

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Aufbau eines Materialtests zur Bewertung der Eigenschaften persönlicher Schutzausrüstung, insbesondere Feuerwehrschutzkleidung, bei Einwirkung von Stichflammen durch einen Flash Over
(Stichflammenbelastung persönlicher Schutzausrüstung)

127

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN,
KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V - Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 127

Aufbau eines Materialtests zur Bewertung der
Eigenschaften persönlicher Schutzausrüstung,
insbesondere Feuerwehrschutzkleidung, bei Ein-
wirkung von Stichflammen durch einen Flash Over
(Stichflammenbelastung persönlicher Schutzausrüstung)

von
Dipl.-Ing. Ulrich Pasch

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt

Heyrothsberge

Dezember 2001

BERICHTS-KENNBLETT

Nr. des Berichtes:	Titel des Berichtes:	ISSN:	
127	Aufbau eines Materialtests zur Bewertung der Eigenschaften persönlicher Schutzausrüstung, insbesondere Feuerwehrsutzausrüstung, bei Einwirkung von Stichflammen bei einem Flash Over (Stichflammenbelastung persönlicher Schutzausrüstung)	0170-0060	
Autoren: Dipl.-Ing. Ulrich Pasch		durchführende Institution: Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt Biederitzer Str. 5 D-39175 Heyrothsberge	
Nummer des Auftrages: 31 (2/2000) H		auftraggebende Institution: Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V - Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung,	
Datum des Berichtes: 20.12.2001			
Seitenzahl: 87 / 30 Anlagen	Bilder: 97	Tabellen: 27	Literaturverweise: 10
<p>Kurzfassung: Im Rahmen der Realisierung des Forschungsvorhabens waren experimentelle Untersuchungen zu führen, die Aufschluss geben sollten über die Eignung der Komponenten eines konzipierten Versuchsstandes für einen Materialtest zur Bewertung der Eigenschaften persönlicher Schutzausrüstung bei Einwirkung von Stichflammen. Untersucht wurden in diesem Zusammenhang:</p> <ul style="list-style-type: none"> - die Propangasversorgungsanlage für die Brenneinrichtung unter dem Aspekt der Veränderung ihrer Parameter durch Umwelteinflüsse. - Die Leistungsabhängigkeit der Brenner in Abhängigkeit von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner. - Die thermischen Parameter der Brenner in Abhängigkeit von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner und den möglichen Positionen der Brenner zum zu beflamenden Objekt. - Die physiologisch relevante Instrumentierung eines Dummy mit Wärmeflussensoren zur Quantifizierung der thermischen Beanspruchung durch Stichflammen. <p>Insgesamt kann im Ergebnis der Untersuchungen zum Forschungsvorhaben eingeschätzt werden, dass die grundlegenden Voraussetzungen zur Realisierung des Verfahrens eines Materialtests zur Bewertung der Eigenschaften persönlicher Schutzausrüstung geschaffen wurden. Es bedarf noch, einige im Bericht aufgezeigten Mängel abzustellen und die Funktionsfähigkeit des Verfahrens in allen seinen Komponenten einem umfangreichen Test zu unterziehen.</p>			
<p>Schlagwörter: Materialtest, persönliche Schutzausrüstung, Feuerwehrsutzausrüstung, Stichflamme, Flash Over, Brenner, Dummy, Wärmeflussensoren, Propangas</p>			

INHALTSVERZEICHNIS

	SEITE
VERZEICHNIS DER ANLAGEN	1
1 EINLEITUNG	4
2 BESCHREIBUNG DES UNTERSUCHUNGSVERFAHRENS	5
3 VERSUCHSAUFBAU	6
4 DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN	9
4.1 Vorversuche	9
4.1.1 Untersuchungen zur Abhängigkeit der Brennereingangsdrücke von den thermischen Umgebungsbedingungen der Versorgungstanks	9
4.1.1.1 Verhalten von Flüssiggas	9
4.1.1.2 Durchgeführte Messungen zum Temperatureinfluss	11
4.1.1.3 Ergebnisse zum Temperatureinfluss auf die Brennereingangsdrücke	13
4.1.2 Untersuchungen zur Abhängigkeit des Brennereingangsdruckes von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner (lastabhängige Einzelbrenner- untersuchung)	15
4.1.2.1 Untersuchungen ohne Bekleidungssimulator	15
4.1.2.2 Untersuchungen mit Bekleidungssimulator	17
4.2 Bestimmung der thermischen Parameter der Brenner	20
4.2.1 Einzelbrenner	20
4.2.1.1 Thermische Belastung als Funktion des Brennerabstandes	21
4.2.1.2 Wärmestrahlungsbelastung als Funktion des Brennerabstandes	25
4.2.2 Brennerkombination	30
4.2.2.1 Brennerkombination bei symmetrischer Anordnung der Brenner	30
4.2.2.2 Brennerkombination bei einseitiger Anordnung der Brenner mit und ohne Bekleidungssimulator	33
4.2.2.3 Wärmestrahlungsbelastung der Brennerkombination bei einseitiger Anordnung der Brenner	35
4.3 Zusammenfassende Bewertung der Untersuchungen zur Bestimmung der thermischen Parameter der Brenner	39
4.3.1 Bewertung Temperaturbelastung	40
4.3.1.1 Einzelbrenner	40

INHALTSVERZEICHNIS

	SEITE
4.3.1.2 Brennerkombination	41
4.3.2 Bewertung der Wärmestrahlungsbelastung	42
4.4 Physiologisch relevante Ausrüstung des Dummy mit Wärmeflussensoren	44
4.4.1 Beschreibung der Komponenten	44
4.4.1.1 Der Dummy	44
4.4.1.2 Die Wärmeflussensoren	46
4.4.1.3 Anforderungen an die Instrumentierung des Dummy mit Wärmeflussensoren .	47
4.4.2 Thermische Anforderungen an den Wärmeflussensensor	49
4.4.2.1 Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der thermischen Anforderungen	49
4.4.2.2 Auswertung der Ergebnisse der Untersuchungen	51
4.4.2.3 Schlussfolgerungen zur thermischen Beanspruchung des Wärmeflussensors	56
4.4.3 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Haut	57
4.4.3.1 Anatomie der Haut	57
4.4.3.2 Auswirkungen von Hitze auf die Haut	58
4.4.3.3 Berechnung des Wärmeflusses in der Haut und der Wärmeleitfähigkeit der Haut	60
4.4.4 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Wärmeflussensors	62
4.4.4.1 Versuchsaufbau zur Bestimmung des Wärmeflusses im Sensor	62
4.4.4.2 Schlussfolgerungen zum Vergleich Haut und Wärmeflussensensor	68
4.4.5 Instrumentierung des Dummy mit Wärmeflussensoren	69
4.4.5.1 Aufbringen des Sensors auf dem Dummy	69
4.4.5.2 Herstellung eines Adapter-Prototypen	72
5 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	77
VERZEICHNIS DER LITERATUR	80
VERZEICHNIS DER BILDER	82
VERZEICHNIS DER TABELLEN	86
ANLAGEN	

VERZEICHNIS DER ANLAGEN

Anlage

- 1.1 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 1 - ohne Bekleidungssimulator
- 1.2 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 2 - ohne Bekleidungssimulator
- 1.3 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 3 - ohne Bekleidungssimulator
- 1.4 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 4 - ohne Bekleidungssimulator
- 1.5 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 5 - ohne Bekleidungssimulator
- 1.6 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 6 - ohne Bekleidungssimulator
- 1.7 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 7 - ohne Bekleidungssimulator
- 1.8 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 8 - ohne Bekleidungssimulator
- 1.9 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 9 - ohne Bekleidungssimulator
- 1.10 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 10 - ohne Bekleidungssimulator
- 1.11 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 11 - ohne Bekleidungssimulator
- 1.12 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 12 - ohne Bekleidungssimulator
- 1.13 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 13 - ohne Bekleidungssimulator

VERZEICHNIS DER ANLAGEN

Anlage

- 1.14 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner – Messstelle 14
- ohne Bekleidungssimulator
- 1.15 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner – Messstelle 15
- ohne Bekleidungssimulator
- 2.1 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung mit Bekleidungssimulator in Abhängigkeit von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner
- Abstand = 40 cm – Messstellen 1 bis 4
- 2.2 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung mit Bekleidungssimulator in Abhängigkeit von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner
- Abstand = 40 cm – Messstellen 5 bis 8
- 2.3 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung mit Bekleidungssimulator in Abhängigkeit von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner
- Abstand = 40 cm – Messstellen 9 bis 12
- 2.4 Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung mit Bekleidungssimulator in Abhängigkeit von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner
- Abstand = 40 cm – Messstellen 13 bis 15
- 3 Zeitabhängige Flammenbilder des Einzelbrenners 1
- 4.1 Untersuchung Brennerkombination aus 2 Brennern, einseitige Anordnung ohne Bekleidungssimulator, Abstände 1 m und 80 cm
- 4.2 Untersuchung Brennerkombination aus 3 Brennern, einseitige Anordnung ohne Bekleidungssimulator, Abstände 1 m und 80 cm
- 4.3 Untersuchung Brennerkombination aus 4 Brennern, einseitige Anordnung ohne Bekleidungssimulator, Abstände 1 m und 80 cm
- 4.4 Untersuchung Brennerkombination aus 4 Brennern, einseitige Anordnung ohne und mit Bekleidungssimulator, Abstand 60 cm
- 4.5 Untersuchung Brennerkombination aus 3 Brennern, einseitige Anordnung ohne und mit Bekleidungssimulator, Abstand 60 cm
- 4.6 Untersuchung Brennerkombination aus 2 Brennern, einseitige Anordnung ohne und mit Bekleidungssimulator, Abstand 60 cm
- 5 Wärmestrahlungsbelastung in Abhängigkeit von der Brenneranzahl und dem Abstand Brennerkombination – einseitig – Auswertezeitraum = 20 Sekunden
- 6 Wärmestrahlungsbelastung in Abhängigkeit von der Brenneranzahl und dem Abstand Brennerkombination – einseitig – Auswertezeitraum = 8 Sekunden
- 7 Datenblatt COTRONICS 124

VERZEICHNIS DER ANLAGEN

Anlage

8 Datenblatt COTRONICS 920

1 EINLEITUNG

Erkenntnisse aus Feuerwehreinsätzen belegen, dass Feuerwehrleute sich in zunehmendem Maße bei der Brandbekämpfung Situationen gegenübersehen, in denen sie thermischen Belastungen durch Stichflammen im Allgemeinen und dem Phänomen Flash Over im Besonderen ausgesetzt sein können. Den damit verbundenen Auswirkungen in Form schwerwiegender Verbrennungen kann begegnet werden durch das Tragen entsprechender persönlicher Schutzausrüstung. Insbesondere Feuerwehreinsatzkleidung muss in der Lage sein, den Körper des Feuerwehrmannes umfassend zu schützen, was in der Regel durch die Anwendung hierfür geeigneter Prüf- und Untersuchungsverfahren nachzuweisen ist. So wird beispielsweise gegenwärtig nach [HuPF 99] das Thermo Man - Verfahren der Firma DuPont zur Prüfung von Feuerwehrsutzkleidung bei thermischer Beanspruchung durch Stichflammen (Flash Over – Simulation) angewendet. Dieses Prüfverfahren mit konkret festgelegten technischen Parametern und seiner ausschließlichen Anwendbarkeit auf Feuerwehrsutzkleidung ist jedoch nicht dazu geeignet, sowohl differenzierte thermische Belastungen zu simulieren, als auch die Gesamtheit der zur persönlichen Schutzausrüstung des Feuerwehrmannes gehörenden Ausrüstungen aus thermischer Sicht zu bewerten. Aber gerade dieses erscheint untersuchenswert, da ja bekanntlicherweise immer das schwächste Glied in der Kette der zu bewertenden Ausrüstungsgegenstände im Ernstfall das über Leben oder Tod entscheidende Ausrüstungsteil ist. Diesem Grundgedanken folgt auch die am Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt vertretene Philosophie, dass nur eine komplexe Betrachtung und Bewertung aller im Feuerwehreinsatz zu tragenden persönlichen Ausrüstungsgegenstände, inklusive der Feuerwehrsutzkleidung, Sinn macht.

Die Zielstellung des Forschungsvorhabens, dessen Ergebnisse im vorliegenden Bericht ausgewiesen werden, bestand in der Schaffung von **Grundlagen** für die Entwicklung eines Materialtests für persönliche Schutzausrüstung bei Stichflammenbelastung bzw. durch einen Flash Over, welcher die Umsetzung der vorgenannten Philosophie ermöglichen sollte. Dabei konzentrierten sich die Untersuchungen vorwiegend auf Probleme der Realisierung eines thermischen Belastungsprofiles, welches dem Flash Over- Phänomen adäquat sein sollte und was mittels einer vorhandenen Brenneinrichtung zu erzeugen war. Weitere grundlegende Untersuchungen befassten sich mit einer physiologisch relevanten Ausstattung eines, zu den technischen Bestandteilen des Materialtestverfahrens gehörenden, Dummys mit Wärmeflussensoren. In diesem Zusammenhang ist zu betonen, dass diese Untersuchungen nicht auf ein perspektivisch zu entwickelndes Prüfverfahren abzielten. Die Zielstellung bestand vielmehr darin, Basisuntersuchungen für eine perspektivisch zu entwickelnde variable

Untersuchungsmethode sowohl in Bezug auf die zu untersuchenden Ausrüstungsgegenstände persönlicher Schutzausrüstung als auch hinsichtlich der durch das Verfahren zu realisierenden thermischen Beanspruchungsparameter zu führen.

