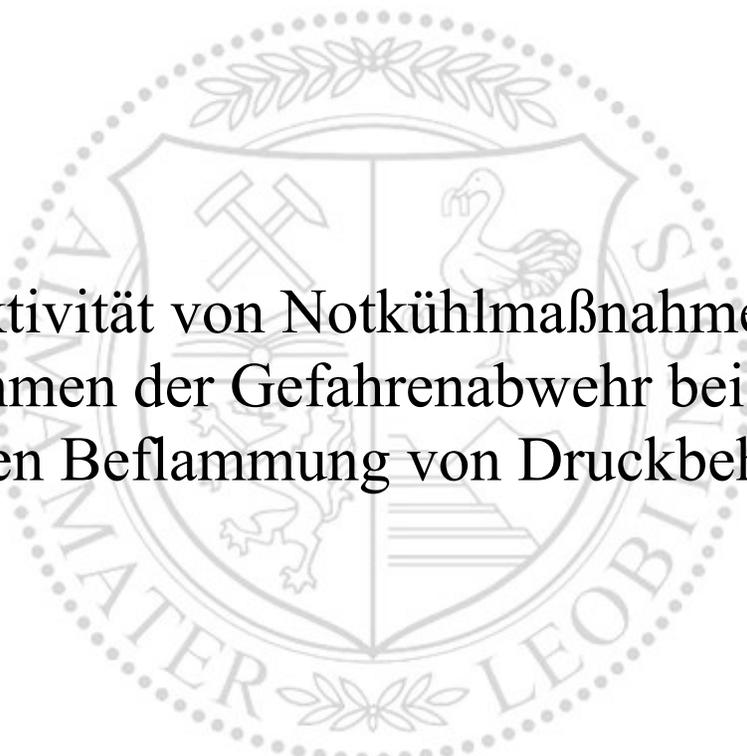




Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Masterarbeit



Effektivität von Notkühlmaßnahmen im
Rahmen der Gefahrenabwehr bei der
direkten Beflammung von Druckbehältern

Florian Martin Markus Toth, BSc

September 2019

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 16.09.2019



Unterschrift Verfasser/in
Florian Martin Markus, Toth
Matrikelnummer: 01235044

Danksagung

Vorab möchte ich mich beim Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik und Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Harald Raupenstrauch für die Bereitstellung der finanziellen Mittel und der experimentellen Ressourcen, die für die Erstellung dieser Arbeit notwendig waren, bedanken. Mein Dank gilt ebenso allen Kollegen am Lehrstuhl für die innovative Zusammenarbeit und die Unterstützung und Lösung von auftretenden Schwierigkeiten.

Für die konstruktive Betreuung und Unterstützung bei der Realisierung dieser Masterarbeit bedanke ich mich bei meinem Betreuer Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Hannes Kern. Weiters weiß ich das mir entgegengebrachte Vertrauen in anderen Projekten der Arbeitsgruppe Prozess- und Anlagensicherheit und die daraus gesammelten Erfahrungen sehr zu schätzen.

Für die Unterstützung und Mitarbeit bei den Vorbereitungen und der Abwicklung der Versuche möchte ich besonders meinen Dank bei Marco Stockinger, Dipl.-Ing. Michael Hohenberger, Paolo Macasaet, Daniel Frühwirth, Lukas Hüttenbrenner und Dipl.-Ing. Katja Hüttenbrenner äußern.

Dies trifft ebenso für die Konstruktion des Prüfstandes und die kompetente Beratung und Fertigung durch Hannes Nestelberger, M.A.L. Metallbau Anlagenservice Leitungsbau GmbH zu.

Abschließend schulde ich der Feuerwehr - und Zivilschutzschule Steiermark Dank für die Nutzung des Übungsgeländes und die Betreuung während der Versuchsserie.

Kurzfassung

Druckbehälter für die Lagerung von brennbaren Flüssigkeiten und Gasen sind in Industrieprozessen häufig verwendete Anlagenbestandteile. Werden diese während eines Störfalles direkt mit einer Kohlenwasserstoff-Jetflame beflammt, stellen die Auswirkungen eines hohes Eskalationsrisiko dar und führen innerhalb weniger Minuten zum katastrophalen Behälterversagen und somit zu Dominoeffekten in der betroffenen Anlage. Mit Hilfe von Schutzmaßnahmen kann der Wärmestrom, der auf den Behälter einwirkt, soweit reduziert werden, dass ein Versagen verhindert und dadurch das Eskalationsrisiko minimiert wird. In Österreich wird in der ÖBFV Richtlinie E07 für das Kühlen von direkt beflammtem technischem Equipment eine spezifische Kühlwassermenge von $15 \frac{l}{m^2min}$ vorgeschrieben [1]. Diese Arbeit beschreibt die Konzeptionierung eines Prüfstandes um zu überprüfen, ob eine effiziente Kühlung durch eine Berieselungsanlage mit dem vorgeschriebenen Volumenstrom realisierbar ist. Die Durchführung einer Versuchsreihe hat gezeigt, dass eine Schutzeinrichtung ausgelegt nach [1] keinen adäquaten Schutz gegen direkte Beflammung leisten kann.

Abstract

Pressure vessels are commonly used equipment for storing flammable hydrocarbon liquids and gases in the process industry. Impinging jetflames affect the vessels in such way that a catastrophic vessel failure is imminent after a few minutes with a high risk of causing domino effects in the affected facility. By using protection systems the induced heat flux on the vessel can be minimized in order to reduce the probability of escalation and prevent a vessel failure. In Austria a cooling water flow rate of $15 \frac{l}{m^2min}$ is recommended in the ÖBFV E07 guideline [1]. This paper describes the development of a test bench to determine if the prescribed flow rate is high enough for a sufficient cooling of a vessel impinged by a jetflame. An experimental series has shown that a water deluge systems built to the specification given in [1] cannot provide adequate cooling.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
1 Theoretische Grundlagen	8
1.1 Grundlagen zu Jetfires	11
1.1.1 Berechnungsmodelle	13
1.2 Auswirkungen von Brandszenarien	14
1.2.1 Versuche zum Versagen von Druckbehältern bei direkter Beflammung	15
1.2.2 Verhalten von Druckbehältern bei Einwirkung von direkter Beflammung	16
1.2.3 Berechnung der Zeitspanne bis zum Behälterversagen	17
1.2.4 Schutzeinrichtungen	19
1.2.4.1 Passive Schutzeinrichtungen	19
1.2.4.2 Aktive Schutzeinrichtungen	21
2 Plattenbrandprüfstand	23
2.1 Aufbau des Prüfstandes	25
2.1.1 Löschanlage	26
2.2 Versuchsablauf	29
3 Rohrbrandprüfstand	30
3.1 Prüfstand	30
3.2 Versuchsablauf	32
4 Experimentelle Ergebnisse Plattenbrandprüfstand	34

4.1	Aufbau der Wasserversorgung	35
4.2	Aufbau der Instrumentierung	35
4.2.1	Temperaturmessung mittels Thermoelementen.....	35
4.2.2	Wärmebildkamera.....	37
4.2.2.1	Bestimmung des Emissionskoeffizienten	37
4.3	Versuche am Plattenbrandprüfstand	40
4.4	Versuch P001	41
4.5	Versuch P002	47
4.6	Versuch P003	50
4.7	Versuch P005	53
4.8	Versuch P006	56
5	Experimentelle Ergebnisse Rohrbrandprüfstand	58
5.1	Aufbau der Wasserversorgung	58
5.2	Aufbau der Instrumentierung	59
5.3	Versuche Rohrbrandprüfstand	60
5.4	Versuch R001	61
5.5	Versuch R002	63
5.6	Versuch R003	65
6	Thermische Modellierung des Plattenbrandprüfstands	68
6.1	Energiebilanz der Stahlplatte	69
6.2	Formulierung der Wärmeströme	70
6.3	Formulierung der Temperaturabhängigkeit der Stoffparameter	71
6.4	Thermisches Modell.....	75
6.5	Validierung des Modells	78
6.6	Berechnungsergebnisse	80
7	Zusammenfassung	82
8	Ausblick.....	84
	Literaturverzeichnis	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verbrennungsdreieck [2]	8
Abbildung 2: Lachenbrand [3]	9
Abbildung 3: Jetfire [4]	10
Abbildung 4: Zeitspanne bis zum Behälterversagen und gemessene Wandtemperaturen der gesammelten Versuche [7]	15
Abbildung 5: Abnahme der Festigkeit unterschiedlicher Stähle mit steigender Temperatur [7]	17
Abbildung 6: Näherung für t_{tf} [7]	18
Abbildung 7: Prüfstand für Berieselungsanlagen für LPG Tanks [9].....	21
Abbildung 8: Fertigungszeichnung Plattenbrandprüfstand	28
Abbildung 9: Fertigungszeichnung Rohrbrandprüfstand	32
Abbildung 10: Versuchssteuerung Plattenbrandprüfstand.....	37
Abbildung 11: Versuchsaufbau Bestimmung des Emissionskoeffizienten	39
Abbildung 12: Verlauf des Emissionskoeffizienten mit steigender Temperatur einer P265GH Stahlprobe.....	40
Abbildung 13: Versuchsaufbau Plattenbrandprüfstand	42
Abbildung 14: Versuch P001	42
Abbildung 15: Plattentemperaturverlauf P001	43

Abbildung 16: Seitenwindeffekt führt zu inhomogener Temperaturverteilung P001.....	44
Abbildung 17: Verdampfung des Kühlwassers aufgrund hoher Berieselungsanlagentemperatur	45
Abbildung 18: Verdampfen des Kühlwassers führt zum Abriss des Wasserfilms	46
Abbildung 19: Ausbildung der Kühlfront.....	46
Abbildung 20: Plattentemperaturverlauf P002.....	48
Abbildung 21: Berieselung Versuch P002.....	48
Abbildung 22: Ausbildung der gekühlten Zone Versuch P002.....	49
Abbildung 23: Plattentemperaturverlauf P003.....	50
Abbildung 24: Temperaturverteilung P003.....	51
Abbildung 25: Berieselung Versuch P003.....	51
Abbildung 26: Abheben der Flamme bei hohen Kühlwassermengen	52
Abbildung 27: Plattentemperaturverlauf P005.....	54
Abbildung 28: Inertisierung der Flamme durch hohen Kühlwasservolumenstrom P005	54
Abbildung 29: Temperaturverteilung P005.....	55
Abbildung 30: Plattentemperaturverlauf P006.....	56
Abbildung 31: Temperaturverteilung P006.....	57
Abbildung 32: Versuchssteuerung Rohrbrandprüfstand.....	59
Abbildung 33: Versuchsaufbau Rohrbrandprüfstand R001	61
Abbildung 34: Wärmestromverlauf R001	62
Abbildung 35: Wassertemperaturverlauf R001.....	62
Abbildung 36: Kühlen mit Mehrzweckstrahlrohr R002.....	64
Abbildung 37: Wärmestromverlauf R002	64
Abbildung 38: Wärmestromverlauf R003	66
Abbildung 39: Kühlen mit Hochdruckschnellangriffseinrichtung	66
Abbildung 40: Energiebilanz des Plattenbrandprüfstands	69
Abbildung 41: Temperaturleitfähigkeit Luft.....	72
Abbildung 42: Isobarer thermischer Ausdehnungskoeffizient Luft	72

Abbildung 43: Wärmekapazität Luft	73
Abbildung 44: Wärmeleitfähigkeit Luft.....	73
Abbildung 45: Kinematische Viskosität Luft	74
Abbildung 46: Berechneter Verlauf des Wärmestromes Zelle 8 Versuch P006	77
Abbildung 47: Validierung des thermischen Modells	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messdaten zur Ermittlung des Emissionskoeffizienten	38
Tabelle 2: Umgebungsbedingungen Plattenbrandversuche	41
Tabelle 3: Kühlmaßnahmen Plattenbrandversuche.....	41
Tabelle 4: Umgebungsbedingungen Rohrbrandversuche	60
Tabelle 5: Kühlmaßnahmen Rohrbrandversuche	60
Tabelle 6: Berechnungsergebnisse Wärmestrom	80

1 Theoretische Grundlagen

Um die durch Beflammung hervorgerufenen Auswirkungen auf Anlagenteile in Industrieprozessen in Störfallszenarien verstehen zu können, müssen zuerst der Quelltherm der Verbrennung und Verbrennungseffekte untersucht werden.

Für eine Verbrennung müssen immer folgende Kriterien des Branddreiecks (Abbildung 1) erfüllt sein.



Abbildung 1: Verbrennungsdreieck [2]

Brennstoff und Sauerstoff müssen im richtigen Mengenverhältnis vorhanden sein. Dies alleine reicht jedoch noch nicht für eine Verbrennung aus. Um den Verbrennungsprozess zu starten, muss eine wirksame Zündquelle vorhanden sein. Diese kann in unterschiedlichen Energieformen zugeführt werden, zum Beispiel durch einen lokalen Wärmeeintrag mit einer Temperatur höher als die Zündtemperatur durch heiße Oberflächen mit denen ein Dampf/Luft-Gemisch in Berührung kommt oder durch elektrische beziehungsweise mechanische Funken.

Die Art und in weiterer Folge die Geschwindigkeit mit der die Verbrennung abläuft hängt maßgeblich von der Art des Brennstoffes ab, vom Aggregatzustand und dem Dispersionsgrad im betrachteten Volumen, vor allem für gas- und dampfförmige Brennstoffe. Gasförmige Brennstoffe können unter den richtigen Voraussetzungen explosionsartig verbrennen oder beispielsweise bei einem Leitungsabriss mit Entzündung ähnlich einer Fackel verbrennen.

Brände werden nach ihrer Erscheinungsform kategorisiert. Sind die Bedingungen des Verbrennungsdreieckes erfüllt, hängt die Art des Brandes vom Quelltherm des Brennstoffes ab. Zwei dieser Typen stellen für industrielle Prozesse eine besondere Gefahr aufgrund ihrer schwerwiegenden Auswirkungen dar.

Wird ein mit einer brennbaren Flüssigkeit gefüllter Behälter leck, zum Beispiel durch Versagen einer Dichtung oder Leckschlagen durch mechanische Einwirkung, tritt die Flüssigkeit aus und sammelt sich am Boden. Abhängig von der Leckrate bildet sich im Laufe der Zeit eine Lache der austretenden Flüssigkeit. Die Flüssigkeit beginnt zu verdampfen und bildet über der Lache, abhängig von räumlichen und meteorologischen Gegebenheiten beim Austritt, eine Dampfphase. Diese kann von einer Zündquelle gezündet werden und wird in der Literatur als „Lachenbrand“ oder „pool-fire“ bezeichnet.



Abbildung 2: Lachenbrand [3]

Gasförmige Brennstoffe werden in Industrieprozessen hauptsächlich in Druckbehältern gelagert und durch Leitungen transportiert. Werden solche Anlagenteile beschädigt entweicht Gas mit hoher Geschwindigkeit in Richtung des Lecks aus den Apparaten. Wird die Gasströmung entzündet bildet sich eine kegelförmige Flamme mit hohem Impuls aus. Diese wird in der Literatur als „jetfire“ bezeichnet und tritt gehäuft in der Öl- und Gasindustrie auf.



Abbildung 3: Jetfire [4]

Da sich diese Masterarbeit in weiterer Folge mit den Auswirkungen von Jetfire befasst, wird in den folgenden Kapiteln nur dieser Brandfall behandelt.

1.1 Grundlagen zu Jetfires

Die Organisation „The Netherlands Organization of Applied Scientific Research“ beschäftigt sich intensiv mit den Auswirkungen von Störfällen in Industrieprozessen und deren physikalischen Grundlagen. Die Publikationen umfassen einerseits theoretische Arbeiten andererseits werden Berechnungsmodelle entwickelt, mit denen Brandszenarien modelliert und die Auswirkungen berechnet werden können. Das Buch „Methods for the calculation of physikal effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases) – Yellow Book CPR14E“ umfasst eine Vielzahl von wissenschaftlichen Artikeln und Sammelwerken, die in diesem Forschungsbereich vorhanden sind. Im folgenden Kapitel wird das Buch sinngemäß zusammengefasst. [5]

Kommt es bei der Freisetzung eines brennbaren Stoffes zur Entzündung und Ausbildung eines Brandes, besteht die Flamme aus heißen Verbrennungsprodukten mit einer Temperatur zwischen 800 und 1600 K. Die bei der Verbrennung frei werdende Energie wird über Strahlung und Wärmeübertragung an die Umgebung abgegeben. Da im Bereich der Anlagensicherheit die Auswirkungen der Flamme auf benachbarte Anlagenteile außerhalb der Flamme in der Regel das primäre Interesse darstellt, wird die Wärmeübertragung durch Strahlung als primäres Übertragungsphänomen definiert. Wärmeübertragung durch Konvektion soll nur bei der Betrachtung von direkt beflamnten Objekten behandelt werden.

Allgemein ist die Wärmestrahlung einer Flamme wie die Strahlung eines Körpers mit einem Emissionskoeffizienten ε definiert.

$$\dot{q}_{Strahlung} = \varepsilon \times \sigma \times (T_{Flamme}^4 - T_{\infty}^4) \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (1-1) [5]$$

Um mit Formel 1-1 die spezifische Strahlungsleistung einer Flamme bestimmen zu können, muss folglich der Emissionskoeffizient und die Flammentemperatur bekannt sein. Beide Parameter sind nur über komplizierte Modelle errechenbar und zusätzlich nicht über die gesamte Oberfläche der Flamme konstant. Für die Entwicklung von Rechenmodellen, die in kurzer Zeit die Berechnung solcher Brände bewerkstelligen sollen, ist dieser Ansatz daher nicht anwendbar. Wie eingangs bereits erwähnt wird die Wärmeübertragung über Wärmestrahlung als primäres Übertragungsphänomen definiert. Durch Berücksichtigung des

Faktors F_s , der den Anteil der bei der Verbrennung freiwerdende Wärme die mittels Strahlung übertragen wird angibt, kann die Strahlungswärmeleistung berechnet werden. Hierfür wird bei Gasbränden zuerst der austretende Massenstrom ermittelt und damit die gesamte Verbrennungsleistung \dot{Q}_{Brand} bestimmt. Um die spezifische Strahlungsleistung zu erhalten, muss lediglich durch die Oberfläche der Flamme dividiert und mit F_s multipliziert werden.

$$\dot{Q}_{Brand} = \dot{m} \times \Delta H_U [W] \quad (1-2) [5]$$

$$F_s = 0.21 \times e^{(-0,00323 \times u)} + 0,11 [-] \quad (1-3) [5]$$

$$\dot{q}_{Strahlung} = F_s \times \frac{\dot{Q}_{Brand}}{A_{Flamme}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1-4) [5]$$

Anschließend ist es mit dem gewonnenen spezifischen Wärmestrom möglich, die Wärmestrahlungsleistung zu berechnen, die auf einen im bestimmten Abstand zur Flamme positionierten Empfänger einwirkt, unter Berücksichtigung von Sichtfaktoren und der atmosphärischen Transmission.

$$\dot{q}_{Empfänger} = \dot{q}_{strahlung} \times F_A \times \tau_a \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1-5) [5]$$

Mit diesem spezifischen Strahlungswert können nun die Auswirkungen auf den Empfänger berechnet und deren Folgen abgeschätzt werden.

1.1.1 Berechnungsmodelle

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl von Berechnungsmodellen für Jetflames, die sich einerseits in der Betrachtung und Modellierung der Flammenform und Abstrahlung und andererseits in ihrer Komplexität und damit verbundenen Rechenaufwand unterscheiden.

Zwei dieser Modelle stechen heraus, da sie durch experimentell ermittelte Daten aus Großversuchen validiert wurden. Somit konnte belegt werden, dass die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen das Ergebnis nicht verfälschen.

Das Modell „Thorin“ ist ein numerisches Modell, das die Flamme entlang einer Achse in Abschnitten berechnet und die Wärmestrahlung der Abschnitte bestimmen kann. Es gibt keine analytische Lösung und kann nur computergestützt berechnet werden.

Das Modell von Chamberlain 1987 [6] berechnet die Flamme mit einem rein geometrischen Ansatz und leitet daraus die entsprechenden Wärmestrahlungen ab. Im Gegensatz zum Modell von Cook gibt es eine analytische Lösung und es ist daher mit geringerem Rechenaufwand verbunden. Beim Vergleich der beiden Modelle wird festgestellt, dass sich die Ergebnisse trotz des vereinfachten Modells nur minimal unterscheiden. Dieses Modell wird daher in der Software „Effekts“ implementiert, um damit die Wärmestrahlungsverteilung der Flamme auf die Umgebung zu berechnen und daraus Auswirkungen, Sicherheitsradien im Störfall und Ähnliches ableiten zu können.

Weiters wird darauf verwiesen, dass Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen prinzipiell genauere Ergebnisse liefern, vor allem für Szenarien, in denen Anlagenteile direkt von einer Jetflame beflammt werden, in der Literatur als „impinging jet“ bezeichnet. In solchen Fällen müssen auch Wärmetransportphänomene wie Konvektion und Konduktion berücksichtigt werden. Diese können nicht soweit vereinfacht werden, dass die Ergebnisse ausreichend verlässlich sind und erfordern daher den Aufwand einer exakten Simulation.

Für den Bereich der Anlagen- und Gefahrenabwehrplanung in der Industrie ist die Evaluierung von Störfällen mit Hilfe solcher Simulationen durch die Vielzahl von möglichen Freisetzungspunkten und Schadensmechanismen nicht zielführend. Daher werden diese Fragstellungen aufgrund der Validität der Modelle mit den vereinfachten Modellen behandelt.

1.2 Auswirkungen von Brandszenarien

Nach der Analyse der Quelltherme und entsprechender Intensität von denkbaren Bränden, müssen die potentiellen Auswirkungen bestimmt werden. Das Werk „Domino Effects in the Process Industries“ [7] befasst sich mit der Analyse der möglichen Auswirkungen von Störfällen in der Industrie, vor allem mit den unterschiedlichen Eskalationmechanismen eines primären Ereignisses, das andere Anlagenteile derart beeinflusst, dass es zu weiteren Störungen kommt. Dies bezeichnet man als Dominoeffekt im Bereich der Prozess und Anlagensicherheit. Kapitel fünf behandelt die Eskalation hervorgerufen durch Brände und wird hier zusammengefasst vorgestellt.

Studien haben gezeigt, dass mehr als die Hälfte von Störfällen mit Dominoeffekten von einem primären Brandereignis ausgelöst wird und sekundär betroffene Anlagenteile Lagertanks, Reaktoren und Leitungsapparate sind. Aufgrund der Häufigkeit ist es daher essentiell, mögliche Dominoeffekte zu identifizieren und zu analysieren, um im Störfall adäquate Handlungen zu setzen. Der Eskalationsvektor ist die Wärmeübertragung vom primären Ereignis auf die Umgebung durch Wärmestrahlung. Im Fall von direkter Beflammung kommt es zusätzlich zur Wärmeübertragung durch Konvektion, die schlussendlich zum Behälterversagen und damit zu einem sekundären Eskalationsszenario führt.

Im Gegensatz zu anderen Eskalationsvektoren wie zum Beispiel Trümmerflug, der andere Anlagenteile leck schlägt und damit sofort zu einem sekundärem Ereignis führt, liegt bei Bränden eine Zeitverzögerung vor. In Abhängigkeit von der Größe des primären Brandes kann die Zeitspanne bis zur Eskalation im Minutenbereich bis hin zu mehreren Stunden liegen und wird als „Time to Failure“ (tff) bezeichnet. Weiters ist diese aber von den Anlageneigenschaften wie Behältergeometrie, Wandstärken, gelagerte Stoffe, Druckentlastungssysteme und vielen mehr abhängig und daher aufwändig zu bestimmen. Ziel ist es, die tff soweit zu verzögern oder durch entsprechende Schutzmaßnahmen die Eskalation ganz zu verhindern, um eine Gefahrenabwehr überhaupt zu ermöglichen.

1.2.1 Versuche zum Versagen von Druckbehältern bei direkter Beflammung

Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurden viele Großversuchsreihen von unterschiedlichen Forschungsgruppen durchgeführt, um das Verhalten von Druckbehälter im Fall einer direkten Beflammung von Jetflames, aber auch von Lachenbrände zu untersuchen. Beide Szenarien stellen realistische und immer wieder auftretende Störfälle dar. In den Versuchsaufbauten werden Druckbehälter mit druckverflüssigten Gasen, meist Propan, Butan oder LPG gefüllt und mit einer Wärmequelle beaufschlagt. Für die Simulation von Lachenbränden wird unter den Behältern eine Wanne mit einer brennbaren Flüssigkeit gefüllt, entzündet und der Behälter dadurch beflammt. Bei Jetflames wird die Flamme eines Gasbrenners direkt auf den Behälter gerichtet und somit die Wärme eingetragen. Ziel dieser Versuche ist es, genügend Messdaten und Erkenntnisse über die vorliegenden Prozesse zu sammeln, um exakte Rechenmodelle erstellen zu können, eine Vergleichsbasis von ungeschützten Behältern zu erhalten und damit in weiterer Folge die Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen zu bestimmen. Die Versuche unterscheiden sich in den vorliegenden Versuchsbedingungen. Die Druckbehälter weisen unterschiedliche Größen und Geometrie auf. Die Flüssigkeiten werden mit verschiedenen Füllständen und Drücken gelagert. Durch die Art des

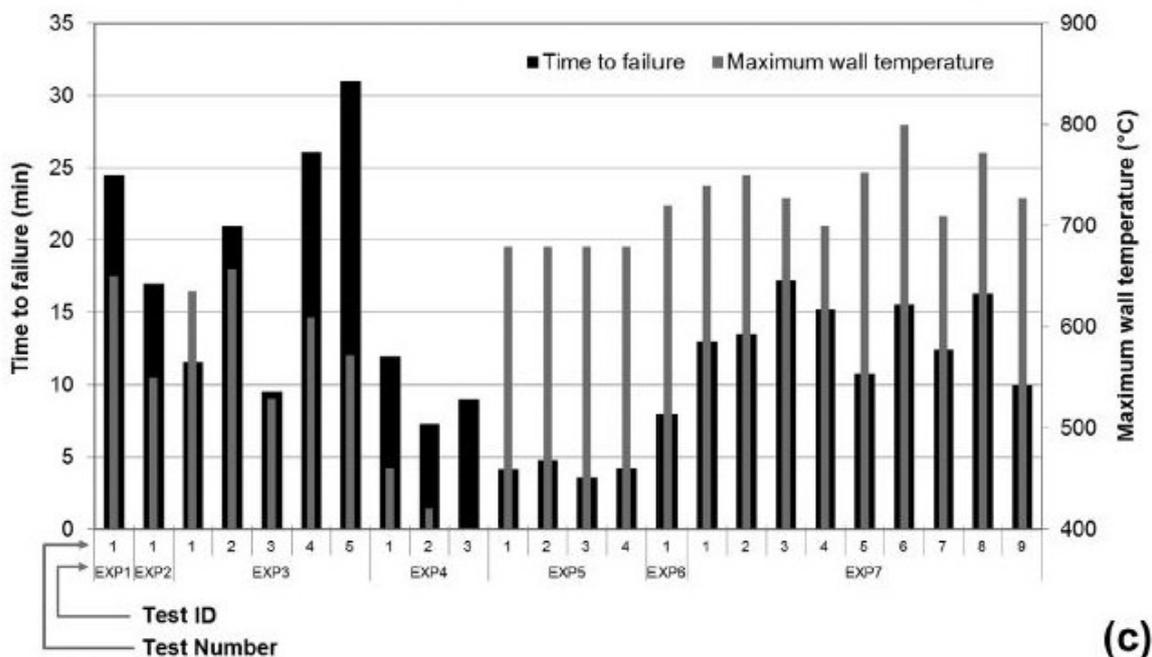


Abbildung 4: Zeitspanne bis zum Behälterversagen und gemessene Wandtemperaturen der gesammelten Versuche [7]

Wärmeeintrages und die verwendeten Brennstoffe liegen Flammentemperaturen von 650 °C bis 1300 °C vor und in weiterer Folge resultieren Wärmeströme von 100 bis 200 $\frac{kW}{m^2}$. Diese voneinander abweichenden Parameter führen zu unterschiedlichen Ergebnissen in der Zeitspanne bis zum Behälterversagen.

