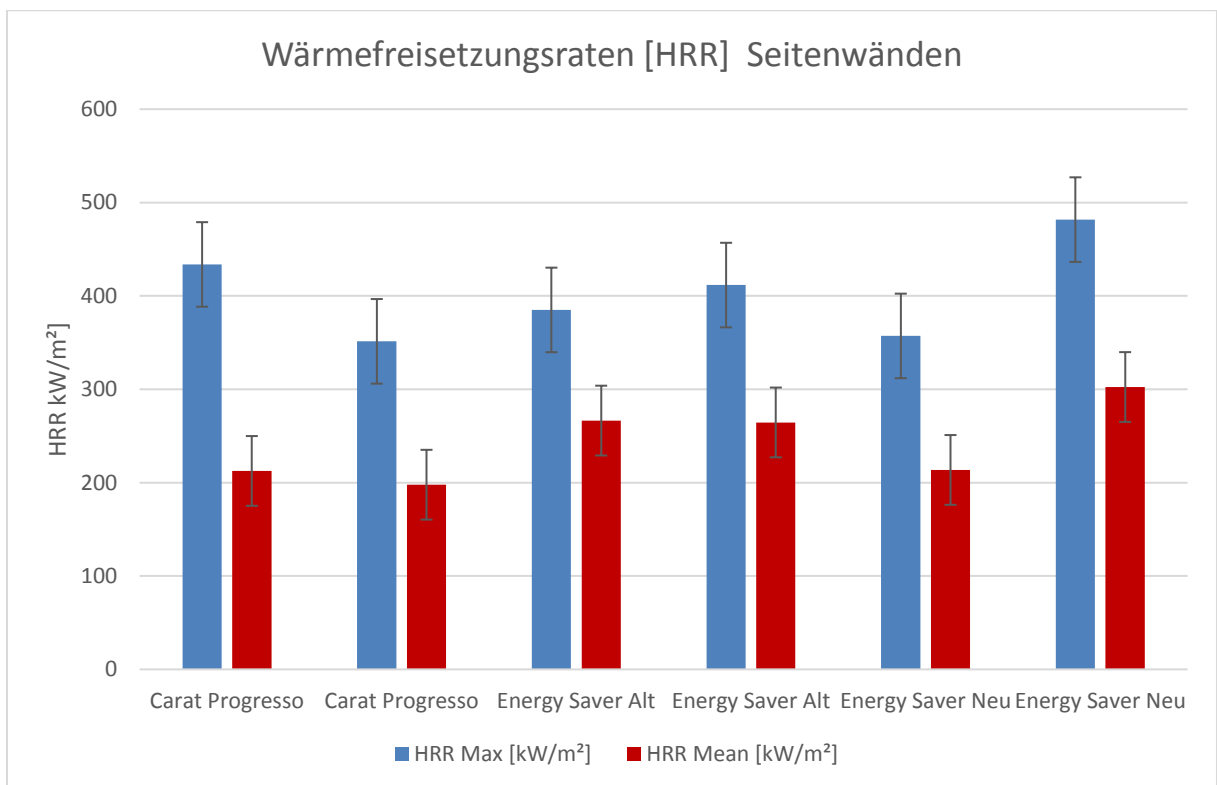


Abbildung 50 Wärmefreisetzungsraten Seitenflächen

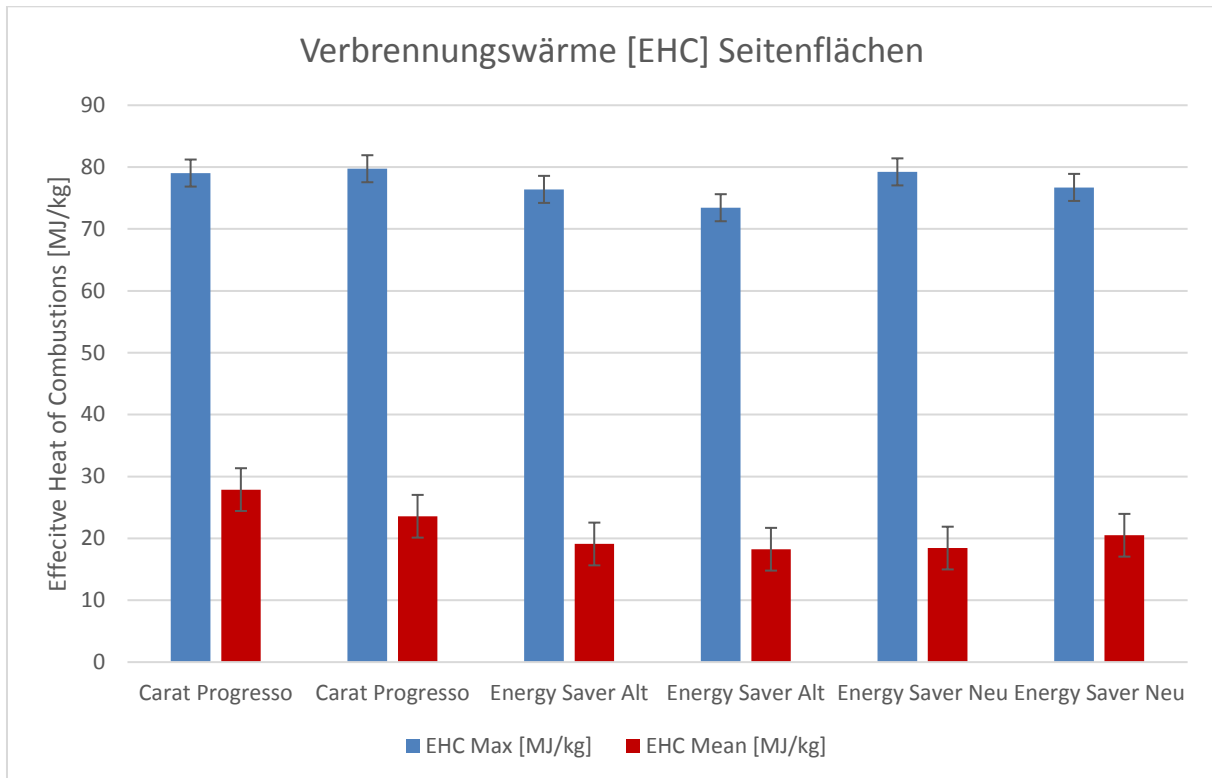


Abbildung 51 Verbrennungswärme Seitenflächen

Aus den Kurven in Abbildung 52 und Abbildung 53 geht hervor, dass die Brandverläufe der einzelnen Reifen zueinander ähnlich verlaufen, im Vergleich zu anderen Reifenmodellen sind allerdings deutliche Unterschiede zu erkennen. Vergleicht man die Verläufe der Laufflächen zu den Seitenwänden ist erkennbar, dass die Wärmefreisetzungsrates bei dem getesteten Neureifen schnell ansteigt und deutlich höhere Werte als die Laufflächen erreicht. Allerdings fällt die Kurve der Wärmefreisetzung schnell ab und die Proben erlöschen wohingegen die Lauffläche deutlich länger brennt. Die so ermittelten Ergebnisse spiegeln die bisherigen Erkenntnisse wieder, dass eine pauschale Aussage über Reifen nicht getroffen werden kann, da es sich um kein homogenes Produkt handelt und unter den Modellen große Unterschiede im Abbrandverhalten sowie der Energiefreisetzung bestehen.