2 BESCHREIBUNG DES UNTERSUCHUNGSVERFAHRENS

Die zu verwirklichende Grundvorstellung zur Realisierung des angestrebten Untersuchungsverfahrens aus der Sicht dessen technischer Ausstattung ist aus der schematischen Darstellung in Bild 2.1 ersichtlich. Danach sieht das Untersuchungsverfahren

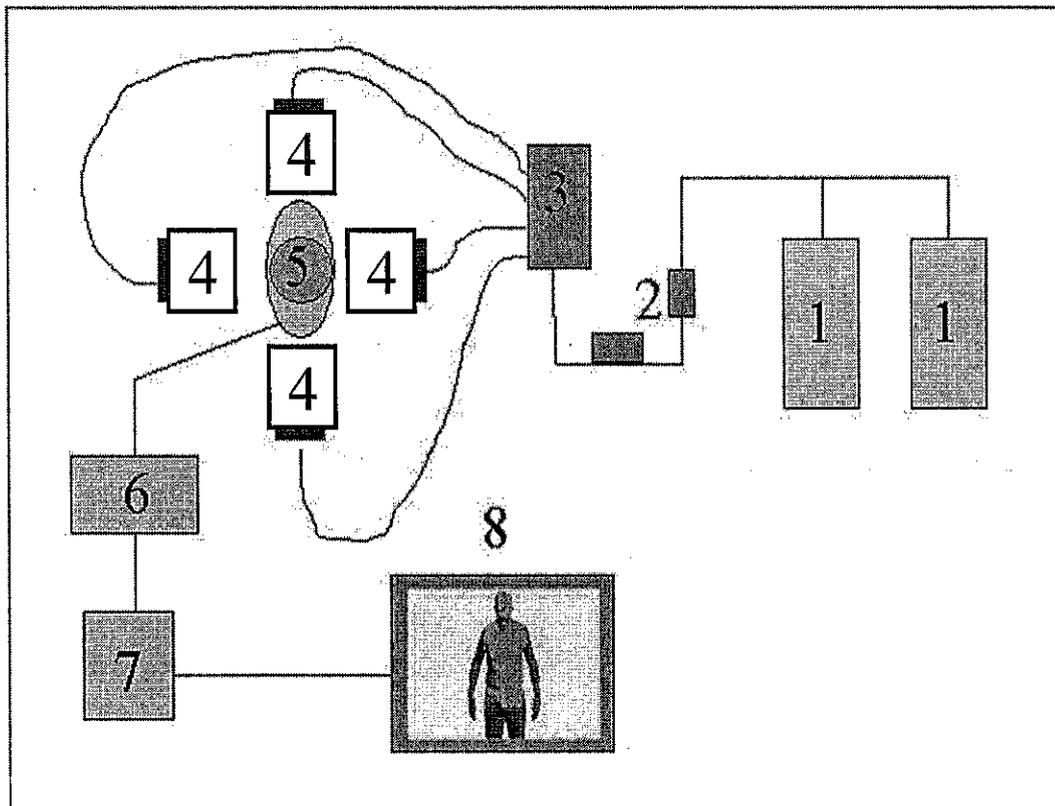


Bild 2.1: Schematische Darstellung des Untersuchungsverfahrens

vor, mittels vier propangasbetriebenen Brennern (4) einen mit Feuerwehr-Schutzkleidung oder anderer persönlicher Schutzausrüstung ausgerüsteten Dummy (5) durch Stichflammen mit definierter Wärmestromdichte und Flammenverteilung über eine relativ kurze Expositionsdauer (nach Art Flash Over) thermisch zu belasten.

Zur Gasversorgung werden den Brennern folgende Komponenten vorgeschaltet:

- 2 Propangastanks mit einem Volumen von je $1,5 \text{ m}^3$ (1)
- Entnahmeleitung, Druckminderer, Sicherheitsventil, Absperrventil (2)
- 2/2 Wege Magnetventil, servogesteuert mit Notausschalter (3).

Die Körperoberfläche des Dummy sollte mit einer entsprechenden Anzahl Wärmeflussensoren ausgestattet werden. Die damit gemessenen Werte für Wärmeflüsse und Temperaturen an den einzelnen Positionen des Körpers dienen der Berechnung des Grades möglicher Hautverbrennungen infolge der thermische Einwirkung und damit der Graduierung der untersuchten persönlichen Schutzausrüstung in bezug auf deren thermische Schutzwirkung. Ein diese Messwerte erfassendes und auswertendes System der Prozessvisualisierung mit den Komponenten

- Datalogger Autolook 2500 (Pekel) mit 120 möglichen Messkanälen (6)
- Messwerterfassungsrechner mit Auto Soft NT- Software (7)
- Prozessvisualisierungsrechner mit Temp View - Software (8)

soll die sich einstellenden thermischen Verhältnisse auf die Körperoberfläche eines auf einem Monitor dargestellten dreidimensionalen Abbildes des Dummy projizieren.

Die Problematik der Messwerterfassung und –auswertung mittels des Systems der Prozessvisualisierung wird der Vollkommenheit halber hier nur erwähnt. Sie war jedoch nicht Gegenstand der Untersuchungen zum Forschungsvorhaben.

3 VERSUCHSAUFBAU

Der Versuchsaufbau mit seinen einzelnen Komponenten ohne Berücksichtigung der Komponenten der Messwerterfassung und –auswertung (Prozessvisualisierung) wird in den Bildern 3.1 und 3.2 schematisch, in den Bildern 3.3 bis 3.7 bildlich dargestellt. Er entspricht den Vorstellungen der perspektivisch zu realisierenden Untersuchungseinrichtung.

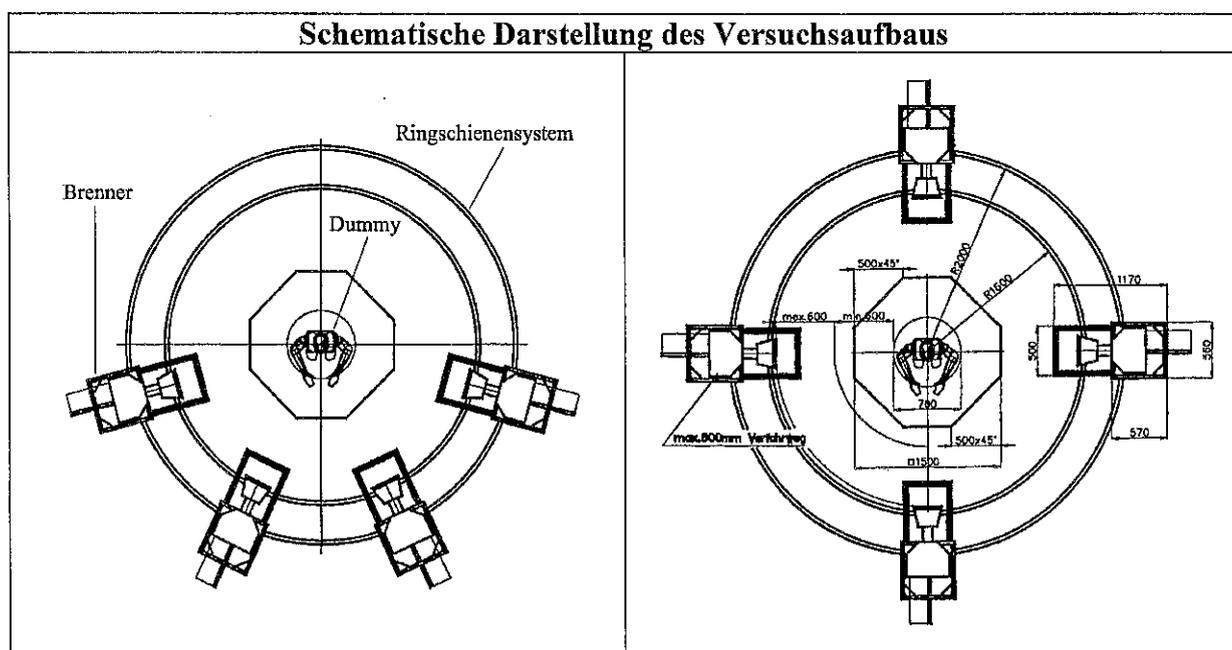


Bild 3.1: Brenneranordnung einseitig

Bild 3.2: Brenneranordnung symmetrisch

Die schematische Darstellung verdeutlicht die Anordnung von vier sich auf einem Ringschienensystem befindenden Positioniergestellen, auf welchem die Brenner aufgesetzt sind. Damit lassen sich die Brenner auf einem 360° - Vollkreis bei konstantem Abstand zum Kreismittelpunkt frei positionieren. Beispielhaft wird in Bild 3.1 eine einseitige, in Bild 3.2 eine symmetrische Brenneranordnung dargestellt. Die Positioniergestelle gestatten die horizontale Positionierung eines jeden Brenners über einen Verfahrweg von maximal 600 mm. Außerdem kann durch sie ein Schwenken der Brenner bis zu 30° zur Horizontalen nach oben bewirkt werden. Bild 3.3 zeigt den zunächst provisorischen Versuchsaufbau des Versuchstandes mit Brennereinrichtung und Dummy. Hier sind die Brenner symmetrisch angeordnet. Die Bilder 3.4 und 3.5 zeigen Ansichten eines Einzelbrenners auf dem Positioniergestell mit der Gaszuführung über einen flexiblen Gasschlauch und dem Kabel für die elektrische Ansteuerung des Brenners. Die Ansteuereinheit selbst wird in Bild 3.6 dargestellt. Über diese können wahlweise 1, 2, 3 oder alle 4 Brenner gleichzeitig angesteuert werden. Die Ansteuereinheit ermöglicht per Knopfdruck die Inbetriebnahme der zugeschalteten Brenner. Nach einer Vorlaufzeit von 2 s werden die Brenner gezündet. Die Brennerlaufzeit (Brenndauer) kann vor der Brennerinbetriebnahme variabel über die Ansteuereinheit eingestellt werden. Nach Ablauf der eingestellten Brennerlaufzeit erfolgt die automatische Außerbetriebnahme der Brenner. Durch Betätigen eines Not-Aus-Tasters können die Brenner jederzeit außer Betrieb genommen werden. Aussagen zum Dummy bleiben den Darlegungen im Abschnitt 4.4 vorbehalten. Erklärend sei hier erwähnt, dass Untersuchungen zur Dummyproblematik ursächlich nicht Gegenstand des Forschungsvorhabens und der damit verbundenen Investitionen waren. Zusätzliche diesbezügliche Grundlagenuntersuchungen, über die vorgegebene Zielstellung des zu bearbeitenden Forschungsvorhabens hinaus, wurden ermöglicht durch die rechtzeitige Bereitstellung und die vorhabensunabhängige Finanzierung des Dummys im Rahmen einer vorausschauenden Planung mit Blick auf die Erfordernisse einer endgültigen und abschließenden Realisierung des angestrebten Untersuchungsverfahrens. Der beschriebene Versuchsaufbau bzw. dessen Komponenten mussten zunächst im Hinblick auf den angedachten Verwendungszweck eingehend untersucht werden. Im Vordergrund der Untersuchungen stand die Bewertung der thermischen Parameter der Brenner. Es galt die Frage zu beantworten, ob die zu ermittelnden Parameter denen eines Flash Over oder einer vergleichbaren Stichflammenexposition adäquat sind. Weitere Untersuchungen konzentrierten sich dann auf die Ausstattung des Dummys mit Wärmeflussensoren. Im vorliegenden Bericht werden die vorgenommenen Untersuchungen beschrieben und deren Ergebnisse dargelegt.

Versuchsaufbau zum Materialtest zur Bewertung der Eigenschaften persönlicher Schutzausrüstung bei Einwirkung von Stichflammen durch einen Flash Over