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Versuche von Behältern ohne Schutzeinrichtungen für die betrachteten Bedingungen dargestellt. Die t_{ff} liegt zwischen 3 und 31 Minuten und bestätigt damit die hohe Eskalationsgefahr, die von Druckbehälter in Brandszenarien ausgeht.

1.2.2 Verhalten von Druckbehältern bei Einwirkung von direkter Beflammung

Wird ein mit einer brennbaren Flüssigkeit gefüllter Behälter direkt beflammt, beginnt durch den Wärmeeintrag die Flüssigkeit zu verdampfen und es bilden sich zwei Zonen aus. Im oberen Teil des Behälters, dem Kesselscheitel, sammelt sich Dampf, im unteren Teil siedende Flüssigkeit. Aufgrund des höheren Wärmeübergangskoeffizienten von der Behälterwand auf die Flüssigphase nimmt die Wandtemperatur im unteren Bereich die der Flüssigkeit an. Im Dampfraum führt die zugeführte Wärme zur Überhitzung des Dampfes und resultiert in einer hohen Wandtemperatur im Kesselscheitel und führt somit zu zusätzlichen Spannungen im Behältermaterial aufgrund des Temperaturgradienten.

Weiters steigt durch das Verdampfen der Flüssigkeit der Druck im Behälter. Erreicht der Druck den Nenndruck des Behälters, öffnet, sofern vorhanden, ein Druckentlastungsventil (PRV), um die Dampfphase in die Umgebung abzulassen. Um ein Versagen des Behälters zu verhindern, muss das PRV so ausgelegt sein, dass der entstehende Dampfmassenstrom durch den hohen Wärmeeintrag rechtzeitig abgelassen werden kann und der Behälter entleert wird.

Hinzu kommt, dass, wie in Abbildung 5 ersichtlich, die Festigkeit der verwendeten Behälterstähle mit steigender Temperatur abnimmt. Diese Abnahme verläuft nicht linear, sondern die Festigkeit fällt ab einer Grenztemperatur stark ab. In der Auslegung der Behälter wird die benötigte Wandstärke anhand der Festigkeit bei Betriebstemperatur unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors ausgewählt. Steigt nun die Temperatur weit über die Auslegungstemperatur an, nimmt die Festigkeit so stark ab, dass die vorhandene Wandstärke nicht mehr ausreicht, um dem Nenndruck standzuhalten. Selbst unter der Annahme, dass das PRV den Druck im Behälter auf dem Auslegungsdruck halten kann, versagt der Behälter.

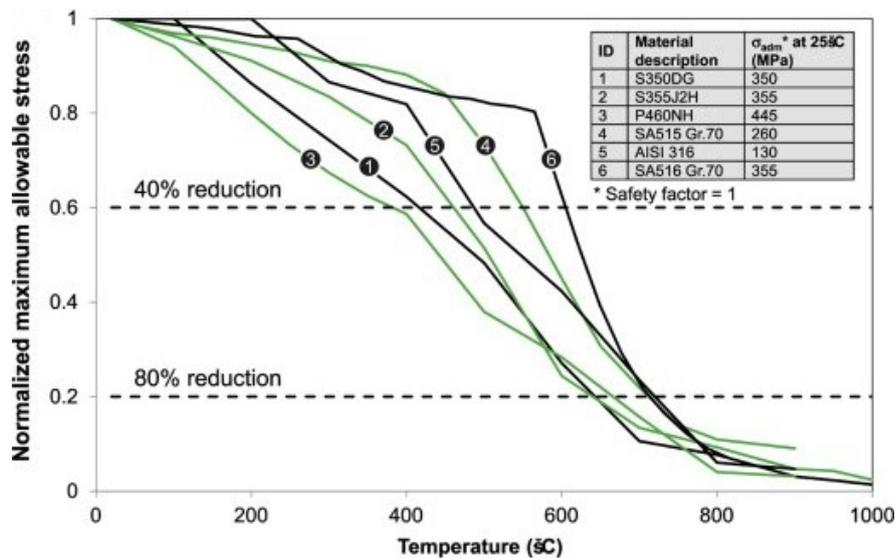


Abbildung 5: Abnahme der Festigkeit unterschiedlicher Stähle mit steigender Temperatur [7]

Auf Basis der experimentell gewonnenen Erkenntnisse müssen Jetflames als primäre Ereignisse mit hoher Eskalationswahrscheinlichkeit eingestuft werden. Im Falle einer direkten Beflammung ist mit einer Eskalation und Dominoeffekten innerhalb kurzer Zeiträume zu rechnen. Diese Argumentation wird durch Studien und Analysen von in der Vergangenheit bereits aufgetretenen Störfällen unterstützt. Werden betroffene Anlagenteile nicht direkt beflammt sondern von der Flamme lediglich bestrahlt, muss das Eskalationsrisiko gesondert bestimmt werden, da mit niedrigeren Wärmeströmen zu rechnen ist.

1.2.3 Berechnung der Zeitspanne bis zum Behälterversagen

Zwei Hauptphänomene bestimmen den Zeitpunkt des Behälterversagens. Einerseits laufen eine Vielzahl von thermischen und thermodynamischen Prozessen im Inneren des Behälters ab, andererseits verändern sich die Werkstoffeigenschaften der verwendeten Stähle. Es müssen im Inneren unterschiedliche Siedetypen und komplexe konvektive Strömungen berücksichtigt werden, die dazu führen, dass unterschiedliche Temperaturen in der Flüssigphase vorliegen. Aufgrund der hohen Temperaturen kann die Gasstrahlung in der Dampfphase, die die Flüssigkeit zusätzlich erwärmt, nicht vernachlässigt werden. Öffnet das PRV, kommt es zu einer erzwungenen Konvektion zwischen Gasphase und Behälterwand, die im geschlossenen Zustand des PRV nicht vorliegt. Weiters führt die Druckentlastung zu hohen Verdampfungsraten in der flüssigen Phase, die wiederum zu hoher Durchmischung

und Änderung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Flüssigkeit und Behälterwand führt. Diese und viele weitere Vorgänge erfordern für die exakte Berechnung von Wandtemperaturen detaillierte und komplexe CFD Simulationen.

Die Ergebnisse der CFD Simulation müssen des Weiteren einem Modell übergeben werden, das bei gegebenem Druck und Wandtemperaturen die Spannungen im Behältermaterial berechnet. Berücksichtigt werden Spannungen durch den Druck im Inneren, Temperaturspannungen, Verformungen und viele mehr. Wenn die Spannung in einem Punkt den Wert der Zugfestigkeit des Behältermaterials bei vorliegender Temperatur erreicht, ist ein Bersten des Behälter zu erwarten und der entsprechende Zeitpunkt entspricht der ttf.

Die Durchführung solcher Simulationen ist mit hohem Aufwand und entsprechenden Kosten verbunden vor allem dann, wenn unterschiedliche Einwirkungsvektoren und Quelltherme analysiert werden. Um dennoch Daten für Risikoanalysen zu erhalten, werden zwei Vorgehensweisen vorgeschlagen.

Eine Möglichkeit stellt die Abschätzung mittels Grenzwerten dar. Hierbei wird davon ausgegangen, wenn zum Beispiel ein bestimmter Strahlungswert überschritten wird, dass eine Eskalation zu erwarten ist. Die Grenzwerte sind über empirische Modelle leicht zu berechnen und erfordern keine aufwändige Simulationen. Diese Methode muss unbedingt mit Vorsicht angewendet werden, da die Ergebnisse entweder über- oder unterschätzt werden können und eine verlässliche Bestimmung der ttf nicht möglich ist, da die komplexen Vorgänge und die Behältergeometrie vernachlässigt werden.

Eine bessere Methode stellt der Vergleich des vorliegenden Szenarios mit Referenzmodellen dar. Es ist gelungen empirische Funktionen für die Berechnung der ttf aus den Ergebnissen

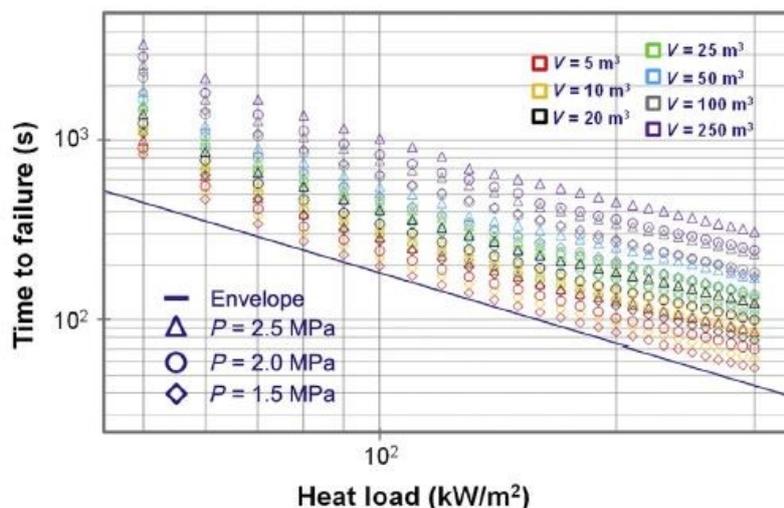


Abbildung 6: Näherung für ttf [7]

validierter Modelle mit unterschiedlichen Behältergeometrien und Brandlasten zu finden, die die Berechnung für eine Vielzahl an Szenarien ermöglicht. Nimmt man für eine Jetflame einen spezifischen Wärmestrom von $\dot{q} = 200 \frac{kW}{m^2}$ an bei einem Betriebsdruck von $p_{nenn} = 25 \text{ bar}$ liegt die zu erwartende ttf, abhängig von der Behältergeometrie, zwischen 100 und 500 s (Abbildung 6). Diese Zeitspanne liegt im Bereich der in Kapitel 1.2.1 beschriebenen Fälle und stellt daher eine Näherung zur Realität dar. Obwohl die physikalischen Phänomene in den hinterlegten Daten und Funktionen berücksichtigt werden, sollen die Ergebnisse als konservative Einschätzung betrachtet werden. Muss die ttf exakt ermittelt werden, ist eine Simulation mit spezifischen Randbedingungen unumgänglich.

1.2.4 Schutzeinrichtungen

Da im Kapitel 1.2 die Eskalationswahrscheinlichkeit von einem durch ein Brandereignis beflamten und bestrahlten Druckbehälter als sehr hoch eingestuft wird, mit ttf-Werten von wenigen Minuten bis Stunden abhängig vom einwirkenden Wärmestrom, müssen Maßnahmen getroffen werden um diese zu senken. Das Ziel der Maßnahmen ist im Wesentlichen Zeit zu gewinnen und ttf-Werte so zu vergrößern, dass anlagenseitige Schutzsysteme wie zum Beispiel Druckentlastung und aktive Gefahrenabwehr durch Einsatzorganisationen durchgeführt werden können. In Österreich ist in der Richtlinie des Österreichischen Bundesfeuerwehrverbandes ÖBFV-RL VB-05 die Aufbringung von 40 % der benötigten Löschwasserrate innerhalb von 10 Minuten vorgeschrieben [8]. Da die Zeitangabe innerhalb der ttf-Zeitspanne liegt, muss hier auch die Sicherheit der Einsatzkräfte berücksichtigt werden.

Maßnahmen zur Verringerung der Eskalationswahrscheinlichkeit zielen darauf ab, den Wärmestrom, der auf Druckbehälter wirkt, soweit zu reduzieren, dass bei gleichem Quelltherm Temperatur- und Druckerhöhung drastisch verzögert werden.

1.2.4.1 Passive Schutzeinrichtungen

Unter passiven Schutzeinrichtungen werden Brandschutzsysteme verstanden, die keine Energie und keinen Auslösemechanismus benötigen, um ihre Wirksamkeit sicher zu stellen. Im Wesentlichen handelt es sich um thermisch isolierende Schichten, die sich in Wirksamkeit, Material und Applikation unterscheiden. Die Verwendung von passiven Schutzeinrichtungen ermöglicht die Reduktion des Wärmestroms um bis zu 90 % und somit die Verlängerung der ttf. Weiters sollen sie in Kombination mit entsprechenden

Druckentlastungs- und Ausblasseystemen verwendet werden, da die verlängerte Zeitspanne erlaubt den Druck der Anlage auf Atmosphärendruck zu senken, sodass selbst bei Erwärmung auf kritische Behältertemperaturen bei sehr langen Feuerexpositionen der Druckbehälter keine Gefahr mehr darstellt.

Gängige Materialien für passive Schutzeinrichtungen sind Epoxid-basierte Beschichtungen, Vermiculit-basierte Beschichtungen und Mineralwolle.

Epoxidbeschichtungen zeichnen sich durch ihr aufschäumendes Verhalten aus. Durch das Aufheizen werden flüchtige Bestandteile aus dem Isolationsmaterial ausgetrieben, die zum Aufschwellen der kohlenstoffreichen Rückstände führen und so die Isolationseigenschaften durch die erhöhte Schichtdicke mit geringer Wärmeleitfähigkeit sicherstellen.

Vermiculit Brandschutzmaterialien beruhen auf dem Konzept der Verdunstungskühlung. Wasser, das im Isolationsmaterial gespeichert ist, beginnt bei Wärmeeinwirkung zu verdampfen und hält die Behälterwand auf einer konstanten Temperatur. Aufgrund der hohen Wärmeströme, die über einen längeren Zeitraum reduziert werden sollen, sind hohe Schichtdicken erforderlich, um eine effektive Isolierung zu sichern.

Als Mineralwollen werden Stein-, Glas- und Keramikfasern bezeichnet, die meistens in Form von Matten für Isolationszwecke verwendet werden. Sie weisen höhere Wärmeleitfähigkeiten als die bereits erwähnten Materialien auf und erfordern daher hohe Schichtdicken. Zusätzlich müssen Mineralwollen aufgrund der mechanischen Eigenschaften in Blechmäntel verbaut werden, um die statische Tragfähigkeit zu gewährleisten. Dies ist zwar mit höherem Aufwand verbunden, bietet aber den zusätzlichen Vorteil, dass ein Luftspalt zwischen Stahlmantel und Isolationsmaterial realisiert werden kann, der einerseits als Strahlungsschild wirkt und andererseits den Wärmedurchgangskoeffizient durch die zusätzliche Schicht erhöht und die Effektivität der Isolation steigert.

Ein Nachteil, den alle passiven Schutzeinrichtungen teilen, ist, dass die Applikation der Materialien, vor allem in Form von direkten Beschichtungen, die Inspektion der Anlagenteile zum Beispiel von Schweißnähten, auf Korrosion und ähnliches erschwert bis unmöglich macht, ohne die Schutzeinrichtung wieder entfernen zu müssen.

1.2.4.2 Aktive Schutzeinrichtungen

Als aktive Schutzeinrichtungen werden Systeme bezeichnet, die einen Brand erkennen und Maßnahmen setzen um die Auswirkungen zu minimieren. Mittels Rauch-, Gas-, und Wärmemeldern kann ein Brand detektiert werden und ein elektrisches Signal an ein entsprechendes Überwachungssystem gesendet werden. Das Verhalten der Schutzeinrichtung nach der Detektion hängt davon ab, inwieweit es in die Steuerung des zu überwachenden Prozesses eingebunden ist. Zumindest muss ein Alarm ausgelöst werden, um Anlagenpersonal auf die möglichen Gefahren aufmerksam zu machen und betroffene Bereiche zu evakuieren. Weiters werden betriebsinterne, sofern vorhanden, oder externe Einsatzkräfte alarmiert, um abwehrende Maßnahmen einzuleiten.

Um den maximalen Nutzen aus einem Branderkennungssystem zu erzielen, soll dieses in der Lage sein, automatisch vorhandene Anlagentechnik für den Brandschutz zu aktivieren. Vorhandene Pumpen sollen gestartet werden, um das Hydrantennetz zu speisen. Mit Hilfe von Berieselungsanlagen ist es möglich, Wasser gleichmäßig auf Anlagenkomponenten zu sprühen und einen geschlossenen Wasserfilm auf den Oberflächen aufzubringen. Das nach unten laufende Wasser kühlt die Behälterwände und verzögert dadurch das Aufheizen. Die ttf-Zeitspanne kann somit vergrößert werden. Gleichzeitig können automatische Notabschaltungen und Druckentlastungssysteme aktiviert werden, um die Anlagen zurück in einen sicheren Betriebszustand zu führen und dadurch eine Eskalation verhindern.



Abbildung 7: Prüfstand für Berieselungsanlagen
für LPG Tanks [9]

Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass ein effektiver Schutz mit Berieselungsanlagen erzielbar ist, aber die vorhandenen Normen zur Auslegung und die aufzubringenden Wassermengen aufgrund getroffener Idealisierung des Problems in den Richtlinien überarbeitet werden müssen, da die geforderten Werte zu gering sind [9].

Dieser Umstand soll auch für österreichische Normen untersucht werden und wird detailliert in den folgenden Kapiteln behandelt.

2 Plattenbrandprüfstand

In Kapitel 1 wird festgestellt, dass der derzeitige Stand der Wissenschaft zu der Schlussfolgerung führt, dass erhöhtes Gefahrenpotential von Druckbehältern im Falle eines Brandes ausgeht. Während einer Prozessanalyse in Kooperation mit einem Industriepartner des Lehrstuhls für Thermoprozesstechnik werden in einer Industrieanlage mehrere Behälter identifiziert, die bei Eskalation schwerwiegende Schäden an der Anlage und Umgebung verursachen können. Der Auftraggeber stellt die Frage, inwieweit Schutzeinrichtungen das Gefahrenpotential verringern könnten. Es wurde daher beschlossen einen Prüfstand zu entwickeln, an dem eine direkte Beflammung eines Druckbehälters nachgestellt werden kann, um experimentelle Daten zu sammeln. Um die Wirksamkeit von aktiven Schutzeinrichtungen zu ermitteln, muss eine Berieselungsanlage nachgestellt werden. Eine weitere Möglichkeit stellt auch noch die Kombination von passiven und aktiven Einrichtungen dar.

Um mehrere Schutzeinrichtungen, zum Beispiel unterschiedliche Materialien für passive Schutzeinrichtungen oder verschiedene Löschmittelmengen für Berieselungssysteme zu prüfen, ist es notwendig den Prüfstand so auszulegen, dass Versuche mit wechselnden Rahmenbedingungen ohne aufwändige Umbauarbeiten und in kurzer Zeitfolge hintereinander durchgeführt werden können. Einer der wesentlichen Punkte, der bei der Konzeptionierung zu berücksichtigen ist, ist das Thema Sicherheit. Es ist möglich für Versuche echte Druckbehälter gefüllt mit brennbaren Flüssigkeiten oder Gasen zu verwenden. Dies hat aber den Nachteil, dass man einerseits ein großes Versuchsgelände braucht, auf dem keine Gefahr besteht selbst wenn der Behälter explodiert und ist andererseits mit hohen Kosten verbunden. Das primäre Ziel der Versuche und Messungen

ist, das thermische Verhalten der geprüften Materialien und Kühlraten durch Berieselungsanlagen zu bestimmen und nicht die ttf-Zeitspanne zu erfassen, da diese vom Behälter abhängt und die eigentlichen Aussagen verfälscht. Es ist somit nicht notwendig echte Behälter zu verwenden, sondern einen Prüfstand zu entwickeln, der eine Behälterwand abbildet, ohne die Sicherheitsbedenken, die bei der Beflammung echter Druckbehälter berücksichtigt werden müssen, und reproduzierbare Ergebnisse ermöglicht.

In den USA ist für Tankwagen, die brennbare Flüssigkeiten transportieren, ein passives Schutzsystem vorgeschrieben. Es ist daher nötig gesetzliche Vorgaben zu schaffen, welche Eigenschaften eine passive Schutzeinrichtung für Tankwagen erfüllen muss [10]. Für die Zulassung von passiven Brandschutzmaterialien in den USA ist eine Norm vorhanden, in der Rahmenbedingungen und Testabläufe vorgegeben werden, bevor ein neues Produkt verkauft werden darf. Diese beschreibt auch ein Verfahren, dass eine direkte Beflammung nachstellt. Einen Prüfstand in Anlehnung an eine bestehende Norm zu verwenden, bietet den Vorteil, dass Ergebnisse aufgrund der vorgegebenen Rahmenbedingungen mit gleichwertigen Versuchsaufbauten vergleichbar sind und somit die korrekte Ausführung überprüft werden kann. Da es sich um das Marktzulassungsverfahren für passive Brandschutzmaterialien handelt, bietet es auch ideale Voraussetzungen die Wirksamkeit mit aktiven Brandschutzeinrichtungen zu vergleichen und verstärkende oder abschwächende Effekte festzustellen, wenn beide Verfahren gleichzeitig zum Einsatz kommen.

In der amerikanischen Norm „CFR 49 Part 179 - SPECIFICATIONS FOR TANK CARS“ [11] wird für passive Schutzeinrichtungen in Paragraf §179.18 folgendes vorgeschrieben:

„When the regulations in this subchapter require thermal protection on a tank car, the tank car must have sufficient thermal resistance so that there will be no release of any lading within the tank car, except release through the pressure release device, when subjected to: (1) A pool fire for 100 minutes; and (2) A torch fire for 30 minutes“ [11].

Die Behörde verlangt einen Beleg für die Erfüllung dieser Auflagen und bezieht sich nicht nur auf den Druckbehälter selbst sondern auch auf alle Anbauteile und Tragrahmen. Wenn die Ergebnisse Mängel aufweisen, müssen entweder bereits zugelassene Systeme verwendet werden oder bei Einführung neuer Systeme wird auf das Testverfahren in Anhang B der Norm verwiesen.

„When the analysis shows the thermal resistance of the tank car does not conform to paragraph (a) of this section, the thermal resistance of the tank car must be increased by using a system listed by the Department under paragraph (c) of this section or by testing a new or untried system and verifying it according to appendix B of this part.“ [11].

2.1 Aufbau des Prüfstandes

Im Anhang B aus [11] werden die Anforderungen an den Prüfstand für die Zulassung neuer Schutzsysteme erörtert.

„A square bare plate with thermal properties equivalent to the material of construction of the tank car must be used. The plate dimensions must be at least four feet by four feet by nominal 1.6 cm (0.625 inch) thick“ [11].

Als Prüfkörper soll eine quadratische Platte mit ähnlichen thermischen Eigenschaften wie das verwendete Material für den zu prüfenden Behälter verwendet werden. Die Platte soll eine Seitenlänge von vier Fuß aufweisen und $\frac{5}{8}$ Zoll dick sein. Weil in Europa metrische Einheiten verwendet werden, sind Stahlplatten in unterschiedlichen Normstärken erhältlich. Stahlplatten mit 16mm Dicke sind nicht erhältlich, daher musste eine 15 mm starke Platte mit 1200 mm Seitenlänge verwendet werden. Um die thermischen Eigenschaften realitätsgetreu nachzustellen, wird eine Stahlsorte ausgewählt, die für den Druckapparatebau bis 400°C zugelassen ist und die Platte aus P265GH mit einer Zugfestigkeit bei 20 °C von $265 \frac{N}{mm^2}$ gefertigt [12].

„The bare plate holder must be constructed in such a manner that the only heat transfer to the back side of the plate is by heat conduction through the plate and not by other heat paths“ [11].

Um die Platte während des Versuches abzustützen, werden auf der Plattenrückseite vier Laschen angeschweißt. Durch die Laschen kann die Platte mit einem Rahmen aus U-Formrohren verschraubt werden. Um mehrere Tests mit unterschiedlichen Materialien durchführen zu können, müssen mehrere Platten gefertigt, beschichtet und mit dem Rahmen verschraubt werden. Dadurch können die Platten im Vorhinein präpariert werden und die Änderungen müssen nicht am Versuchsaufbau selbst durchgeführt werden. Da der Rahmen schmaler ist als die Platte und der Probenkörper nicht am Rahmen aufliegt, kann ausgeschlossen werden, dass die Rückseite durch den Rahmen erwärmt wird. Zusätzlich bietet der Rahmen die Möglichkeit, die Neigung der Platte durch eine Reihe von Bohrungen, durch die der Haltebolzen der Abstrebung versetzt werden kann, zu verstellen. Dies soll zukünftig weitere Untersuchungen erlauben, ob flache Einfallswinkel der Flamme erosive Effekte auf Beschichtungen haben können.

„The bare plate must be instrumented with not less than nine thermocouples to record the thermal response of the plate. The thermocouples must be attached to the surface not

exposed to the simulated torch and must be divided into nine equal squares with a thermocouple placed in the center of each square” [11].

Um die Temperatur der Platte aufzuzeichnen, soll diese mit Thermoelementen instrumentiert werden. Eine exakte Messung der Oberflächentemperatur eines Körpers ist mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Das Thermoelement muss an der Oberfläche anliegen. Um die Oberflächentemperatur exakt zu messen muss darauf geachtet werden, dass das Ergebnis nicht durch Grenzschichtprozesse, wie freie und erzwungene Konvektion, die die Messstelle kühlen, verfälscht wird. Zusätzlich muss die verwendete Montagetechnik den vorherrschenden Temperaturen standhalten. Es sind Oberflächenthermoelemente erhältlich, die aus einer Klebefolie, in der ein Thermoelement eingebettet ist, bestehen. Diese sind allerdings meistens nur bis 200 °C verwendbar, da die Folie bei höheren Temperaturen verbrennt. Daher wird die Platte in neun Quadrate mit einer Seitenlänge von 40 cm geteilt. In der Mitte jedes Quadrates wird ein Stahlquader von 10x10x30 mm geschweißt. In die Seitenfläche, die die Platte berührt, wird ein 20 mm langer und 1,8 mm breiter und tiefer Schlitz eingefräst. In diesen kann ein Mantelthermoelement mit einem Durchmesser von 1,6 mm eingesteckt werden und liegt mit der Messperle an der Platte an. Diese Methode der Befestigung erlaubt eine einfache aber präzise Montage der Sensorik und verhindert gleichzeitig Messfehler durch Konvektion an der Messstelle.