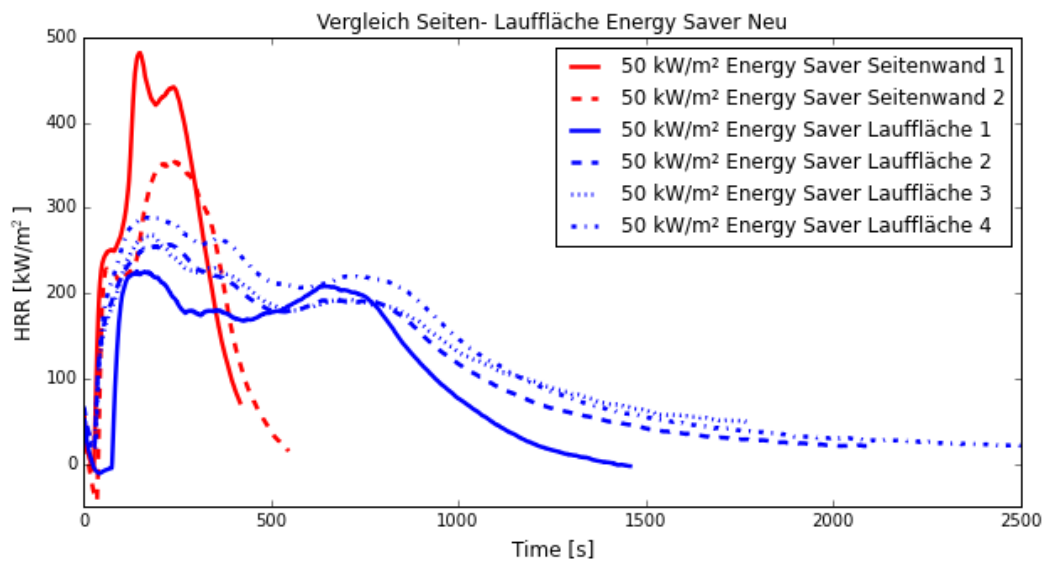


Abbildung 52 Vergleich Seiten- zu Lauffläche Energy Saver Neu

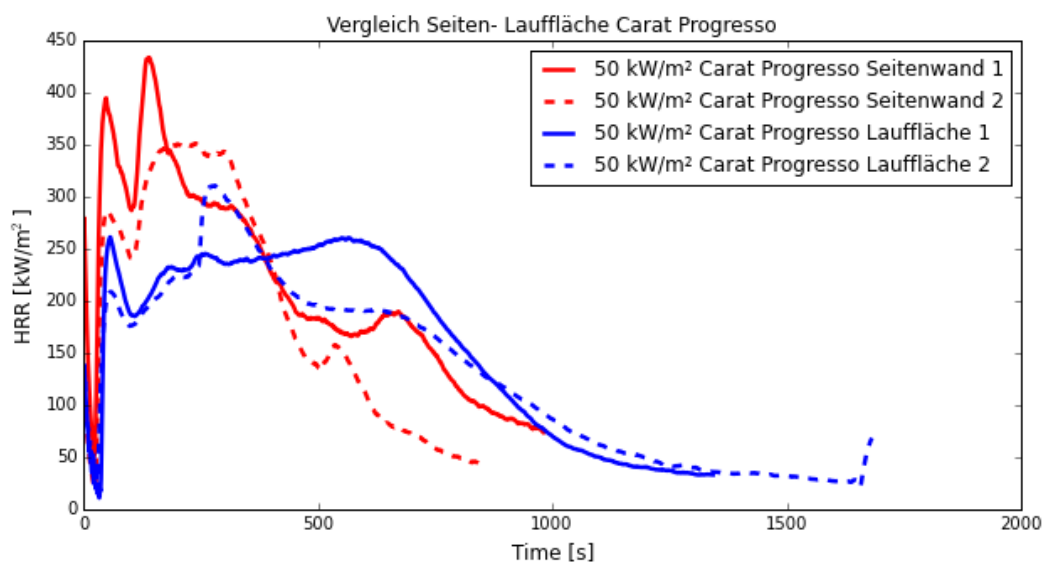


Abbildung 53 Vergleich Seiten zu Lauffläche Carat Progresso

4.1.8. Fazit

Reifen stellen sich, entsprechend der Marktvielfalt als sehr inhomogenes Brandgut dar. Die Untersuchungen mittels Thermogravimetrie zeigten das die größten Unterschiede, energetisch gesehen, zwischen Alt- und Neureifen bestehen hier weichen die gemessenen Gesamtenergien um 14 % ab. Der Vergleich zwischen den Neureifen zeigte Abweichungen von 11 % und 8 %. Der Unterschied zwischen Winter- und Sommerreifen bei gleichem Hersteller zeigte ebenfalls geringe energetische Unterschiede von 8 %. Bei der Betrachtung von Altreifen konnte ein Unterschied von 3 % festgestellt werden. Dies lässt darauf schließen, dass über die Lebensdauer eines Reifens sein Energiegehalt abnimmt und sich die Energieniveaus angleichen. Wobei anzumerken ist, dass diese These durch weitere, breitere Untersuchungen zu stützen

ist. Bei der Untersuchung des kritischen Wärmestroms konnte mittels MLC, nachgewiesen werden, dass eine Bestrahlungsstärke von 15 kW/m^2 und vorhandener Zündquelle ausreichen um einen Reifen sicher zu entzünden. Durch das Cone Calorimeter wurde ebenfalls die frei werdende Wärmemenge bei der Verbrennung bestimmt. Wobei die Wärmefreisetzungsraten von Reifenseitenflächen ein höheres Energieniveau aufwiesen als die getesteten Laufflächen. Bei den Versuchen konnte der in der Literatur angegebene Energiegehalt von 35 MJ/kg nicht erreicht werden.

4.2. Brandsimulation

Mit den in den vorangegangenen Abschnitten experimentell ermittelten Werten wurden Brandsimulationen durchgeführt um die für die Verhinderung einer Brandausbreitung notwendigen Abstände zu ermitteln. Die Simulationen wurden mit dem Fire Dynamics Simulator (FDS) in der Version 6.4.0 durchgeführt. Das gewählte Modell, siehe Abbildung 54, basiert auf Kunststofflager – Richtlinie (KLR) und wurde mittels der Software PyroSim 2016 der Firma Thunderhead Engineering erstellt. Das gewählte Brandszenario stellt einen quadratischen Lagerabschnitt eines Reifenlagers in Blocklagerung nach KLR dar. Um die Rechenzeit zu minimieren und da es sich um einen quadratischen Lagerabschnitt handelt wurde dieser halbiert betrachtet. Somit weist der Simulierte Lagerabschnitt die Maße $20 \times 10 \times 4 \text{ m}$ auf.

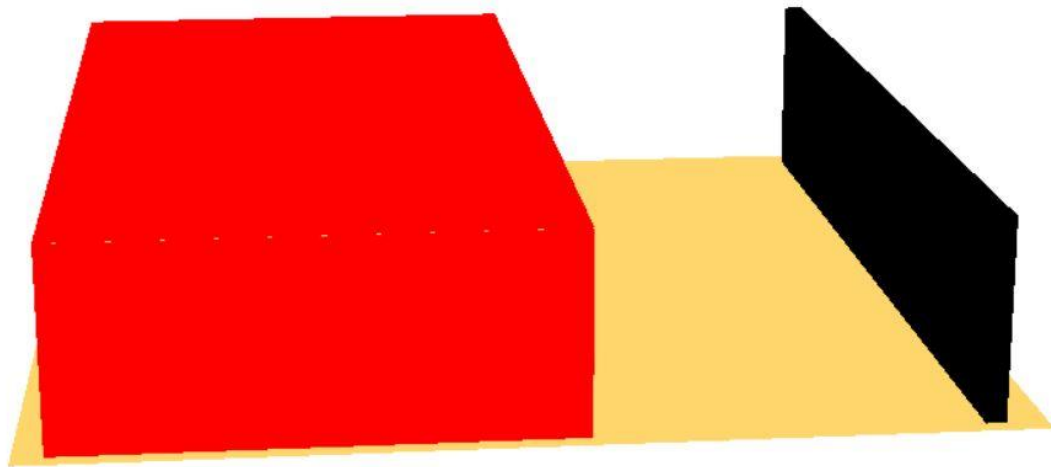


Abbildung 54 CFD-Modell Reifenlager

Ausgehend von den Daten aus Kapitel 1.1 wurde eine flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate (HRRPUA) von 482 kW/m^2 angesetzt. Das entspricht der maximal gemessenen Wärmefreisetzungsrate. Es wurde davon ausgegangen, dass das Lager im Vollbrand steht und über die Simulationszeit konstant bleibt. Aus numerischen Gründen wurde der Anstieg der Wärmefreisetzungsrate konstant über zwei Minuten an sein Maximum modelliert. Für die simulierte Fläche ergibt sich so eine durchschnittliche Wärmefreisetzungsrate von 153 MW . Der Brandverlauf ist in Abbildung 55 dargestellt. [42]

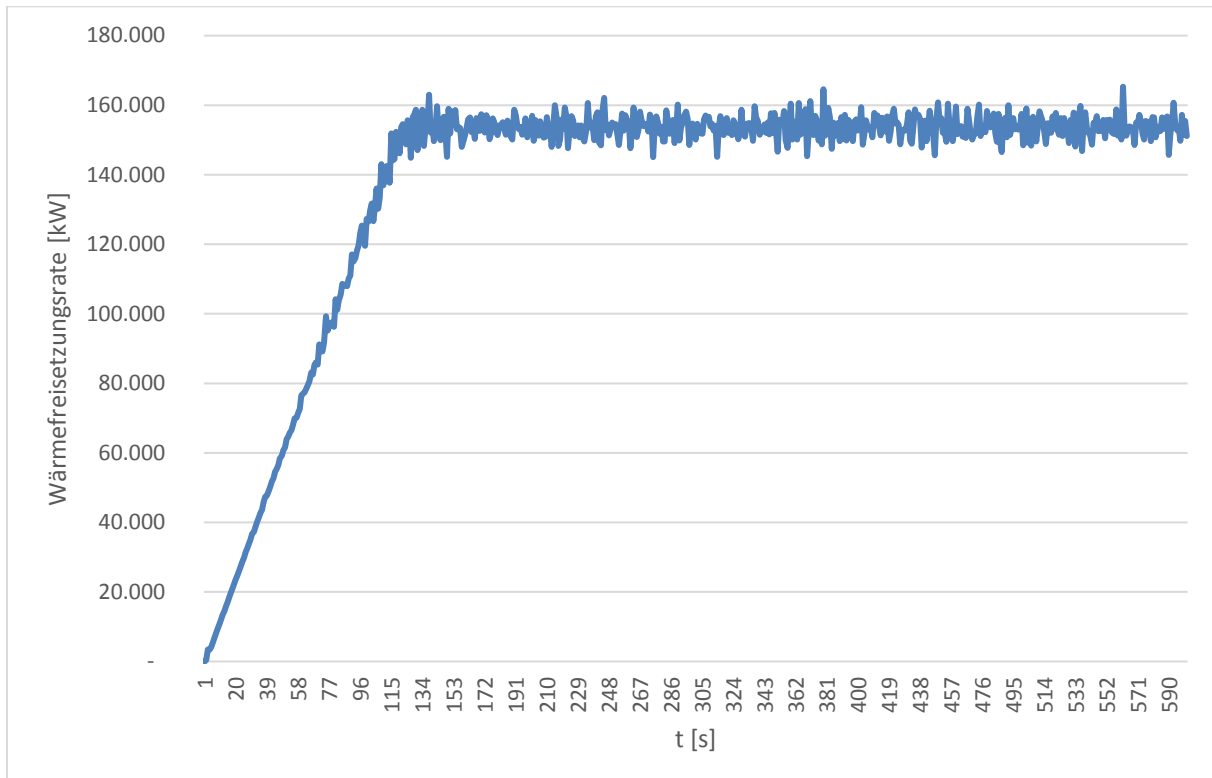


Abbildung 55 Brandverlauf der Simulation

An der Oberfläche des angrenzenden Abschnitts wird die ankommende Energie erfasst. Der Abstand zwischen den beiden Lagerabschnitten wurde solange variiert bis der in Abschnitt 1.1 ermittelte kritische Wärmestrom nicht mehr erreicht wurde. Im Rahmen eines konservativen Ansatzes wurde die höchste gemessene Wärmefreisetzungsrate von 482 kW/m^2 als durchgängiger Zustand angesetzt und die Emissivität mit einem Wert von 1 angesetzt. Somit wird die gesamte auftreffende Wärmestrahlung von der Oberfläche absorbiert. Die gewählten Parameter finden sich zusammengefasst in Tabelle 19. Das Modell wurde im 20 cm Gitter diskretisiert.