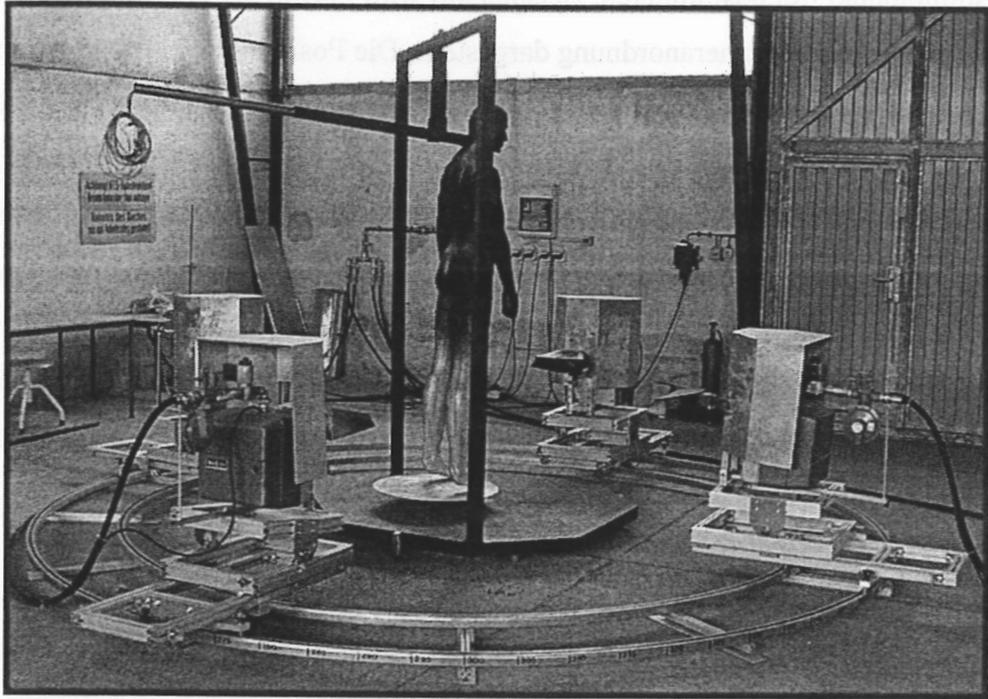


Bild 3.3: Versuchsaufbau mit Brenneinrichtung und Dummy

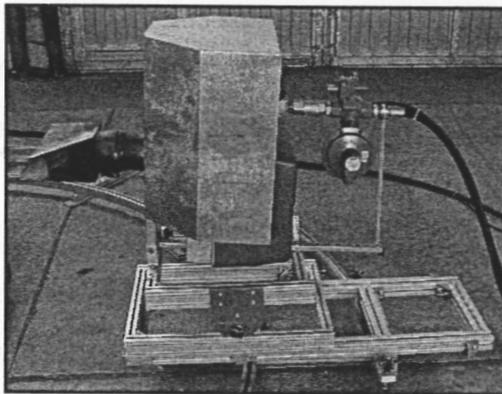


Bild 3.4: Seitenansicht eines Brenners

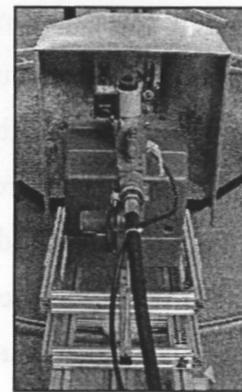


Bild 3.5: Brenner, Ansicht von hinten

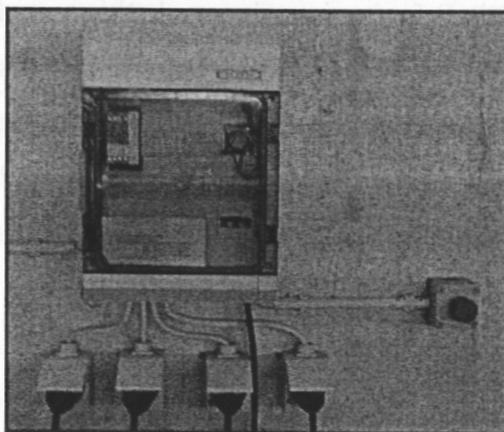


Bild 3.6: Ansteuereinheit für 4 Brenner

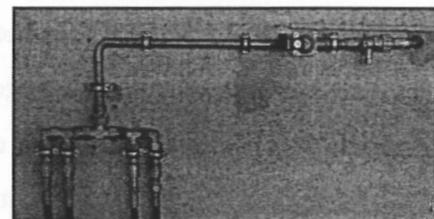


Bild 3.7: Gaszuführung zu den Brennern

4 DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN

4.1 Vorversuche

4.1.1 Untersuchungen zur Abhängigkeit der Brennereingangsdrücke von den thermischen Umgebungsbedingungen der Versorgungstanks

Die in Bild 4.1 dargestellten zwei Lagertanks mit je $1,5 \text{ m}^3$ Inhalt des technischen Brennstoffes Propan (C_3H_8) dienen der Gasversorgung der Brenner. Über eine von den Tanks abgehende Sammelleitung mit zwischengeschaltetem Druckminder-, Sicherheits- und Absperrventil wurden die Brenner mit Gas versorgt. Die Tanks waren zum Zeitpunkt der Untersuchungen im Freien aufgestellt und demzufolge der jahres- und tageszeitlich bedingten Witterung, insbesondere auch der Sonneneinstrahlung, ausgesetzt. Zu untersuchen war, inwieweit der mit Temperaturschwankungen infolge sich verändernder Lufttemperaturen und der Sonneneinstrahlung sich auch verändernde Dampfdruck Auswirkungen hat auf die Brennereingangsdrücke und damit möglicherweise auf das Flammenbild der Brenner. Erklärend hierzu muss gesagt werden, dass auf Grund eines in die Gas – Hauptzuführungsleitung nach den Tanks und vor den Brennern zwischengeschalteten und auf einen konstanten Ausgangsdruck (bzw. Brennereingangsdruck) eingestellten Druckminderers davon ausgegangen werden konnte, dass der Druckminderer die sich verändernden Dampfdrücke kompensiert und deshalb ein davon unabhängiger und konstanter Brennereingangsdruck sich einstellen würde. Durch die Untersuchungen sollte geklärt werden, inwieweit die Reproduzierbarkeit der Parameter der Brennereinrichtung unter variierenden Umgebungsbedingungen (Temperaturschwankungen) gegeben ist.

4.1.1.1 Verhalten von Flüssiggas

Flüssiggas im Allgemeinen ist ein Natur- und Synthesegas, das vorwiegend aus C_3 - und C_4 -Kohlenwasserstoffen besteht und bei Drücken bis $2,5 \text{ Mpa}$ und Raumtemperatur verflüssigt werden kann. Eine für die Flüssiggastechnik charakteristische Eigenschaft von Flüssigkeiten ist ihre Verdampfungsfähigkeit. Bei jeder Temperatur kann ein Teil der Moleküle der Flüssigkeit unter dem Einfluss der Molekülbewegung in den gasförmigen Zustand übergehen. Die Verdampfungsneigung ist stoffabhängig und nimmt mit steigender Temperatur zu. Findet die Verdampfung in einem abgeschlossenen, teilweise mit Flüssigkeit ausgefüllten Raum, wie den Tanks, statt, dann stellt sich zwischen Flüssigkeit und Dampf ein Gleichgewicht ein. Der sich bei diesem Vorgang einstellende Druck wird als Dampfdruck p_D bezeichnet [Kurth 75].

Für Propan ist der Dampfdruck nach folgender Beziehung berechenbar:

$$\lg p_D = 6,2886 - \frac{987}{T} \quad p \text{ in } kPa \quad (4.1)$$

T in K (von -42 bis 80°C)

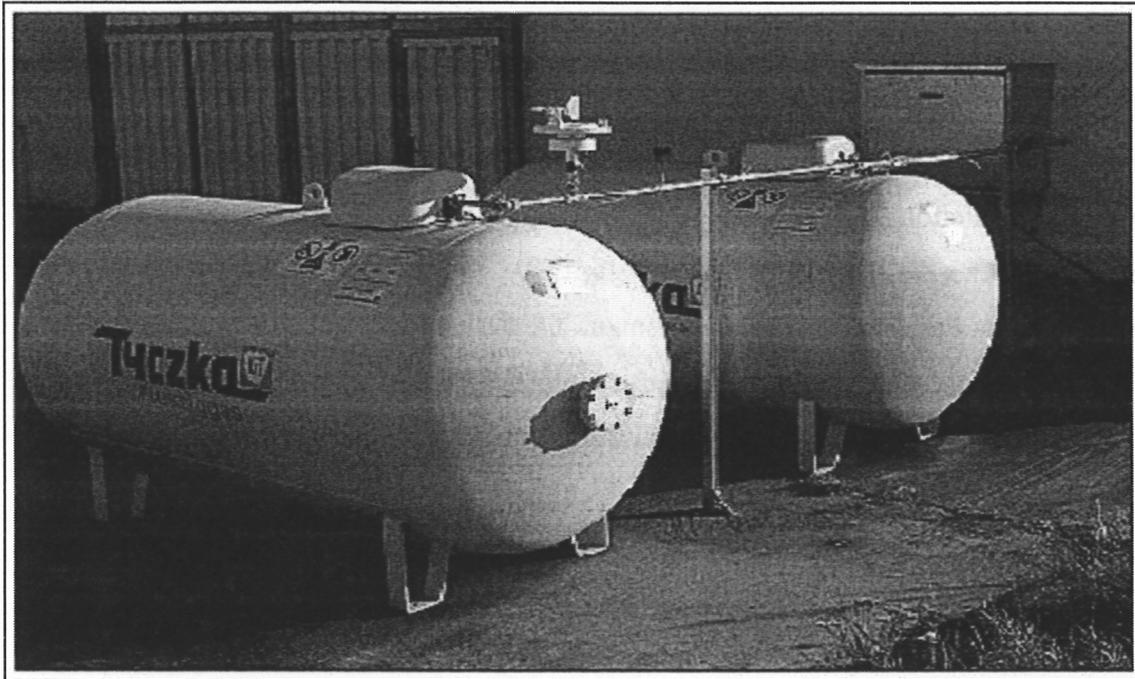


Bild 4.1: Tanks der Brenneinrichtung

Die Temperaturabhängigkeit des Dampfdruckes ist in Bild 4.2 dargestellt.

Ist der Dampfdruck der Flüssigkeit größer als der Druck des umgebenden Systems, findet ein rascher Phasenübergang Flüssigkeit/Gas statt. Die dazugehörige Temperatur ist die Siedetemperatur (- 42,1°C bei 101,3 kPa).

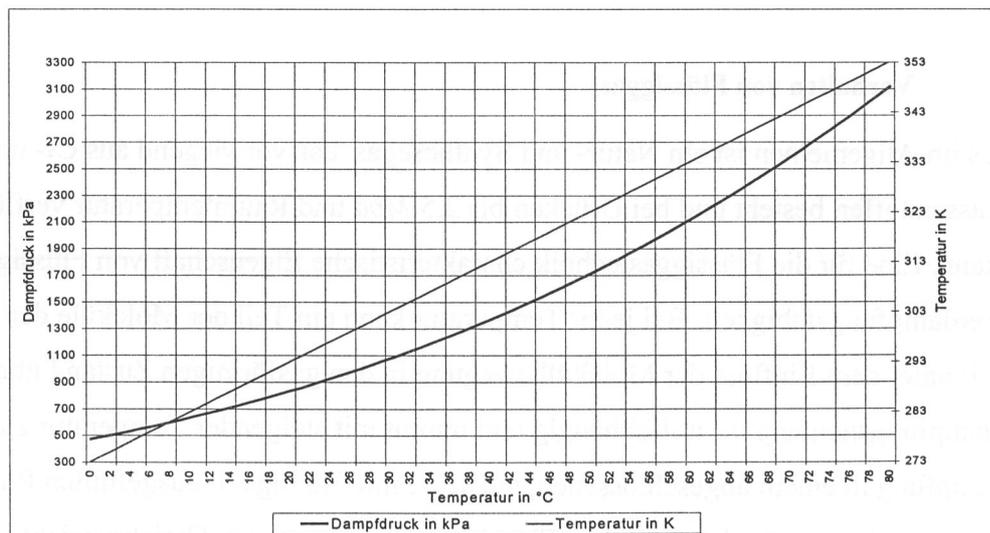


Bild 4.2: Temperaturabhängigkeit des Dampfdruckes von Propan

4.1.1.2 Durchgeführte Messungen zum Temperatureinfluss

Die hierfür erforderlichen Messungen wurden an verschiedenen Tagen, die repräsentativ waren für differenzierte thermische Umgebungsbedingungen, durchgeführt, um ein möglichst breites Temperaturspektrum zu erfassen. Für die Untersuchungen zur Abhängigkeit der Brenneingangsdrücke von den thermischen Umgebungsbedingungen der Versorgungstanks wurden folgende Messungen durchgeführt [Nicolai 01_1]:

- Ermittlung der Globalstrahlung (Intensität der Sonneneinstrahlung),
- Messung der Lufttemperatur,
- Ermittlung der Temperatur der Flüssigphase des Propans im Tank,
- Ermittlung der Temperatur der Gasphase des Propans im Tank,
- Ermittlung des Gasdruckes in der Hauptversorgungszuleitung der Brenner.

Um die Globalstrahlung zu messen, wurde eine Computer-Wetterstation (CWS7) der Firma Reinhardt System und Messelectronic GmbH gemäß Bild 4.3 an einem der Tanks installiert. Der Globalstrahlungssensor der Station ist ein Pyrometer, welches die Sonneneinstrahlung im Bereich von 305 bis 2800 *nm* erfasst. Messprinzip ist hierbei, dass die Temperaturdifferenz zwischen einem geschwärzten und einem reflektierenden Element mittels zweier Halbleitersensoren ermittelt und softwaremäßig linearisiert wird. Die Ausgabe der Messwerte der Globalstrahlung erfolgt in W/m^2 . Die Daten der Wetterstation wurden per Computer erfasst.

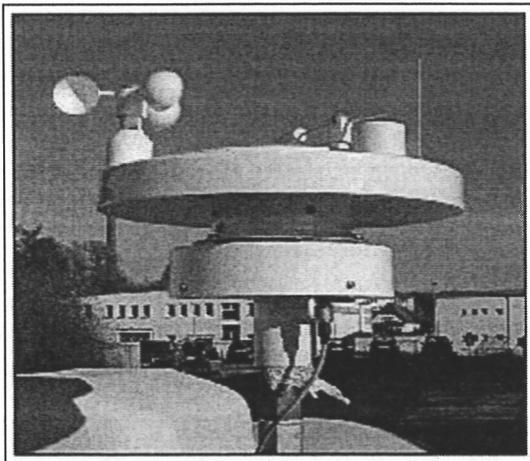


Bild 4.3: Wetterstation CWS 7

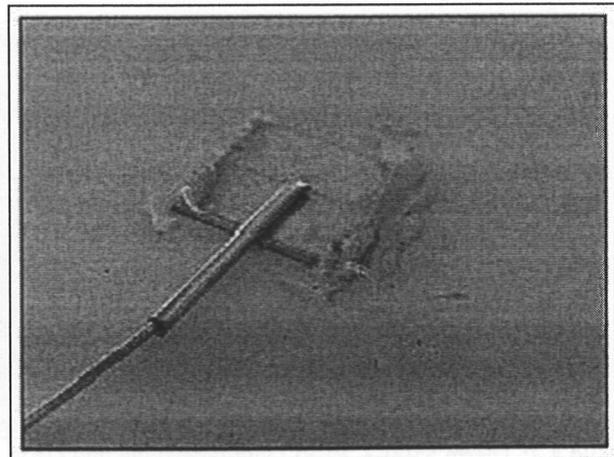


Bild 4.4: Thermoelement auf Tankoberfläche

Um die Temperaturen zu erfassen, wurden mehrere NiCr-Ni Thermoelemente ($\varnothing 0,5 \text{ mm}$) in der in Bild 4.4 dargestellten Art und Weise (auf Tank mit thermisch leitendem Kleber aufgebrauchte Aufnahmeplättchen, in deren Aufnahmehülse das Thermoelement eingebracht

wird) an den Tanks der Brenneinrichtung sowohl im Bereich der Gasphase als auch im Bereich der Flüssigkeitsphase des Propan angebracht.