2.1.1 Löschanlage

Wie bereits erwähnt soll zusätzlich die Wirksamkeit von Berieselungsanlagen untersucht werden können. Das Ziel ist, auf der Platte einen gleichmäßigen Wasserfilm zu erzeugen, der auf der Platte nach unten abläuft und dabei die Platte kühlt. Damit die benötigten Komponenten die Platte nicht abdecken und die Flamme beeinträchtigen, werden auf der Plattenrückseite zwei Laschen angebracht, die über die Platte hinausragen. An diesen können zwei Rohrschellen befestigt werden, die ein horizontales Rohr mit einer Länge von 1210 mm halten. In dem Rohr sind 24 Bohrungen mit einem Durchmesser von 1,5 mm im rechten Winkel zur Längsachse. In der Mitte befindet sich ein T-Stück an dem über eine Storz-C-Kupplung ein Schlauch angeschlossen werden kann, um die Löschanlage mit Wasser zu versorgen. Aufgrund der hohen thermischen Belastung der Löschanlage wird diese ebenfalls aus P265GH mit einem Nenndurchmesser von 2 Zoll gefertigt. Der große Durchmesser und die Wassereinspeisung in der Mitte der Löscheinrichtung dienen dazu, die Strömungsgeschwindigkeit im Rohr so gering wie möglich zu halten, damit nur geringe

Druckverluste entlang des Rohres entstehen und alle Düsen gleichmäßig mit Wasser versorgt werden. Vom Bundesfeuerwehrverband Österreich wird für durch Gasbrände direkt beflamnte Lagerbehälter eine Kühlwassermenge von $15 \frac{l}{m^2 min}$ festgelegt [1]. Für die Auslegung der Berieselungsanlage wird der vorgegebene Wert als Mindestdurchflussmenge definiert.

Vor der Fertigung muss bestimmt werden wie viele Bohrungen notwendig sind, um den gewünschten Volumenstrom aus der Löscheinrichtung zu erhalten. Man muss hierbei vor allem beachten, wie das Wasser aus den Bohrungen austreten soll. Für die Ausbildung eines Films ist ein dünner geschlossener Strahl am besten geeignet. Ein Sprühnebel wäre ungeeignet, da zu viel Löschmittel vom Impuls der Flamme verschleppt würde. Man muss daher abwägen, welche Bohrungsdurchmesser und wie viele Bohrungen verwendet werden. Zur Berechnung kann man fundamentale Gleichungen der Strömungslehre anwenden. Man bildet die Bohrung als eine Verjüngung eines großen Querschnittes auf einen kleinen mit dem Durchmesser der Bohrung mit der Wandstärke des Rohres als Länge ab. Wasser fließt durch das vorherrschende Druckgefälle zwischen Rohr und Umgebung durch die Bohrung und wird auf hohe Geschwindigkeit beschleunigt. Da keine Höhenunterschiede berücksichtigt werden müssen, kann die Austrittsgeschwindigkeit mit Hilfe der Toricelli-Gleichung mit Rohrreibungsverlusten berechnet werden.

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \left(1 + \frac{\lambda \cdot l}{d} + \zeta\right)}} \left[\frac{m}{s}\right] \quad (2-1) [13]$$

Die Austrittsgeschwindigkeit aus einer Bohrung ist somit nur über den Druck variierbar, sofern die Dichte als konstant angenommen wird. Die Reibungsverluste sind von der Geometrie und Oberflächenrauheit abhängig und somit nicht beeinflussbar. Mit der Kontinuitätsgleichung kann der austretende Massenstrom berechnet werden. Erweitert man die Gleichung um die Variable n , die die Anzahl der Bohrungen repräsentiert, erhält man

$$\dot{m} = n * u * A * \rho = n * u * \frac{d^2 \pi}{4} * \rho \left[\frac{kg}{s}\right] \quad (2-2) [13]$$

Abschließend kann aus Gleichung 2-2 die Anzahl der Bohrungen berechnet werden.

$$n = \frac{4\dot{m}}{u\rho d^2\pi} [-] \quad (2-3)$$

Für die Versuche sollen Volumenströme von $15-30 \frac{l}{m^2 min}$ möglich sein. Der Betriebsdruck soll 6 bar betragen und der Bohrungsdurchmesser 1 mm. Aus dem Moody-Diagramm [13] kann für turbulente Strömung ein Reibungszahl von $\lambda = 0,066$ abgelesen werden. Der

Druckverlustbeiwert für plötzliche Verjüngungen beträgt $\zeta = 0,5 [-]$ [13]. Die Wandstärke des Rohres beträgt 2 mm.

Für einen Volumenstrom von $15 \frac{l}{m^2 \cdot min}$ werden folglich 17 Bohrungen benötigt, bei $30 \frac{l}{m^2 \cdot min}$ sind 34 Bohrungen notwendig. Die Löscheinrichtung wird daher mit 24 Bohrungen mit einem Durchmesser von 1 mm versehen. Durch Regelung des Drucks über ein Drosselventil kann der gewünschte Volumenstrom erreicht werden.

In ersten Testversuchen hat sich gezeigt, dass nicht mehr als $27 \frac{l}{m^2 \cdot min}$ erreichbar sind und das Strahlbild aufgrund der hohen Geschwindigkeiten nicht optimal ist. Die Bohrungen werden daher nachträglich auf 1,5 mm vergrößert. Dies ermöglicht die Variation des Volumenstroms von $4-48 \frac{l}{m^2 \cdot min}$ mit geschlossenen Wasserstrahlen.

Der gesamte Aufbau ist in Form von Fertigungszeichnungen aus Abbildung 8 zu entnehmen.

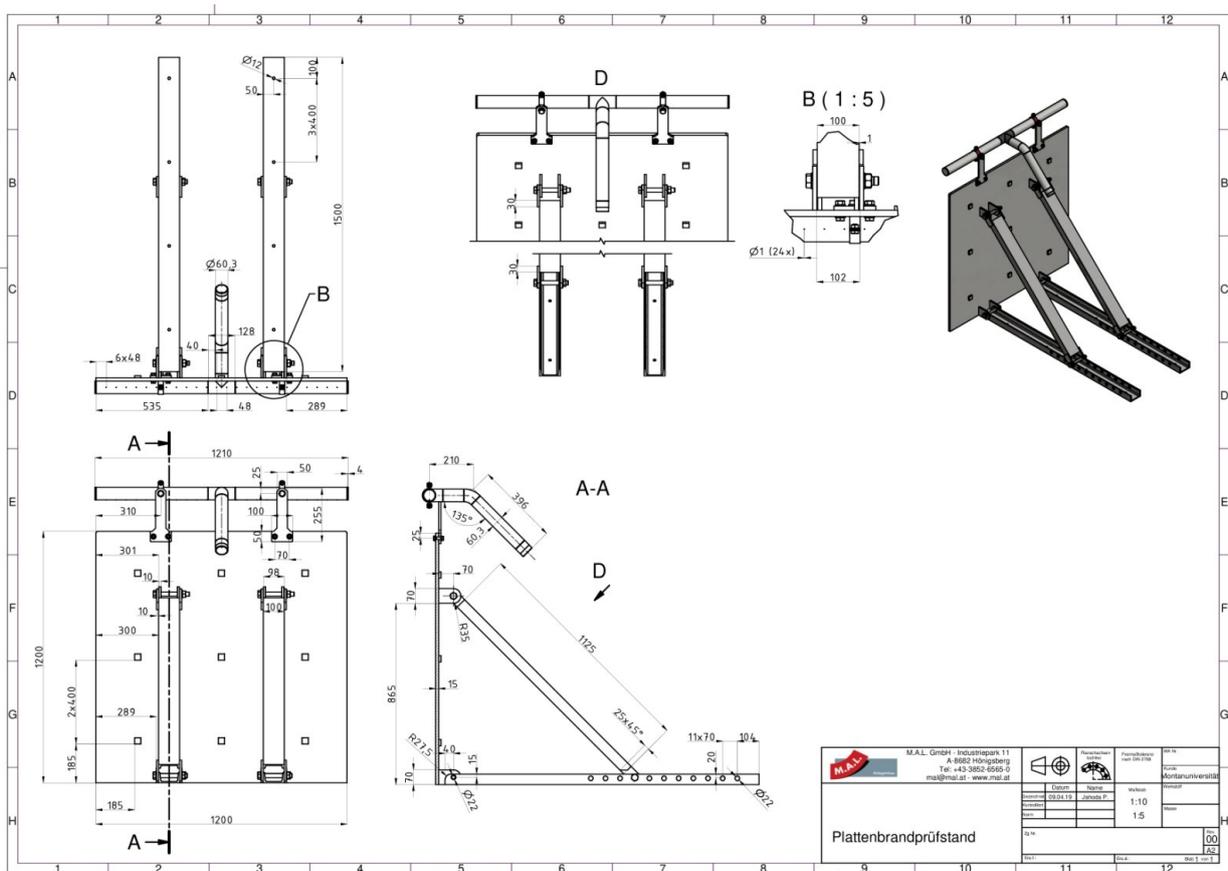


Abbildung 8: Fertigungszeichnung Plattenbrandprüfstand

2.2 Versuchsablauf

Für die Zulassung von passiven Schutzeinrichtungen auf einem Prüfstand entsprechend der Vorgaben der Norm [11] ist der Versuchsablauf wie folgt definiert:

„(3) Before exposure to the simulated torch, none of the thermocouples on the back side of the thermal protection system configuration may indicate a plate temperature in excess of 37.8 °C (100 °F) nor less than 0 °C (32 °F). (4) The entire outside surface of the thermal protection system must be exposed to the simulated torch-fire environment. (5) A torch-simulation test must be run for a minimum of 30 minutes. The thermal protection system must retard the heat flow to the plate so that none of the thermocouples on the backside of the bare plate indicate a plate temperature in excess of 427 °C (800 °F). (6) A minimum of two consecutive successful torch-simulation tests must be performed on each thermal protection system.”

Um Einflüsse durch Umgebungsbedingungen zu minimieren, darf die Temperatur der Platte zu Beginn des Versuchs nicht mehr als 37,8 °C betragen. Die Flamme soll in die Mitte der beschichteten Platte gerichtet werden und diese auf der ganzen Fläche beflammen. Der Test ist erfolgreich abgeschlossen, wenn das Schutzsystem die Plattentemperatur durch Reduktion des Wärmestroms nach einer Zeitspanne von 30 Minuten unter 427 °C halten kann. Übersteigt die Temperatur den Grenzwert ist das getestete System nicht für den Einsatz geeignet und muss abgelehnt werden. Für eine Zulassung sind mindestens zwei aufeinanderfolgende erfolgreiche Tests notwendig.

Bevor der Prüfstand für Versuche verwendet werden kann muss auch dieser überprüft werden. Hierfür soll eine unbeschichtete Platte einer direkten Beflammung ausgesetzt werden um zu überprüfen, ob der übertragene Wärmestrom den Vorgaben der Norm entspricht. In einem Zeitraum von 3:30 bis 4:30 min nach dem Entzünden der Flamme, müssen mindestens 2 Thermoelemente 427 °C anzeigen. Dieser erste Test wird für die in den folgenden Kapiteln präsentierten Messergebnisse genutzt, um die Wirksamkeit von Kühlmaßnahmen zu überprüfen.

3 Rohrbrandprüfstand

Rohrleitungen sind zentrale Elemente in Industrieanlagen. Abgesehen von Edukt- und Produktleitungen wird eine Vielzahl von Medien in industriellen Prozessen mittels Rohrleitungen, vor allem prozessintern, transportiert. Diese können genau wie Druckbehälter von einem Brandszenario wie den „impinging Jet“ betroffen sein und stehen falls erforderlich unter hohem Druck. Man muss sich daher die Frage stellen, wie sich diese im Brandfall verhalten. Der Unterschied zu Lagerbehältern besteht darin, dass diese, solange die Anlage im Betrieb ist, durchflossen sind. Die Strömung im Inneren ist daher in der Lage große Wärmeströme aus den beflamten Zonen durch erzwungene Konvektion ähnlich eines primitiven Wärmetauschers abzuführen. Dies führt zu einem Kühlungseffekt und verringert dadurch das Ansteigen der Rohrwandtemperaturen, das zum Bersten der Rohre führen kann.

3.1 Prüfstand

Um untersuchen zu können wie groß der innen abgeführte Wärmestrom ist und ob der innere Kühleffekt so groß ist, dass externe Kühlmaßnahmen durch aktive Schutzeinrichtungen keine signifikant höhere Kühlrate ermöglichen, wird ein weiterer Prüfstand aufgebaut.

Der Rohrbrandprüfstand soll eine Rohrleitung nachstellen, die auf einem Abschnitt von einer Jetflame beflammt wird. Es sollen dadurch die Auswirkungen eines Flanschbrandes auf benachbarte Rohrbauten untersucht werden. Das zwei Meter lange Rohr mit einem

Innendurchmesser von 105 mm wird über Storz B-Kupplungen und einem 3 Zoll Stutzen mit Wasser durchflossen. Beim Durchfließen wird das Wasser durch die beheizte Rohrwand erwärmt und fließt über ein Drosselventil ab. Das Drosselventil ist notwendig, um Druck im Rohr aufzubauen und das Rohr vollständig mit Wasser zu füllen. Durch den hohen Innendurchmesser muss davon ausgegangen werden, dass sich eine radiale Temperaturverteilung in der Strömung einstellt. Da der übertragene Wärmestrom aufgrund der Wasseraustrittstemperatur ermittelt werden soll, hängt die gemessene Temperatur von der Position des Thermoelementes in der Strömung ab und kann zu hohen Messfehlern führen. Daher wird in Strömungsrichtung nach der beheizten Zone ein statischer Mischer im Rohr eingeschweißt, um das Wasser zu durchmischen. Ein Temperaturprofil in radialer Richtung wird dadurch vermieden und es kann ein einheitlicher Wert gemessen werden.

Für die Temperaturbestimmung werden zwei 1,6mm Mantelthermoelemente durch Klemmverschraubungen in der Mitte des Rohres platziert. Das erste Thermoelement misst nach dem Einlass die Einlasstemperatur des Wassers und das zweite misst nach dem statischen Mischer die Auslasstemperatur. Es ist hierbei wichtig dünne und sensible Sensoren zu verwenden, damit auch kleine Temperaturunterschiede verlässlich aufgezeichnet werden können. Sind die Thermoelemente zu träge, werden Temperaturerhöhungen zu spät registriert, weil es zu lange dauert bis der Sensor im thermischen Gleichgewicht mit dem Wasser ist. Der ermittelte Wärmestrom wäre dadurch verfälscht.

Der Wärmestrom aus den gemessenen Temperaturunterschieden zwischen Einlass und Auslass wird wie folgt berechnet.

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_{Aus} - T_{ein}) [W] \quad (3-1) [14]$$

Für die Berechnung ist zusätzlich der Massenstrom des Wassers notwendig. Dieser muss daher mit einem Volumenstromgeber gemessen und in den Massenstrom umgerechnet werden.

Der Versuchsaufbau wird horizontal in einer Höhe von 500 mm aufgeständert. Der gesamte Aufbau ist in Abbildung 9 ersichtlich.

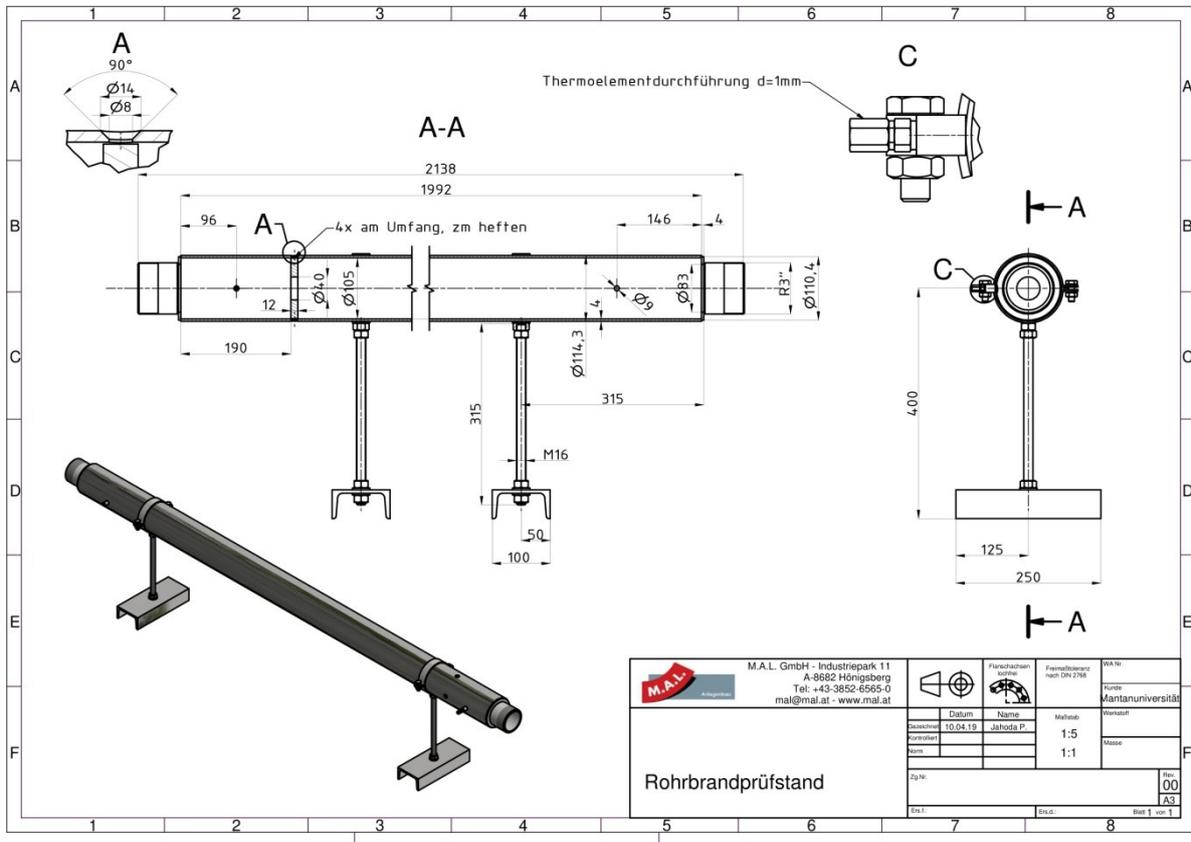


Abbildung 9: Fertigungszeichnung Rohrbrandprüfstand

3.2 Versuchsablauf

Für die Untersuchung des Effekts der zusätzlichen externen Kühlung von direkt beflammt durchflossenen Rohren wird die Flamme auf die Mitte des Rohres gerichtet. Durch Öffnen eines Drosselventils am Auslass kann ein konstanter Volumenstrom Wasser, das durch den Versuchsaufbau fließt, eingestellt werden.

Nach dem Versuchsbeginn stellt sich aufgrund des eingetragenen Wärmestroms eine Temperaturdifferenz der Wasserströmung zwischen Einlass und Auslass ein. Es wird nun solange gewartet, bis die Temperaturdifferenz konstant bleibt und sich das System im thermischen Gleichgewicht befindet. Ab diesem Zeitpunkt kann die Wärmemenge bestimmt werden, die das Wasser aus der beheizten Zone abführt und somit die innere Kühlrate berechnet werden.

Anschließend wird mit der externen Kühlung durch einen Löschangriff mit unterschiedlichen Löschmittelraten und Strahlformen begonnen. Durch den zusätzlich von außen abgeführten Wärmestrom nimmt die Wandtemperatur weiter ab und die innere Kühlrate wird, bei weiterhin konstantem Volumenstrom, geringer. Wenn das System im neuen Gleichgewicht ist, kann die Effektivität der externen Kühlung anhand der verminderten internen Kühlung untersucht werden.

4 Experimentelle Ergebnisse

Plattenbrandprüfstand

Für die Durchführung der Versuchsreihe wird von der Feuerwehr- und Zivilschutzschule Steiermark ein Übungsgelände angemietet. Es ist eine betonierte Freifläche vorhanden, in deren Mitte eine 1 Zoll Gasleitung aus dem Boden kommt, die mit einem LPG-Tank verbunden ist. Über ein Ventil kann aus der Leitung in circa 60 cm Höhe Gas unter Tankdruck in horizontale Richtung freigesetzt werden. Durch leichtes Öffnen wird eine kleine Vorflamme mit einem Gasbrenner entzündet. Danach wird das Gasventil vollständig geöffnet und das ausströmende Gas bildet eine Jetflame aus.

Der Plattenbrandprüfstand wird so positioniert, dass die Flammenachse auf die Mitte des Probenkörpers gerichtet ist. Damit die Platte vollständig beflammt wird, ist die Gasaustrittsöffnung 2,1 m vom Versuchsstand entfernt. Die Flamme kann sich über diese Strecke soweit ausbilden, dass der gesamte Prüfstand erfasst wird. In der bestehenden Gasinstallation ist kein Massenstromgeber vorhanden und kann damit nicht direkt erfasst werden. Für die Sicherstellung gleicher Versuchsbedingungen wird der Tankdruck, der über ein Manometer ablesbar ist, überwacht. Zwischen den Versuchen wird so lange gewartet, bis sich der Tankdruck wieder stabilisiert hat.

4.1 Aufbau der Wasserversorgung

Für die Wasserversorgung der Löscheinrichtung steht das örtliche Hydrantennetz zur Verfügung. Um den benötigten Volumenstrom zu erzielen muss der Wasserdruck reduziert werden. Damit dies nicht während des Versuchs eingestellt werden muss und durch Abweichungen die Ergebnisse verfälscht, wird die Wasserversorgung wie folgt aufgebaut. Aus dem Hydranten wird Wasser über einen 40 m lang C-Schlauch durch ein Drosselventil geleitet. Am Auslass des Ventils wird ein Ultraschall-Durchflussmessgerät (Siemens SITRANS F) angeschlossen. Hinter dem Volumenstromgeber ist ein Kugelhahn montiert, an dem, über einen weiteren C-Schlauch mit einer Länge von 30 m, die Löscheinrichtung angeschlossen wird. Vor dem Versuch wird durch Öffnen des Kugelhahns die Wasserversorgung eingeleitet. Mit dem Drosselventil wird durch Ablesen des Volumenstromes die gewünschte Durchflussmenge durch Drosselung eingestellt. Ist der Sollwert erreicht, wird durch Schließen des Kugelhahns die Wasserversorgung wieder unterbrochen. Da die Stellung des Drosselventils unverändert bleibt, wird durch erneutes Öffnen des Kugelhahns während des Versuchs sofort der benötigte Volumenstrom erreicht und die richtige Wassermenge kann dadurch verlässlich bereitgestellt werden.

Zusätzlich zur Berieselungsanlage soll die Effektivität von Kühlmaßnahmen durch Einsatzkräfte untersucht werden. Hierfür wird mit zwei unterschiedlichen Standard Löschgeräten der Feuerwehr die Platte gekühlt. Diese benötigen höhere Drücke als das Hydrantennetz zur Verfügung stellen kann. Daher wird zusätzlich ein Tanklöschfahrzeug (TLF) mit einem Maschinisten zur Bedienung der Pumpe benötigt. Die Wassermengen sind durch die Löschgeräte vorgeben und müssen daher nicht eingestellt werden. Kurz vor Beginn der Kühlmaßnahme wird die Pumpe des TLF gestartet und das Löschgerät unter Druck gesetzt und durch Aktivieren durch den Bediener die Intervention gestartet.

4.2 Aufbau der Instrumentierung

4.2.1 Temperaturmessung mittels Thermoelementen

Zur Instrumentierung des Versuchsstandes werden, wie in Kapitel 2 beschrieben, neun Mantelthermoelemente Typ-K mit einem Durchmesser von 1,6 mm verwendet. Die Sensoren werden mit wasserdichten Steckverbindern mit je 20 m Thermoelementausgleichsleitungen verbunden. Die Signalleitungen werden hinter dem Prüfstand gebündelt und vom

Versuchsaufbau weggeführt. Die Auswertelektronik, Thermoelement-Messkarte NI-9213 von National Instruments, und die dafür benötigten Computer sind in 15m Entfernung in einem Zelt aufgebaut, um sie vor Wärmestrahlung und vor allem Spritzwasser zu schützen. Vom Zelt aus wird der Versuch überwacht und zu setzende Handlungen dirigiert. Die verwendeten Kabel sind für Temperaturen bis zu 200 °C ausgelegt. Da auch hinter der Platte mit hoher Wärmestrahlung zu rechnen ist, werden die Leitungen mit Keramikwolle isoliert, um Beschädigungen zu vermeiden.

Für die Ermittlung der Flammentemperatur kommt ein Keramikmantelthermoelement Typ S zum Einsatz. Dieses wird auf einem Stahlstativ befestigt und in der Flammenachse montiert. Aufgrund des langen Keramikrohres wird die Flamme nur minimal beeinflusst. Obwohl der gesamte Aufbau mit mehreren Lagen 2 cm Keramikwollmatten und einer reflektierenden Aluminiumfolie isoliert ist, ist die Anschlussleitung aufgrund der hohen Temperaturen der Anschlusskontakte im Inneren der Isolierung so stark verschmort, dass ein Kurzschluss die Flammentemperaturmessung beschädigt. Dies kann vor Ort nicht repariert werden und diese Messwerte können in der Auswertung nicht berücksichtigt werden. Für zukünftige Messungen wird ein Absaugpyrometer angeschafft, da die Gastemperatur der Flamme gemessen mit Thermoelementen aufgrund der Wärmestrahlung ohnehin im Nachhinein rechnerisch ermittelt werden muss.

Die korrekte Protokollierung der ermittelten Messdaten ist für die nachfolgende Auswertung essentiell. Da für die Signalerfassung der Thermoelemente Hardware von National Instruments zum Einsatz kommt, wird im Programm LabVIEW eine Versuchssteuerung programmiert. Die primäre Funktion stellt die Abbildung der aktuellen Messdaten dar. In Abbildung 10 ist ersichtlich, dass die Daten in einem Diagramm und als Zahlenwert aufgelistet werden. Zur einfachen Visualisierung der Temperaturverteilung werden die Temperaturwerte zusätzlich in einem dreidimensionalen Balkendiagramm dargestellt. Die Position des Balkens auf der xy-Ebene entspricht den Koordinaten des dargestellten Sensors auf dem Prüfstand. Die Höhe des Balkens in z-Richtung repräsentiert die aktuelle Temperatur. Weiters übernimmt die Software die Protokollierung der Messdaten. Die im Bedienungsfenster eingegebenen Werte für den Wasservolumenstrom und die Dichte werden verwendet, um den Massenstrom zu berechnen. Alle neun Temperaturwerte und eingegebenen Werte werden in einer Datenmatrix mit zugehörigem Zeitstempel als lvm-Datei in einem Intervall von einer Sekunde abgespeichert.