Tabelle 19 Simulationsparameter

Parameter	Wert	Quelle
Heat of Combustion	27070 (kJ/m ³)	Siehe Abschnitt 3.3
HRRPUA	482 kW/m ²	Siehe Abschnitt 3.3
Specific Heat	1,88	[59]
Conductivity	0,15 (W/(K*m))	[59]
Density	1150 kg/m ³	[21]
Emissivity	1	[20]
Zellgröße	20 cm	-

Die Auswertung erfolgte über Boundaryfiles, diese ermöglichen definierte Parameter an Oberflächen auszulesen. Für die Aufzeichnung von Wärmeströmen bietet FDS für verschiedene Anwendungen mehrere Modelle an. Im Rahmen dieses Berichtes erfolgte die Auswertung über den Nettowärmestrom (\dot{q}''_{net}). Dieser wird wie folgt berechnet:

$$\dot{q}''_{net} = \dot{q}''_{conv} + \dot{q}''_{rad}$$

mit

\dot{q}''_{net} = Nettowärmestrom

\dot{q}''_{conv} = Konvektiverwärmestrom

\dot{q}''_{rad} = radiativer Wärmestrom

Die gemessenen Wärmeströme wurden mittels des Visualisierungstools Smokeview bewertet. Abbildung 56 zeigt exemplarisch die Auswertung für eine Simulation mit einem Abstand von 7 m. Die schwarzen Felder stellen die Bereiche dar in denen zum jeweiligen Zeitpunkt die kritischen 15 kW/m² erreicht wurden.

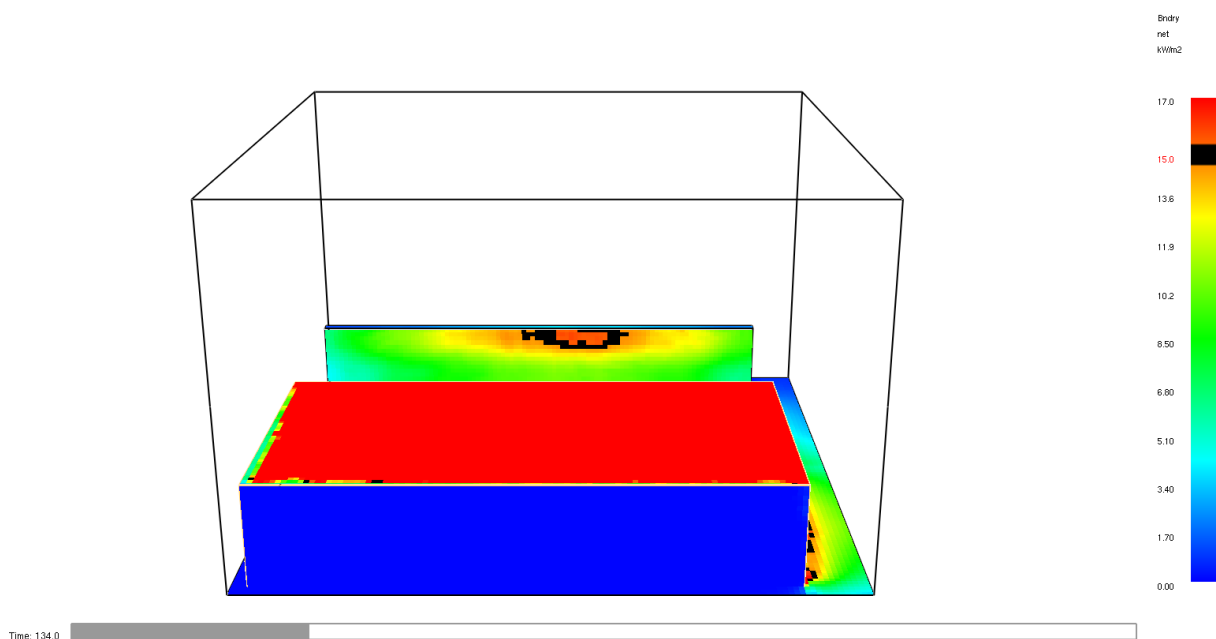


Abbildung 56 Ankommender Wärmestrom in 7 m Entfernung

Neben der Auswertung der ankommenden Wärmeströme wird die am angrenzenden Lagerabschnitt anliegende Temperatur aufgenommen und mit der Zündtemperatur, 360 °C, für SBR mit Zündquelle verglichen.[3] Aufgrund des Brandereignisses und dem damit nicht auszuschließenden Funkenflug ist, das Vorhandensein einer Zündquelle wahrscheinlich.

4.2.1. Ergebnisse

Durch die Simulationen konnte nachgewiesen werden, dass bei einem Abstand von 8 m zuletzt keine Wärmestrahlung von 15 kW/m² am angrenzenden Lagerabschnitt auftrat. Das Maximum liegt bei 14,9 kW/m² und wurde lediglich bei einer einzelnen Zelle gemessen. Bei einem Abstand von 9 m liegt das Maximum bei 13,2 kW/m²

Tabelle 20 Maximale ankommende Wärmeströme

Abstand [m]	Maximum [kW/m ²]
5	21,1
6	18,5
7	17,2
8	14,8
9	13,1
10	11,4

Daraus ergibt sich ein notwendiger Mindestabstand von 8 m zwischen den beiden Lagerabschnitten.

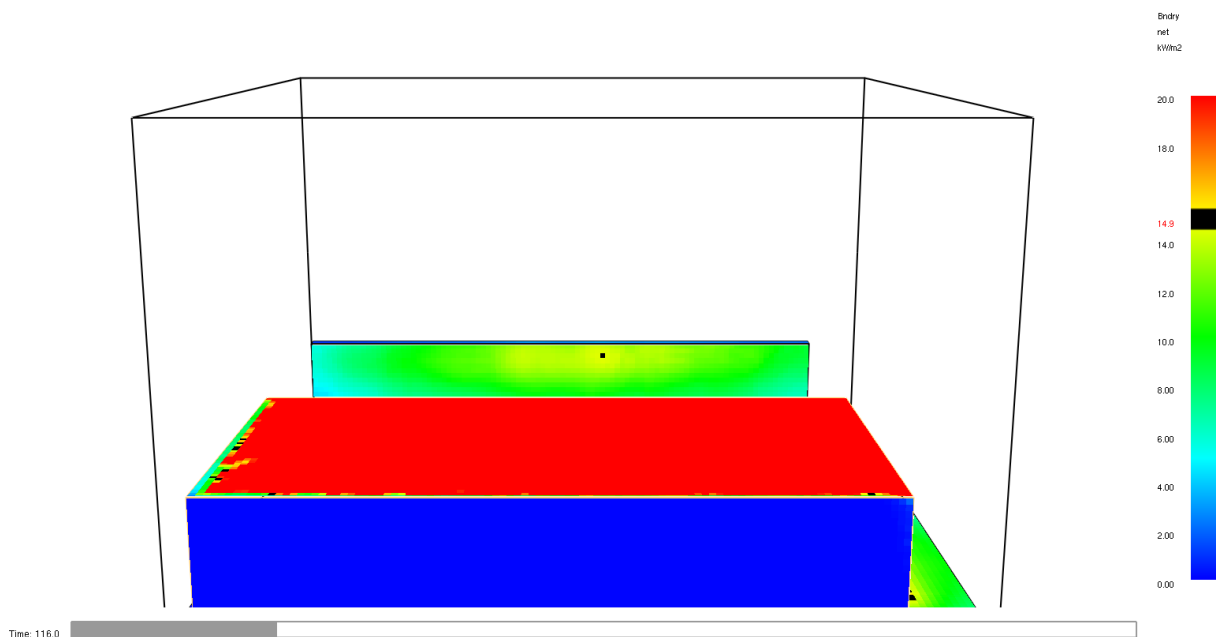


Abbildung 57 Maximale Bestrahlungsstärke bei einem Abstand von 8 m

Betrachtet man die ankommende Wärmestrahlung so zeigt sich ein anderes Bild. Bei 9 m wird noch eine maximale Oberflächentemperatur von 369 °C erreicht. Erst bei 10 m Abstand wird die kritische Temperatur von 360 °C nicht erreicht. Hier liegt die höchste Temperatur bei 314 °C, vgl. Tabelle 21.

Tabelle 21 Maximale Oberflächentemperatur

Abstand [m]	Maximum [°C]
5	525
6	461
7	429
8	392
9	367
10	314

4.2.2. Fazit

Um eine Brandweiterleitung zu verhindern ergibt sich aus den Simulationen bezogen auf den kritischen Wärmestrom von 8 m, bezogen auf die Oberflächentemperatur von 10 m. Es muss beachtet werden, dass die Simulation die Realität nur bedingt widerspiegeln kann. So wurden Umwelteinflüsse wie Wind, unterschiedliche Außentemperaturen, Luftfeuchte, etc. nicht betrachtet. Somit bieten diese Entfernungsangaben einen beispielhaften Wert der vorliegen könnte. Aus der Simulation lässt sich dennoch ableiten, dass ein Abstand von 5 m nicht ausreicht. Auch bei 10 m Abstand ist es ratsam angrenzende Flächen zu kühlen um die Brandausbreitung zu verhindern. Wobei fraglich ist ob eine Riegelstellung, aufgrund der zu erwartenden Temperaturen, zwischen den Stapeln möglich ist.