Diese Bereiche wurden vor dem Anbringen der Thermoelemente durch Aufnahme der Tanks mit einer Wärmebildkamera selektiert. Bild 4.5 zeigt das Infrarotbild der Tanks. Gut erkennbar sind hier die Bereiche Flüssigphase und Gasphase auf Grund ihres unterschiedlichen Temperaturniveaus.

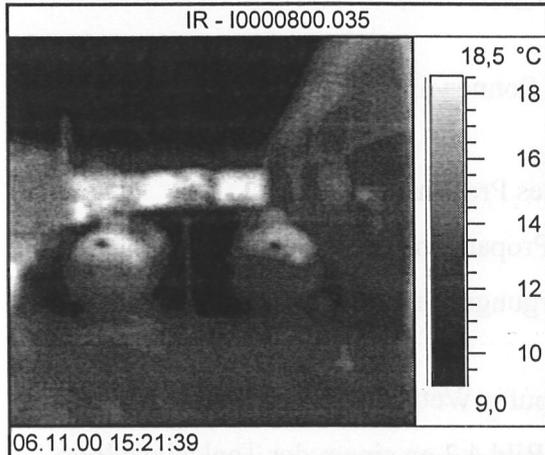


Bild 4.5: Infrarotbild der Propangastanks

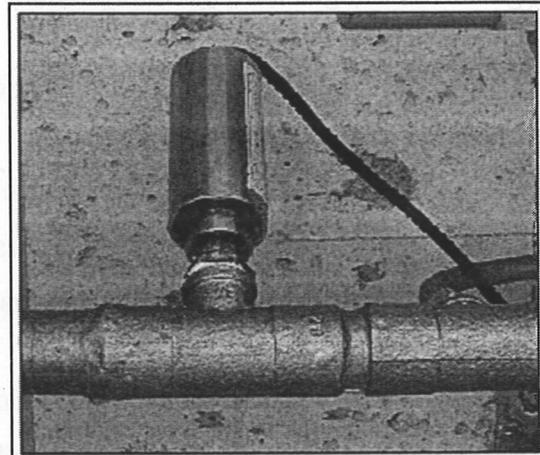


Bild 4.6: Druckaufnehmer von PERO

Ein weiteres Thermoelement wurde, abgeschirmt vor einfallender Sonneneinstrahlung, zur Lufttemperaturmessung im Schaltschrank der Gasanlage positioniert.

Hinter dem sich ebenfalls im Schaltschrank befindenden Gasdruckregler wurde ein Druckaufnehmer DA100Pe/000204 der Firma Pero über einen Flansch direkt in die Hauptversorgungsleitung der Brenner eingeschraubt. Bild 4.6 zeigt den Druckaufnehmer. Die

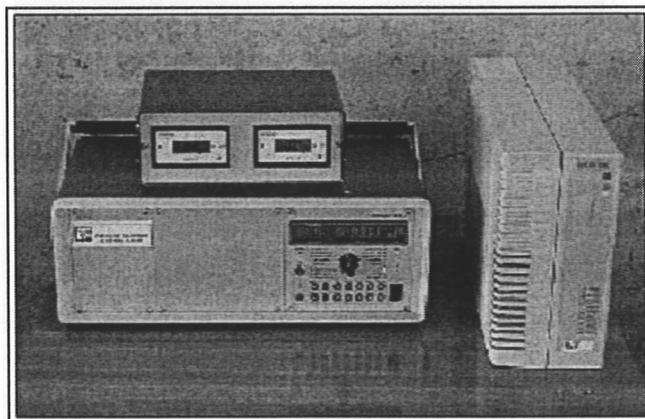


Bild 4.7: Therm 5500-3, PERO Digitalanzeige und USV

Auswahl des Druckaufnehmers richtete sich nach den zu erwartenden Drücken von max. 4 bar. Die analogen Messwerte des Druckaufnehmers wurden über ein Zusatzgerät von PERO in ein digitales Signal umgewandelt und auf dem in Bild 4.7 (Gerät oben) dargestellten Display digital ausgewiesen. Die

Messwernerfassung bei der Temperatur- und Druckmessung erfolgte mittels der in Bild 4.7 (Gerät unten) dargestellten Präzisions-Messwernerfassungsanlage Therm 5500-3 der Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH (AMR).

4.1.1.3 Ergebnisse zum Temperatureinfluss auf die Brennereingangsdrücke

In Bild 4.8 werden beispielhaft die Ergebnisse der Messungen der Globalstrahlung (Sonnenenergie), der Temperatur der Außenluft, der Temperatur der Gasphase im Tank 2 sowie des Druckes am Manometer tageszeitlich abhängig für einen Tag grafisch ausgewiesen.

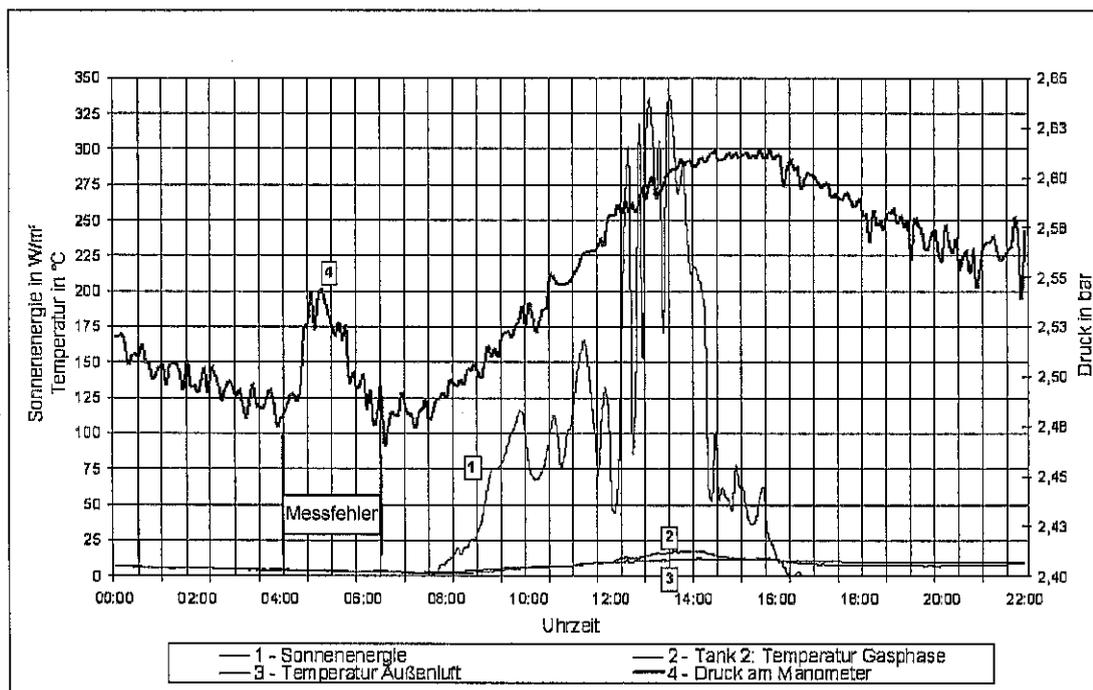


Bild 4.8: Tageszeitliche Darstellung der Messgrößen (Beispiel: 02.11.2000)

Die gemessenen Höchst- und Tiefstwerte für diesen Tag enthält Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1: Erfasste Maximal –und Minimalmesswerte über den Messzeitraum nach Bild 4.8

Messwerte	Luft-temperatur	Tank 1 Flüssig-phase	Tank 1 Gasphase	Tank 2 Gasphase	Sonnen-energie	Druck
	Temperatur in °C				W/m ²	bar
Maximalwert	12,1	10,0	16,7	17,7	397,4	2,621
Minimalwert	1,8	2,2	1,7	1,3	0	2,424
Differenzwerte	10,3	7,8	15,0	16,4	397,4	0,197

Ergebnisse der Messungen über mehrere Tage werden beispielhaft in Bild 4.9 dargestellt.

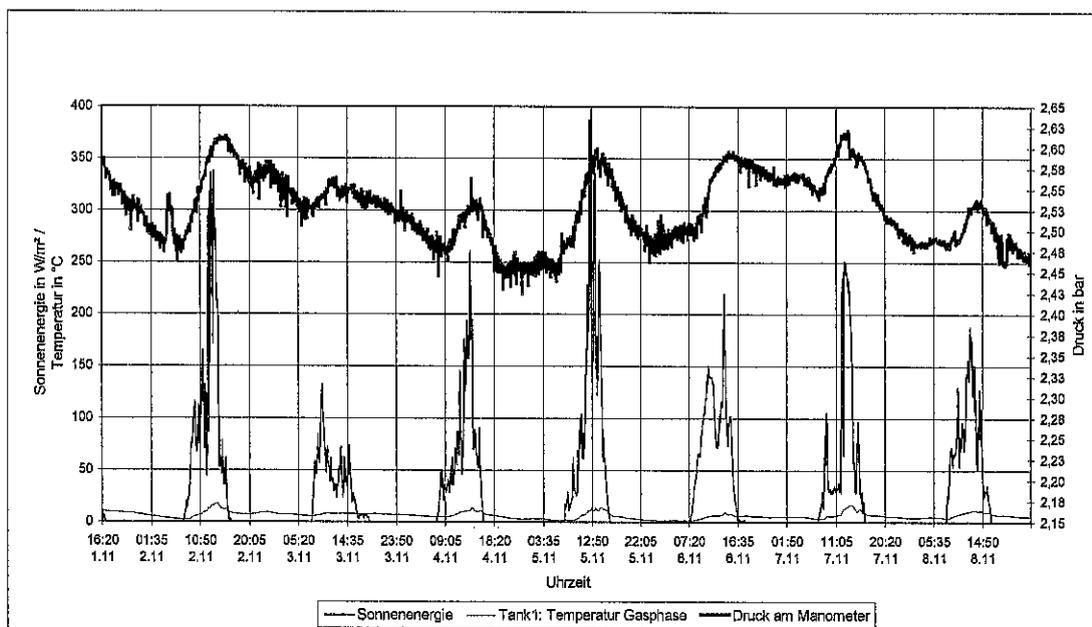


Bild 4.9: Darstellung der Messgrößen über mehrere Tage (01.11. bis 08.11.2000)

Die ausgewiesenen Werte verdeutlichen eindeutig die Abhängigkeit des Druckes in der zu den Brennern führenden Gas - Hauptversorgungsleitung von den Parametern Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung. Es ist davon auszugehen, dass größere als die in Tabelle 4.1 ausgewiesenen Differenzwerte auch größere Druckdifferenzen in der Gas - Hauptversorgungsleitung nach sich ziehen werden.

Durch die Ergebnisse konnte nachgewiesen werden, dass trotz des auf einen festen Brenneingangsdruck eingestellten Druckminderers der Brenneingangsdruck in Abhängigkeit von den thermischen Umgebungsbedingungen schwankt. Nach Auskunft der Herstellerfirma des Gasdruckreglers sind Schwankungen des Ausgangsdruckes des Reglers von $\pm 30\%$ normal und lassen sich nicht minimieren.

Es konnte festgestellt werden, dass die Sonnen-Einstrahlung wesentlich die Brenneingangsdrücke bestimmt. Wenn in den Nachmittagsstunden die Sonne direkt auf die Tanks scheint und sich dadurch die Tankoberfläche erwärmt, so steigt auch wenig später der Druck am Manometer. An Tagen mit sehr intensiver Sonneneinstrahlung (ca. 350 bis 450 W/m^2), sind die Temperaturwerte an der Tankoberfläche und demnach auch die gemessenen Druckanstiege sehr hoch. Die Drücke nach dem Druckminderer schwanken zwar nicht so stark wie der Druck der Gasphase direkt im Tank, es ist jedoch festzustellen, dass der Brenneingangsdruck nicht den gewünschten gleichbleibenden Wert aufweist, also nicht reproduzierbar ist. Eine Minimierung der Druckschwankungen ließe sich sicherlich allein schon durch eine Abschirmung der Tanks vor einfallender Sonneneinstrahlung oder durch eine unterirdische bzw. eingebettete Anordnung der Tanks erreichen.

Es stellte sich nunmehr die Frage, inwieweit zusätzlich zu den durch variable äußere thermische Bedingungen verursachten Brennereingangsdrukschwankungen auch Druckschwankungen an den einzelnen Brennern in Abhängigkeit von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner auftreten und somit zusätzlich die thermische Charakteristik der Brenneranlage durch dadurch veränderte Flammenbilder der Brenner insgesamt verändert wird. Derartige Betrachtungen waren Gegenstand der im nachfolgenden Abschnitt beschriebenen Untersuchungen.