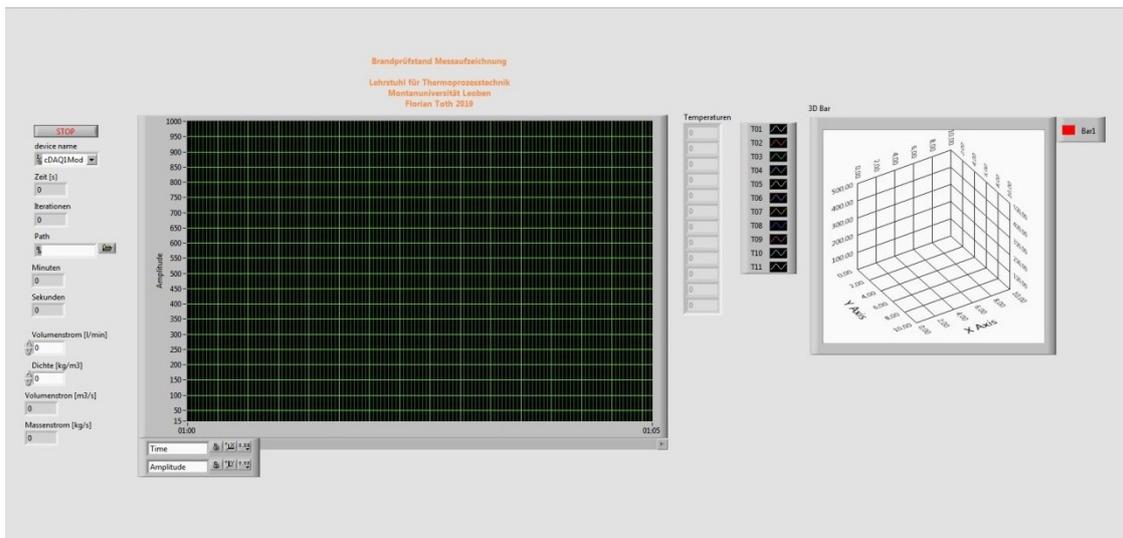


Abbildung 10: Versuchssteuerung Plattenbrandprüfstand

4.2.2 Wärmebildkamera

Um das Verhalten des Probekörpers beim Aktivieren der Berieselungsanlage festzustellen, vor allem wie sich die Temperaturverteilung entlang der Platte einstellt, muss festgestellt werden, dass die vorhandenen Thermoelemente nicht die dafür benötigte räumliche Auflösung bieten. Es besteht die Möglichkeit die Anzahl der Thermoelemente zu erhöhen, um mehr Messstellen zu erhalten und die Daten in Flächendiagrammen darzustellen. Die dadurch gewonnenen Ergebnisse können aber nur so aussagekräftig wie die Anzahl der Messpunkte sein. Daher wird zusätzlich zur Temperaturmessung hinter dem Prüfstand eine Wärmebildkamera (VarioCAM head HiRes 640) installiert. Die erhaltenen Messdaten werden nach den Versuchen in Wärmebilder umgerechnet. Der Temperaturverlauf ist dadurch über die ganze Plattenfläche ersichtlich. Wärmebildkameras ermitteln die Temperatur einer Oberfläche anhand der emittierten Wärmestrahlung. Für die exakte Messung der Temperatur ist daher die Bestimmung des Emissionskoeffizienten der Probe essentiell.

4.2.2.1 Bestimmung des Emissionskoeffizienten

Für die Bestimmung des Emissionskoeffizienten muss eine Probe aus dem Material der zu bestimmenden Oberfläche erwärmt werden. Hierfür wird bei der Auftragserteilung für die Fertigung des Prüfstandes gefordert aus dem gleichen Rohmaterial, aus dem der eigentliche Probekörper geschnitten wird, eine 5 mal 5 cm große Stahlprobe für die Bestimmung des Emissionskoeffizienten zu erhalten. In die Probe wird ein 25 mm tiefes Sackloch in der Mitte

einer Seitenfläche gebohrt, in das ein Thermoelement eingeschoben werden kann. Es dient dazu die Kerntemperatur der Probe zu ermitteln. Mit einem zweiten Thermoelement wird die Temperatur der Ofenatmosphäre eines Muffelofens, in dem die Probe erwärmt wird, gemessen. Wenn beide Sensoren den gleichen Wert erreichen, ist die Probe im thermischen Gleichgewicht mit dem Ofen und die Kerntemperatur entspricht der Oberflächentemperatur. Für die Temperaturmessung kommt ein Thermoelement Messgerät AHLBORN ALMEMO 2690 zum Einsatz.

Ist das Gleichgewicht erreicht, wird durch eine kleine Öffnung im Ofen mit der Wärmebildkamera die Oberflächentemperatur, unter der Annahme eines Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 1$, gemessen und protokolliert (Abbildung 11). Während der Versuchsreihe am Prüfstand wird mit Temperaturen zwischen 600 und 100 °C gerechnet, daher muss in diesem Bereich die Bestimmung durchgeführt werden. Die Messung wird im Temperaturbereich von 600 bis 550 °C in 25 °C Schritten und von 550 bis 50 °C in 50 °C Schritten wiederholt. Die Temperatur des Ofens wird dabei nach dem ersten Aufheizen auf 600 °C Schritt für Schritt durch Einstellen des neuen Sollwertes reduziert. Es wurden die in Tabelle 1 angeführten Daten erhoben.

Tabelle 1: Messdaten zur Ermittlung des Emissionskoeffizienten

T_{ofen} °C	T_{probe} °C	T_{IR} °C	T_{ofen} K	T_{probe} K	T_{IR} K	ϵ	-
595,1	595,1	575	868,25	868,25	848,15	0,9105	
579,3	579,3	561,1	852,45	852,45	834,25	0,9172	
554,8	554,8	536,2	827,95	827,95	809,35	0,9131	
547	547,1	529,4	820,15	820,25	802,55	0,9164	
504,1	504,3	489	777,25	777,45	762,15	0,9235	
452	452,2	438,1	725,15	725,35	711,25	0,9244	
401	401,4	386,5	674,15	674,55	659,65	0,9145	
349,4	350,1	336,4	622,55	623,25	609,55	0,9149	
321,4	321,1	308,3	594,55	594,25	581,45	0,9165	
259	261,1	250,9	532,15	534,25	524,05	0,9257	
208,5	209,5	201	481,65	482,65	474,15	0,9313	
150,1	151,8	145,6	423,25	424,95	418,75	0,9429	
93,4	93,3	87	366,55	366,45	360,15	0,9329	
54,4	54	45,8	327,55	327,15	318,95	0,9034	

Sind die tatsächliche Probentemperatur und die von der Wärmebildkamera mit $\varepsilon = 1$ bekannt, kann der Emissionskoeffizient der Stahlprobe bei den gegebenen Temperaturen mit Gleichung 4-1 berechnet werden.

$$\varepsilon = \left(\frac{T_{IR}}{T_{Probe}} \right)^4 [-] \quad (4-1) [14]$$

In Abbildung 12 ist der Verlauf des berechneten Emissionskoeffizienten gegen die Temperatur dargestellt. Man erkennt, dass über den gewählten Temperaturbereich der Wert des Emissionskoeffizienten relativ konstant verläuft und kein erkennbarer Trend messbar ist. Der Mittelwert beträgt $\bar{\varepsilon} = 0,9205 [-]$ mit einer Standardabweichung von $\sigma = 0,01 [-]$. Für die Messungen im Rahmen der Versuche wird folglich der Mittelwert als Emissionskoeffizient in der Bedienungssoftware der Wärmebildkamera eingetragen.



Abbildung 11: Versuchsaufbau Bestimmung des Emissionskoeffizienten

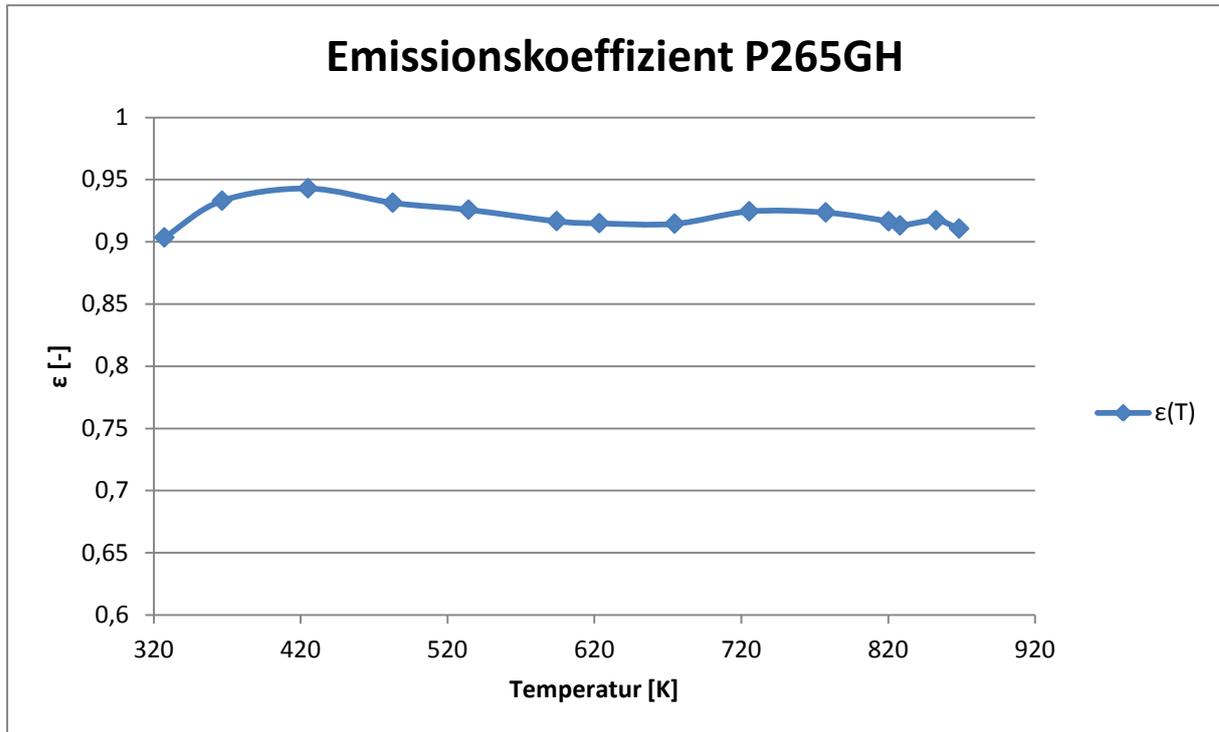


Abbildung 12: Verlauf des Emissionskoeffizienten mit steigender Temperatur einer P265GH Stahlprobe

4.3 Versuche am Plattenbrandprüfstand

Am Plattenbrandprüfstand werden sechs Versuche durchgeführt. Es werden unterschiedliche Arten der Kühlung und unterschiedliche Vorbrenndauern untersucht. Da die Versuche im Freien stattfinden, variieren die Umgebungsbedingungen. Durch Abwarten bei Windgeschwindigkeitsänderungen wird versucht die Bedingungen so konstant wie möglich zu halten. Weiters sinkt der Tankdruck aufgrund des abnehmenden Füllstandes im Laufe der Versuchsserie. Zwischen den Versuchen wird gewartet bis sich der Tankdruck stabilisiert. Erst dann wird der nächste Versuch vorbereitet. In Tabelle 2 und Tabelle 3 sind die Umgebungsbedingungen und Kühlmaßnahmen zusammenfassend aufgelistet.

Tabelle 2: Umgebungsbedingungen Plattenbrandversuche

Versuch	Tankdruck	Tankdruck	Windgeschwindigkeit	Volumenstrom	Zeitpunkt
	Start	Ende		Wasser	Kühlung
	bar	bar	kmh ⁻¹	lmin ⁻¹	s
P001	7,1	6,5	3,0	24,66	
P002	6,5	6,5	1,1	25,1	
P003	6,4	6,2	1,5	38,5	
P004	6,2	6,2	2,3	150	
P005	6,2	6,2	2,5	150	
P006	6,1	6,0	0,5	0	

Tabelle 3: Kühlmaßnahmen Plattenbrandversuche

Versuch	Kühlmethode
P001	Berieselung
P002	Berieselung
P003	Berieselung
P004	Hochdruckschnelleingriffseinrichtung
P005	Hochdruckschnelleingriffseinrichtung
P006	-

4.4 Versuch P001

Ziel des Versuches P001 ist zu untersuchen, ob die in Kapitel 2 beschriebenen Vorgaben erfüllt werden. Die Platte soll durch direkte Beflammung innerhalb der geforderten Zeitspanne von maximal 4:30 Minuten auf die Zieltemperatur von 427 °C erwärmt werden. Da die Platte nach dem Ablöschen der Flamme bereits hohe Temperaturen hat, wird zusätzlich das Verhalten des Probenkörpers untersucht, wenn ein aktives Schutzsystem aktiviert wird. Es soll dadurch beispielsweise die manuelle Aktivierung einer Berieselungsanlage nachgestellt werden, wenn die Wandtemperatur eines Druckbehälter bereits im kritischen Temperaturfenster liegt. Hierfür wird die Löscheinrichtung mit einem Volumenstrom im Mittel von $24,66 \frac{l}{min}$ beaufschlagt, das einem Volumenstrom von $17,13 \frac{l}{min m^2}$ entspricht. Die Abweichung vom Zielwert von $15 \frac{l}{min m^2}$ ist auf Druckschwankungen im Hydrantennetz zurückzuführen.



Abbildung 13: Versuchsaufbau Plattenbrandprüfstand



Abbildung 14: Versuch P001

In Abbildung 13 ist der Versuchsstand vor dem ersten Versuch abgebildet. Abbildung 14 zeigt, dass die Flamme wie gefordert den gesamten Probenkörper beaufschlagt, aber nicht hinter die Platte wirbelt und dort die Messergebnisse verfälscht.

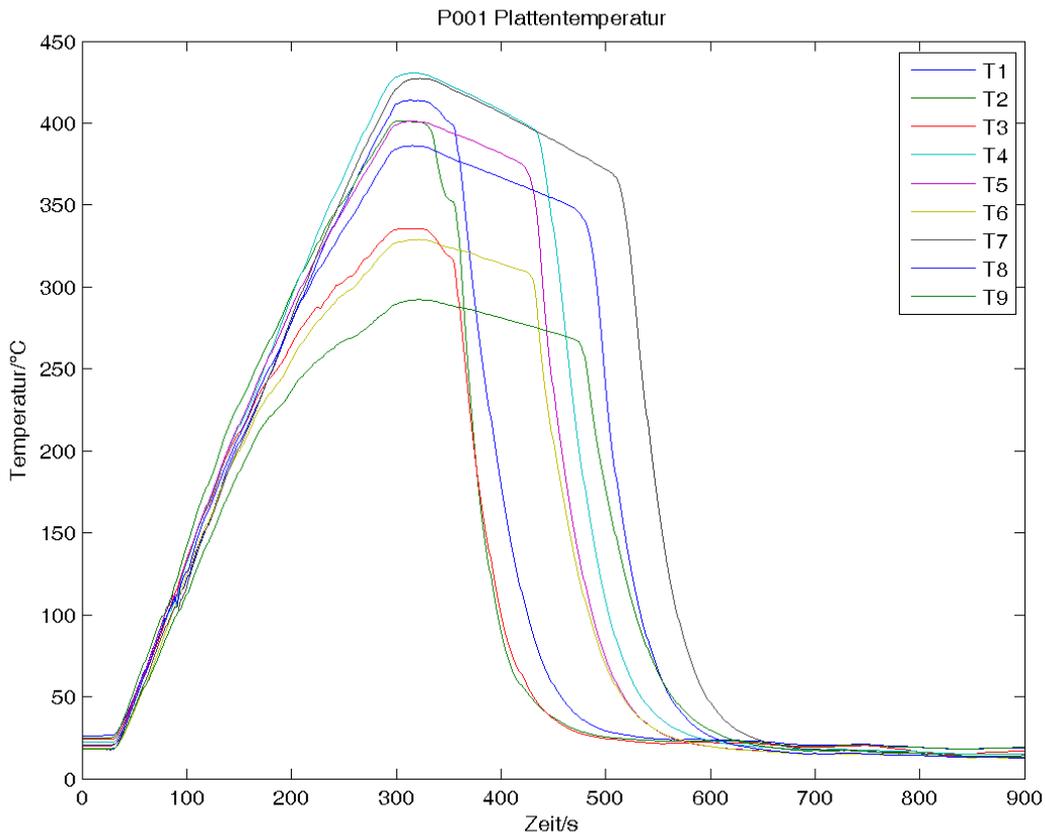


Abbildung 15: Plattentemperaturverlauf P001

Anhand des Temperaturverlaufes des Versuchs (Abbildung 15) ist ersichtlich, dass sich die Stahlplatte zu Beginn gleichmäßig erwärmt. Die Sensoren T4 und T7 übersteigen nach 4:28 Minuten die geforderte Temperatur. Die Zeitspanne wird damit gerade noch erfüllt. Die höhere Windgeschwindigkeit im Vergleich zu den anderen Versuchen aus einer Windrichtung senkrecht zur Flammenachse führt dazu, dass die Flamme mehrmals auf die rechte Seite des Versuchsstands gedrückt wird (Abbildung 16). Das linke Drittel der Platte wird daher für mehrere Sekunden nicht beflammt und reduziert die Aufheizrate. Um eine bessere Reproduzierbarkeit der Versuche zu erreichen, wird zukünftig die Brennerleistung erhöht, um die Grenztemperatur schneller zu erreichen. Im unteren Bereich der Platte erkennt man an der Temperaturkurve, dass der Wärmeeintrag geringer ist. Da der

Versuchsstand am Boden steht und die Flamme in die Mitte des Probenkörpers gerichtet ist, wird in Bodennähe ein stark ausgebildeter Wirbel beobachtet. Dies bewirkt, dass die Flamme im unteren Bereich die Platte nicht berührt und aus der Umgebung Sekundärluft ansaugt, die in die Wirbelzone eingemischt wird. Beides führt zur Verringerung der Plattentemperatur.

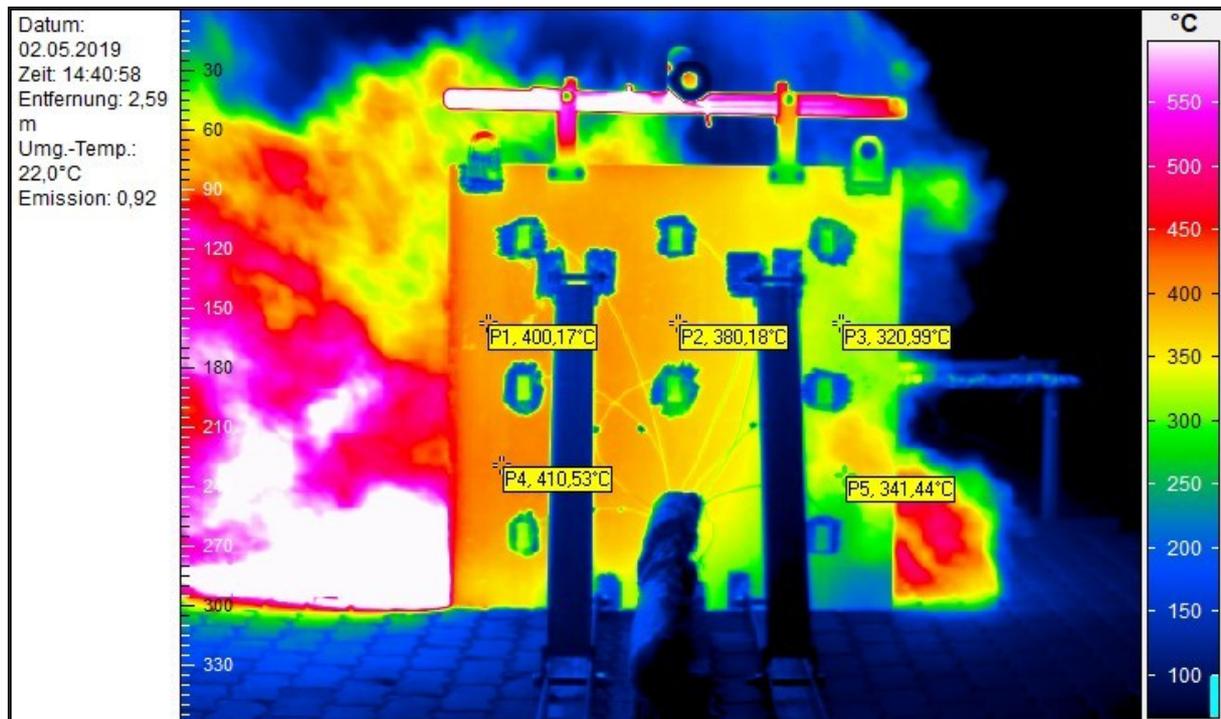


Abbildung 16: Seitenwindeffekt führt zu inhomogener Temperaturverteilung P001

Nach dem Erreichen der geforderten Temperatur wird die Flamme gelöscht und die Wasserversorgung der Löscheinrichtung aktiviert. Da das Rohr während des Beflammens nicht mit Wasser gefüllt ist, heizt sich dieses ebenfalls auf. Aus den Daten der Wärmebildkamera konnte eine Temperatur von 540°C ermittelt werden. Tritt kaltes Wasser in die Berieselungsanlage ein, verdampft dieses schlagartig und führt zu Druckstößen (Abbildung 17). Erst wenn das Rohr abgekühlt ist, wird eine effektive Kühlung möglich.

Beim Berieseln und Abkühlen der Platte werden zwei Effekte ersichtlich, deren starke Ausprägung nicht erwartet werden.

Die hohe Temperatur der Platte führt zum Verdampfen des Kühlwassers. Das Wasser trifft auf die Platte, bildet einen Film und läuft nach unten ab. Je länger der Wasserfilm mit der Platte in Berührung ist, desto höher wird die Temperatur der Grenzschicht zwischen Wasser und Platte bis diese letztendlich zu verdampfen beginnt, was dazu führt, dass der Wasserfilm abreißt, mehrere Zentimeter von der Platte abhebt und diese nicht mehr berührt (Abbildung 18). Diese Front wandert mit der Zeit die Platte entlang nach unten, bis diese das

Ende erreicht und erst dann wird die Platte auf der ganzen Fläche gekühlt. Vor dem Versuch wird die Berieselung zum Test bei kalter Platte in Betrieb genommen. Hierbei bildet sich ein Wasserfilm, der im Gegensatz zur heißen Platte, gleichmäßig die gesamte Länge abläuft.

Das Wandern der Front, ab der der Wasserfilm abreißt, manifestiert sich auch in den aufgezeichneten Temperaturen des Probekörpers (Abbildung 15). Man sieht, dass die Temperaturen nicht gleichzeitig abfallen, wie eine homogene Kühlung vermuten lassen würde, sondern zeitversetzt, wenn der Wasserfilm den Messpunkt erreicht. In den Daten der Wärmebildkamera erkennt man ebenfalls wie sich die Front ausbildet (Abbildung 19).



Abbildung 17: Verdampfung des Kühlwassers aufgrund hoher Berieselungsanlagentemperatur

Das schnelle inhomogene Abkühlen der Platte durch das Kühlwasser verursacht hohe Spannungen im Material, hervorgerufen durch die Temperaturverteilung. Die Konsequenz daraus ist, dass sich die Platte stark verzieht und verdeutlicht, wie in Kapitel 1 beschrieben, dass dies bei der Simulation von Druckbehältern unbedingt berücksichtigt werden muss.



Abbildung 18: Verdampfen des Kühlwassers führt zum Abriss des Wasserfilms

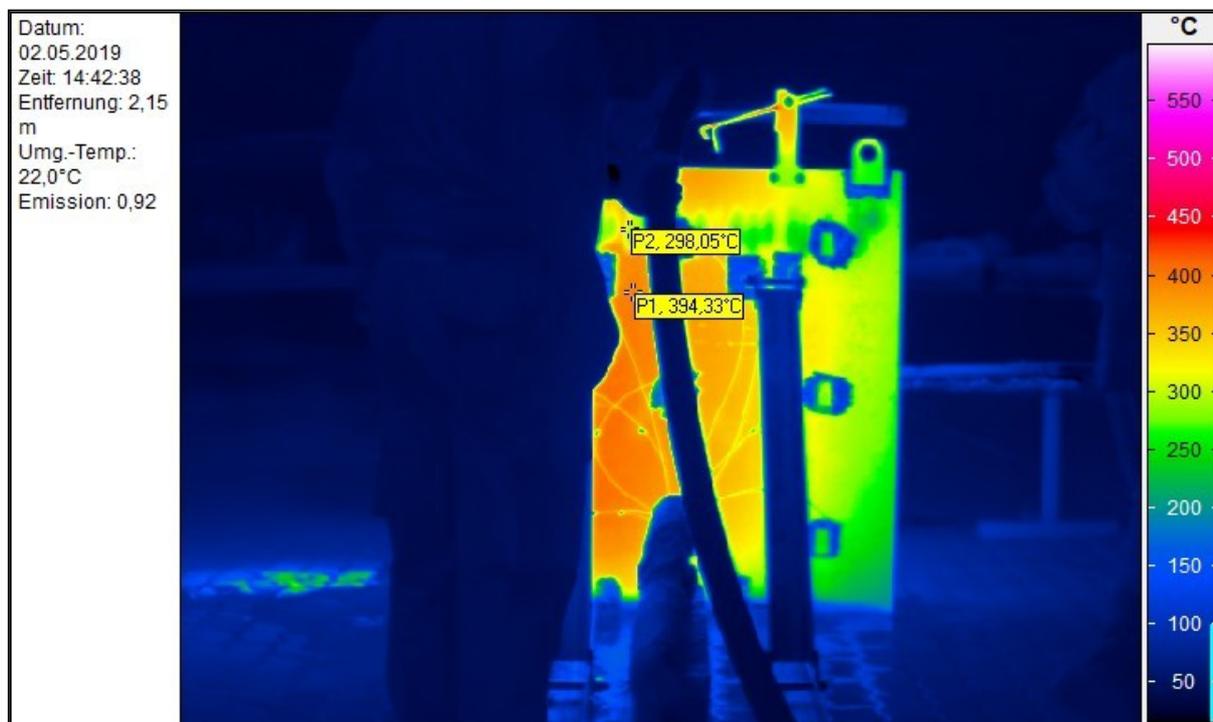


Abbildung 19: Ausbildung der Kühlfront

Der erste Versuch führt zu folgenden Erkenntnissen. Da Druckbehälter in der Regel im Freien positioniert sind, müssen auch aktive Schutzeinrichtungen für die vorliegenden Bedingungen ausgelegt werden. Eine Problematik hierbei ist, dass Schäden durch Frost vermieden werden müssen. Berieselungsanlagen sind daher in der Regel als Trockenanlagen ausgeführt. Das heißt, dass die Rohrleitungen nicht mit Wasser gefüllt sind. Wird ein Brand erkannt füllt sich durch Aktivieren von Pumpen und Öffnen von Ventilen die Anlage. Wird ein durch eine Berieselungsanlage geschützter Druckbehälter direkt beflammt, muss davon ausgegangen werden, dass auch die Schutzeinrichtung selbst beeinträchtigt wird. Heizt sich die Verrohrung zu stark auf und wird dann mit Wasser gefüllt, besteht die Möglichkeit der Beschädigung durch Druckstöße wie sie in Versuch P001 beobachtet werden. Es ist daher wesentlich, dass die Aktivierung von Schutzeinrichtungen durch ein Brandmeldesystem innerhalb kürzester Zeit durchgeführt wird, um die Betriebsfähigkeit sicherzustellen.