5. Brandbekämpfung

5.1. Löschmittel

Die Brandbekämpfung von Reifenbränden stellt sich oftmals aufgrund der geometrischen Form sowie der freigesetzten Wärmemenge ein Problem dar. So gestaltet sich die Applikation von Löschmittel im inneren eines Reifenstapels ein Problematisch, da Kautschuk wasserabweisend ist. Daher werden in der Praxis zumeist Schaummittel zum Ablöschen von Reifenbränden eingesetzt. Schaum bietet auf den ersten Blick diverse Vorteile beim Ablöschen von Reifenstapeln. Zum einen ist es möglich einen trennenden Effekt zwischen der Umgebungsluft und dem Brandgut Reifen zu erreichen. Ein weiterer Effekt ist das verzögerte Austreten von Wasser aus dem Schaum so wird kontinuierlich Energie aus dem Brandgut gebunden. Eine ungeklärte Frage ist die welches Schaummittel sich am besten für die Bekämpfung von Reifenlagerbränden eignet. Hierfür sollten kleinskalige Löschversuche mit unterschiedlichen Schaummitteln durchgeführt werden. Die Erzeugung von Schaummitteln erfolgte mittels einer Schaumbox von Dr. Stahmer chemische Präparate. Zunächst sollten Proben analog zum Abschnitt 1 gelöscht werden. Es zeigte sich, dass das Probengewicht von 150 g nicht überschritten werden durfte, da die Abzugsleistung des vorhandenen Abzugs nicht ausreichte. In einem Vorversuch sollten erste Löschmittel getestet und der Versuchsaufbau festgelegt werden. Dieser entsprach ebenfalls dem im Abschnitt 1 beschriebenen. Hierbei zeigte sich, dass die Schaumbox zu leistungsstark für die maximale Probengröße ist. Die so ermittelten Werte schwankten zwischen 24 und 32 Sekunden und ließen keine Rückschlüsse auf Löschmittelspezifische Effekte zu, vgl. Tabelle 22.

Tabelle 22 Löschezeiten

	Fluorfreies pseudoplastisches Schaummittel	Class A Schaummittel	Protein- schaummittel		
	t [s]	t [s]	t [s]		
Versuch 1			24	24	32
Versuch 2			30	32	30

Um die Leistung der Schaumbox zu reduzieren wurde die verwendete Rutsche modifiziert, sodass der auftreffende Volumenstrom beliebig reduziert werden konnte. Die bisher verwendeten Probestücke wurden durch Gummigranulat aus LKW-Reifen substituiert. Dies ermöglichte eine verbesserte Dosierung der Probenmenge. Ebenso wurde der Probenkorb angepasst und über der Auffangwanne gelagert um den Kontakt zwischen Probe und sich sammelnden Löschwasser zu vermeiden.

In Vorversuchen wurden unterschiedliche Probengewichte sowie Volumenströme getestet. Der Versuchsaufbau konnte insoweit verändert werden, dass die aufgegebene Schaummenge keinen Löscherfolg erzielte, aber dies galt für alle getesteten Löschmittel. Bei weiteren Anpassungen zeigten unterschiedliche Löschmittel (Mehrbereichsschaummittel, AFFF) gleiche Ergebnisse. Sodass der Schluss gezogen werden musste, dass alleinig die Menge des Löschmittels Einfluss auf den Löscherfolg hat und nicht die Auswahl des Schaummittels. Da aber der Versuchsaufbau eine Vielzahl von Freiheitsgraden (Neigung der Probe, Volumenstrom und Probengewicht), kann diese Aussage nicht als allgemeingültig angesehen werden. Um tatsächlich Unterschiede zwischen einzelnen Löschmitteln ausmachen zu können sind weiterführende Versuche in einem größeren Maßstab erforderlich. Um dennoch Unterschiede der Löschmittel zueinander untersuchen zu können wurde die Spreitung von Löschmittelwassergemischen auf einer Reifenoberfläche untersucht. Diese beschreibt die Ausbreitung des Löschmittels auf einer Oberfläche. Es wird gemessen welcher Kontaktwinkel sich zwischen einem Tropfen Löschmittel-Wasser Gemisches und der Reifenoberfläche über die Zeit einstellt. Der Kontaktwinkel ist ein Maß für die Benetzung durch eine Flüssigkeit auf einer Oberfläche, je kleiner der Kontaktwinkel desto besser die Benetzung der Oberfläche, vgl. Abbildung 58.

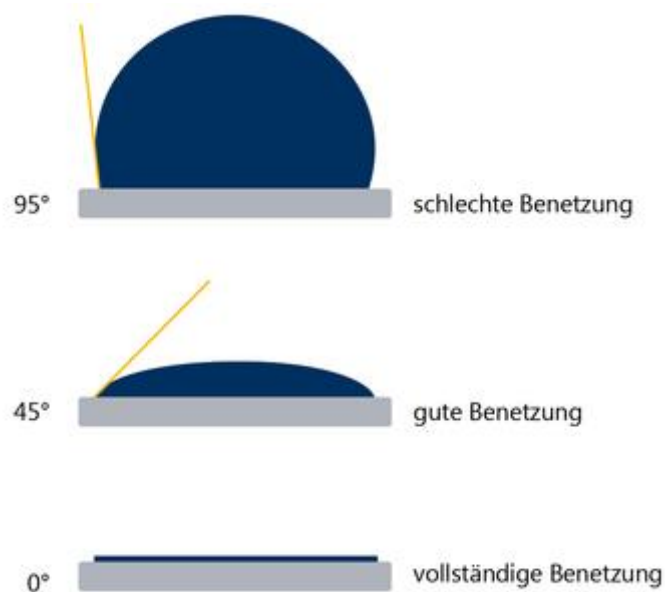


Abbildung 58 Zusammenhang Kontaktwinkel – Benetzbarkeit [35]

Um aus der Benetzbarkeit auf Vorteile bei der Brandbekämpfung schließen zu können wurden vier Löschmittel auf einer Reifenprobe gemessen. Zum Vergleich wurde ebenfalls Wasser getestet. Ein AFFF Schaummittel wurde gewählt, da Erfahrungsberichte von Feuerwehren über gute Eigenschaften bei Reifenbrände berichteten des Weiteren wurde jeweils ein Class A, Mehrbereichsschaummittel sowie ein Fluorfreies pseudoplastisches Schaummittel als alternativ Mittel zu AFFF getestet. Erwartungsgemäß bildet Wasser auf der Reifenoberfläche einen ungünstigen Kontaktwinkel um die 100° aus und behält diesen bei. Das andere Extrem stellte AFFF dar, der Kontaktwinkel strebte binnen kurzer Zeit gegen 0° . Der Kontaktwinkel des

Class A mittels sank in den ersten 6 Sekunden von etwa 75° auf etwa 40° im weiteren Verlauf näherte sich der Winkel an einen Wert von 20° an. Ein sehr ähnliches Bild zeigte sich beim Mehrbereichsschaummittel in den ersten 6 Sekunden der Messung fiel der Winkel von etwa 85° auf ca. 50° und näherte sich im weiteren Verlauf den 20 ° an. Das fluorfreie pseudoplastische Schaummittel zeigte einen leicht abweichenden Verlauf. Es startete bei ca. 60 ° und nähert sich im Verlauf den 30 ° an. Der Verlauf der gemessenen Kontaktwinkel ist in Abbildung 59 dargestellt.

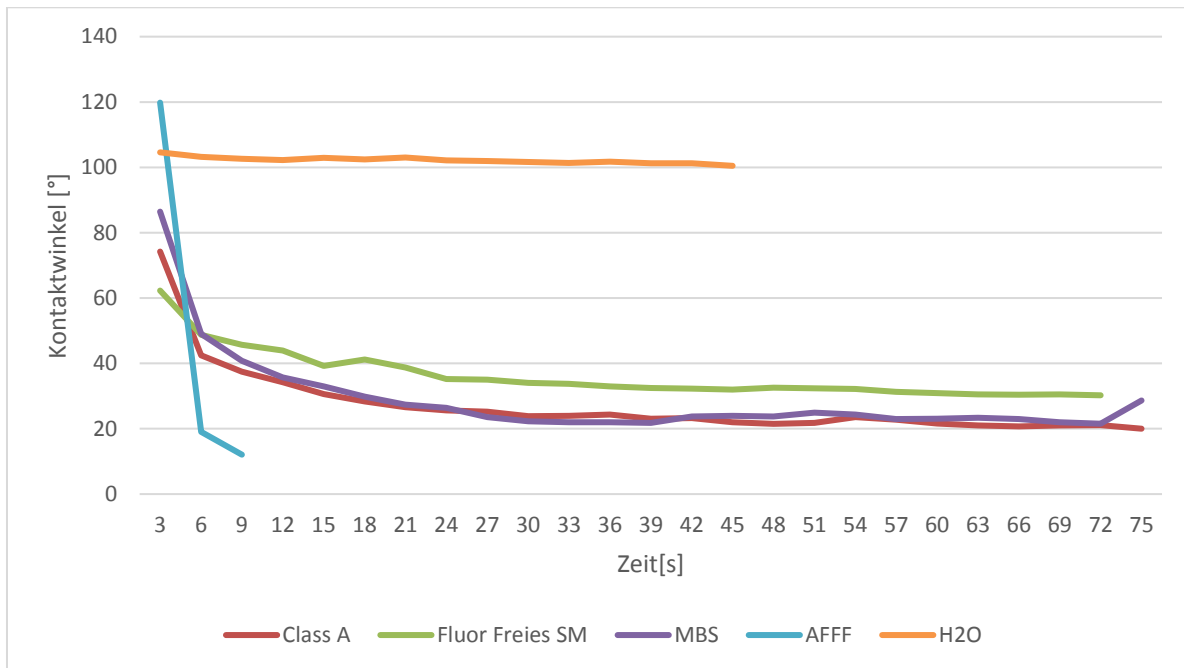


Abbildung 59 Kontaktwinkel verschiedener Schaummittel

Die Untersuchungen zeigen, dass die Benetzung der Reifenoberfläche durch AFFF am schnellsten erreicht wird. Das alleine lässt aus Sicht des Verfassers aber nicht den Schluss zu, dass AFFF das Löschmittel der Wahl ist. Die bekannten Umweltprobleme die durch Fluorhaltige Löschmittel entstehen stehen einem eventuellen schnelleren Löscherfolg gegenüber. In den Realversuchen konnte kein direkter Vorteil durch AFFF gegenüber einem MBS nachgewiesen werden. Tendenziell zeigt sich eher eine Abhängigkeit von eingesetzter Löschmittelmenge zu Brandgut. Dies deckt sich mit den Erfahrungsberichten von Feuerwehren, dass erst ein massiver Schaumeinsatz zum Löscherfolg führte. Geht man also davon aus, dass die Auswahl des Schaummittels zweitrangig und die verwendete Menge entscheidend ist sollte die sich aus der Ländergesetzgebung ergebene und in der Feuerwehr-Dienstvorschrift (FwDV) 100 angewandte Rangfolge Menschen, Tiere, Umwelt, Sachwerte angewandt werden. [12, 43, 44] Daraus resultiert der Verzicht auf Fluorfreie Schaummittel.