4.1.2 Untersuchungen zur Abhängigkeit des Brennereingangsdruckes von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner (lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung)

4.1.2.1 Untersuchungen ohne Bekleidungssimulator

Zur Feststellung, inwieweit sich der Eingangsdruck eines Einzelbrenners in Abhängigkeit von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner ändert und, bedingt durch den erwarteten Druckabfall beim Betrieb mehrerer Brenner, auch die thermische Belastung variiert, wurde einerseits der Eingangsdruck gemessen und parallel sowie zeitgleich dazu die von der Brennerflamme erzeugten Temperaturen gemessen. Als Versuchsbrenner kam Brenner Nr. 4 zum Einsatz. Die Temperaturmessung wurde realisiert durch Thermoelemente, die an einem Messständer angebracht waren. Der Messständer (siehe hierzu Bild 4.27) war ein 3 m langes Stativ, über dessen Höhe ab Boden im Abstand von jeweils 200 mm insgesamt 15 Thermoelemente angebracht waren. Messstelle 1 befand sich oben am Ende des Messständers, während Messstelle 15 sich 200 mm über dem Boden am Messständer befand. Bei jeder der vorgenommenen Untersuchungen wurde die Brennerflamme des Brenners Nr. 4 in den jeweiligen Abständen von 100 cm, 80 cm, 60 cm und 40 cm auf den Messständer gerichtet. Je Abstand wurden dann nacheinander zusätzlich 1, 2 und 3 weitere Brenner zugeschaltet. Die Flammen der zugeschalteten Brenner wurden nicht auf den Messständer gerichtet. In den Bildern 4.10 bis 4.12 ist der Versuchsaufbau der lastabhängigen Einzelbrenneruntersuchung bildlich dargestellt. Die bei den Untersuchungen erfassten messstellenbezogenen Temperaturen werden wegen des Grundlagencharakters der Untersuchungen umfangreich in den Anlagen 1.1 bis 1.15 grafisch dargestellt.

Im Ergebnis der Versuche wurden die in Bild 4.13 ausgewiesenen Brennereingangsdrücke als Funktion der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner ermittelt. Diese liegen zwischen 2,1 bar (1 Brenner) und 0,9 bar (4 Brenner). Die Drücke wurden ermittelt bei Außentemperaturen

von 2 °C. Damit sind die Untersuchungsergebnisse strenggenommen auch nur aussagefähig hinsichtlich dieses Temperatur-Bezugswertes.

Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung – Flammenbilder

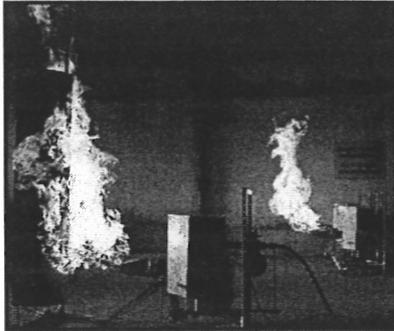


Bild 4.10: Zwei Brenner in Betrieb

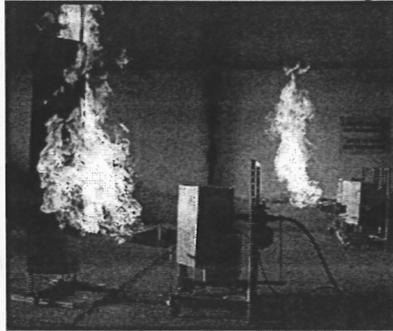


Bild 4.11: Drei Brenner in Betrieb

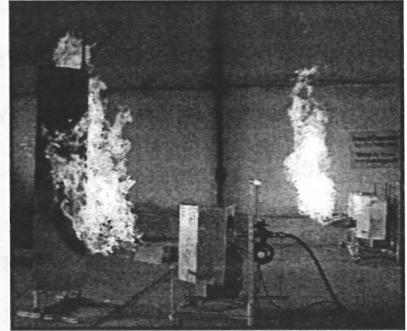


Bild 4.12: Vier Brenner in Betrieb

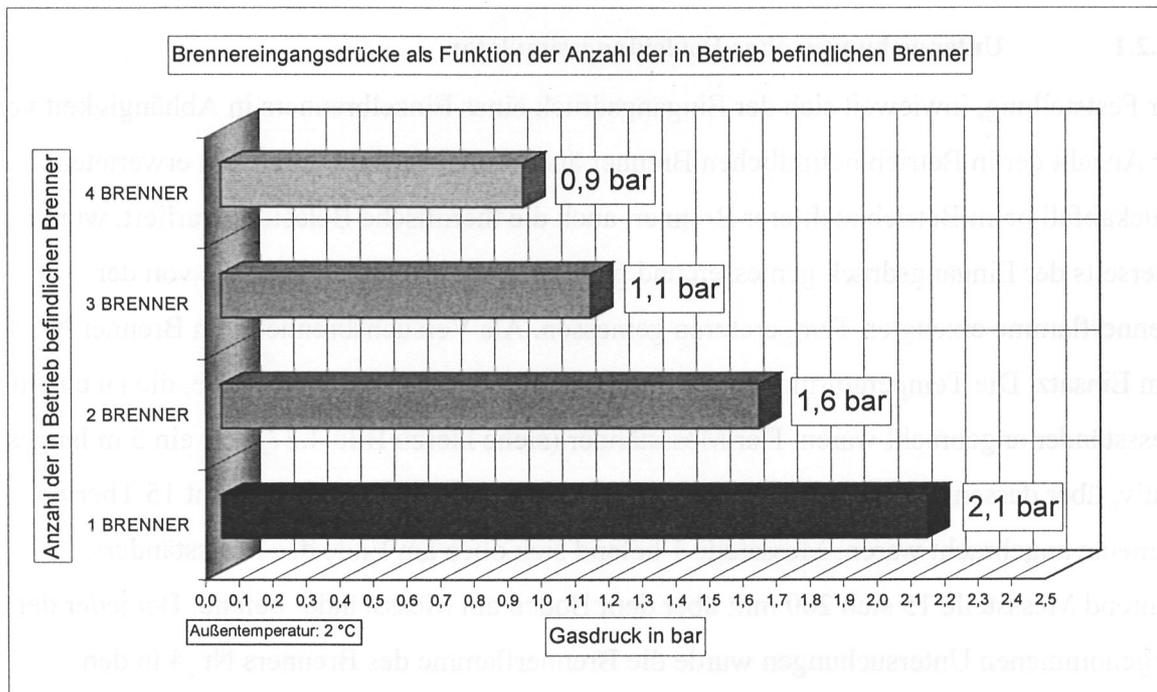


Bild 4.13: Brennereingangsdrücke als Funktion der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner

Auch die in den Grafiken in Anlage 1 dargestellten Messwerte verdeutlichen eindeutig den mit dem Druckabfall beim Einsatz mehrerer Brenner einhergehenden Temperaturabfall (Absinken der thermischen Belastung) an den einzelnen Messstellen bei jedem Brennerabstand. Die auftretenden Temperaturdifferenzen können variantenabhängig bis zu einigen 100 °C betragen. Entgegen diesem allgemeinen Trend ist aber auch feststellbar, dass an einigen Messstellen bei bestimmten Abständen des Brenners zum Messständer beim Betrieb von 2 Brennern höhere Temperaturen auftreten als bei nur einem Brenner [Pasch 00]. Beispielhaft zu bemerken ist, dass dort, wo bei jeder Brenneranzahl die höchsten Temperaturen gemessen wurden (Messstelle 11 bei 40 cm Brennerabstand – siehe auch

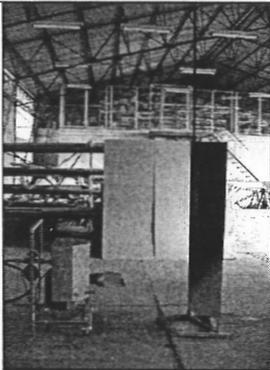
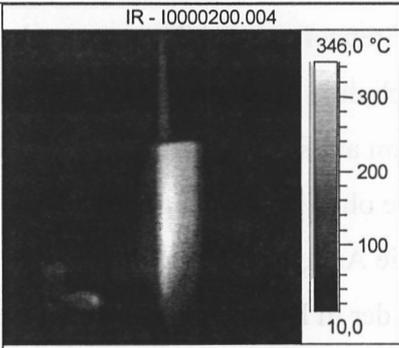
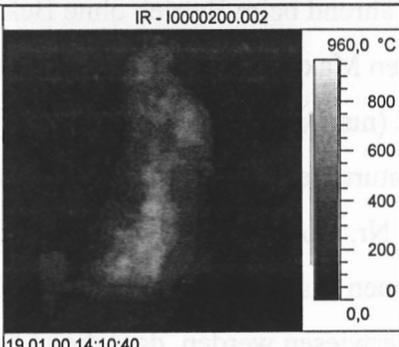
Anlage 1.11), die brenneranzahlabhängigen Messwertdifferenzen am geringsten ausfallen. Trotzdem sind hier immer noch Temperaturunterschiede im jeweiligen Maximum der Temperaturverläufe zwischen 950 °C (4 Brenner im Betrieb) und 1080 °C (nur Brenner Nr. 4 in Betrieb) feststellbar. Weiterführende Ergebnisse zur thermischen Belastung durch den Einzelbrenner Nr. 4 werden in den Abschnitten 4.1.2.2 und 4.2.1 dargelegt.

4.1.2.2 Untersuchungen mit Bekleidungssimulator

Es wurden Vergleichsuntersuchungen derart angestellt, dass der im Rahmen der Untersuchungen thermisch beaufschlagte Messständer nunmehr nachgerüstet wurde mit einem sogenannten Bekleidungssimulator (nähere Beschreibung siehe Abschnitt 4.2). Dieser sollte die ungefähre Körperform des eine Kleidung tragenden menschlichen Körpers repräsentieren. Dabei wurde von der Erwartung ausgegangen, dass sich, bedingt durch die durch den Bekleidungssimulator nunmehr veränderte Geometrie des Messständers, auch die Flammgeometrie und damit der Grad der thermischen Beaufschlagung an den Messstellen ändert. Die Untersuchungen wurden beschränkt auf den bei bereits bei den Voruntersuchungen ermittelten maximalen thermischen Lastfall bei einem Abstand von 40 cm des Brenners zu den Thermoelementen am Messständer mit Bekleidungssimulator. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Anlagen 2.1 bis 2.4 grafisch dargestellt. Wiederum am Beispiel der Messstelle 11 soll der Vergleich zwischen den Ergebnissen der Versuche ohne Bekleidungssimulator und mit Bekleidungssimulator geführt werden (siehe hierzu die Anlagen 1.11 und 2.3). Es ist festzustellen, dass der Einfluss der Lastabhängigkeit (Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner) beim Betrieb der Versuchseinrichtung mit Bekleidungssimulator weiter zurückgegangen ist, ja weitestgehend vernachlässigt werden kann. Während beim Betrieb ohne Bekleidungssimulator die Temperaturunterschiede im jeweiligen Maximum der Temperaturverläufe zwischen 950 °C (4 Brenner im Betrieb) und 1080 °C (nur Brenner Nr. 4 in Betrieb) lagen, sind bei Betrieb mit Bekleidungssimulator nur Temperaturunterschiede im Bereich von 1000 °C (2 Brenner in Betrieb) und 1050 °C (nur Brenner Nr. 4 oder 4 Brenner in Betrieb) zu verzeichnen. Der Temperaturunterschied bei den gemessenen Maximaltemperaturen von 30 °C ist praktisch vernachlässigbar. Es muss jedoch darauf verwiesen werden, dass die in Bezug auf Messstelle 11 getroffene Aussage der durchaus vergleichbaren Versuchsergebnisse zwischen Messständer ohne Bekleidungssimulator und Messständer mit Bekleidungssimulator nicht übertragbar sind auf andere Messstellen. Hier gibt es durchaus relevante Differenzen bei den Messergebnissen, worauf an dieser Stelle aber nicht näher eingegangen werden soll. Durch Vergleich der

grafischen Darstellungen der Messwerte in den Anlagen 1.11 und 2.3 wird dieser Sachverhalt deutlich. Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Untersuchungen wurde im Rahmen dieses Untersuchungsprogramms die thermische Belastung des Bekleidungssimulators qualitativ mittels einer Wärmebildkamera untersucht. Berücksichtigt wurden hier die Abstände Brenner – Bekleidungssimulator von 40 cm, 60 cm und 100 cm. Die Bilder 4.14 bis 4.25 zeigen, bezogen auf die jeweiligen Abstände, die Realbilder vom Versuchsaufbau und von der Versuchsdurchführung (Brenner in Betrieb) sowie die mit der Wärmebildkamera aufgenommenen Infrarotbilder der Flamme und des Bekleidungssimulators. Die Darstellungen der Infrarotbilder des Bekleidungssimulators lassen auch hier deutlich erkennen, dass die stärkste thermische Belastung beim Abstand von 40 cm vorliegt und sie mit zunehmendem Abstand abnimmt. Es kann davon ausgegangen werden, dass, unabhängig vom Brennerabstand, das Maximum der thermischen Belastung des Bekleidungssimulators in seinem oberen Drittel (ca. bei 1 m über Boden) auftritt.