Werden Kühlmaßnahmen erst dann durchgeführt, wenn sich ein Druckbehälter bereits im kritischen Temperaturfenster befindet, muss damit gerechnet werden, dass die Kühlung zu Beginn nicht den gewünschten Erfolg aufgrund der Verdampfung des Kühlwassers liefert. Zusätzlich entwickeln sich hohe Spannungen im Behälter, die zur Schwächung des Materials führen können. Auch in diesem Fall können beide Problemstellungen durch kurze Interventionszeiten mit automatisch aktivierten Schutzeinrichtungen vermieden werden. Rechtzeitig gesetzte Maßnahmen zur Deeskalation verhindern, dass die Wandtemperaturen so weit steigen, dass dies zu Problemen führen kann.

4.5 Versuch P002

Anhand der in Versuch P001 gewonnenen Erkenntnisse, wird in Versuch P002 eine Berieselungsanlage nachgestellt, die ein Brandmeldesystem automatisch aktiviert. Die Platte wird während der Beflammung mit einem Kühlwasservolumenstrom von $17,4 \frac{l}{\text{min} m^2}$ beaufschlagt. Mit Hilfe des Temperaturverlaufs kann ermittelt werden, ob der in [1] vorgegebene Volumenstrom ausreicht, um das weitere Aufheizen der Platte zu verhindern. Hierfür wird eine Interventionszeit von 30 s angenommen. Die Flamme wird gezündet und nach Ablauf der Interventionszeit die Berieselungsanlage aktiviert.

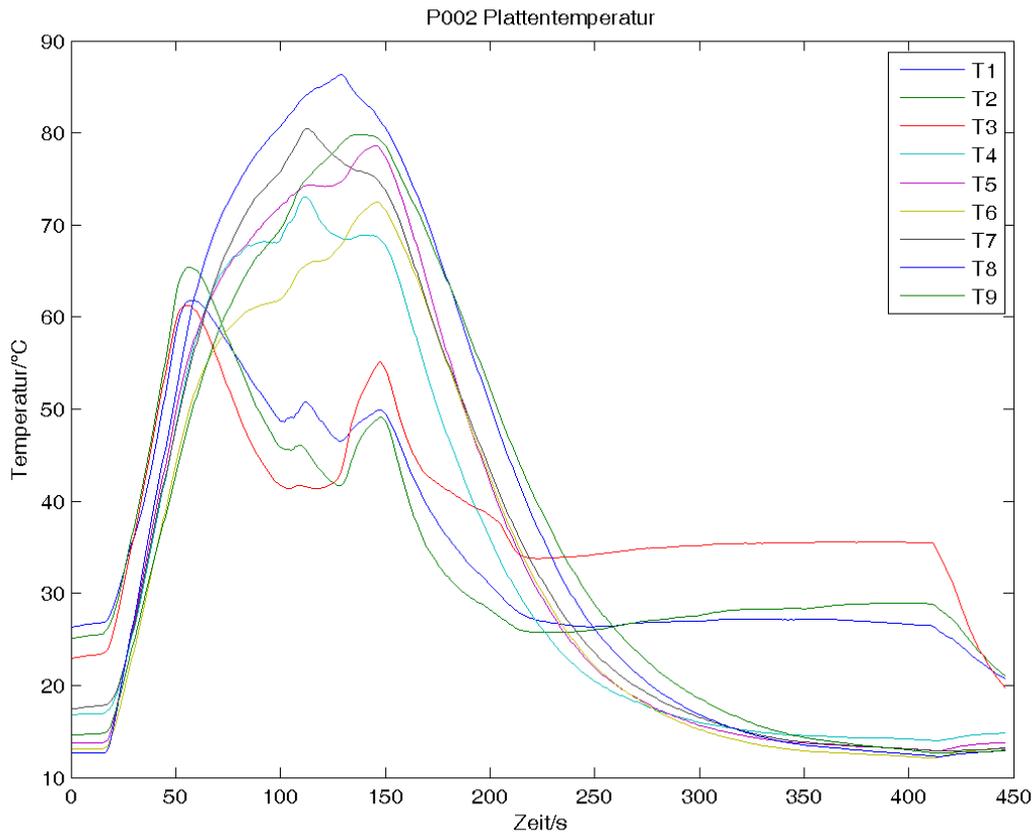


Abbildung 20: Plattentemperaturverlauf P002



Abbildung 21: Berieselung Versuch P002

Aus Abbildung 20 ist der Zeitpunkt der Aktivierung der Kühlmaßnahme an der Abnahme der Temperaturen T1 – T3 im oberen Bereich der Platte erkennbar. Jedoch im unteren Bereich der Platte wird der Temperaturanstieg T4- T9 nur verringert aber nicht umgekehrt. Das lässt den Schluss zu, dass der Volumenstrom lediglich für eine effektive Kühlung des ersten Drittels ausreicht. In Abbildung 22 ist die kühle Zone als horizontaler blauer Streifen erkennbar. Die Aufnahme der Wärmebildkamera zeigt daher ebenfalls, dass die Temperaturverteilung entlang der Platte inhomogen ist.

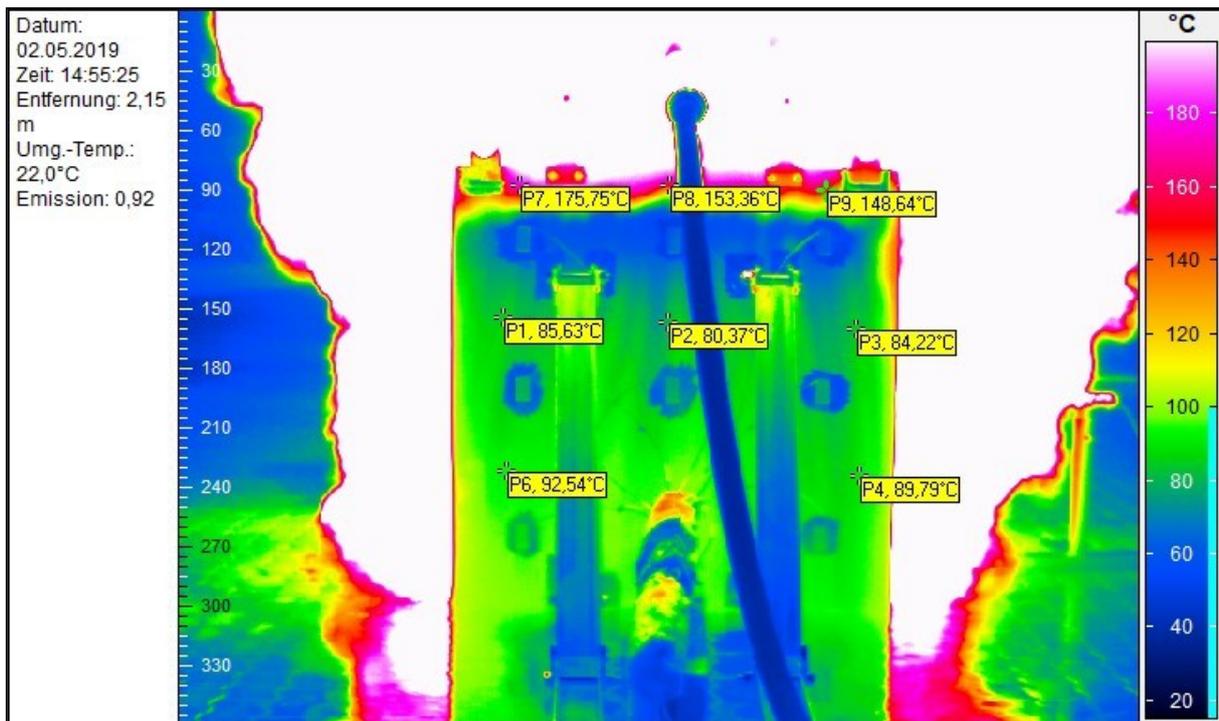


Abbildung 22: Ausbildung der gekühlten Zone Versuch P002

Der Versuch wird daher nach circa zwei Minuten abgebrochen, da bereits bei der Versuchsüberwachung offensichtlich ist, dass der gewählte Volumenstrom an Kühlwasser zu gering ist, um die Temperatur der Platte zumindest konstant zu halten.

Weiters kann beobachtet werden, dass ein Teil des Wassers durch den hohen Flammenimpuls von der Platte geschleudert wird und somit nicht zur Kühlung beitragen kann.

Die ermittelten Messdaten lassen die Schlussfolgerung zu, dass der in [1] vorgeschriebene Volumenstrom für die Kühlung direkt beflammter Druckbehälter nicht ausreichend ist.

4.6 Versuch P003

Der Ablauf von Versuch P002 wird in Versuch P003 mit auf $26,7 \frac{l}{min m^2}$ erhöhtem Kühlwasservolumenstrom wiederholt.

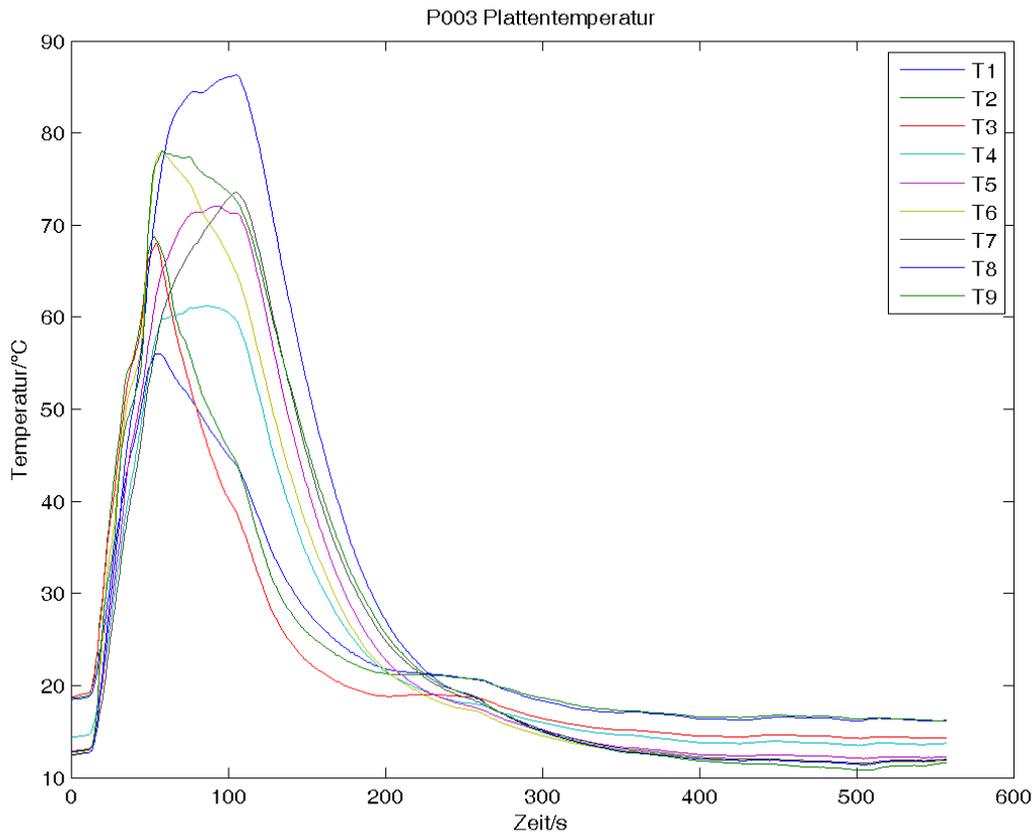


Abbildung 23: Plattentemperaturverlauf P003

Aus dem Temperaturverlauf (Abbildung 23) während des Versuches geht hervor, dass mit der eingesetzten Kühlwassermenge selbst während der Beflammung die Plattentemperatur stabilisiert werden kann. Die Flamme wird nach 125 s gelöscht. Die Sensoren in den oberen zwei Dritteln der Platte zeigen trotz des einwirkenden Wärmestroms eine Verringerung der Temperatur, während das untere Drittel stabilisiert werden kann. Der Volumenstrom ist damit ausreichend, um eine Eskalation im realen Schadensfall abzuwenden.

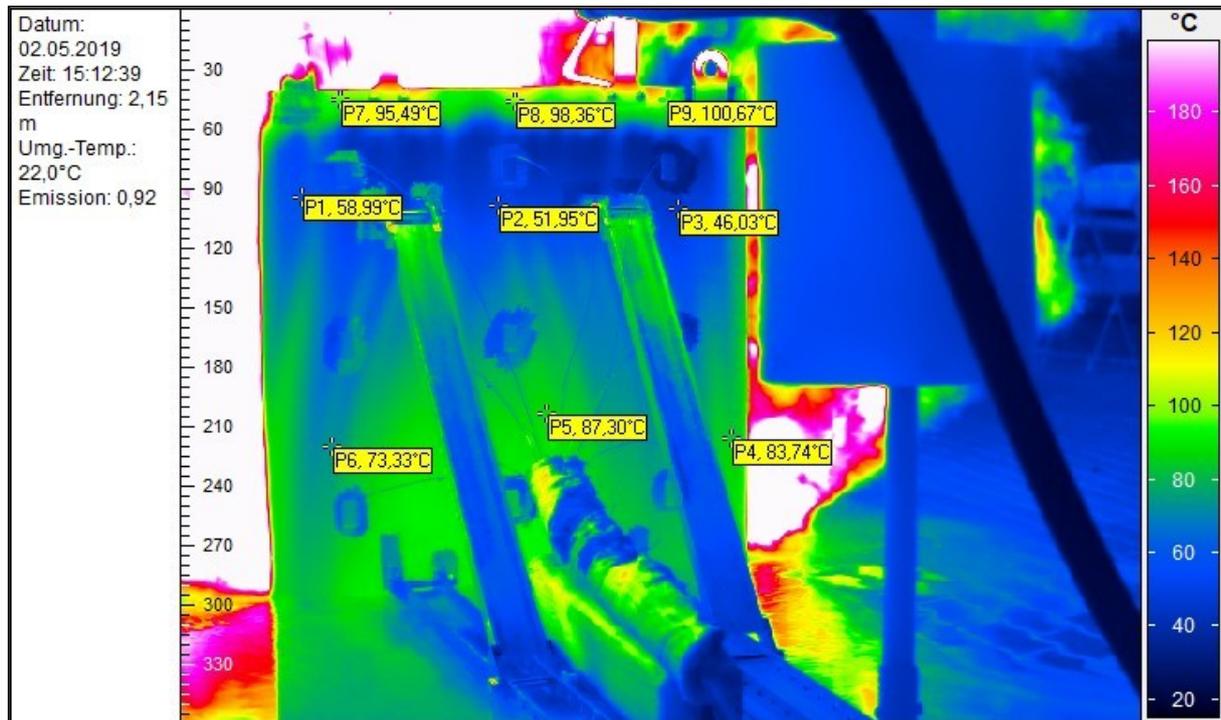


Abbildung 24: Temperaturverteilung P003



Abbildung 25: Berieselung Versuch P003

Aus dem Wärmebild (Abbildung 24) geht hervor, dass die Temperaturverteilung der Platte in diesem Versuch gleichmäßiger als in Versuch P002 ist und die kühleren Zonen deutlich größer sind.

Vergleicht man Abbildung 21 und Abbildung 25 stellt man fest, dass die Flamme in Versuch P003 deutlich kleiner ist, obwohl die Versuche bei identem Tankdruck und nur minimalen Windgeschwindigkeitsunterschied durchgeführt werden. Der höhere Volumenstrom führt zusätzlich dazu, dass die Flamme besonders im oberen Bereich der Platte durch das Wasser inertisiert wird. Das hat zur Folge, dass die Flamme von der Platte abgehoben wird und nicht mehr im direkten Kontakt mit dieser ist (Abbildung 26).



Abbildung 26: Abheben der Flamme bei hohen Kühlwassermengen

Hohe Kühlmittelraten bieten daher nicht nur eine effektivere Kühlung, sondern reduzieren zusätzlich den von der Flamme auf das beflamte Objekt übertragenen Wärmestrom durch teilweise Inertisierung der Flamme und Reduktion konvektiv übertragener Wärme durch Abheben der Flamme.

Auch bei diesem Versuch wird beobachtet, dass ein Teil des Wassers vom Flammenimpuls verschleppt wird. Da dies bereits bei einer Plattenlänge von 1,2 m zur Verminderung der Kühlleistung im unteren Teil der Platte führt, muss dies bei der Auslegung

von Berieselungsanlagen für reale Druckbehälter berücksichtigt werden. Es besteht die Vermutung, dass für eine geschlossene Filmbildung auf der Behälteroberfläche nur geringe Abstände zwischen den Sprinklern zulässig sind. Um diese Fragestellung zu klären, muss der Prüfstand höher sein, damit größere Filmlängen erzielt werden, die vom Flammenimpuls erfasst werden und die Analyse der benötigten Sprinklerabstände ermöglichen.

4.7 Versuch P005

Im Versuch P004 soll die Effektivität von Kühlmaßnahmen durch Einsatzkräfte untersucht werden. Durch die gewählte Wasserstrahlrichtung wird die Flamme innerhalb weniger Sekunden durch das Kühlwasser gelöscht und der Versuch ist fehlgeschlagen. Der Versuch wurde daher in Versuch P005 wiederholt.

In Brandszenarien, in denen Druckbehälter beflammt werden, wird von Seiten der Einsatzkräfte das Einleiten von Kühlmaßnahmen der betroffenen Anlagenteile vorgesehen. Es soll daher analysiert werden, wie sie die Plattentemperaturen verändern unter der Annahme, dass die Flamme weiterhin auf die Anlage einwirkt und mit Hilfe von Strahlrohren und Monitoren Wasser aufgebracht wird. Damit die Platte gleichmäßig beaufschlagt wird, kommt eine Hochdruckschnellangriffseinrichtung mit einem Wasserdruck von 30 bar und einem Durchfluss von $150 \frac{l}{min}$ mit breitem Strahlkegel zum Einsatz. Gespeist wird das Löschesystem von einer Pumpe im Tanklöschfahrzeug. Auf die Plattenfläche umgelegt entspricht die Wassermenge einem spezifischen Volumenstrom von $104,2 \frac{l}{min m^2}$.

Nach einer Vorbrenndauer von 40 Sekunden wird mit dem Kühlen begonnen. Es ist anzumerken, dass eine Intervention durch Einsatzkräfte nach so kurzer Zeit nicht realistisch ist. Um einen Vergleich mit Berieselungsanlagen zu ermöglichen sollen die Plattentemperaturen jedoch gleich sein. Die Kühlung vermindernde Effekte durch hohe Wandtemperaturen, wie Verdampfung und Filmabriss, müssen separat untersucht werden. Die Düse wird in Flammenrichtung rechts einen Meter hinter der Brennermündung positioniert, damit die Flamme nicht wieder gelöscht wird. Durch Kreisbewegungen wird das Wasser gleichmäßig auf die Platte aufgebracht.

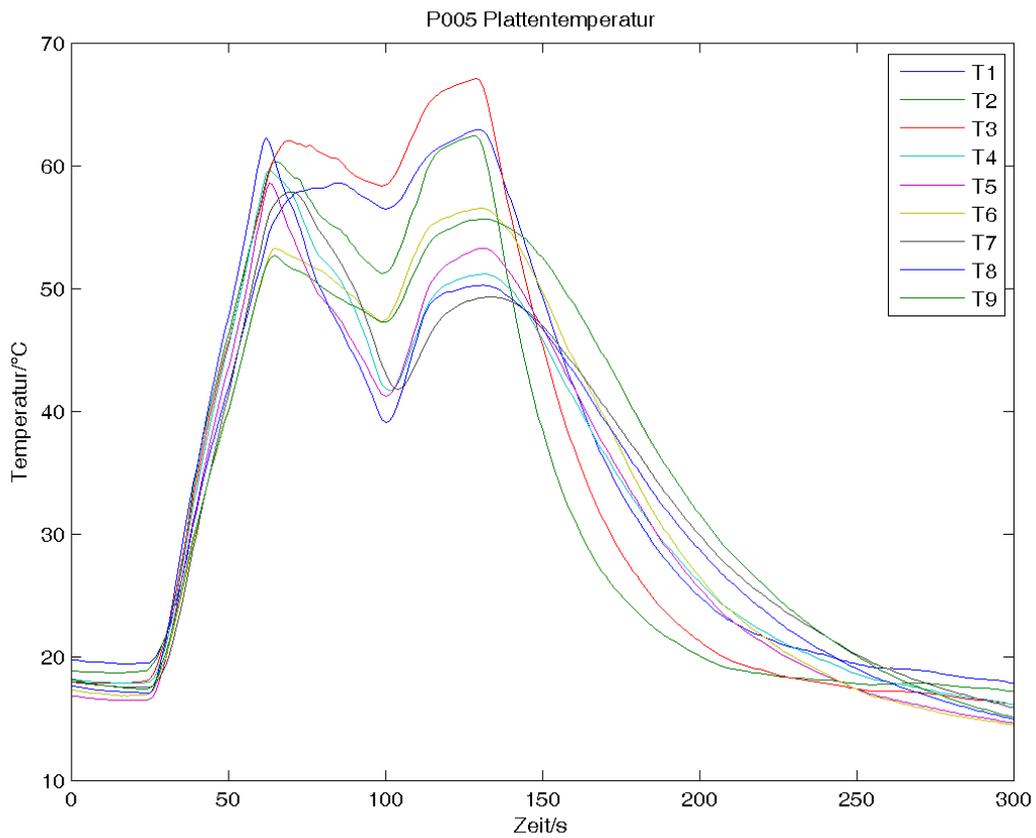


Abbildung 27: Plattentemperaturverlauf P005



Abbildung 28: Inertisierung der Flamme durch hohen Kühlwasservolumenstrom P005

Am Temperaturverlauf der Platte (Abbildung 27) erkennt man eine signifikante Temperaturabnahme aller Sensoren. Um sicherzustellen, dass der gesamte Wasserstrahl auf die Platte trifft, muss ein Abstand zum Plattenrand gehalten werden. Die Sichtung von Videoaufnahmen ergibt, dass im oberen Bereich der Platte der Abstand zu groß ist und daher die Temperaturen T1 und T2 nicht so schnell absinken. Da während des Versuchs nur ein Vertreter der Landesfeuerwehrschiule anwesend ist, können die Gasarmaturen und das Tanklöschfahrzeug nicht gleichzeitig betrieben werden. Daher muss die Pumpe vor der Flamme deaktiviert werden und die Plattentemperatur steigt in weiterer Folge wieder an. Anhand der Wärmebildaufnahmen (Abbildung 29) erkennt man ebenfalls, dass die Temperaturverteilung nicht so gleichmäßig wie bei Berieslungsanlagen ist. Da der Wasserstrahl über die Platte bewegt werden muss, wird in der Mitte mehr als an den Rändern gekühlt. Es bildet sich folglich eine kalte Zone in der Plattenmitte aus.



Abbildung 29: Temperaturverteilung P005

Die Inertisierung der Flamme ist aufgrund des höheren Wasservolumenstroms noch ausgeprägter als im Versuch P003 und erhöht dadurch die Kühlrate.

Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass die hohen Volumenströme, die durch Einsatzkräfte aufgebracht werden können, hohe Kühlraten ermöglichen. Allerdings ist die gleichmäßige Auftragung durch die manuelle Bedienung und die Notwendigkeit der Bewegung des Wasserstrahls nur schwer zu realisieren. Weiters muss berücksichtigt werden, dass für die gleichmäßige Kühlung realer Druckbehälter mit hohen spezifischen Kühlwasserströmen

aufgrund der großen Behälteroberflächen, die benötigten Gesamtwassermengen stark ansteigen. Die Sicherstellung von mehreren tausend oder zehntausend Litern pro Minute über längere Zeiträume ist nur mit entsprechender Infrastruktur möglich.

4.8 Versuch P006

Mit Versuch P006 soll das natürliche Abkühlverhalten der Stahlplatte bestimmt werden. Die Platte wird wie in Versuch P001 auf 427 °C aufgeheizt. Ist die Temperatur erreicht wird die Flamme gelöscht und keine zusätzlichen Kühlmaßnahmen gesetzt. Die Platte kühlt durch natürliche Konvektion und Abgabe von Wärmestrahlung an die Umgebung ab. Die aufgezeichnete Abkühlkurve wird benötigt, um das in Kapitel 6 beschriebene thermische Modell des Versuchsstands zu verifizieren.