5.2. Löschwasserversorgung

5.2.1. Grundsätze

Als Grundsatz nach DVGW Arbeitsblatt W-405 werden 192 m³/h über 2 Stunden für die Löschwasserversorgung angenommen.

Anhand des Konzepts der Kunststoff-Lagerrichtlinie zur Flächen- und Höhenbegrenzung im Freilager wird angenommen, dass maximal ein Brandabschnitt mit einer Fläche von max. 2.000 m² in Brand gerät. Grundsätzlich ist dann davon auszugehen, dass bei einer maximalen Brandfläche von 2.000 m² eine Löschwasserversorgung mit 192 m³/h über 2 Stunden nicht ausreichend ist. Es wird also über den Grundsatz hinaus immer ein Objektschutz notwendig.

Bei der bisherigen Planung wird davon ausgegangen, dass innerhalb der baulichen Anlagen eine stationäre Löschanlage vorhanden ist, sofern die baulichen Anlagen eine Lagerfläche von über 2.000 m² haben. D.h., der Bemessungsbrand für die Einsatzplanung umfasst eine Fläche von maximal 2.000 m², da alle darüber hinausgehenden Flächen mit stationären Löschanlagen gesichert werden müssen.

Bemessung des Objektschutzes, Berücksichtigung der Feuerwehr:

In der Annahme, ein Tanklöschfahrzeug wäre einschließlich Hin- und Rückfahrt nach 20 Minuten wieder gefüllt, könnten drei Tankfüllungen eines Tanklöschfahrzeuges pro Stunde eingesetzt werden. Das wäre bei einem TLF 4000 eine Löschwasserbereitstellung von 12 m³/h.

Als Sonderlöschmittel ist vom Betreiber die Vorhaltung eines für die Wasserbevorratung ausreichenden Volumens an Class A Foam als Netzmittel zu fordern.

5.2.2. Bemessung des Löschwasserbedarfs

Nach [51] gilt für die normative Bemessung des Löschwassers:

$$\dot{V}_{ges} = \dot{V}_{Bbk} + \dot{V}_{Schutz} \quad (1.)$$

mit

$$\dot{V}_{liq} = I_{Lösch} \cdot A_{Brd} \quad (2.)$$

und

$$\dot{V}_{Schutz} = \sum_{i=1}^k n_i \cdot \dot{V}_{Str,i} \quad (3.)$$

Für feste glutbildende Stoffe ergeben sich Löschintensitäten von 8 – 10 mm·min⁻¹.

Die anzunehmende Brandfläche A_{Brd} ergibt sich für $t_{Brd} > 10$ min aus

$$A_{Brd} = \pi (0,5 v_{aus} t_{Brd1} + v_{aus} t_{Brd2})^2$$

mit

$$t_{Brd1} = 10 \text{ min und } t_{Brd2} = t_{Brd} - t_{Brd1}$$

$$A_{Brd} = \pi v_{aus}^2 (t_{Brd} - 5)^2 \quad (4.)$$

v_{aus} = mittlere lineare Brandausbreitungsgeschwindigkeit [$m \cdot \text{min}^{-1}$]

t_{Brd} = Zeit der ungehinderten Brandausbreitung

Dabei wird angenommen, dass sich der Brand in den ersten 10 Minuten (t_{Brd1}) (Brandentwicklungsphase) nur mit der Hälfte der mittleren linearen Brandausbreitungsgeschwindigkeit ausbreitet, während in der anschließenden Brandausbreitungsphase (t_{Brd2}) die volle Brandausbreitungsgeschwindigkeit erreicht wird.

Nimmt man eine maximale Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_{aus} von 1,2 m/min und eine Dauer der ungehinderten Brandausbreitung t_{Brd} von 20 min an, ergibt sich daraus eine Brandfläche A_{Brd} von 1.018 m². Sind die gelagerten Materialien nach den Regelungen der KLAR kompartimentiert, bedeutet das, dass sich in dieser Zeit bereits zwei Lagerabschnitte entzündet haben. Dies stimmt auch mit den durchgeführten Brandsimulationen überein. Es ergäbe sich damit eine abzulöschende Fläche von 800 m². Bei einer notwendigen Löschintensität von 10 mm·min⁻¹ ist dann eine

Löschwasserzufuhr V_{liq} von $8 \text{ m}^3/\text{min}$ und insgesamt (nach DVGW W-405) über zwei Stunden ein Löschwasservorrat von 960 m^3 für die Brandbekämpfung notwendig.

Für den Schutz der Umgebung muss man mindestens die Vornahme von 2 B-Rohren ohne Mundstück mit einem Volumenstrom von $800 \text{ l}/\text{min}$ und damit für den Schutz V_{Schutz} von $1.600 \text{ l}/\text{min}$ annehmen. Über eine Löschdauer von zwei Stunden ergibt sich damit für das Löschwasservolumen zum Schutz der Umgebung ein Volumen von $192 \text{ m}^3/\text{h}$.

Damit ergibt sich ein Mindestlöschwasservolumen von $192 \text{ m}^3 + 960 \text{ m}^3 = 1.152 \text{ m}^3$.

Nach den üblichen Regelungen für die Löschwasserversorgung in der Bundesrepublik Deutschland, die im DVGW-Arbeitsblatt W 405 fixiert sind, bedeutet das Folgendes:

Grundschutz

Es muss ein Grundschutz von $192 \text{ m}^3/\text{h}$ über zwei Stunden, entsprechend einem Löschwasservolumen von 384 m^3 vorhanden sein. Die Sicherstellung des Grundschatzes gehört zu den Erschließungspflichten der Gemeinden (§ 3 Abs. 2 Satz 2 BHKG NRW vom 17. Dezember 2015).

Objektschutz

Darüber hinaus ist bei den hier betrachteten Anlagen (zusammenhängende Lagerfläche von max. 800 m^2 auch bei Kompartimentierung in zwei Lagerabschnitte) in der Regel mindestens noch ein Objektschutz für die Brandbekämpfung und den Schutz der Umgebung von 768 m^3 erforderlich. Die Sicherstellung des Objektschutzes ist nach Feststellung der Bauaufsichtsbehörde auf Basis der Beurteilung der Brandschutzdienststelle Aufgabe des Eigentümers, Besitzers oder sonstigen Nutzungsberechtigten (§ 3 Abs. 2 Satz 3 BHKG NRW).

Zusammenfassend ergibt sich folgende Löschwasserbemessung:

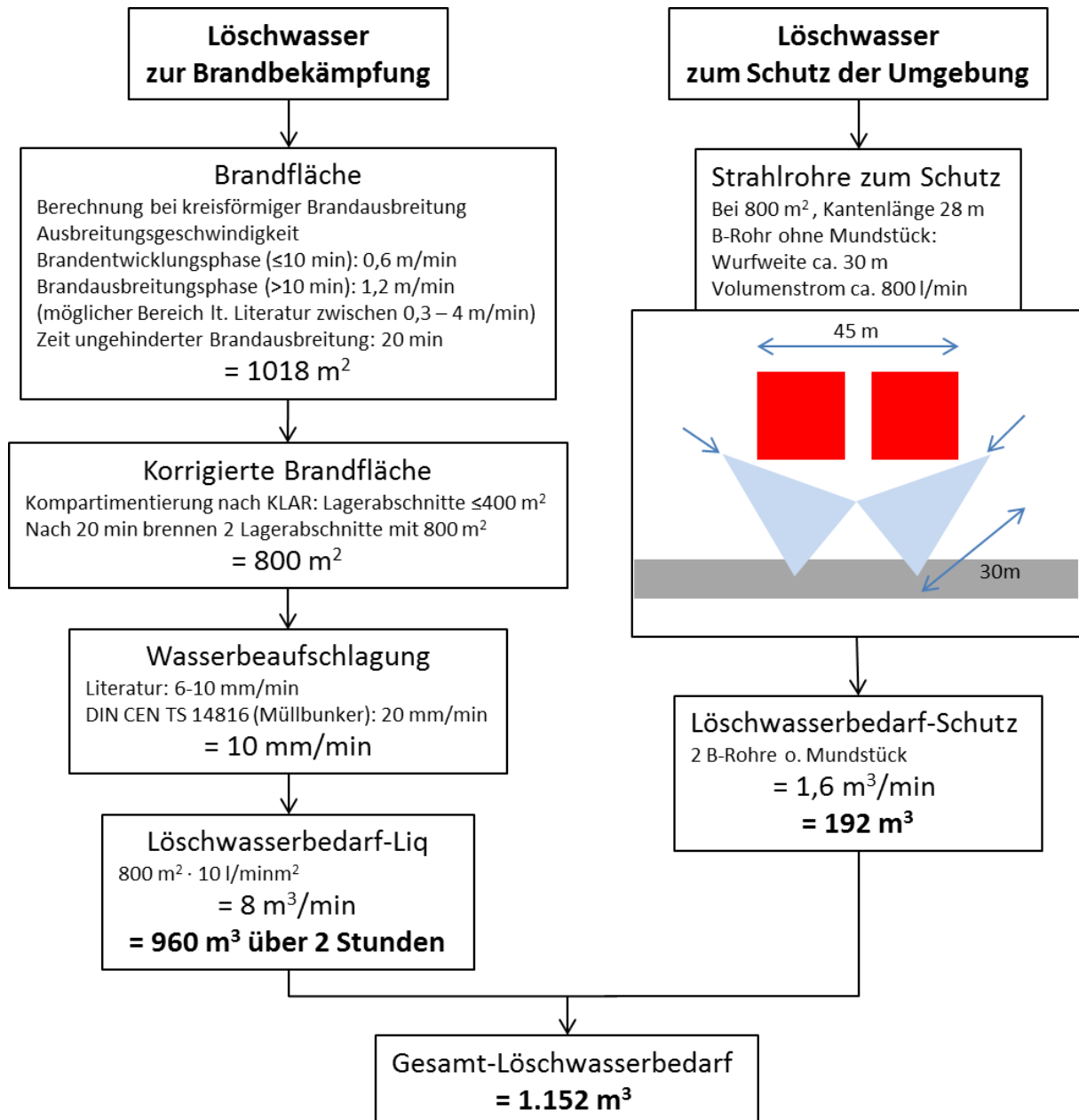


Abbildung 60 Exemplarische Bemessung des Löschwasserbedarfs

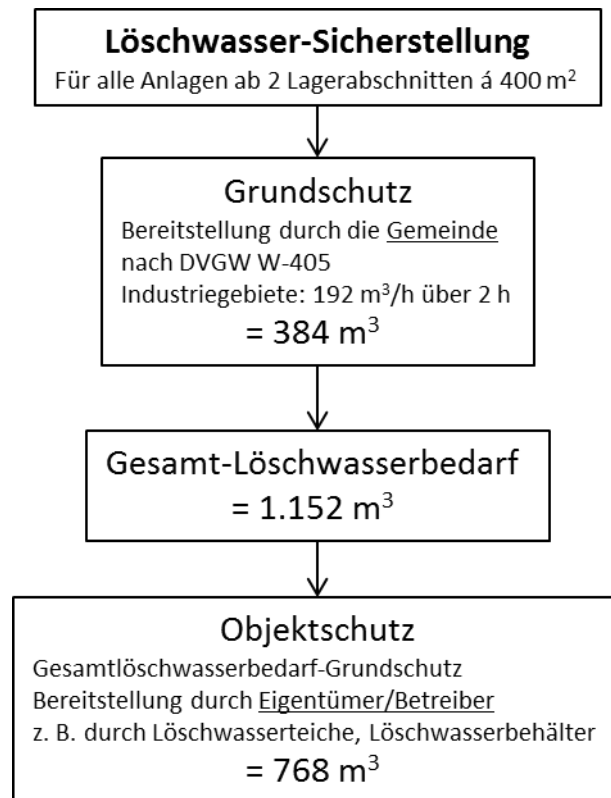


Abbildung 61 Sicherstellung des Löschwassers durch Grund- und Objektschutz

Bei größeren zusammenhängenden Flächen, besonderen Erschwernissen oder einer längeren Eintreffzeit der Feuerwehr muss der Objektschutz nach den o. g. Formeln entsprechend erhöht werden.

Mit Blick auf die in den Anlagen vorhandenen Flächen ist davon auszugehen, dass es sich bei der hier vorgestellten Löschwasserbemessung um das Mindestvolumen handelt, nach dem man annehmen kann, dass wirksame Löscharbeiten im Sinne der Landesbauordnung noch möglich sind.

Für die 960 m³ Löschwasser, die der unmittelbaren Brandbekämpfung dienen, kann im Rahmen des Objektschutzes auch die Bevorratung von wirksamen Zusätzen wie Schaummittel (Class A-Foam) erforderlich werden, wenn anzunehmen ist, dass wirksame Löscharbeiten nur mit Wasser nicht erfolgversprechend sind. Das ist bei einem sehr hohen Kunststoffanteil regelmäßig der Fall. Bei einer 1%igen Zumischung wären dann für 960 m³ 9,6 m³ Schaummittel durch den Betrieb vorzuhalten.

Als Maximum der Löschwasserbevorratung ergibt sich bei einer maximal anzunehmenden Brandfläche von 2.000 m² (s. o.) ein Löschwasserbedarf für die Brandbekämpfung von 2.400 m³. Das Löschwasservolumen für den Schutz der Umgebung muss in diesem Fall bei mindestens 3 B-Rohren ohne Mundstück mit jeweils 800 l/min, insgesamt also mit 288 m³ angenommen werden. Insgesamt ergibt sich damit ein maximal notwendiger Löschwasservorrat von 2.688 m³.

5.2.3. Abfließendes Löschwasser

Das beim Löschen von Bränden an einer Abfallbehandlungsanlage anfallende Löschwasser kann auf Grund seiner chemischen Zusammensetzung zu Schäden in Gewässern führen. Auch in kommunalen Kläranlagen kann das in großer Menge in einem relativ kurzen Zeitraum zufließende Löschwasser die biologischen Behandlungsstufen schädigen und damit indirekt eine Beeinträchtigung von Oberflächengewässern verursachen.

Das Schadstoffpotenzial des Löschwassers hängt von den in der Abfallbehandlungsanlage vorhandenen Materialien und den im Brandfall daraus resultierenden chemischen Verbindungen einerseits und von den zum Einsatz kommenden Löschmitteln andererseits ab. Nach bisheriger Einschätzung lässt sich die Gefährlichkeit des abfließenden Löschwassers nicht pauschal beantworten. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Aus dem begleitenden Arbeitskreis mitgeteilte Erfahrungen aus einer Reihe von Brandereignissen in Abfallbehandlungsanlagen zeigen, dass ein (ungedrosselter) Zufluss von Löschwasser auf Grund seiner chemischen Zusammensetzung zu einer Störung oder Schädigung der biologischen Stufen führen kann. Außerdem besteht die Gefahr, dass wegen schwer abbaubarer Inhaltsstoffe – zum Teil auch bedingt durch die eingesetzten Löschschäume – das Löschwasser innerhalb der relativ kurzen Aufenthaltszeit in der Kläranlage nicht oder nur unzureichend behandelt werden kann. Diese Gefahren sind umso größer, je stärker und schneller der Zufluss des Löschwassers zur Kläranlage erfolgt. Um Störungen in den biologischen Stufen der kommunalen Kläranlage - und damit einhergehend Gewässerverunreinigungen durch die anschließende Einleitung - vermeiden zu können, muss das Löschwasser vor der Ableitung in einem öffentlichen Kanalisationsnetz auf seine biologische Abbaubarkeit und mögliche einzelfallspezifische Schadstoffe hin überprüft werden. Ggf. ist die Ableitung in das Kanalisationsnetz durch Drosselung so zu steuern, dass eine Überlastung der biologischen Behandlungsstufen vermieden wird.

Vor dem Hintergrund dieser Erfahrungen ist davon auszugehen, dass aus verwaltungsrechtlicher Sicht bei dem abfließenden Löschwasser mindestens ein Gefahrenverdacht vorliegt, also das Tatsachenbild hinsichtlich der davon ausgehenden Gefahren noch unvollständig ist. Demnach muss bei Bränden in Abfallbehandlungsanlagen im Einzelfall eine Gefahrenbeurteilung des abfließenden Löschwassers anhand verschiedener Laborparameter durchgeführt werden. Es sind daher Maßnahmen zu treffen, damit anfallendes Löschwasser nicht unkontrolliert vom Gelände ablaufen und in ein Oberflächengewässer, in die Kanalisation oder auf eine unversiegelte Fläche – und damit in das Grundwasser - abfließen kann. Dies muss durch konstruktive Maßnahmen auf dem Anlagengelände, wie z.B. eine ausreichende Gefälleausbildung und Aufkantungen als Begrenzung einer befestigten Fläche, sichergestellt werden. Sofern keine anderen geeigneten Mittel in Frage kommen, ist ein Rückhaltebecken oder -raum ausreichender Größe auf dem Anlagengelände zu

schaffen. Nach der Gefahrenbeurteilung anhand der Laborparameter kann dann über die weitere Verfahrensweise zum Umgang mit dem Löschwasser entschieden werden.

Grundsätzlich sollten alle Fragen zum Umgang mit anfallendem Löschwasser, sowie alle im Gefahrenfall zu treffenden Maßnahmen, bereits im Genehmigungsverfahren geklärt und mit der zuständigen Feuerwehr abgestimmt werden. Dabei sollte insbesondere auch die Frage geklärt werden, wie die erheblichen Löschwassermengen zurückzuhalten sind. Die im Vorfeld abgestimmten Maßnahmen sollten sowohl auf der Anlage, z.B. im Betriebshandbuch, als auch bei der zuständigen Feuerwehr vorgehalten werden, um mögliche Fehler innerhalb einer Gefahrenabwehrmaßnahme zu vermeiden.