Untersuchung mit Wärmebildkamera

Abstand Brenner zu Bekleidungssimulator 40 cm	
	 <p>IR - I0000200.004 346,0 °C 300 200 100 10,0 19.01.00 14:11:14</p>
Bild 4.14: Brenner vor Bekleidungssimulator (40 cm)	Bild 4.15: Infrarotbild Bekleidungssimulator (40 cm)
	 <p>IR - I0000200.002 960,0 °C 800 600 400 200 0 0,0 19.01.00 14:10:40</p>
Bild 4.16: Brenner in Betrieb (40 cm)	Bild 4.17: Infrarotbild Flamme (40 cm)

Untersuchung mit Wärmebildkamera

Abstand Brenner zu Bekleidungssimulator 60 cm

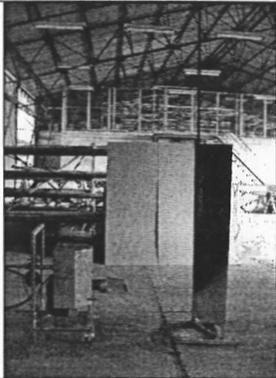


Bild 4.18: Brenner vor Bekleidungssimulator (60 cm)

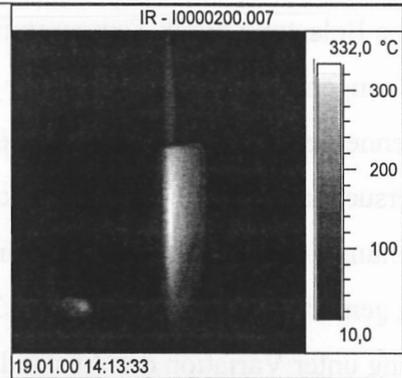


Bild 4.19: Infrarotbild Bekleidungssimulator (60 cm)



Bild 4.20: Brenner in Betrieb (60 cm)

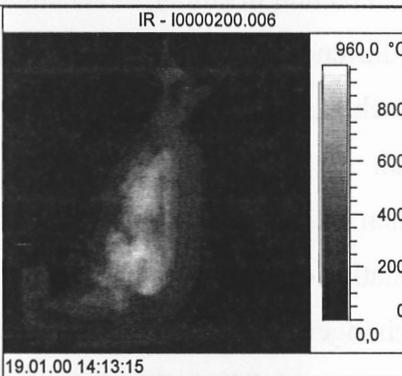


Bild 21: Infrarotbild Flamme (60 cm)

Abstand Brenner zu Bekleidungssimulator 100 cm

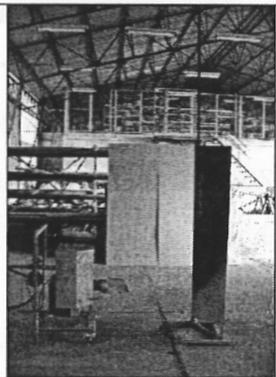


Bild 4.22: Brenner vor Bekleidungssimulator (100 cm)

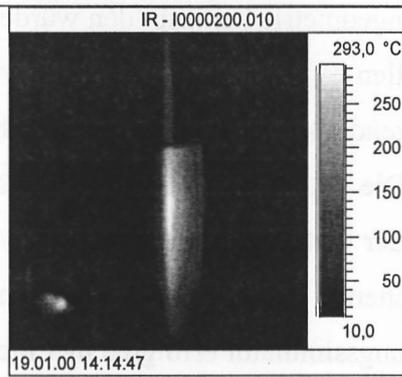


Bild 4.23: Infrarotbild Bekleidungssimulator (100 cm)



Bild 4.24: Brenner in Betrieb (100 cm)

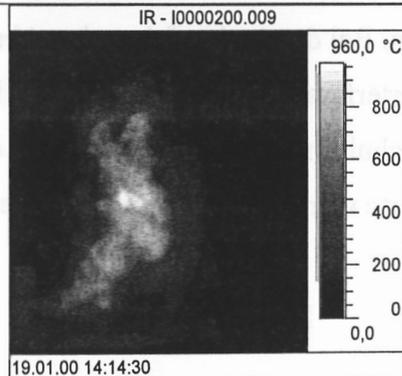


Bild 4.25: Infrarotbild Flamme (100 cm)

4.2 Bestimmung der thermischen Parameter der Brenner

Anliegen dieser Untersuchungen war es, die durch den Betrieb der Brenner hervorgerufene thermische Belastung durch Temperaturmessungen zu ermitteln. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde die Laufzeit der Brenner (Brennzeit mit aktiver Flamme) bei der Einzelbrenneruntersuchung mittels der elektronischen Ansteuereinheit auf 20 Sekunden, bei den Untersuchungen mit einer Brennerkombination auf 24 Sekunden eingestellt. Für die Untersuchungen wurden 4, 3, 2 oder nur 1 Brenner eingesetzt. Die Brenneranordnungen erfolgten gemäß den Bildern 4.26 bis 4.31 einzeln oder in symmetrischer bzw. einseitiger Anordnung unter Variation der Abstände der Brenner zu den bereits im Abschnitt 4.1.2.1 beschriebenen und in Bild 4.27 schematisch dargestellten Messständen. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen erfolgte keine Variation der Anstellwinkel der Brenner (Brennerachsen) zur Ebene, d. h., die Brennerachsen der einzelnen Brenner verliefen horizontal.

Im Rahmen weiterer Untersuchungen mit den Brennerkombinationen wurde der Messstand zur Simulation der Körperoberfläche des menschlichen Körpers (zum Zeitpunkt der Untersuchungen war der Dummy noch nicht verfügbar) mit einem aus der Sicht der Brenner konvex gebogenen Blech (Blechkorpus) mit den Abmaßen 1600 x 500 x 280 (Höhe x Breite x Tiefe) versehen, da die Möglichkeit bestand, dass sich dadurch eine andere Flammgeometrie herausbilden würde, die zu auch veränderten Temperaturen an den Messstellen des Messständers führen würde. Die Unterkante des Blechkorpus, der nachfolgend als Bekleidungssimulator bezeichnet wird, hatte einen Abstand von 200 mm zum Boden. Die Thermoelemente des Messständers wurden zum Zwecke der Temperaturmessung entlang der vertikalen Symmetrieachse des Blechkorpus durch diesen nach außen geführt. Entsprechende Untersuchungen des Einzelbrenners in Verbindung mit dem Bekleidungssimulator erfolgten hier nicht, da analoge Untersuchungen bereits in Verbindung mit der Problematik der lastabhängigen Einzelbrenneruntersuchung (siehe Abschnitt 4.1.2.2) erfolgten. Bei den in den folgenden Abschnitten beschriebenen Untersuchungen erfolgte die Messwerterfassung mittels des Vielstellen - Messwerterfassungssystems des Mobilen Brandtechnischen Labors (MOBLAB) des Instituts der Feuerwehr Sachsen-Anhalt. Die Messwerte wurden zur Messwertauswertung grafisch aufbereitet.

4.2.1 Einzelbrenner

Sämtliche Einzelbrenneruntersuchungen wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse wieder mit dem Brenner Nr. 4 durchgeführt.

4.2.1.1 Thermische Belastung als Funktion des Brennerabstandes

Die Ergebnisse der Einzelbrenneruntersuchungen in Form grafischer Darstellungen der gemessenen Temperaturen an den ausgewählten Messstellen 1 bis 11 des Messständers in Abhängigkeit vom Abstand des Brenners zum Messständer werden in den Bildern 4.32 bis 4.35 ausgewiesen.

Folgende Maximaltemperaturen nach Tabelle 4.2 wurden erreicht:

Tabelle 4.2: Erzielte Maximaltemperaturen bei der Einzelbrenneruntersuchung

Messstelle / Höhe ab Boden in Meter	Abstand Brenner - Messständer in Meter	Maximaltemperatur in °C
6 / 2	1	160
10 / 1,2	0,8	560
10 / 1,2	0,6	1020
11 / 1,0	0,4	1080

Damit erzeugt der Brenner unter den gegebenen Bedingungen im Abstand von 40 cm an Messstelle 11 die höchste thermische Belastung. Der thermisch am höchsten beanspruchte Bereich zwischen 780 °C und 1080 °C liegt bei diesem Abstand zwischen den Messstellen 7 und 12 (0,8 bis 1,8 m über Boden).

Es ist festzustellen, dass bei allen Brennerabständen über den Messzeitraum von 20 Sekunden ein fast konstanter Temperaturverlauf an den Messstellen zu verzeichnen ist. Die Messstellen 14 (400 mm über Boden) und 15 (200 mm über Boden), die in den Bildern 4.32 bis 4.35 aus Übersichtsgründen nicht mit ausgewiesen werden, sind bei allen Brennerabständen kaum thermisch beansprucht, da sich die Brennerachse oberhalb dieser Messstellen in einem Abstand von 500 mm über Niveau befindet. Somit liegen diese Messstellen außerhalb des Bereiches der direkten Beflammung. An diesen Messstellen kommt offensichtlich nur der Strahlungsanteil der Brennerflamme zur Geltung.