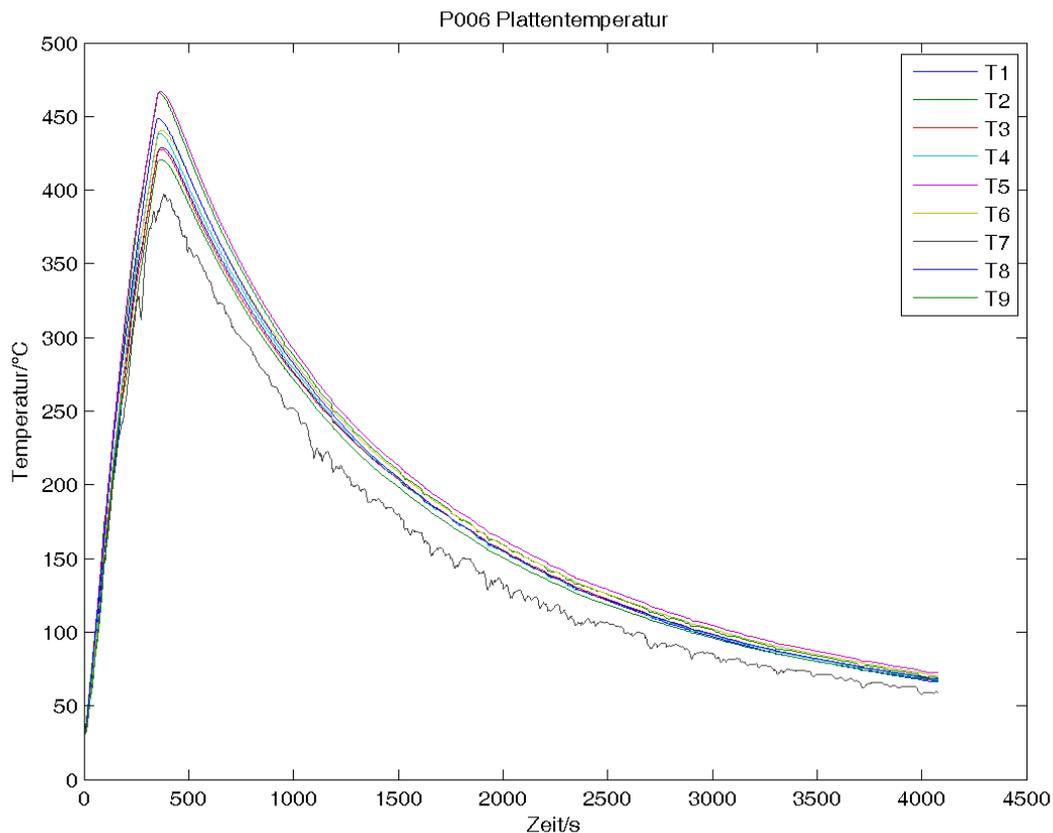


Abbildung 30: Plattentemperaturverlauf P006

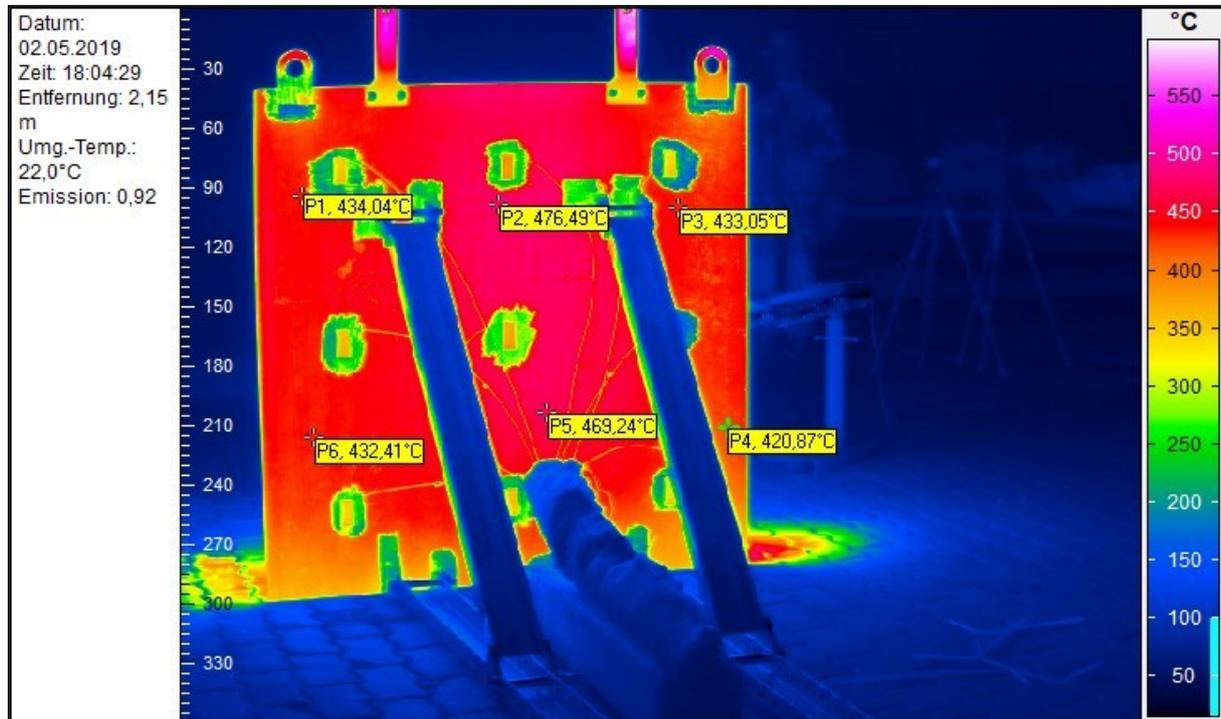


Abbildung 31: Temperaturverteilung P006

Da keine Kühlung eingesetzt wird, kann die Temperaturverteilung einer ungekühlten Behälterwand bestimmt werden (Abbildung 31). Im Vergleich zu den Versuchen mit Kühlung ist die Verteilung sehr homogen. Lediglich in Bodennähe ist die Temperatur geringer, geschuldet durch den in 4.4 beschriebenen Wirbel.

62 Minuten nach dem Löschen der Flamme liegen die Temperaturen zwischen 60 und 70 °C. Die Abkühlrate nach diesem Zeitraum ist so gering, dass der Versuch beendet wird.

5 Experimentelle Ergebnisse

Rohrbrandprüfstand

Im Anschluss an die Plattenbrandversuche wird eine Versuchsreihe mit drei Versuchen am Rohrbrandprüfstand durchgeführt. Die Aufständigung des Rohres wird auf die Höhe des Gasauslasses eingestellt, damit die Flamme in der Mitte des Rohres auftritt und an der Ober- und Unterseite des Außenmantels entlang streift. Der Aufbau wird 2 m vom Austritt entfernt positioniert, da die Flamme in diesem Abstand bereits voll ausgebildet ist.

5.1 Aufbau der Wasserversorgung

Der Rohrbrandprüfstand wird mit einem 20 m langen C-Schlauch (52 mm) nach dem Kugelhahn an die in 4.1 beschriebene Wasserversorgung angeschlossen. An der Auslassseite des Prüfstandes wird ein weiterer 20 m langer C-Schlauch angeschlossen, an dessen Ende ebenfalls ein Drosselventil montiert wird. Das Drosselventil vor dem Volumenstromgeber wird voll geöffnet und der Durchfluss mit dem Ventil am Ende des Auslassschlauches eingestellt. Abgesperrt wird die Versorgung mit dem Kugelhahn. Durch diese Anordnung kann permanent ein Überdruck im Rohr sichergestellt werden, um teilweise Verdampfung zu verhindern.

Die Wasserversorgung für die externen Kühlmaßnahmen wird aufgrund der gewählten Löscheräte durch das Tanklöschfahrzeug und dessen Wasserpumpe durchgeführt. Um den Wassertank zwischen den Versuchen wieder zu füllen, muss das Fahrzeug vor der

Wasserversorgung des Prüfstandes ebenfalls mit dem Hydrantennetz verbunden werden. Ein automatisches Schwimmerventil im Inneren des Fahrzeuges öffnet automatisch, wenn der Füllstand zu niedrig wird.

5.2 Aufbau der Instrumentierung

Aufgrund des Versuchsaufbaus gibt es keine Möglichkeit eine Wärmebildkamera so zu positionieren, dass direkter Blick auf die zu messende Oberfläche möglich ist, da diese von der Flamme verdeckt ist. Die intensive Wärmestrahlung der Flamme macht es daher unmöglich die Temperaturverteilung der beflamnten Zone des Rohres aufzuzeichnen. Folglich wird nur die Wassertemperatur mit Hilfe von 1,5 mm Mantelthermoelementen ermittelt. Je ein Stück wird nach dem Einlass und vor dem Auslass hinter dem statischen Mischer mit den in Kapitel 3.1 beschriebenen Klemmverschraubungen in der Wasserströmung platziert. Mit zwei Steckverbindern werden die Sensoren über die Ausgleichsleitungen mit der Messelektronik verbunden.

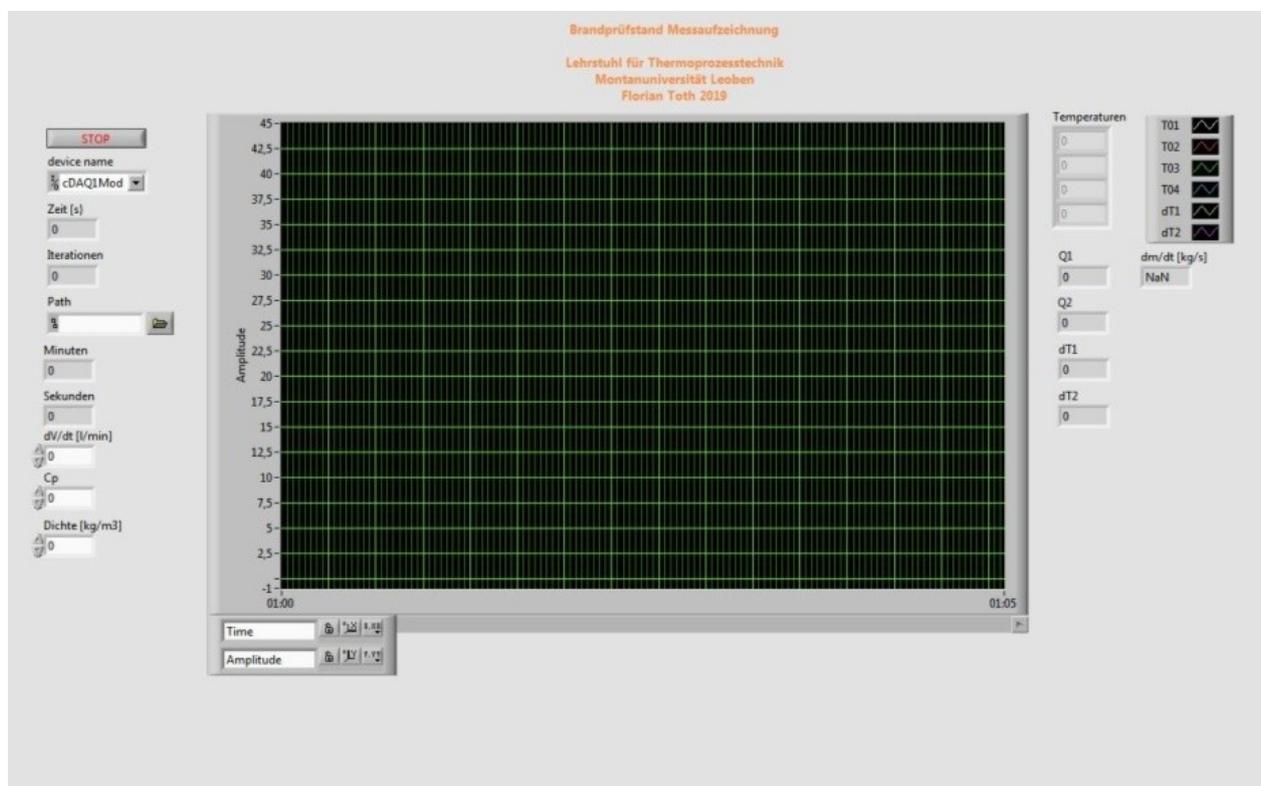


Abbildung 32: Versuchssteuerung Rohrbrandprüfstand

Für die Überwachung des Versuchs und Protokollierung der Messdaten wird in LabView ein zweites Programm erstellt (Abbildung 32). Aus den Daten der Thermoelemente wird die Temperaturdifferenz ermittelt. Für den aktuellen Volumenstrom, die Wärmekapazität und die Dichte des Wassers sind Eingabefenster vorhanden, deren Werte auch während des Versuchs geändert werden können und sofort in die im Hintergrund laufenden Berechnungen übernommen werden. Aus den Stoffparametern wird zuerst der Massenstrom des Wassers zur internen Kühlung ermittelt. Der übertragene Wärmestrom wird mit Formel 3-1 berechnet und das Ergebnis einmal pro Sekunde im Übersichtsfenster aktualisiert. Für die detaillierte Auswertung im Nachhinein werden alle Temperatur- und Stoffwerte und daraus resultierende Ergebnisse protokolliert und als lvm-Datei mit Zeitstempel abgespeichert.

5.3 Versuche Rohrbrandprüfstand

Die drei am Rohrbrandprüfstand durchgeführten Versuche sollen die Effektivität von unterschiedlichen Kühlmaßnahmen von direkt beflamnten und von Betriebsmittel durchflossenen Rohrleitungen untersuchen. Zwischen den Versuchen wird so lange gewartet bis die Umgebungsbedingungen während der Versuche so ähnlich wie möglich sind und sich der LPG-Tankdruck stabilisiert hat. In Tabelle 4 und 5 sind die Bedingungen und gewählten Löschgeräte aufgelistet.

Tabelle 4: Umgebungsbedingungen Rohrbrandversuche

Versuch	Tankdruck Start bar	Tankdruck Ende bar	Windgeschwindigkeit kmh ⁻¹	Volumenstrom Wasser lmin ⁻¹
R001	6,6	6,5	0,5	45
R002	6,5	6,3	1,2	45,2 + 200
R003	6,3	6	0,8	44,3 + 150

Tabelle 5: Kühlmaßnahmen Rohrbrandversuche

Versuch	Kühlmethode
R001	Interne Kühlung
R002	Interne Kühlung + Hohlstrahlrohr
R003	Interne Kühlung + Hochdruckschnelleingriffseinrichtung

5.4 Versuch R001

Versuch R001 soll die Vergleichsbasis für die Effektivität von externen Kühlmaßnahmen für ein beflammtes Rohr erheben. Hierfür muss die reine Kühlrate durch die Wasserströmung im Inneren des Rohres bestimmt werden. Folglich werden keine zusätzlichen Kühlmaßnahmen angewendet.

Durch Entzünden der Gasflamme wird mit dem Wärmeeintrag in das Rohr begonnen. Es wird so lange beflammt bis sich der gemessene Wärmestrom, der durch das Wasser abgeführt wird, nicht mehr verändert und das System im thermischen Gleichgewicht ist. Im Gleichgewicht ändern sich die Wandtemperaturen des Rohres nicht mehr, da der eingetragene Wärmestrom dem abgeführten Wärmestrom entspricht. Folglich wird durch den Versuch nicht nur die Kühlrate identifiziert, sondern auch der Wärmestrom, den die Flamme auf das Rohr überträgt.



Abbildung 33: Versuchsaufbau Rohrbrandprüfstand R001

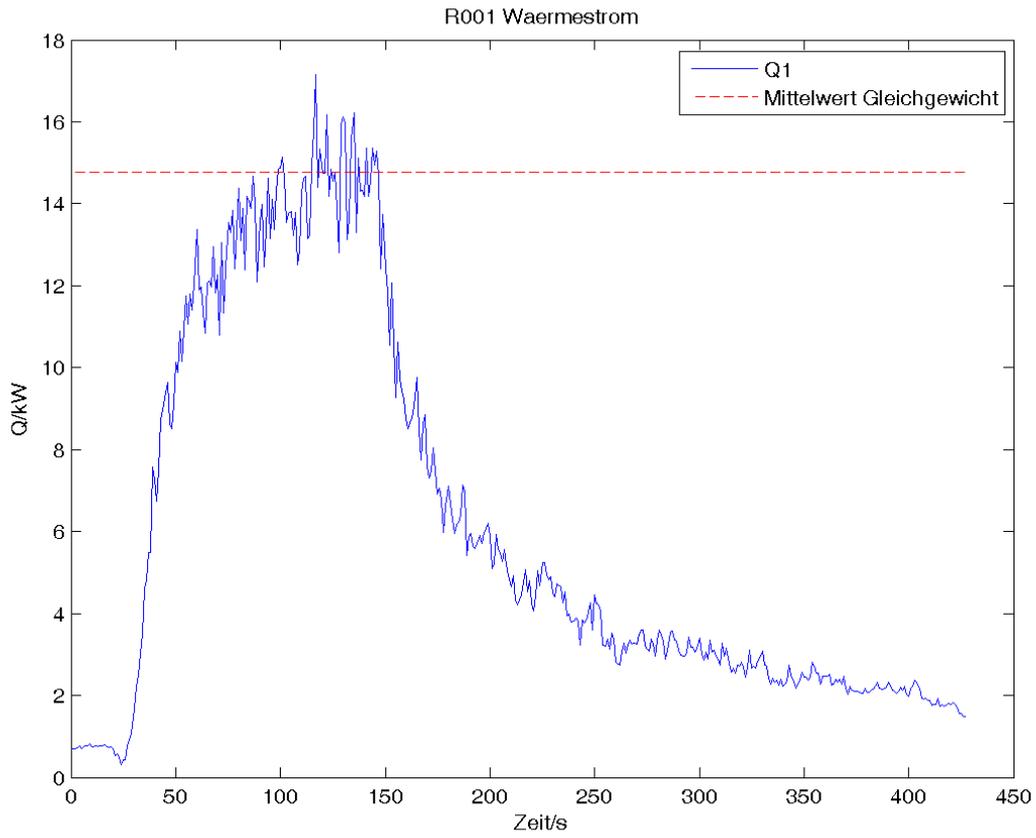


Abbildung 34: Wärmestromverlauf R001

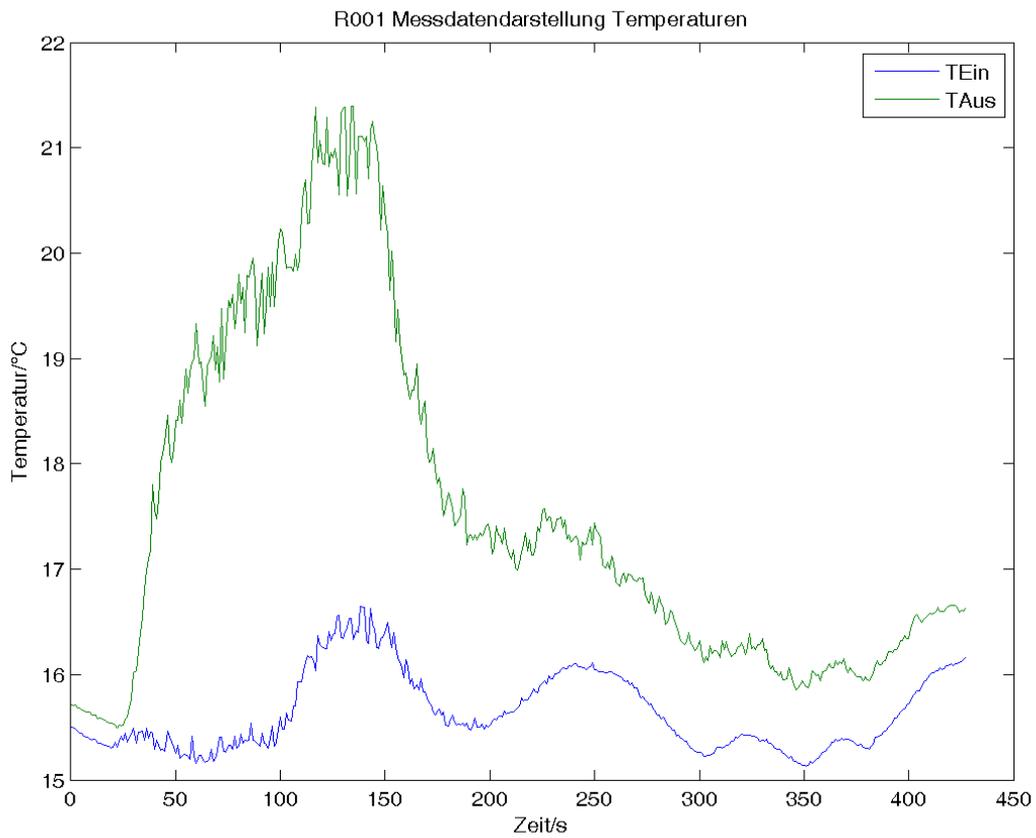


Abbildung 35: Wassertemperaturverlauf R001

In Abbildung 34 ist der gemessene Wärmestrom grafisch dargestellt. Nach dem Zünden ist ein rascher Anstieg des Wärmestroms erkennbar. Der Zeitpunkt des Erreichens des Gleichgewichts kann durch Einsicht der Messdaten bestimmt werden und liegt in diesem Fall bei $t = 119 \text{ s}$. Im Gleichgewicht liegt der beobachtete Wärmestrom, bei gewählten Volumenstrom von $45 \frac{\text{l}}{\text{min}}$, im Mittel bei $\bar{Q} = 14,44 \text{ kW}$ und ist als rot gestrichelte Linie im Diagramm eingezeichnet.

Durch den relativ hohen Volumenstrom im Inneren des Rohres erwärmt sich das Wasser trotz der übertragenen Leistung um maximal 5 °C (Abbildung 35). Da die Einlasstemperaturen zwischen 15 und 17 °C schwanken werden Auslasstemperaturen von maximal $21,4 \text{ °C}$ gemessen. Dies ist gewünscht, da unbedingt vermieden werden muss, dass sich kleine Dampfblasen bei hohen Temperaturen hinter dem statischen Mischer ansammeln und somit das Messergebnis verfälschen können.

5.5 Versuch R002

Im Versuch R002 soll die Wirksamkeit einer externen Kühlung durch Einsatzkräfte auf ein beflammtes Rohr bestimmt werden, wenn als Löschgerät ein C-Mehrzweckstrahlrohr zum Einsatz kommt.

Nach dem Zünden der Flamme wird so lange beflammt bis der Versuchsstand das thermische Gleichgewicht erreicht hat. Erst dann wird die Wasserversorgung des Mehrzweckstrahlrohres aktiviert und der Wasserstrahl manuell gleichmäßig über das Rohr geführt. Beim anliegenden Pumpendruck von 5 bar liegt die geförderte Wassermenge bei $200 \frac{\text{l}}{\text{min}}$.



Abbildung 36: Kühlen mit Mehrzweckstrahlrohr R002

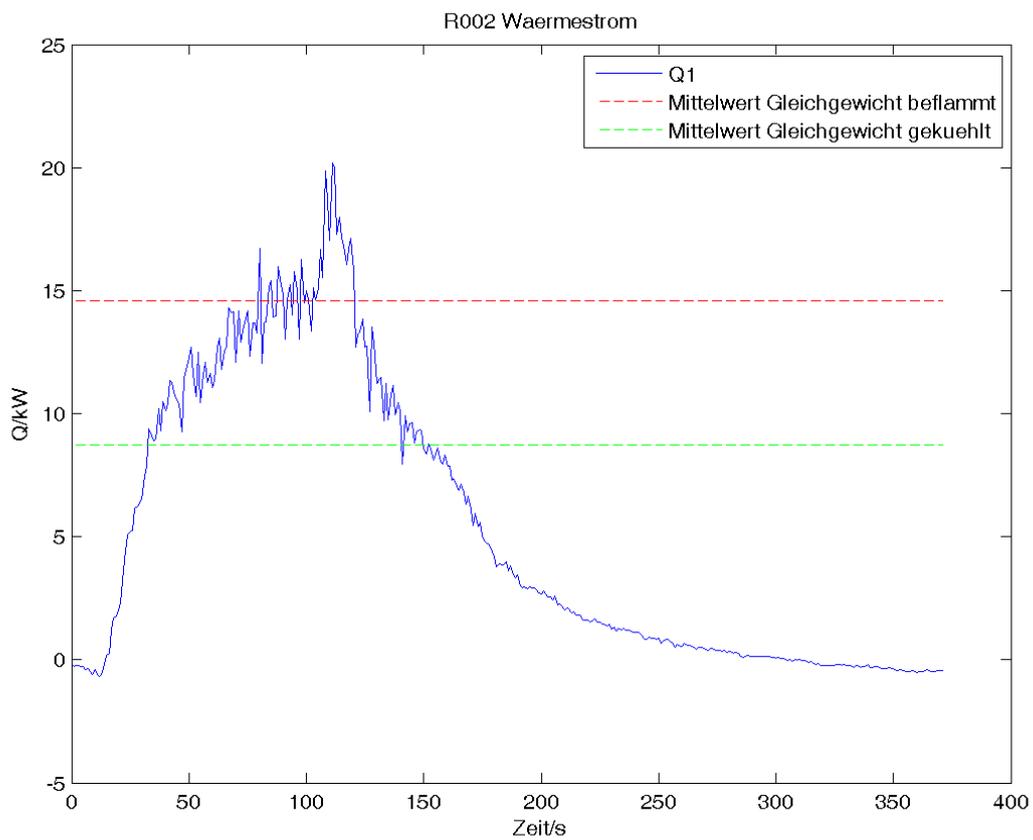


Abbildung 37: Wärmestromverlauf R002

Vor dem Kühlen hat sich das thermische Gleichgewicht bei einem Wärmestrom $\bar{Q} = 14,59 \text{ kW}$ eingestellt. Im Vergleich von Abbildung 36 und 33 ist analog zu den Plattenbrandversuchen erkennbar, dass die hohen Volumenströme und die Zufuhr des Wassers entlang der Flammenachse zur Inertisierung der Flamme führt und auch bei diesen Szenarien mit verminderter Wärmezufuhr zusätzlich zur Kühlung gerechnet werden muss.

Kurz nach dem Beginn der Kühlmaßnahme wird ein abrupter Anstieg des Wärmestroms um circa 5 kW aufgezeichnet (Abbildung 37). Der Grund dieses Verhaltens ist Gegenstand aktueller weiterer Untersuchungen. Nach dem Anstieg fällt der Wärmestrom wieder stark ab. Im Zeitraum von 140-158 Sekunden hat die Versuchsteuerung eine Stabilisierung des Wärmestroms indiziert. Auch in den Messdaten ist im gefragten Intervall eine Stabilisierung erkennbar mit einem Mittelwert von $\bar{Q} = 8,73 \text{ kW}$ und damit eine Reduktion um 40,2 %. Nach diesem Zeitraum wird die Flamme vom Kühlwasser ausgelöscht und es kann nicht mit Sicherheit von einer langfristigen Stabilisierung ausgegangen werden. Der Versuch muss daher wiederholt werden, um das Ergebnis zu verifizieren. Zum jetzigen Zeitpunkt ist daher eine endgültige Aussage nicht möglich.

In Abbildung 36 und bei der Sichtung des aufgenommen Videomaterials erkennt man, dass aufgrund der Strahlform des Mehrzweckstrahlrohres der Großteil des Wasser nicht auf das Rohr trifft und daher nicht zur Kühlung beiträgt.

5.6 Versuch R003

Im Versuch R003 wird wie im Versuch P005 eine Hochdruckschnellangriffseinrichtung bei einem Druck von 30 bar und einen Durchfluss von $150 \frac{\text{l}}{\text{min}}$ verwendet. Da der Strahlkegel deutlich schmaler ist als beim Mehrzweckstrahlrohr, soll untersucht werden, ob dadurch die Kühlleistung verbessert werden kann. Zwischen den Versuchen R002 und R003 hat sich die Windgeschwindigkeit halbiert und die Windrichtung umgekehrt. Da der Wind nun in Gegenrichtung zur Flamme kommt, hat sich die Flammengeometrie verändert und das Rohr wird auf einer größeren Länge beflammt. Dadurch ist der Gleichgewichtswärmestrom angestiegen und erlaubt deshalb nur einen prozentuellen Vergleich in der Verbesserung der Kühlrate mit dem Mehrweckstrahlrohr.