6. Zusammenfassung

Um ein besseres Verständnis für die Entzündung von Reifen zu bekommen und daraus Maßnahmen zur Verhinderung von Bränden ableiten zu können wurden kleinskalige Entzündungsversuche durchgeführt. Hierbei wurden sowohl versehentliche als auch vorsätzlich herbeigeführte Zündungen betrachtet. Ein weiterer Fokus lag auf der Betrachtung von Zündreihenfolgen die dazu führen können, dass ein Reifen und somit ein Reifenlager zünden kann. Die Ergebnisse zeigen, dass ein erheblicher Energieeintrag notwendig ist um einen Reifen zu zünden und eine brandlastfreie Umgebung eine Zündung von Reifenlager unwahrscheinlich macht. Aus den Ergebnissen der Versuche kann darauf geschlossen werden, dass die Entzündung hauptsächlich durch Unfälle oder durch Brandstiftung ausgelöst wird. Ein weiter Gegenstand der Betrachtung war die Brandausbreitung, hierfür war es notwendig ein besseres Verständnis für das Brandgut Reifen zu erlangen. Hierbei sollten Unterschiede in der Produktgruppe Reifen ermittelt werden. Das Augenmerk lag auf Unterschieden zwischen Alt- und Neureifen, Sommer- und Winterreifen, Neureifen sowie Altreifen. Es zeigte sich, dass der Energiegehalt von Reifen bedingt durch Nutzung und Alterung sinkt. Ein weiterer Unterschied war bei Reifen unterschiedlicher Hersteller festzustellen. Zwischen Winter- und Sommerreifen konnte ein geringer Unterschied festgestellt werden, wobei sich der Winterreifen als energetischer zeigte. Um Abschätzungen für die Brandausbreitung machen zu können war die Bestimmung des kritischen Wärmestroms sowie der Wärmefreisetzungsrate notwendig. Hierbei wurde ebenfalls die Verbrennungswärme ermittelt, hier konnten die in der Literatur vorhandenen Werte nicht erreicht werden. Aus den so gewonnenen Daten wurden Simulationen erstellt mit denen, auf Grundlage der KLR, ein notwendiger Mindestabstand zwischen zwei Lagerabschnitten ermittelt wurde und eine Empfehlung von 10 m ausgesprochen wird. Somit ist, der in Abschnitt 5.3 der KLR, beschriebene Abstand von 5 m nicht ausreichend. Daher empfiehlt es sich diesen um einen Abschnitt zu erweitern der diesen Abstand für Reifenlager erhöht. Vorgehend ist es erforderlich die KLR in ihrer Gültigkeit auf Reifen auszuweiten. Abschließend sollten mittels kleinskaliger Brandversuchen ein geeignetes Löschmittel ermittelt werden. Aufgrund der hohen Wärmefreisetzung von Reifen war dies nur bedingt möglich. Sodass aus der Spreitung unterschiedlicher Schaummittel – Wassergemische auf ein geeignetes Mittel geschlossen werden sollte. Erwartungsgemäß zeigte AFFF ein besseres Ausbreitungsverhalten als andere, Fluorfreie Löschmittel. Es empfiehlt sich diese Ergebnisse kritisch zu sehen, da auch Fluorfreie Schaummittel gute Ergebnisse erzielen und eine geringere Belastung für die Umwelt sind. Danach kann mit Lösch-Schaum auf Basis fluorfreier Mehrbereichsschaummittel (MBS) eine ausreichend gute Löschwirkung erzielt werden.

7. Bildverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau eines PKW-Reifens [22]	3
Abbildung 2: Backen eines Reifenrohlings [55]	4
Abbildung 3: Bestandteile einer Gummimischung [37]	5
Abbildung 4 Wärmestromdichten in liegender (oben) und stehender (unten) Position [26]	8
Abbildung 5: Wärmefreisetzungsrate in liegender (oben) und stehender (unten) Position [26].....	9
Abbildung 6 Seitenansicht eines Lagerabschnitts [23]	20
Abbildung 7 Zusammenfassung der Lagerabschnitte zu einem Brandabschnitt [23]	21
Abbildung 8 Mindestabstände zwischen den Brandabschnitten [23]	21
Abbildung 9 Minimalabstände bei kleinen Lagerflächen [23]	22
Abbildung 10 Minimalabstände bei großen Lagerflächen [23].....	22
Abbildung 11 Darstellung der Feuerwehzufahrten [23]	23
Abbildung 12 Vergleich der Lagerorganisationen: Australien (o.l.), Schweiz (o.r.), MKLR (u.)	29
Abbildung 13 Versuchsaufbau Entzündungsversuche	31
Abbildung 14 Vergleich von Alt- (l.) und Neureifenprobe (r.)	33
Abbildung 15: Probenanordnung Zündquelle Ethanol	34
Abbildung 16: Probenanordnung Zündquelle Benzin-Bindemittelgemisch	36
Abbildung 17: Pelletanzünder mit Kippvorrichtung	37
Abbildung 18: Elektrisch erhitzter Platindraht mit Steuereinrichtung	38
Abbildung 19: Probenanordnung Zündquelle Ölgetränkte Lappen	39
Abbildung 20: Probenanordnung Zündquelle Grillanzünder	41
Abbildung 21: Probenanordnung Zündquelle Flüssigkleber	42
Abbildung 22: Probenanordnung Zündquelle Brandpaste	43
Abbildung 23: MGA5 Diagramm Versuch 10	48
Abbildung 24: Skizze Anbringung Sensoren.....	49
Abbildung 25: Temperaturverlauf Versuch 10	50
Abbildung 26: Schadgaskonzentrationen Versuch 10	51
Abbildung 27: CO Konzentration Versuch 10	51
Abbildung 28: Sauerstoff-Kohlenstoffdioxidkonzentration Versuch 10	52
Abbildung 29: Sauerstoff-Kohlenstoffdioxidkonzentration Versuch 11	53
Abbildung 30: Gemittelte Maximaltemperaturen Vollbrandphase	54
Abbildung 31: Gemittelte maximale Schadgaskonzentrationen Vollbrandphase	55
Abbildung 32 Vergleich Innenisolierung Sommerreifen Debica	59
Abbildung 33 Vergleich Innenisolierung Sommer- Winterreifen.....	60
Abbildung 34 Vergleich Seitenflächen Sommer- Winterreifen	61
Abbildung 35 Vergleich Laufflächen Sommer- Winterreifen	61
Abbildung 36 Vergleich Innenisolierung Energy Saver	62
Abbildung 37 Vergleich Lauffläche Energy Saver.....	63

Abbildung 38 Vergleich Seitenflächen Energy Saver	63
Abbildung 39 Vergleich Innenisolierung Altreifen	64
Abbildung 40 Vergleich Seitenflächen Altreifen	65
Abbildung 41 Vergleich Laufflächen Altreifen	65
Abbildung 42 Vergleich Innenisolierung Neureifen	66
Abbildung 43 Vergleich Seitenwände Neureifen.....	67
Abbildung 44 Vergleich Laufflächen Neureifen.....	67
Abbildung 45 Fehlerbestimmung des Zündzeitpunkts	69
Abbildung 46 Verlauf der Wärmefreisetzungsraten von Laufflächen	70
Abbildung 47 Verlauf der Wärmefreisetzungsraten von Seitenflächen	70
Abbildung 48 Wärmefreisetzungsraten Lauffläche	71
Abbildung 49 Verbrennungswäre Lauffläche	72
Abbildung 50 Wärmefreisetzungsraten Seitenflächen	72
Abbildung 51 Verbrennungswärme Seitenflächen	73
Abbildung 52 Vergleich Seiten- zu Lauffläche Energy Saver Neu	74
Abbildung 53 Vergleich Seiten zu Lauffläche Carat Progresso	74
Abbildung 54 CFD-Modell Reifenlager	75
Abbildung 55 Brandverlauf der Simulation.....	76
Abbildung 56 Ankommender Wärmestrom in 7 m Entfernung.....	77
Abbildung 57 Maximale Bestrahlungsstärke bei einem Abstand von 8 m	78
Abbildung 58 Zusammenhang Kontaktwinkel – Benetzbarkeit [35]	81
Abbildung 59 Kontaktwinkel verschiedener Schaummittel.....	82
Abbildung 60 Exemplarische Bemessung des Löschwasserbedarfs	86
Abbildung 61 Sicherstellung des Löschwassers durch Grund- und Objektschutz	87

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammensetzung von Reifen [37, 56]	6
Tabelle 2: Relevante brandtechnologischen Kennwerte von Ethanol [13, 39]	33
Tabelle 3: Aufzählung der mit Ethanol durchgeführten Entzündungsversuche.....	34
Tabelle 4: Aufzählung der Versuche mit 25 ml Ethanol als Zündquelle	35
Tabelle 5: Brandtechnologischen Kennwerte von Ottokraftstoffen [13]	36
Tabelle 6: Brandtechnologische Kennwerte von Petroleum [31]	40
Tabelle 7: Brandtechnologischen Kennwerte von Benzin und Benzol [30, 36, 52] ¹ ..	43
Tabelle 8: Annäherung an die für die Entzündung benötigte Mindestmenge an Holzspänen.....	45
Tabelle 9: Entzündungsversuche mit 20 g Holzspänen	45
Tabelle 10: Versuche mit Vollbrandphase	54
Tabelle 11: Berechnung Schadgaskonzentration Autoreifen (9 kg)	55
Tabelle 12 Reifendaten	59
Tabelle 13 Energien Winter- Sommerreifen.....	61
Tabelle 14 Vergleich Energien Energy Saver	63
Tabelle 15 Energien Altreifen	65
Tabelle 16 Energien Neureifen	66
Tabelle 17 Ermittlung des kritischen Wärmeflusses	68
Tabelle 18 Vergleich der gemittelten Verbrennungswärme	71
Tabelle 19 Simulationsparameter	76
Tabelle 20 Maximale ankommende Wärmeströme	78
Tabelle 21 Maximale Oberflächentemperatur	79
Tabelle 22 Löschzeiten.....	80

9. Anhang

Berechnung der Gewichtsanteile

Es wird die Annahme getroffen, dass die Anteile der Innenisolierung am Reifen 20% betragen. Aus den von Leister angegeben werden können Prozentuale Anteile von Lauffläche und Seitenwand errechnet werden:

Basisreifen 195/55 R15		
	Gewicht [kg]	Gewichtsanteil [%]
Gesamtreifen	8,68	100 %
Laufstreifen mit Stahlanteil	5,7	66 %
Seitenwand mit Wulstpaket	1,96	34%

Bezieht man in die Berechnung der Gewichtsanteile die angenommen 20% für die Innenisolierung ein ergeben sich folgende Werte:

Innenisolierung	20 %
Laufstreifen	52,8 %
Seitenwand mit Wulstpaket	27,2 %

References

- [1] 24007321. 2005. *Jahresbericht 2005*. Berliner Feuerwehr.
- [2] B. Römstedt. *Brandgefahr aus der Schublade: Blockbatterien können Stahlwolle entzünden*.
- [3] Babrauskas, V. 2003. *Ignition handbook. Principles and applications to fire safety engineering, risk management and forensic science*. Fire Science Publ, Issaquah Wash.
- [4] Bauministerkonferenz. *Muster-Industriebau-Richtlinie. MIndBauRL*.
- [5] Bauministerkonferenz, Ed. *Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (Muster-Industriebau-Richtlinie – MindBauRL). Stand Juli 2014. Erläuterungen*.
- [6] Bauministerkonferenz. Zuletzt geändert 2012. *Musterbuordnung. MBO*.
- [7] Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik. *Brandschutz bei feuergefährlichen Arbeiten*, 563.
- [8] Bundesministerium für Arbeit und Soziales. 2016. *Technische Regeln für Gefahrstoffe / Arbeitsplatzgrenzwerte. TRGS 900*.
- [9] Bundesregierung und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis. (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV)*.
- [10] Bundesregierung und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. 4. BImSchV*.
- [11] Bundesverband Reifenhandel und Vulkaniseurhandwerk e.V. *Branchenspezifische Kriterien für die Zertifizierung von Altreifenentsorgungsbetrieben*. Bundesverband Reifenhandel und Vulkaniseurhandwerk e.V.
- [12] Bürgerschaft. *Bremisches Hilfeleistungsgesetz. BremHilfeG*.
- [13] Chemie.de. *Lexikon*. <http://www.chemie.de/lexikon.html>. Accessed 22 September 2016.
- [14] Continental Reifen Deutschland GmbH. 2013. *Reifengrundlagen*. <http://blobs.continental-tires.com/www8/servlet/blob/378068/653c35d5093e49127ac6425b79cc1dd4/reifengrundlagen-2015-16-data.pdf>. Accessed 27.10.2016.
- [15] Deutsche Forschungsgemeinschaft. 2002. *The MAK-collection for occupational health and safety*. Wiley-VCH Verl., Germany.
- [16] Deutsches Institut für Bautechnik. 2015. *Verzeichnis Eingeführte Technische Baubestimmungen*.
- [17] Deutsches Institut für Normung. *Erzeugnisse aus Kautschuk und Gummi. Anforderungen an die Lagerung, Reinigung und Wartung*. Beuth Verlag, Berlin, DIN 7716.
- [18] DiNenno, P. J., Ed. 2008. *SFPE handbook of fire protection engineering*. NFPA National Fire Protection Association [u.a.], Quincy Mass.

-
- [19] Dipl.-Chem. Peter René Eulenburg. 1976. *Das Brandverhalten von Textilien aus der Sicht der Feuerwehr*.
- [20] Dr. rer. nat. Georg Pleß. 1996. Brandschutz bei recyclingfähigen Stoffen - Konzepte für Wertstoff-Zwischenlager des Dualen Systems Deutschland und für Reifenlager aus der Sicht der mobilen Brandbekämpfung und Ableitung von Löschstrategien. Analyse des Ist-Standes zum Brandschutz und zur stationären und mobilen Brandbekämpfung, 107.
- [21] Dr. rer. nat. Nicholas Büthe. 1999. *Elastomerbrände - Modellbrandversuche, Analytik und Bewertung*. Dissertation, Universität Hannover.
- [22] DVR e.V. *Was Sie jetzt über Sommerreifen wissen müssen. Tipps für sicheres Fahren im Sommer*. http://www.brv-bonn.de/fileadmin/user_upload/verbraucher/reifen-reifen/Sommerreifen-Dossier.pdf. Accessed 21 November 2016.
- [23] Fire & Rescue NSW. 2014. *Fire Safety Guideline. Guideline for bulk storage of rubber tyres. Version 3*. https://www.fire.nsw.gov.au/gallery/files/pdf/guidelines/rubber_tyres.pdf. Accessed 9 July 2015.
- [24] Gebäudeversicherung Kanton Zürich. 2008. *Lagerung von Reifen und ihren Folgeprodukten. Auszug der wichtigsten im Normalfall geltenden feuerpolizeilichen Anforderungen für die Lagerung von Reifen und ihren Folgeprodukten. Erlass gestützt auf § 14 Abs. 2 des Gesetzes über die Feuerpolizei und das Feuerwehrwesen*.
- [25] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. *Sortierung, Aufbereitung und Lagerung von Siedlungsabfällen und brennbaren Sekundärrohstoffen- Hinweise für den Brandschutz*. VdS Schadenverhütung GmbH, Köln, VdS 2517:2011-02 (03).
- [26] Gratkowski, M. T. 2014. Burning Characteristics of Automotive Tires. *Fire Technol* 50, 2, 379–391.
- [27] *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland. GG*.
- [28] H. Heine. Für ihn war es ein Abenteuer. Geschichte eines Autozündlers. 2012.
- [29] Heißing, B., Ersoy, M., and Gies, S., Eds. 2013. *Fahrwerkhandbuch. Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven. Mit 80 Tabellen*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [30] Ing. Erich Hähnel. 1976. *Brandschutz Formel und Tabellen*. Staatsverlag der DDR, Berlin.
- [31] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. *Gestis Stoffdatenbank*. <http://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-stoffdatenbank/index.jsp>.
- [32] Institut für Schadenverhütung und Schadensforschung. 2015. *IFS-Brandursachenstatistik 2015*.
- [33] 2016.449+01:00. *Jahrbuch des Kölnischen Geschichtsvereins*. Böhlau, Wien, Köln.
- [34] Kraftfahrbundesamt. *Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2016*. http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html.
- [35] Krüss GmbH. *Kontaktwinkel auf versch. Materialien*. https://www.kruss.de/fileadmin/_processed_/csm_kruss_meth_contact_angle_de_919832388f.png. Accessed 26.11.2016.

-
- [36] Kurzweil, P. and Scheipers, P. 2011. *Chemie: Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*. Vieweg+Teubner Verlag.
- [37] Leister, G. and Leister, G. 2015. *Fahrzeugräder - Fahrzeugreifen. Entwicklung - Herstellung - Anwendung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [38] Liermann and Stegen. 1985. *Reifen- und Kautschuk-Technologie im Fahrzeugbereich. Das Fachlexikon für die Reifen- und KFZ-Branche*. Vogel Fachbuch. H. Vogel, München.
- [39] M. Müller. 2016. *Thermodynamische Daten bei 25°C*. <http://www.chempage.de/Tab/thermo.htm>.
- [40] M. Saßmannshausen. *Großbrand Schmallenberger Reifendienst*. http://lz-bad-fredeburg.de/wp-content/uploads/eb.Hacke_.pdf. Accessed 9 November 2016.
- [41] Metropolitan Fire Brigade. *Fire Service Guideline- Open Air Storage of New or Used Tyres*. http://www.cfa.vic.gov.au/fm_files/attachments/Publications/Fire_Services_Guideline_Open_Air_Storage_of_New_or_Used_Tyres.pdf. Accessed 9 July 2015.
- [42] Ministerium für Bauen und Wohnen. 2003. *Richtlinie über den Brandschutz bei der Lagerung von Sekundärstoffen aus Kunststoffen - Kunststofflager-Richtlinie. KLR*.
- [43] Ministerium für Innere und Kommunales des Landes Nordrhein-Westfalen. *Feuerwehr-Dienstvorschrift 100 Führung und Leitung im Einsatz. FwDV 100*.
- [44] Ministerium für Innere und Kommunales des Landes Nordrhein-Westfalen. *Gesetz über den Brandschutz, die Hilfeleistung und den Katastrophenschutz. BHKG*.
- [45] Nebraska Secretary of State. 2001. *Nebraska Administrative Code. Title 153- State Fire Marshal. Chapter 1-Nebraska State Fire Code Regulations*.
- [46] ORF Online und Teletext GmbH & Co KG. 2016. *Großbrand in Reifendeponie. Evakuierung in Sesena*. <http://orf.at/stories/2339372/>. Accessed 27 October 2016.
- [47] Österreichischer Rundfunk. *Reifenlager: Brandursache geklärt*. <http://noe.orf.at/news/stories/2670245/>. Accessed 9 November 2016.
- [48] Patnaik, P. 2007. *A Comprehensive Guide to the Hazardous Properties of Chemical Substances*. Wiley.
- [49] Peter Hirschberger. 2012. *Wälder in Flammen. Ursachen und Folgen der weltweiten Waldbrände*, Berlin.
- [50] S. Tautz. 2011. *Feuergefährliche Arbeiten. VDRI Vortragsveranstaltung*.
- [51] Schott, T. *Die objektbezogene Vorbereitung von Einsatzhandlungen der Feuerwehr. DDR: Schulungsmaterial für die Aus- und Weiterbildung der Angehörigen der Feuerwehr*.
- [52] Steinbach, K., Puchner, U., Redmer, T., van Bebber, P., Krönke, K., and Fiedler, H. 2013. *Methodischer Leitfaden zur Brandursachenermittlung. Technischer Bericht der Vfdb. VdS-Verl., Köln*.
- [53] T. Seilnacht. *Thermitschweißen*. <http://www.seilnacht.com/Lexikon/thermit.html>. Accessed 14 September 2016.

-
- [54] Technisch-Wissenschaftlicher Beirat der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. *Richtlinie zur Bewertung von Schadstoffkonzentrationen im ABC-Einsatz mit C-Gefahrstoffen*, Altenberge, 10-01.
- [55] U. Baumann. 2016. *Reifenherstellung. So werden Reifen produziert*. <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/reifenherstellung-so-werden-reifen-produziert->. Accessed 5 October 2016.
- [56] U. Mielicke , D. Schlag. 2002. *Entsorgung von Altreifen in Baden-Württemberg. Situationsbericht 03/2002*.
- [57] U. Müller. 2016. Umweltkatastrophe in Spanien. Die schwelende Pneuhalde von Madrid. *Neue Zürcher Zeitung* (Oct. 2016).
- [58] Umweltbundesamt. *Stickoxide*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/stickstoffoxide>. Accessed 31 October 2016.
- [59] 2013. *VDI-Wärmeatlas*. Springer Vieweg, Berlin u.a.
- [60] *Verfahren zur Herstellung von künstlichem Kautschuk*, Kaiserliches Patentamt.
- [61] Weiland, R. 1995. *Rücknahme- und Entsorgungspflichten in der Abfallwirtschaft. Eine institutionenökonomische Analyse der Automobilbranche*. Zugl.: Münster (Westfalen), Univ., Diss., 1994. Gabler Edition Wissenschaft. Dt. Univ.-Verl. [u.a.], Wiesbaden.