Versuchsaufbau Einzelbrenneruntersuchung

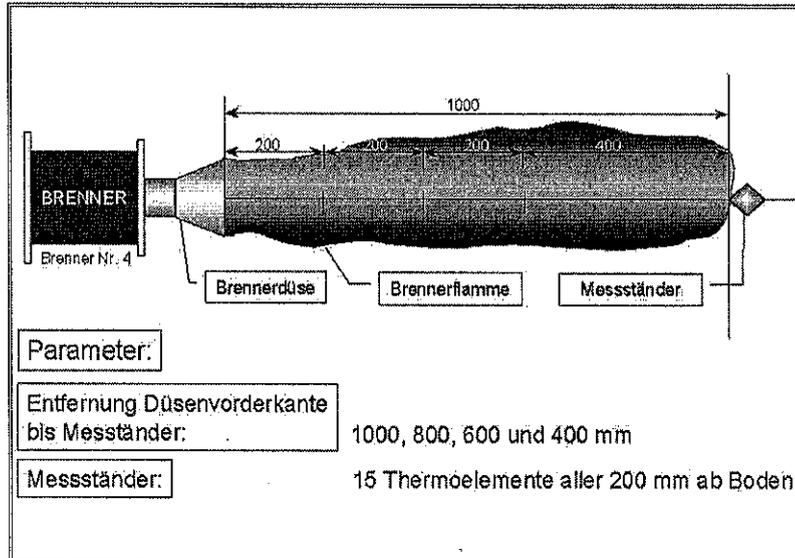


Bild 4.26: Position des Brenners zum Messständer

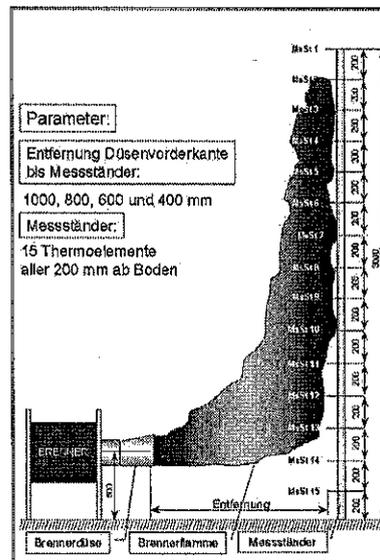


Bild 4.27: Messständer

Versuchsaufbau Brennerkombination mit einseitiger Anordnung

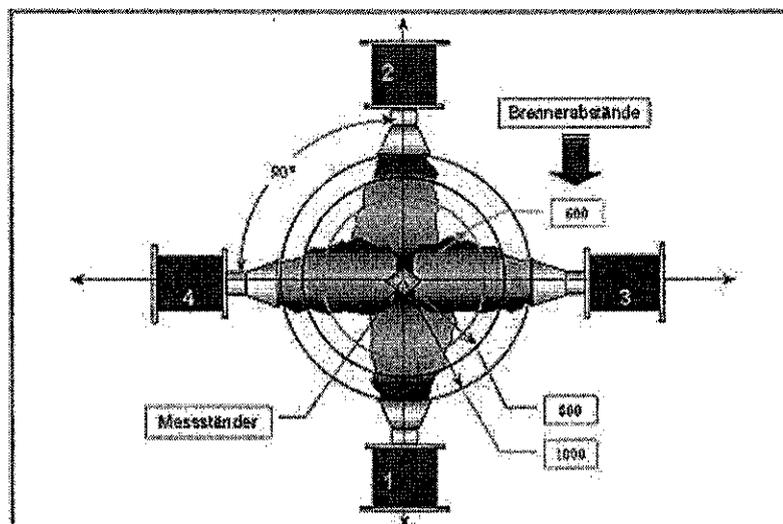


Bild 4.28: Symmetrische Anordnung von 4 Brennern

Versuchsaufbau Brennerkombination mit einseitiger Anordnung

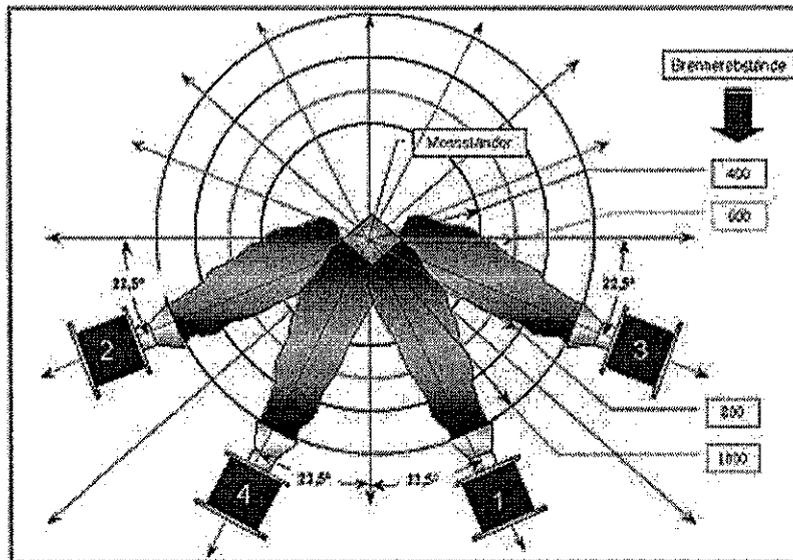


Bild 4.29: Einseitige Anordnung von 4 Brennern

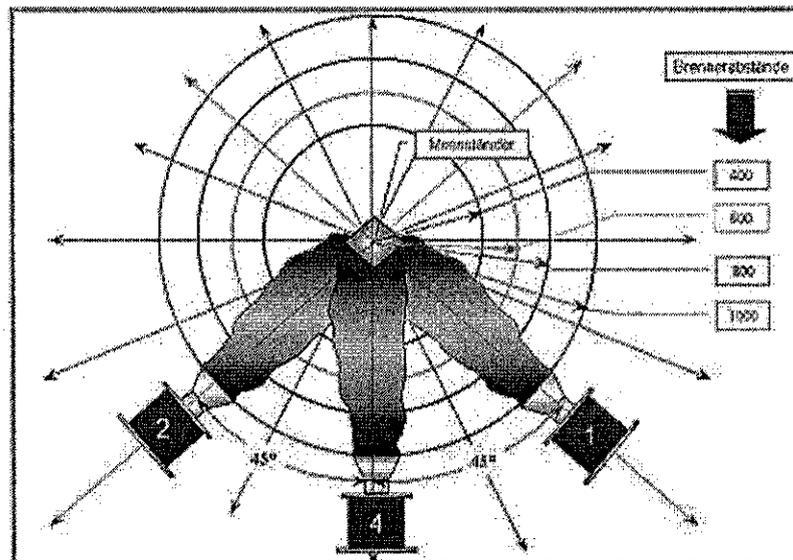


Bild 4.30: Einseitige Anordnung von 3 Brennern

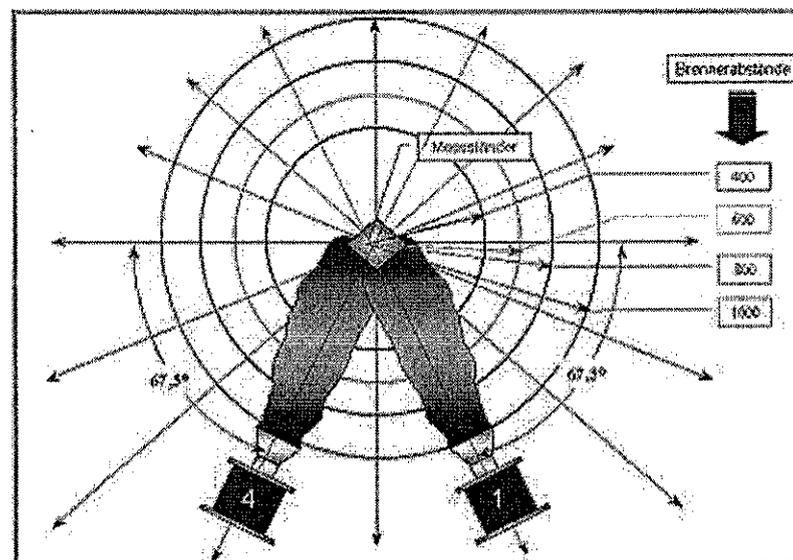


Bild 4.31: Einseitige Anordnung von 2 Brennern

Ergebnisse der Einzelbrenneruntersuchungen (EB) – Brenner Nr. 4

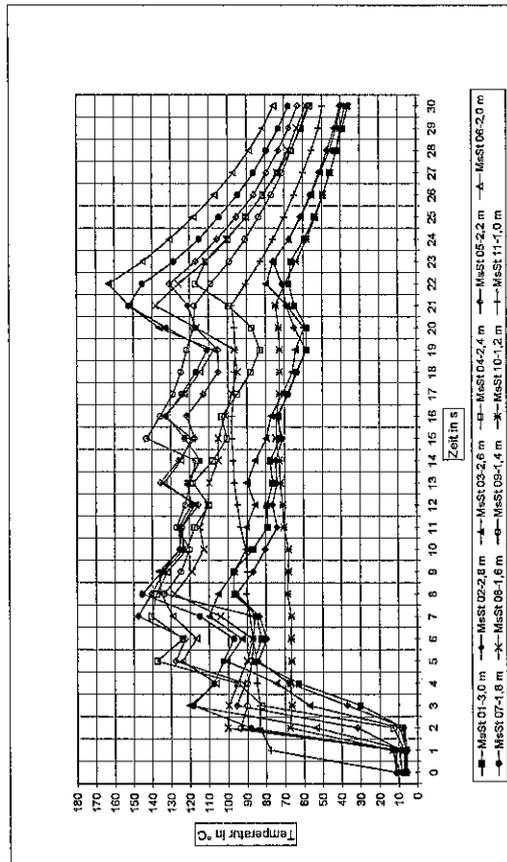


Bild 4.32: EB - Temperaturen an den Messstellen -- 100 cm

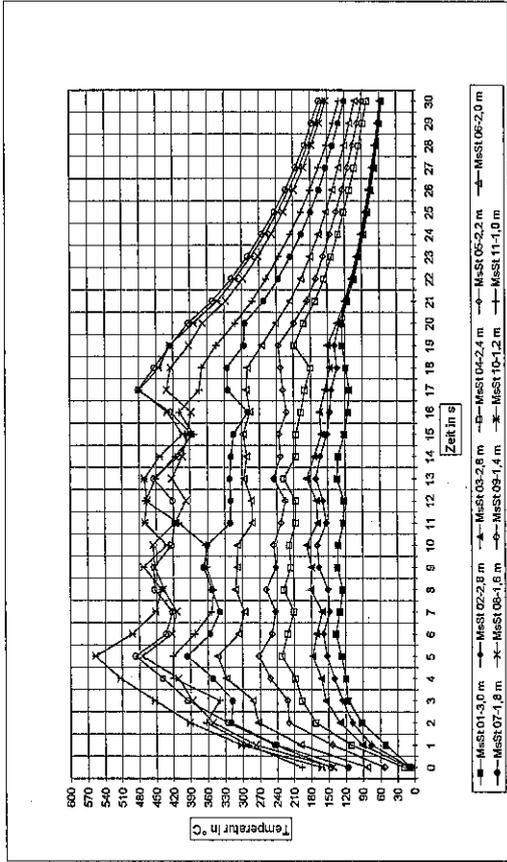


Bild 4.33: EB - Temperaturen an den Messstellen -- 80 cm

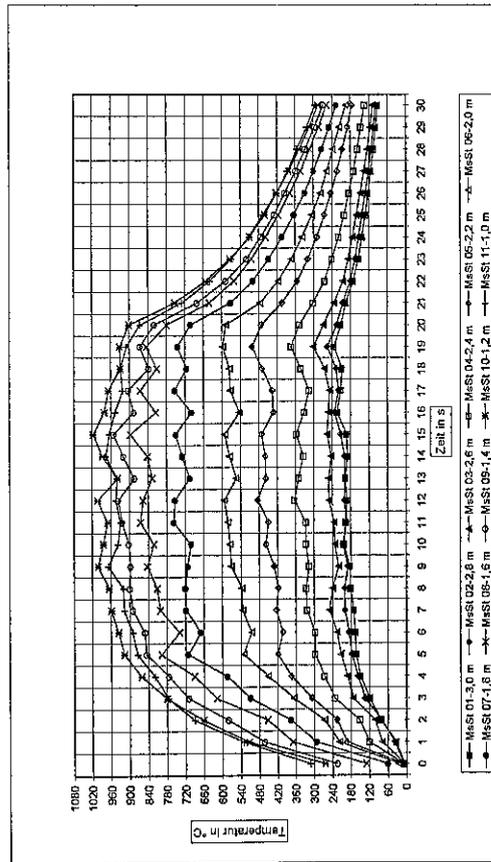


Bild 4.34: EB - Temperaturen an den Messstellen -- 60 cm

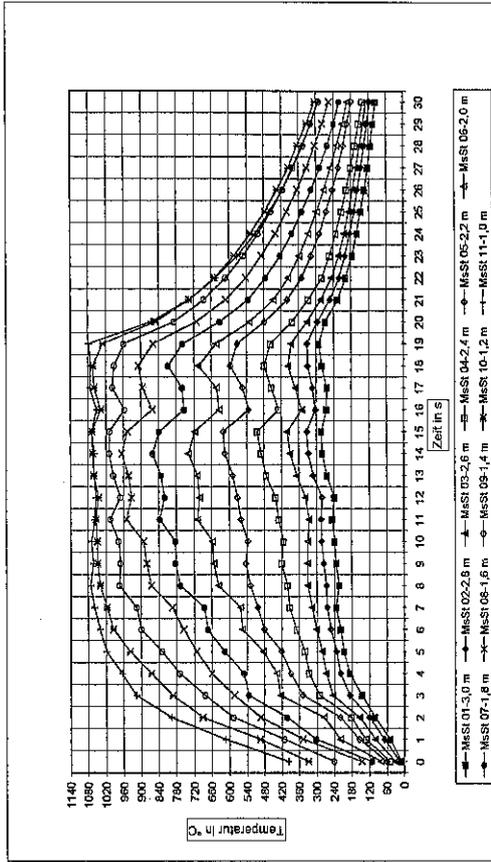


Bild 4.35: EB - Temperaturen an den Messstellen -- 40 cm

4.2.1.2 Wärmestrahlungsbelastung als Funktion des Brennerabstandes

Zusätzlich zur Ermittlung der auftretenden Temperaturen infolge des direkten Flammenkontaktes der Brennerflammen mit den Thermoelementen des Messständers wurde gesondert die Wärmestrahlungsbelastung durch die Brennerflammen untersucht. Zur Ermittlung der Wärmestrahlung kamen vier wassergekühlte Radiometer der Firma MEDTHERM[®] Corporation zum Einsatz. Bild 4.36 zeigt eines dieser Radiometer. Diese Radiometer gehören zur 64er Serie mit dem Sensor-Art Gardon Typ (5 bis 4000 BTU/ft²sec). Bei dieser Sensorart wird der Wärmestrom an der Sensoroberfläche absorbiert und weitergeleitet zu einer integrierten gekühlten Messfläche, die eine konstante Temperatur hat, die unterhalb der Sensoroberflächentemperatur liegt. Die unterschiedlichen Temperaturen zwischen den beiden Punkten entlang des Übertragungsweges des Wärmestromes vom Sensor zum Kühler sind proportional der übertragenen Wärme und deshalb auch proportional dem absorbierten Wärmestrom. An diesen Punkten der MEDTHERM[®] Radiometer sind Thermoelemente angebracht, die einen unterschiedlichen thermoelektrischen (durch Wärmeunterschied erzeugte Elektrizität) Stromkreis bilden, der eine sich selbst erzeugende EMF (Electro Motive Force = elektrobewegende Kraft, Potentialunterschied zwischen zwei Punkten, der elektrischen Stromfluss bewirkt) zwischen den beiden Ausgabekanälen bewirkt, welche direkt proportional dem Wärmefluss ist. Gardon Messgeräte absorbieren die Wärme in einer dünnen metallischen kreisförmigen Folie und übertragen die Wärme radial (parallel zur absorbierenden Oberfläche) zum an der Peripherie der Folie angeschlossenen Kühler. Die Temperaturunterschiede werden zwischen dem Zentrum und dem Rand der Folie gemessen. Entsprechend der Kalibrierdaten des Herstellers der Radiometer wurden bei der Messwerterfassung die vorgegebenen Korrekturfaktoren berücksichtigt. Tabelle 4.3 weist die Parameter der zum Einsatz gelangten Radiometer aus.

Tabelle 4.3: Parameter der Radiometer zur Untersuchung der Wärmestrahlungsbelastung

	Radiometer 1 (Ms St 1)	Radiometer 2 (Ms St 2)	Radiometer 3 (Ms St 3)	Radiometer 4 (Ms St 4)
Korrekturfaktor	1,18	1,18	1,12	0,61
Modell Nr.	64-10-20	64-10-20	64-10-20	64-5-20
Serien Nr.	84681	92582	92581	97801
Messstellenhöhe	1800 mm	1600 mm	1400 mm	1200 mm

Wie bereits aus Tabelle 4.3 ersichtlich, wurden auch die Radiometer in unterschiedlicher Höhe an einem Messständer installiert.

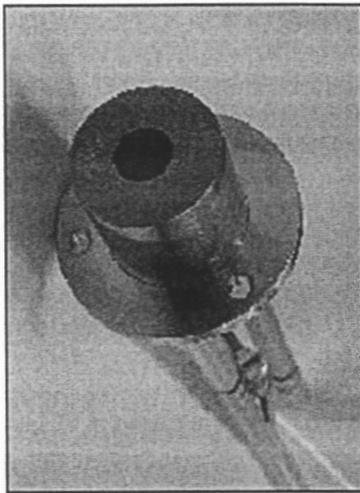


Bild 4.36: Radiometer mit Kühlung

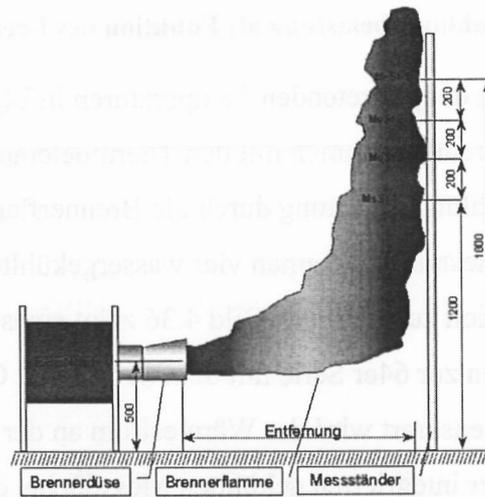


Bild 4.37: Messständer schematisch

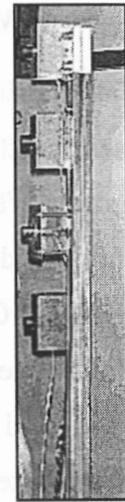


Bild 4.38: Messständer

Bild 4.37 zeigt die schematische Darstellung des Messständers mit den Positionen der Radiometermessstellen. Die Positionen der Messstellen wurde nach den Orten der höchsten thermischen Belastungen, die im Ergebnis der Untersuchungen nach Abschnitt 4.2.1.1 ermittelt wurden, gewählt. In Bild 4.38 wird der Originalmessständer dargestellt.