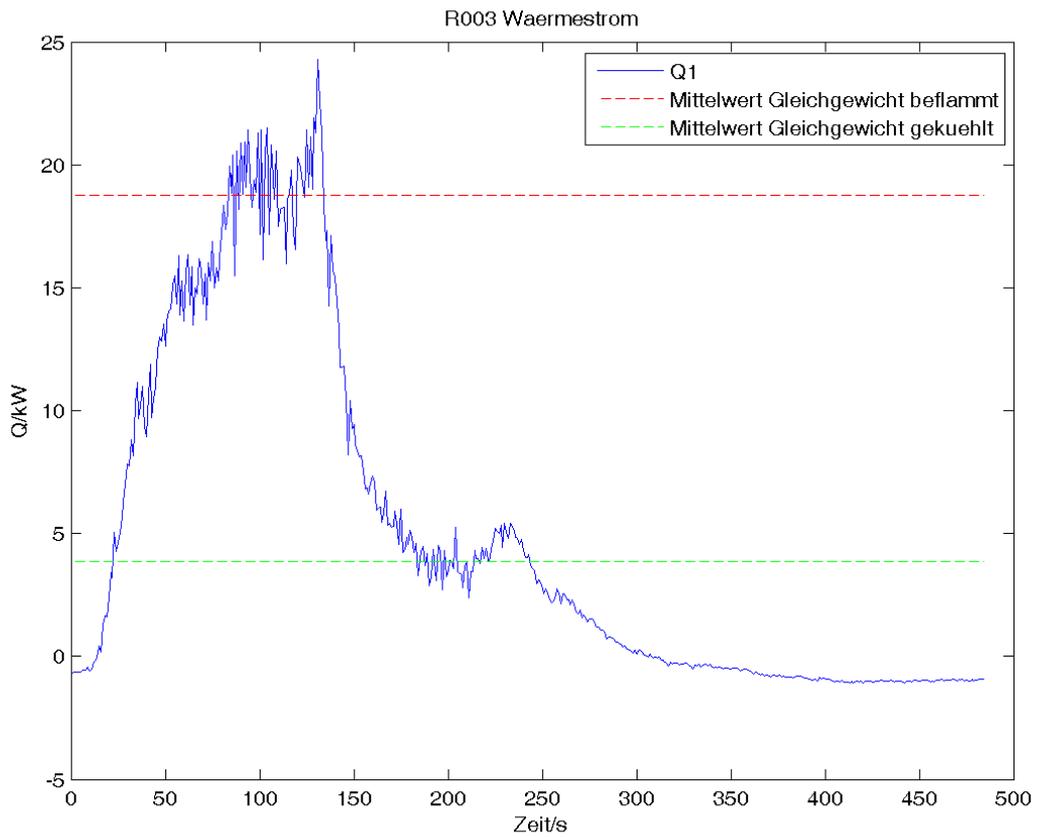


Abbildung 38: Wärmestromverlauf R003



Abbildung 39: Kühlen mit Hochdruckschnellangriffseinrichtung

Nach einer Vorbrenndauer von 75 Sekunden hat sich der mittlere Wärmestrom auf $\bar{Q} = 18,76 \text{ kW}$ eingestellt (Abbildung 38). Wie im Versuch R002 kann auch in diesem Versuch der abrupte kurzfristige Anstieg des Wärmestroms nach Kühlbeginn beobachtet werden. Ab dem Zeitpunkt $t = 180 \text{ s}$ hat sich das neue thermische Gleichgewicht inklusive extern abgeführter Wärme eingestellt. Der mittlere Wärmestrom im Zeitfenster bis zum Beenden der Kühlmaßnahme bei $t = 220 \text{ s}$ stellt sich bei $\bar{Q} = 3,86 \text{ kW}$ ein. Das entspricht einer Reduktion von 79,42 %.

In Abbildung 39 ist ersichtlich, dass, im Vergleich zum Mehrzweckstrahlrohr (Abbildung 36) aufgrund des schmäleren Strahls mehr Wasser direkt auf das Rohr trifft. Durch die höhere Beaufschlagung ist die Reduktion des Wärmestroms um den Faktor 1,98 größer, obwohl der Wasserdurchfluss um 25 % geringer ist.

6 Thermische Modellierung des Plattenbrandprüfstands

In diesem Kapitel wird die Erstellung eines thermischen Modells des Plattenbrandprüfstands mittels MATLAB beschrieben. Die Erstellung des Modells hat zwei Gründe. Einerseits soll der von der Flamme auf den Prüfstand übertragene Wärmestrom rechnerisch ermittelt werden. Dies ist notwendig, da die direkte Messung sehr komplex ist. Wie in Kapitel 1 beschrieben lässt sich der Wärmestrom in zwei Transportphänomene teilen, in erzwungene Konvektion und Wärmestrahlung. Für die Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs müssen die Gasphasentemperatur und die Geschwindigkeit der Flamme bekannt sein. Die exakte Temperaturmessung ist nur mit großem Aufwand möglich, da die Wärmestrahlung die Messung beeinflusst. Für die Messung der Wärmestrahlung müsste ein Strahlungssensor auf der Platte platziert werden um an der richtigen Position zu messen und ist technisch nicht möglich. Die Bestimmung der Sichtfaktoren einer Flamme, die umgelenkt wird, die für die Berechnung notwendig sind stellt eine weitere Schwierigkeit dar. Da am ausgewählten Standort die Messung des Gasvolumenstromes nicht möglich ist, muss ein mathematischer Ansatz gewählt werden. Zweitens kann mit einem vorhandenen thermischen Modell das Verhalten der Platte bei unterschiedlichen Randbedingungen vorhergesagt werden und soll unterstützend bei der Planung neuer Versuchsserien zum Einsatz kommen.

6.1 Energiebilanz der Stahlplatte

Betrachtet man die Stahlplatte als ein thermisch instationäres System kann eine Energiebilanz über die Platte erstellt werden. Durch die auftreffende Flamme, \dot{q}_{ein} , steigt die Plattentemperatur und erhöht die innere Energie, $\frac{dU}{dt}$. Die Platte gibt entsprechend ihrer Temperatur durch Wärmestrahlung Energie an die Umgebung ab, \dot{q}_{Str} . Die Wärmestrahlung muss sowohl auf der Flammen zugewandten Seite als auch der Rückseite berücksichtigt werden. Auf der nicht beflamten Seite der Platte stellt sich durch die höhere Temperatur als die Umgebung eine Luftströmung aufgrund natürlicher Konvektion ein und kühlt somit die Rückseite, \dot{q}_{konv} .

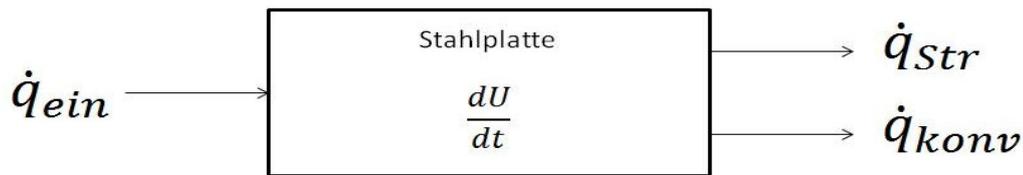


Abbildung 40: Energiebilanz des Plattenbrandprüfstands

Durch Einsetzen in den ersten Hauptsatz der Thermodynamik kann die Energiebilanz ausformuliert werden.

$$d\dot{U} = d\dot{Q} + d\dot{W} [W] \quad (6-1) [14]$$

$$d\dot{W} = 0 [W] \quad (6-2)$$

$$\frac{m_{Stahl}}{A} c_p \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{ein} - \dot{q}_{Str} - \dot{q}_{konv} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (6-3)$$

Aus Gleichung 6-3 folgt, dass mit den experimentell erfassten Daten die Änderung der inneren Energie, die Wärmestrahlungsleistung und die konvektive Wärmeabgabe berechnet werden können und lediglich der auf die Platte übertragene Wärmestrom, die gesuchte Größe, unbekannt ist. Durch Umformen erhält man Gleichung 6-4.

$$\dot{q}_{ein} = d_{Stahl} \rho_{Stahl} c_p \frac{dT}{dt} + \dot{q}_{Str} + \dot{q}_{konv} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (6-4)$$

6.2 Formulierung der Wärmeströme

Um die abgegebene Leistung mittels Wärmestrahlung zu ermitteln wird die Stahlplatte als grauer Strahler betrachtet. Daraus folgt, dass der Emissionskoeffizient ε immer kleiner eins ist. Für die Berechnungen wird der in Kapitel 4 experimentell ermittelte Wert für den Emissionskoeffizient herangezogen. Der Wärmestrom wird nach Gleichung 6-5 mit dem Stefan-Boltzmann Gesetz berechnet.

$$\dot{q}_{Str} = \varepsilon \sigma T_{Platte}^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (6-5) [14]$$

Um die Abstrahlung auf beiden Oberflächen der Stahlplatte zu berücksichtigen wird für die Wärmestrahlung im Modell Gleichung 6-6 hinterlegt.

$$\dot{q}_{Str} = 2 * 0,92 * 5,670 * 10^{-8} * (T_{Platte} + 273,15) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (6-6)$$

Die Berechnung des Wärmestroms, der von der Platte durch Konvektion abgeführt wird, erfolgt bei bekanntem Wärmeübergangskoeffizient α durch das Newton'sche Gesetz.

$$\dot{q}_{konv} = \alpha (T_{Platte} - T_{Luft}) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (6-7) [14]$$

Stellt sich eine Strömung aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen einem Körper und einem Fluid ein und führt zur konvektiven Wärmeübertragung, ist der Wärmeübergangskoeffizient von der Temperatur und der Geometrie des Körpers abhängig. Für eine vertikal ebene Platte ist dieser über Ähnlichkeitsbeziehungen berechenbar.

$$Nu_M = 0,68 + \frac{0,670 Ra_L^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,462}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{4}{9}}} [-] \quad (6-8) [14]$$

Für die Berechnung von Gleichung 6-8 werden die Rayleigh- und die Prandtl-Zahl benötigt. Die Prandtl-Zahl ist nur von Stoffgrößen des Fluids, der kinematischen Viskosität ν und der Temperaturleitfähigkeit a , abhängig.

$$Pr = \frac{\nu}{a} [-] \quad (6-9) [14]$$

Die Rayleigh-Zahl ist eine Funktion der Temperatur, der charakteristischen Länge, der Erdbeschleunigung und Stoffwerten des Fluids.

$$Ra_L = \frac{g \beta \Delta T L^3}{a \nu} = \frac{g \beta (T_{Fluid} - T_{Platte}) L^3}{a \nu} [-] \quad (6-10) [14]$$

Allgemein ist die Nußelt-Zahl nach Gleichung 6-11 definiert

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} [-] \quad (6-11) [14]$$

Berechnet man die Nußelt-Zahl nach Gleichung 6-8, kann aus dem Ergebnis durch Umformen und Einsetzen in Gleichung 6-11 der Wärmeübergangskoeffizient berechnet werden. Schlussendlich kann mit Gleichung 6-7 der spezifische Wärmestrom berechnet werden.

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{L} \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (6-12) [14]$$

Betrachtet man die Zusammenhänge erkennt man, dass die Parameter, die zur Berechnung verwendet werden, vom Temperaturunterschied zwischen Stahlplatte und Luft abhängig sind. Daraus folgt, dass es nicht ausreicht den Wärmeübergangskoeffizienten einmal zu berechnen, da die Platte keine konstante Temperatur aufweist, sondern eine instationäre Erwärmung oder Abkühlung beschrieben werden muss. Gleiches gilt auch für die Wärmestrahlung. Diese nimmt mit steigender Temperatur zu und kann nicht als konstant angenommen werden. Folglich muss das thermische Modell als iterative Berechnung ausgeführt werden und für jeden Zeitschritt alle Parameter neu berechnet werden.

6.3 Formulierung der Temperaturabhängigkeit der Stoffparameter

Für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten werden mehrere Stoffparameter der Luft verwendet. Diese sind eine Funktion der Temperatur und daher nicht konstant. Ähnlich wie bei den Wärmeströmen müssen auch die Stoffparameter für jede beliebige Temperatur bekannt sein. Eine manuelle Eingabe der Werte in das thermische Modell ist daher nicht möglich. Um die Stoffparameter trotzdem korrekt in den Berechnungen berücksichtigen zu können, werden für jeden Parameter mit dem Program Peace Software mehrere Werte im betrachteten Temperaturfenster berechnet. Diese Werte werden in Excel eingegeben und eine polynomische Näherung berechnet. Die erhaltene polynomische Funktion ist nur von der Temperatur abhängig und erlaubt die Bestimmung eines Stoffwertes bei jeder beliebigen Temperatur. Die Näherungsfunktionen werden in separate Unterprogramme implementiert, die bei jedem Schleifendurchlauf des thermischen Modells aufgerufen werden und bei gegebener Temperatur die benötigten Werte zur Verfügung stellen. In den Abbildungen 41 bis 45 sind die ermittelten Funktionen der Unterprogramme dargestellt. Die tatsächlichen Stoffwerte sind blau und die errechnete Funktion ist schwarz und als Formel dargestellt.

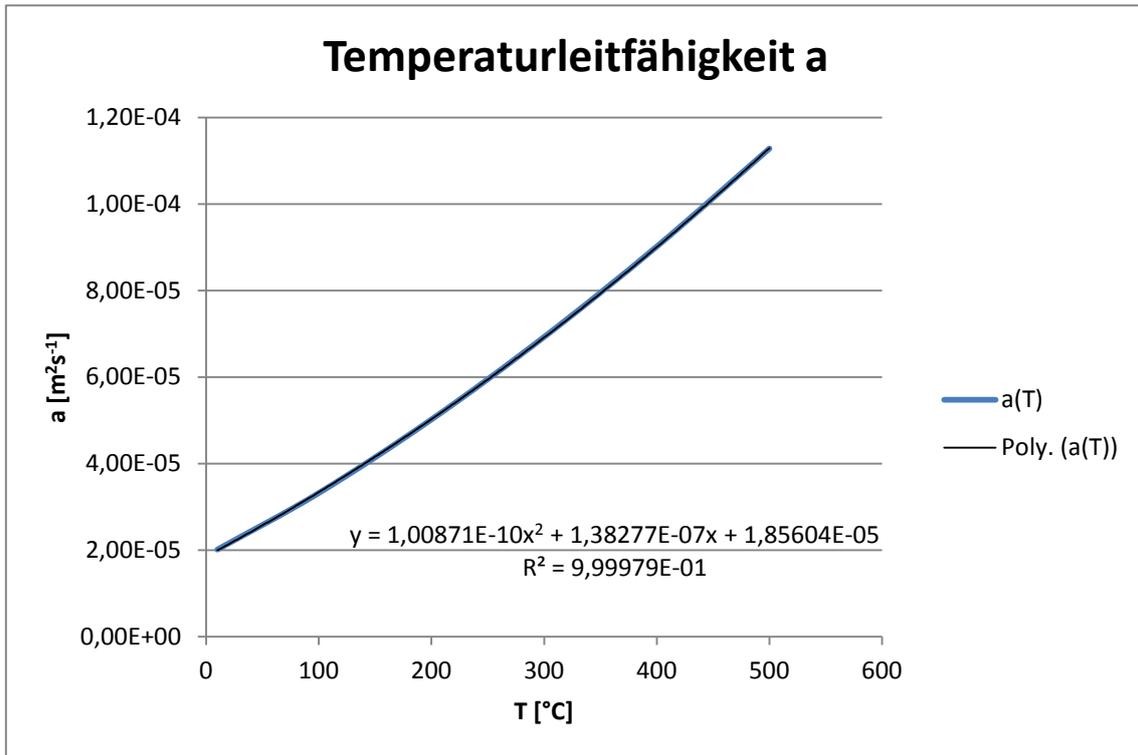


Abbildung 41: Temperaturleitfähigkeit Luft

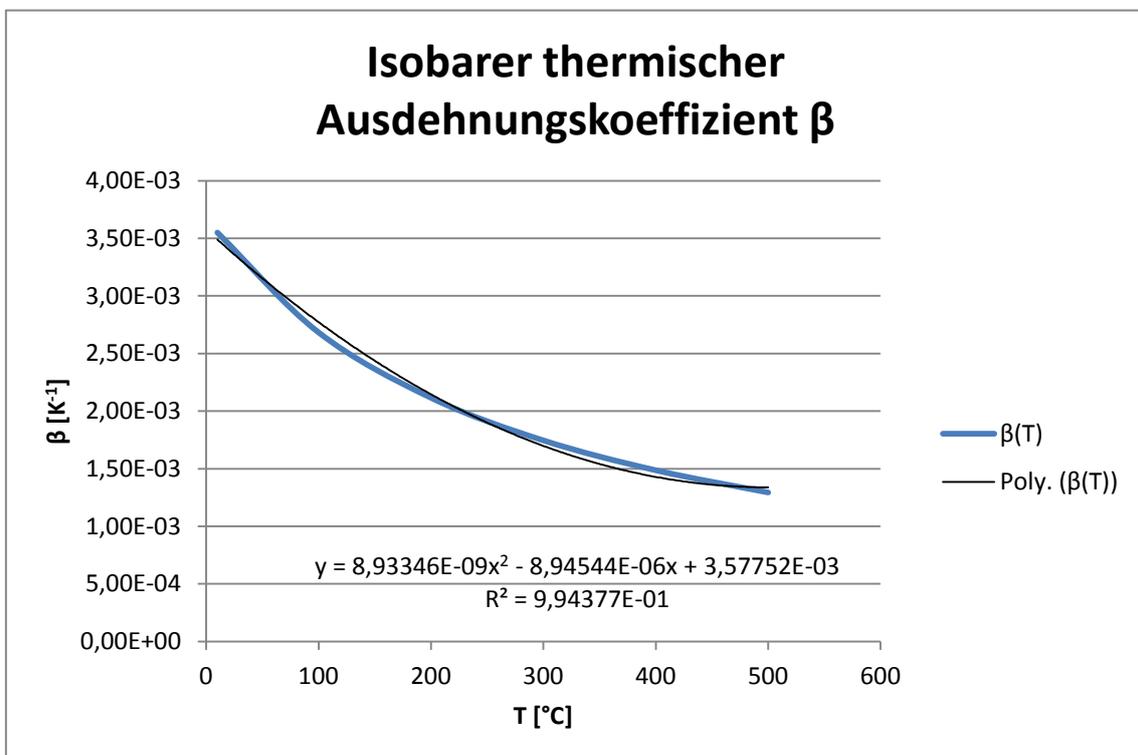


Abbildung 42: Isobarer thermischer Ausdehnungskoeffizient Luft

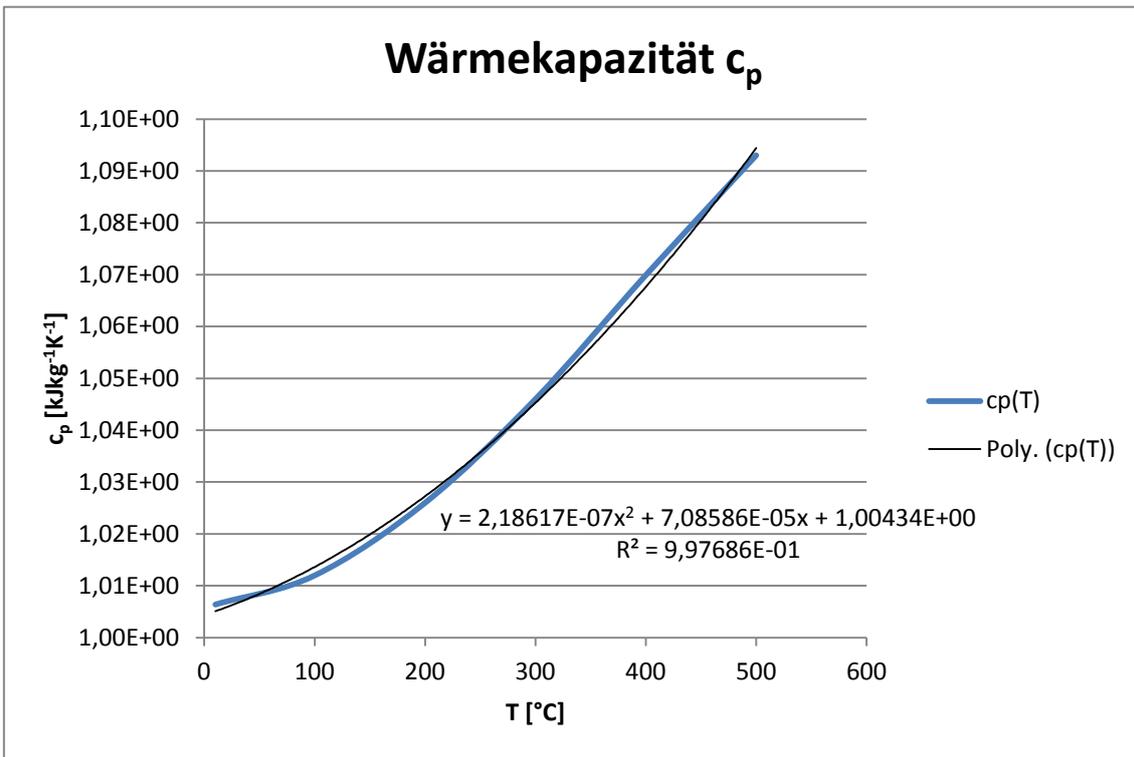


Abbildung 43: Wärmekapazität Luft

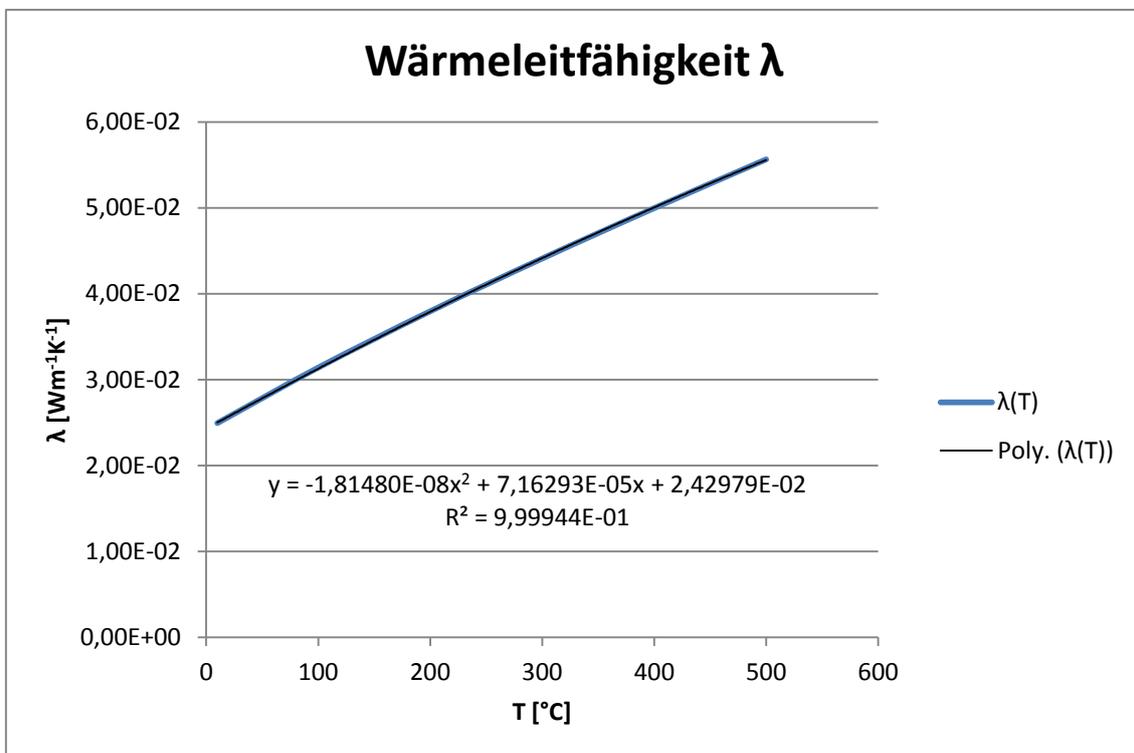


Abbildung 44: Wärmeleitfähigkeit Luft

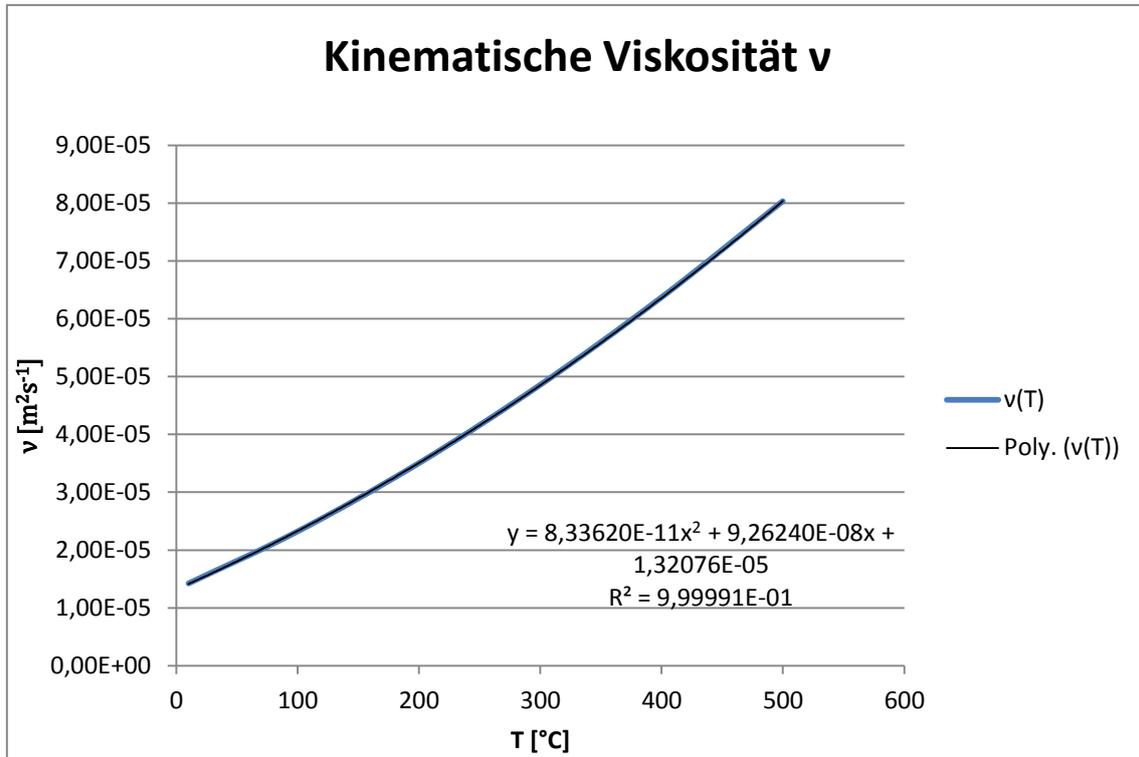


Abbildung 45: Kinematische Viskosität Luft

Die Implementierung der Stoffwertfunktionen in das Modell wird am Beispiel der Temperaturleitfähigkeit erläutert. Um einen automatisierten Aufruf im Berechnungsprogramm zu ermöglichen, wird ein Subprogramm erstellt, welches dann im Modell als Befehl zur Verfügung steht (calca(T)). Als Eingangsparameter muss die aktuell vorliegende Temperatur übergeben werden. Die Temperatur wird in die in Excel berechnete Näherung eingesetzt und die Temperaturleitfähigkeit an das Modell zurück übergeben.

```
%% Berechnung der Temperaturleitfähigkeit
%Stoffwerte in Excel
% R=1
```

```
function a=calca(T)
```

```
a = 1.00871*10^(-10)*T^2+1.38277*10^(-7)*T+1.85604*10^(-5);
```

```
return
```

```
end
```

6.4 Thermisches Modell

Da alle relevanten Gleichungen, Stoffwerte, Randbedingungen und Annahmen bekannt sind, kann das Modell programmiert werden. Für die Ermittlung des Wärmestroms, der von der Flamme auf die Platte übertragen wird, muss aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen der Sensoren die Platte in neun Zellen unterteilt werden. Die Aufteilung erfolgt wie in [11] vorgeschrieben. Jede Zelle hat daher einen eigenen Temperaturwert und wird separat berechnet. Abschließend kann der Gesamtwärmestrom ermittelt werden. Es folgen nun Ausschnitte aus dem Programmcode und Erklärung der Funktion.

Bevor Berechnungen durchgeführt werden können, müssen die Messdaten der Versuche eingelesen und in neun Temperaturvektoren aufgeteilt werden. Das Programm sucht nach allen .txt Dateien, in denen die Messdaten gespeichert sind. Anschließend kann die Änderung der gemessenen Temperatur jeder Zelle zwischen zwei Zeitpunkten bestimmt und in neuen Vektoren abgespeichert werden.

```

file=files'
X=load(file.name);
Name=file.name;
Name=regexprep(Name, '\.(.)*', '');

t=X(:,1); %Einlesen Zeitvektor
T1=X(:,2); %Aufteilen der Messdatenmatrix in Kanäle
T2=X(:,3);
T3=X(:,4);
T4=X(:,5);
T5=X(:,6);
T6=X(:,7);
T7=X(:,8);
T8=X(:,9);
T9=X(:,10);

for i=1:length(T1)-1
    dT1(i,1) = T1(i+1,1)-T1(i,1); %Bildung dT/dt
    dT2(i,1) = T2(i+1,1)-T2(i,1);
    dT3(i,1) = T3(i+1,1)-T3(i,1);
    dT4(i,1) = T4(i+1,1)-T4(i,1);
    dT5(i,1) = T5(i+1,1)-T5(i,1);
    dT6(i,1) = T6(i+1,1)-T6(i,1);
    dT7(i,1) = T7(i+1,1)-T7(i,1);
    dT8(i,1) = T8(i+1,1)-T8(i,1);
    dT9(i,1) = T9(i+1,1)-T9(i,1);
end

```

Die Wärmeströme sollen nur in bestimmten Zeitintervallen berechnet werden, zum Beispiel während der Beflammung oder der Abkühlung. Daher wird dem Programm über die Variablen „start“ und „ende“ das Zeitintervall, in dem kalkuliert werden soll, vorgeben. Innerhalb dieser Zeitspanne werden alle Wärmeströme für jeden Zeitschritt bestimmt und

abgespeichert. Die Stoffwerte werden durch Aufruf der Unterprogramme bestimmt. Als Temperatur wird die mittlere Fluidtemperatur herangezogen [14].

$$T_B = \frac{T_{Platte} + T_{Luft}}{2} [K] \quad (6-13) [14]$$

Anschließend werden die aktuelle Rayleigh- und Prandtl-Zahl (Glg 6-10, 6-9) ermittelt und in die Nußeltbeziehung (Glg 6-8) eingesetzt. Mit bekannter Nußelt-Zahl kann mit Gleichung 6-12 der Wärmeübergangskoeffizient berechnet werden. An dieser Stelle sind alle Werte zur Bestimmung aller Wärmeströme vorhanden und werden laut den Gleichungen 6-3, 6-6 und 6-7 ermittelt. Den Wärmestrom, der von der Flamme auf den Prüfstand im betrachteten Zeitraum übertragen wird, erhält man durch Lösung der Energiebilanz 6-4.

```

for i=start:ende

    t_p(i,1) = t(i,1);
    T = T1(i);
    DT = dT1(i);
    a = calca((T+T1)/2);           %Berechnung Temperaturleitf.
    beta = calcbeta((T+T1)/2);   %Berechnung Ausdehnungskoeffizient
    visk = calcvisk((T+T1)/2);   %Berechnung Viskosität
    lambda = calclambda((T+T1)/2); %Berechnung Wärmeleitfähigkeit
    cp = calccp((T+T1)/2);       %Berechnung Wärmekapazität

    Ra(i,1) = (g*beta*abs(T-T1)*(3*1)^3)/(a*visk); %Rayleighzahl
    Pr = visk/a;                  %Berechnung Prantlzahl

    Num = 0.68+(0.67*Ra(i,1)^(1/4))/((1+(0.462/Pr)^(9/16))^(4/9));
    alpha(i,1) = (Num*lambda)/(3*1); %Berechnung Wärmeübergangskoeff
                                     %izient natuerliche Konvektion

    q_dt(i,1)=DT*roh*cpstahl*d;
    q_konv(i,1)=alpha(i,1)*(T-T1);
    q_str(i,1)=2*bolz*epsilon*(T+273.15)^4;
    q_g1(i,1) = (q_dt(i,1) + q_konv(i,1) + q_str(i,1))/1000; %/1000 für
                                                         %umrechnung in kW
end

```

Die Ergebnisse werden für jeden Zeitschritt in Vektoren abgespeichert und können mit dem Zeitvektor „t_p“ grafisch dargestellt werden. Dies ermöglicht den Verlauf des Wärmestromes darzustellen.

```

figure(1)
plot(t_p(start:ende),
q_g1(start:ende),t_p(start:ende),q_g1mabsp(start:ende),'r--');
legend('Wärmestrom q1','Mittelwert q1','Location','northeast')
xlabel('Zeit/s')
ylabel('Q/kW')
String1=strcat(Name,' uebertragener spezifischer Wärmestrom');
title(String1)
String=strcat(Name,'WärmestromFlamme1.png');
print(figure(1),'-dpng',String);

```

Die Diagramme werden automatisch beschriftet, formatiert und als Bilddateien im Format png abgespeichert.

Der Berechnungsalgorithmus ist für jeden Kanal vorhanden. Somit erhält man als Endergebnis die grafische Darstellung des Wärmestromverlaufs aller Kanäle im betrachteten Zeitintervall (Abbildung 46) und einen Ergebnisvektor mit den mittleren spezifischen Wärmeströmen während der Beflammung.

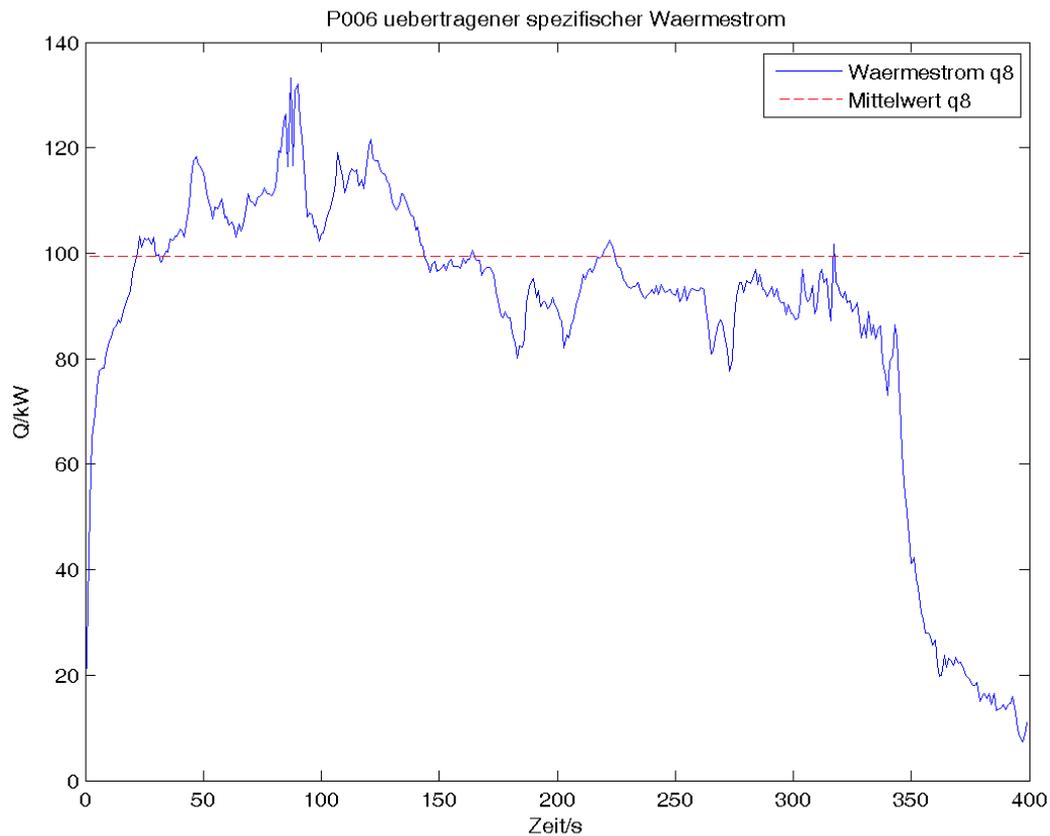


Abbildung 46: Berechneter Verlauf des Wärmestromes Zelle 8 Versuch P006

6.5 Validierung des Modells

Für die Erstellung des Modells müssen die bereits beschriebenen Annahmen und Randbedingungen getroffen werden. Man kann daher nicht ohne Überprüfung davon ausgehen, dass die Ergebnisse richtig sind oder innerhalb akzeptabler Abweichungen liegen. Vor allem die polynomische Näherung der Stoffwerte für Luft kann zu systematischen Fehlern im Modell führen. Weiters werden durch die Idealisierung der Wärmestrahlung und konvektiven Kühlung physikalische Vorgänge vernachlässigt, deren Auswirkung auf das Ergebnis nicht prognostizierbar ist.

Das Modell muss daher durch einen mathematischen Beweis verifiziert werden. Wie in Kapitel 4.8 bereits erwähnt, kann mit den Messdaten der natürlichen Abkühlkurve der Stahlplatte überprüft werden, ob das Modell die Wärmeströme richtig berechnen kann. Nach dem Ablöschen der Flamme wird der Wärmestrom der Flamme \dot{q}_{ein} null und hat keinen Einfluss mehr auf die Energiebilanz 6-3. Es liegen während des Abkühlens folglich nur mehr die Wärmeströme durch Strahlung, Konvektion und die Änderung der inneren Energie vor. Letztere ist laut Gleichung 6-3 ausschließlich von der Änderung der Temperatur abhängig und durch die Abkühlkurve vorgegeben und kann ohne Unsicherheiten berechnet werden. Somit liegen mögliche Fehler nur mehr in den beiden anderen Wärmeströmen. Setzt man in Gleichung 6-3 für \dot{q}_{ein} null ein, erhält man eine neue Energiebilanz für das Abkühlen der Platte.

$$d_{Stahl}\rho_{Stahl}c_p \frac{dT}{dt} = -\dot{q}_{Str} - \dot{q}_{konv} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (6-14)$$

Aus Gleichung 6-14 folgt, wenn die mit den getroffenen Annahmen und Stoffwerten berechneten Wärmeströme \dot{q}_{Str} und \dot{q}_{konv} in Summe die Änderung der inneren Energie ergeben, ist das Modell mathematisch validiert und die berechneten Ergebnisse können verwendet werden.

Da während des Abkühlens die Platte nicht beflammt wird, muss der konvektive Wärmestrom auf beiden Oberflächen betrachtet werden, da sich ohne Flamme auch dort eine Strömung aufgrund der natürlichen Konvektion einstellt.

Lässt man das zu überprüfende Gleichungssystem für die Abkühlung jeden Zeitschritt nach dem bereits beschriebenen Algorithmus berechnen, erhält man den Verlauf der Wärmeströme und der Änderung der inneren Energie und kann diese grafisch darstellen. Wenn das Modell richtig ist und man die Absolutwerte der Graphen gegen die Zeit aufträgt, um die Vorzeichen zu berücksichtigen, müssen die beiden Kurven übereinander liegen (Abbildung 47).

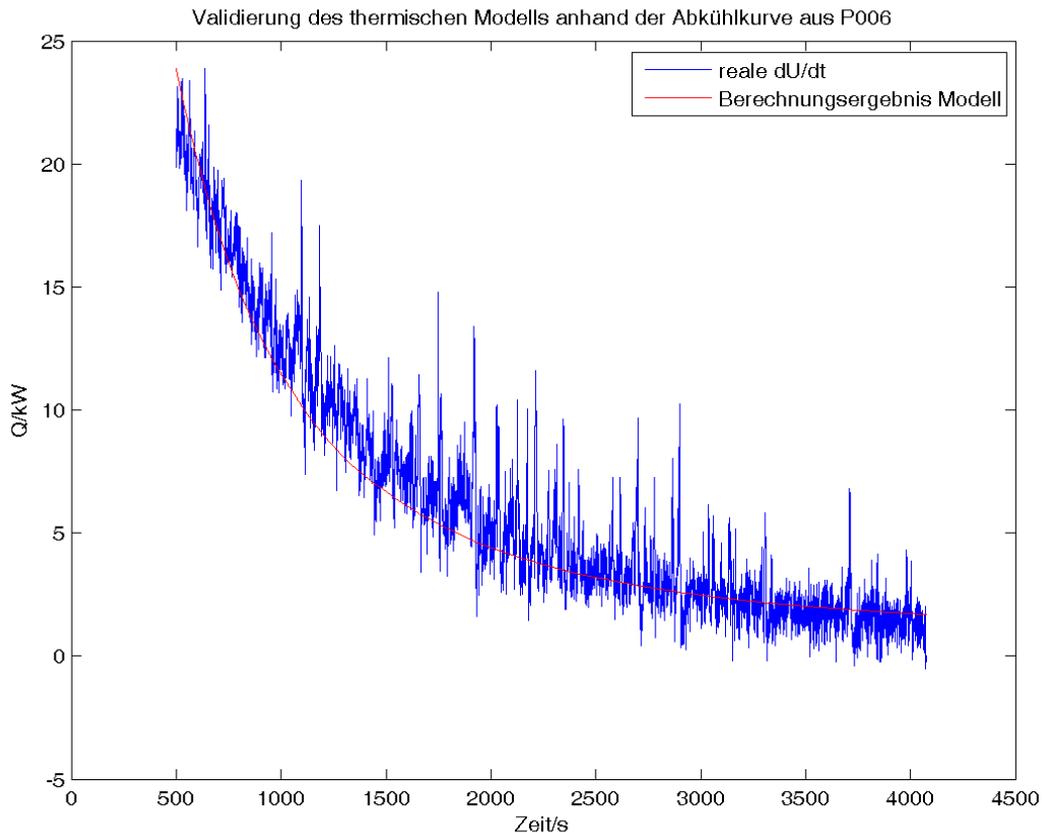


Abbildung 47: Validierung des thermischen Modells

Man erkennt, dass die Ergebniskurve die realen Messwerte widerspiegelt und die getroffenen Annahmen korrekt sind. Die raue Kurvenform der realen Messwerte lässt sich auf die hohe Gesamtwärmekapazität der Stahlplatte zurückführen. Sehr kleine Änderungen der Temperatur durch Messfehler und Störsignale haben starke Auswirkungen auf die berechnete Temperaturänderung und führen somit, durch die Multiplikation mit der Gesamtwärmekapazität, zu hohen Änderungen der gemessenen inneren Energieänderung. Das Modell gleicht durch die gewählten Formeln diese Abweichungen aus und liefert eine glatte Kurve.

Zusätzlich zur Auswertung der Versuche kann das Modell zukünftig erweitert werden. Wenn die gleichen Vereinfachungen beibehalten werden, ist es zum Beispiel möglich für unterschiedliche Flammen das Temperaturprofil der Platte beim Aufheizen vorauszusagen. Sollen weitere passive Schutzvorrichtungen analysiert werden, kann durch Erweiterung des Gleichungssystems um die Wärmeleitung durch die Isolationsschicht die Auswirkungen auf die Platte berechnet werden. Dies soll unterstützend in der Planung erweiterter und neuer Versuchsreihen angewendet werden.

6.6 Berechnungsergebnisse

Die ungestörten Aufheizphasen aller Plattenbrandversuche werden mit dem beschriebenen Modell berechnet. Der Gesamtwärmestrom, der auf den Versuchsstand einwirkt, wird folgenderweise ermittelt. Die erhaltenen mittleren spezifischen Wärmeströme der einzelnen Zellen werden durch Multiplikation mit der Zellenfläche in einen absoluten Wärmestrom umgewandelt. Durch Summieren aller einzelnen Wärmeströme erhält man den absoluten Wärmestrom, der auf die gesamte Platte einwirkt. Dividiert man diesen Wert durch die Fläche der Platte erhält man den gesamten spezifischen Wärmestrom, der auf den Prüfstand übertragen wird (Tabelle 6).

Tabelle 6: Berechnungsergebnisse Wärmestrom

Versuch		P001	P002	P003	P005	P006
q ₁	kWm ⁻²	112,84	71,91	74,47	70,92	93,27
q ₂	kWm ⁻²	113,55	80,14	84,04	82,40	102,18
q ₃	kWm ⁻²	96,58	72,24	84,45	82,83	92,98
q ₄	kWm ⁻²	120,77	77,51	81,88	85,85	95,75
q ₅	kWm ⁻²	113,29	79,42	92,02	84,95	103,25
q ₆	kWm ⁻²	96,05	70,92	88,93	71,57	97,21
q ₇	kWm ⁻²	118,23	75,36	81,25	79,06	86,79
q ₈	kWm ⁻²	109,34	87,20	101,57	93,75	99,43
q ₉	kWm ⁻²	84,70	64,68	85,96	71,10	92,01
Q ₁	kW	18,05	11,51	11,91	11,35	14,92
Q ₂	kW	18,17	12,82	13,45	13,18	16,35
Q ₃	kW	15,45	11,56	13,51	13,25	14,88
Q ₄	kW	19,32	12,40	13,10	13,74	15,32
Q ₅	kW	18,13	12,71	14,72	13,59	16,52
Q ₆	kW	15,37	11,35	14,23	11,45	15,55
Q ₇	kW	18,92	12,06	13,00	12,65	13,89
Q ₈	kW	17,49	13,95	16,25	15,00	15,91
Q ₉	kW	13,55	10,35	13,75	11,38	14,72
Q _G	kW	154,46	108,70	123,93	115,59	138,06
q _G	kWm ⁻²	107,26	75,49	86,06	80,27	95,87

Die Interpretation der Ergebnisse lässt folgende Schlussfolgerung zu. Der übertragene Wärmestrom nimmt mit sinkendem LPG-Tankdruck ab, da der Gasmassenstrom geringer wird und dadurch die Feuerwärmeleistung abnimmt. Bei höheren Plattentemperaturen und längeren Beflammungszeiten steigt im zeitlichen Mittel der übertragene Wärmestrom.

Wie in Kapitel 4.4 bereits erwähnt, erreicht die Platte die geforderte Temperatur im Versuch P001 am oberen Ende der maximal erlaubten Zeitspanne aus [11]. Wie in [7] berichtet, werden für große Jetflames spezifische Wärmeströme von 100 bis 200 $\frac{kW}{m^2}$ angenommen. Da der Prüfstand Jetflame-Szenarien nachstellen soll und die berechneten Wärmeströme zwischen 75 und 107 $\frac{kW}{m^2}$ liegen, erklärt die geringere Leistung, warum die erlaubte Zeitspanne ausgereizt wird.

7 Zusammenfassung

Es wird aufgezeigt, dass Störfälle, die zu einem Brand in Industriebetrieben führen, aufgrund der vorhandenen Stoffe und den vorliegenden Betriebsparametern ein großes Schadenspotential aufweisen. Die direkte Beflammung von Anlagenteilen, insbesondere Druckbehälter, durch Jetflames stellt eine Sonderform dar. Die dabei ablaufenden physikalischen Vorgänge und Wechselwirkungen zwischen der Wärmequelle, dem Behälter und der gelagerten Flüssigkeit können nur mittels exakter Simulation so genau dargestellt werden, dass Aussagen über Zeitspannen bis zum Behälterversagen und dessen Auswirkungen möglich sind. Vereinfachte Ansätze sind zwar vorhanden und teilweise anerkannt, aber deren Ergebnisse müssen immer im Kontext zu den getroffenen Vereinfachungen interpretiert werden.

Der derzeitige Stand der Wissenschaft weist darauf hin, dass der Zeitraum, in dem ein Behälterversagen zu erwarten ist, zwischen wenigen Minuten und unter einer Stunde liegt, abhängig vom Quelltherm und der Behältergeometrie. Diese Tatsache soll zukünftig in die Planung des abwehrenden Brandschutzes integriert werden, um die Sicherheit der Einsatzkräfte gewährleisten zu können.

Es bestehen technische Möglichkeiten die Wahrscheinlichkeit des Versagens von Druckbehältern im Brandfall drastisch zu reduzieren. Dies kann einerseits durch den Einbau von Brandschutzbeschichtungen beziehungsweise thermischer Isolation realisiert werden oder durch Verwendung von aktiven Schutzeinrichtungen wie Berieselungsanlagen. Beide Systeme können bei richtiger Auslegung und Anwendung den auf den Behälter einwirkenden Wärmestrom drastisch reduzieren und somit die Behälterwandtemperatur in einem sicheren Betriebsbereich halten.

Für eine weitere Verbesserung der Anlagensicherheit im Brandfall sollen Verfahren entwickelt und in die Anlagensteuerung eingebunden werden, die bei Erkennen der beschriebenen Störfällen rechtzeitig Maßnahmen wie Druckreduktion durch Ausblasen des Behälterinhaltes setzen und die Anlage wieder in einen sicheren Zustand zurückführen. Dies senkt nicht nur das Eskalationsrisiko, sondern verringert in weiterer Folge auch den wirtschaftlichen Schaden, der dadurch an der Anlage entstehen würde.

Um die beschriebenen Phänomene experimentell untersuchen zu können und die Effektivität von Kühlmaßnahmen zu bestimmen, wird beschlossen einen Prüfstand zu entwickeln. Es ist gelungen den Versuchsaufbau so zu konzipieren, dass er die Anforderungen der Norm [11] erfüllt.

Die durchgeführten Versuche zeigen deutlich, dass die angenommenen Wärmeströme, die durch Jetflames auf Druckbehälter übertragen werden, richtig sind. Folglich muss eine Berieselungsanlage in der Lage sein, die Wärme in einer Weise abführen zu können, die nur geringe Temperaturgradienten über die Behälteroberfläche verursacht. Mit der verwendeten Apparatur zur Kühlung der Platte wird erst bei einem Kühlwasservolumenstrom von $26,7 \frac{l}{\text{min } m^2}$ eine zufriedenstellende Kühlung erreicht. Es wird daher empfohlen die ÖBFV Richtlinie [1], die einen Volumenstrom von $15 \frac{l}{\text{min } m^2}$ vorschreibt, zu überarbeiten und korrekte Werte experimentell zu ermitteln. Der Wert des ermittelten Volumenstromes deckt sich desweiteren mit Versuchsaufbauten anderer Forschungsteams, die die gleiche Fragestellung untersuchen. Beispielsweise werden am Prüfstand aus [9], bestehend aus einem Druckbehälter und einer Berieselungsanlage, mindestens $23 \frac{l}{\text{min } m^2}$ benötigt um eine Stabilisierung der Behältertemperatur zu erreichen.

8 Ausblick

Zukünftig sollen weitere Versuche durchgeführt werden, um eine breitere Datenbasis zu erhalten. Vorher muss entweder durch Modifikation der vorhandenen Infrastruktur oder einem Standortwechsel der Wärmestrom der Flamme erhöht werden. Dadurch soll die maximal zulässige Temperatur aus [11] früher erreicht werden, um reale Jetflames besser nachstellen zu können.

Da der Prüfstand auch in jetziger Form die Auflagen erfüllt, soll durch Kooperation mit Industriekunden aus dem Bereich der Brandschutzbeschichtungen Partnerschaften für Produktentwicklung und -überprüfung geschaffen werden. Es kann ein normiertes Testverfahren entwickelt werden, das aufgrund des Prüfstandaufbaus eine Vielzahl von Versuchen in kurzer Zeit ermöglicht. Dadurch soll die Möglichkeit geschaffen werden, unterschiedliche Materialien in unterschiedlichen Ausführungen, zum Beispiel Schichtdicken, bei ähnlichen Umgebungsbedingungen zu testen.

Literaturverzeichnis

- [1] Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, ÖBFV-INFO E-07 (2010).
- [2] <https://de.wikipedia.org/wiki/Verbrennungsdreieck#/media/Datei:Verbrennungsdreieck.svg>, abgerufen am 02. August 2019.
- [3] Droste, B., A. Ulrich and J. Borch, Brand new fire test facilities at 'BAM Test Site Technical Safety', Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material 22 (2013), 4, 195–199.
- [4] http://4.bp.blogspot.com/_YOjepBEvjc8/RqoBK4i0R8I/AAAAAAAAAYo/beJYq_wxeBY/s1600-h/JetFire.jpg, abgerufen am 02. August 2019.
- [5] C.J.H van den Bosch (Ed.), 1997, Methods for the calculation of physical effects Due to releases of hazardous materials (liquids and gases) ; 'yellow book'. With assistance of R.A.P.M. Weterings, Niederlande. 3rd ed., Den Haag, Sdu Uitgevers (CPR, 14-E).
- [6] Chamberlain, Development in design methods for predicting thermal radiation from flares, Chemical Engineering, Research and Design (1987), 65, 299–309.
- [7] Reniers, Genserik; Cozzani, Valerio (Eds.), 2013, Domino Effects in the Process Industries Modelling, Prevention and Managing. With assistance of Valerio Cozzani, Burlington, Elsevier Science.
- [8] Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, ÖBFV-RL VB-05 (1996).
- [9] Roberts, T.A., Directed deluge system designs and determination of the effectiveness of the currently recommended minimum deluge rate for the protection of LPG tanks, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 17 (2004), 2, 103–109.

- [10] Blees, D., Experimentelle und numerische Untersuchungen reaktiver Brandschutzbeschichtungen für Gefahrgut-Transporttanks, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal.
- [11] Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, Departement of Transportation, CFR 49 Part 179-SPECIFICATIONS FOR TANK CARS (2011).
- [12] VdTÜV, AD 2000-Regelwerk, Beuth Verlag, Berlin, 2018.
- [13] Gamsjäger E., Strömungslehre, Montanuniversität, Leoben, 2019.
- [14] Raupenstrauch H., Wärmeübertragung, Montanuniversität, Leoben, 2013.