Die jeweiligen Untersuchungen erstreckten sich jeweils über einen Zeitraum von 24 Sekunden. Für die Messwerterfassung gelangte das Messwerterfassungssystem Autolook 2500 der Firma Pekel zur Anwendung. Die Messwertaufbereitung erfolgte mittels Auto Soft

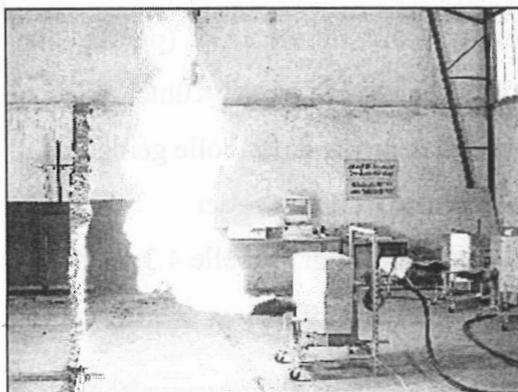


Bild 4.39: Versuchsaufbau Einzelbrennerbetrieb

NT. Festgelegt wurde ein Messintervall von 0,1 Sekunden, so dass je durchgeführter Untersuchung mit den Brennern 1, 2, 3 und 4 jeweils 240 Messwerte aufgenommen wurden. Zur Bestimmung der Wärmestrahlungsintensität in Abhängigkeit vom Abstand der Brenner zum Messwertaufnehmer (Radiometer) wurde nacheinander jeder einzelne Brenner, beginnend beim Abstand 0,8 m über 1,0 m, 1,2 m, 1,4 m bis

hin zu 2,0 m Abstand zu den Radiometern in Position gebracht. Begonnen wurde bei diesen Untersuchungen erst bei dem Abstand 0,8 m, um auszuschließen, dass die Radiometer einer direkten Beflammung ausgesetzt werden, was zu einer Zerstörung derselben geführt hätte. Nach Beendigung eines jeden Versuches wurde bis zu Beginn des nächsten solange gewartet, bis die Ausgangsbedingungen, die zu Versuchsbeginn vorlagen, wieder hergestellt waren, um dadurch miteinander vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Der Versuchsaufbau im Betrieb beim Abstand eines Einzelbrenners von 1,0 m zu den Messwertaufnehmern ist aus Bild 4.39 ersichtlich. Bei Vorversuchen wurde festgestellt, dass die Flammelänge des Brenners 4 größer

ist als die der anderen Brenner. Die Flammenlänge wurde nicht verändert, um deren Einfluss auf die Wärmerstrahlungsintensität gegenüber den anderen Brennern auszutesten. Brenner 4 wurde aber wegen der längeren Brennerflamme nicht in die Untersuchungen beim Abstand 0,8 m einbezogen, um die Radiometer nicht der direkten Beflammung auszusetzen. In Tabelle 4.4 werden die Untersuchungsergebnisse in Form der Angabe der Messwerte als Maximal- und Mittelwerte sowie als Durchschnittswerte (über alle Messstellen) brennerabhängig an den einzelnen Messstellen für einen Auswertzeitraum von 20 Sekunden ausgewiesen.

Tabelle 4.4: Messergebnisse zur Wärmestrahlung bei Einzelbrennern – Auswertzeitraum = 20 Sekunden

Wärmestrahlung in W/cm²									
Abstand in m	Messstelle	BRENNER 1		BRENNER 2		BRENNER 3		BRENNER 4	
		Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert
0,8	1	3,54	2,58	6,64	3,78	5,39	3,71	keine Messung bei diesem Abstand	
	2	4,61	3,46	10,10	4,70	8,09	5,07		
	3	5,27	4,04	9,01	5,06	9,10	5,50		
	4	5,50	4,27	8,97	4,99	7,77	5,39		
Durchschnitt		4,73	3,59	8,68	4,63	7,59	4,92	-	
1,0	1	2,86	1,87	2,64	2,17	2,75	2,38	4,28	3,21
	2	4,75	2,51	3,37	2,71	4,11	3,02	6,66	4,19
	3	3,88	2,85	3,63	2,95	4,16	3,25	7,73	4,61
	4	3,79	2,98	3,57	2,90	4,03	3,18	7,24	4,56
Durchschnitt		3,82	2,55	3,30	2,68	3,76	2,9	6,48	4,10
1,2	1	1,82	1,54	1,88	1,61	1,98	1,74	2,35	1,64
	2	2,45	1,92	2,41	1,93	2,61	2,12	3,25	2,12
	3	2,64	2,09	2,56	2,04	2,67	2,22	3,20	2,38
	4	2,57	2,08	2,50	1,98	2,62	2,18	3,28	2,40
Durchschnitt		2,37	1,91	2,34	1,89	2,47	2,07	3,02	2,14
1,4	1	1,42	1,25	1,32	1,22	1,50	1,35	1,46	1,27
	2	1,85	1,5	1,66	1,41	1,91	1,59	1,87	1,56
	3	1,88	1,58	1,65	1,45	1,92	1,65	1,97	1,65
	4	1,75	1,53	1,58	1,38	1,83	1,59	1,96	1,66
Durchschnitt		1,73	1,47	1,55	1,37	1,79	1,55	1,82	1,54
2,0	1	0,69	0,62	0,69	0,60	0,85	0,71	0,68	0,62
	2	0,79	0,69	0,77	0,66	0,99	0,79	0,80	0,71
	3	0,82	0,71	0,76	0,66	0,96	0,79	0,82	0,72
	4	0,77	0,68	0,71	0,62	0,91	0,76	0,77	0,70
Durchschnitt		0,77	0,68	0,73	0,64	0,93	0,76	0,77	0,69

Durch die Charakteristik einer Brennerflamme (kein konstantes Flammenbild) im Allgemeinen bedingt, traten bei den durchgeführten Untersuchungen erhebliche

Schwankungen der Wärmestrahlungsintensität auf. Bild 4.40 verdeutlicht am Beispiel des Abstandes von 0,8 m des Einzelbrenners vom Messständer den typischen Verlauf der Messergebnisse der Wärmestrahlungsintensität an den 4 Messstellen. In Anlage 3 werden zur Verdeutlichung der Brennerphasen beispielhaft die sich zeitabhängig einstellenden Flammenbilder des Brenners Nr. 1 dargestellt. Vor allem in der Anfangsphase (Startphase)

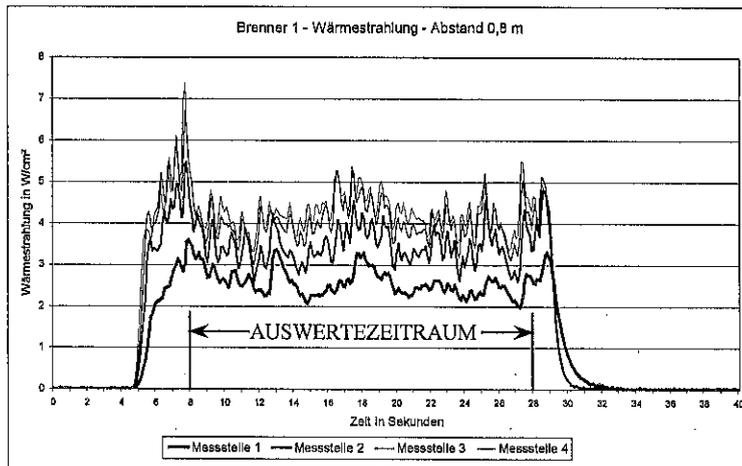


Bild 4.40: Wärmestrahlungsmessung – Auswertezeitraum = 20 s

der Brenner kommt es zu Spitzenwerten der Wärmestrahlung, die nicht charakteristisch sind für den Gesamtzeitraum der jeweiligen Messung für den festgelegten Zeitraum. Die in Tabelle 4.4 ausgewiesenen Messwerte beziehen sich dann auch, um vor allem durch die

Anfangsspitzenwerte nicht zu einer falschen Einschätzung zu gelangen, nicht auf den gesamten Messzeitraum von 24 Sekunden. Erfasst wurden hier die Messwerte über einen Zeitraum von 20 Sekunden (ab 3 s nach Brennerstart). In Bild 4.40 wird dieser Messzeitraum (Auswertezeitraum) dargestellt durch den Bereich 8 bis 28 Sekunden. Zur vergleichenden Bewertung der Wärmestrahlungsintensität wurde der Durchschnitt der Mittelwerte über alle Messstellen (grau unterlegte Felder in Tabelle 4.4) herangezogen. Danach ist ersichtlich, dass die Messwerte der Wärmestrahlungsintensität generell an Messstelle 3, d. h. in 1,40 m Höhe ab Boden am höchsten ausfallen. Diese Höhe entspricht gemäß Bild 4.37 einem vertikalen Abstand der Brennerachse zu Messstelle 3 von 900 mm. Die höchsten Werte werden bei allen Brennern beim Abstand von 0,8 m erreicht. Mit größer werdendem Abstand sinken die Werte der Wärmestrahlungsintensität weiter ab. Beim Abstand 2,0 m liegen sämtliche Messwerte unter 1 W/cm^2 . Insgesamt ist feststellbar, dass, bezogen auf die gleiche Messstelle und den gleichen Abstand, die Werte der Wärmestrahlungsintensität der einzelnen Brenner eine doch relativ große Schwankungsbreite aufweisen. Insbesondere wird dieses deutlich am Beispiel der in Tabelle 4.4 für den Abstand 0,8 m ausgewiesenen Durchschnittswerte für die einzelnen Brenner.

Die vorgenannten Darlegungen basierten auf dem Auswertezeitraum von 20 Sekunden, um Aussagen auch hinsichtlich des „Langzeitverhaltens“ der Brenner sowie zu Möglichkeiten einer großen Variationsbreite der thermischen Belastung bei der Untersuchung persönlicher

Schutzausrüstung zu erhalten. Die Untersuchungspraxis zur Stichflammenbelastung persönlicher Schutzausrüstung wird insbesondere bei Prüfungen aber eher durch kürzere Expositionszeiten einer thermischen Belastung durch Stichflammen geprägt sein. So wird beispielsweise beim Thermo Man[®]-Verfahren von DuPont (nach HuPF) eine Expositionszeit von 8 Sekunden zugrunde gelegt.

Die folgenden Ausführungen nehmen deshalb Bezug auf diese Expositionszeit und widerspiegeln die bei den vorgenannten Untersuchungen erzielten Ergebnisse im Auswertebereich 0 bis 8 Sekunden.

Bild 4.41 verdeutlicht am Beispiel des Abstandes von 0,8 m des Einzelbrenners vom Messständer den typischen Verlauf der Messergebnisse der Wärmestrahlungsintensität an den

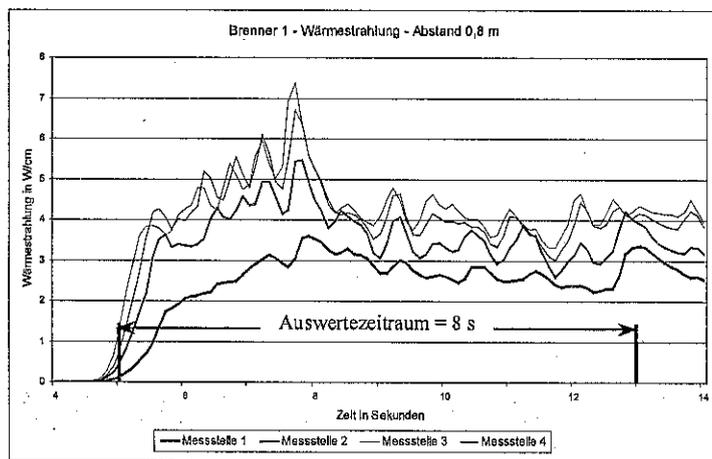


Bild 4.41: Wärmestrahlungsmessung – Auswertzeitraum = 8 s

4 Messstellen in dem Auswertzeitraum von 8 (Zeitintervall 5 bis 13 Sekunden) Sekunden. In Tabelle 4.5 werden die Messergebnisse zur Wärmestrahlung bei den Untersuchungen zu den Einzelbrennern über den Auswertzeitraum von 8

Sekunden dargestellt. Ebenso wie im Auswertzeitraum von 20 Sekunden ist auch hier feststellbar, dass die höchsten Messwerte an Messstelle 3 (1,40 m Höhe ab Boden bzw. vertikaler Abstand der Brennerachse zu dieser Messstelle = 900 mm) auftreten. Auch hier werden die maximalen Werte bei allen Brennern bei einem Abstand von 0,8 m von der Brennerdüse zum Messständer erreicht. Vergleicht man sowohl die Maximalwerte als auch die Durchschnittswerte in den Tabellen 4.4 und 4.5 (Auswertzeitraum 20 s und Auswertzeitraum 8 s), so sind hier nur relativ geringfügige Abweichungen der Werte untereinander erkennbar. Brennerbezogen kann die Aussage getroffen werden, dass die größten Abweichungen der Messwerte der Brenner untereinander beim Abstand = 0,8 m zu verzeichnen sind. Diese Feststellung hat Gültigkeit für beide Auswertzeiträume. Diese Aussage und die Tatsache, dass bei allen anderen Abständen mit relativ geringen Abweichungen durchaus vergleichbare Messwerte (vor allem Durchschnittswerte) vorliegen, verdeutlicht, dass die durch die Installationsfirma vorgenommenen Brennerjustierungen nicht sachgemäß vorgenommen wurden und deshalb eine Nachjustierung erforderlich wird. Es kann

davon ausgegangen werden, dass dadurch dann auch die bei den Abständen 1,0 bis 2,0 m derzeit noch auftretenden Abweichungen der Messwerte der Brenner untereinander egalisiert werden können.

Tabelle 4.5: Messergebnisse zur Wärmestrahlung bei Einzelbrennern - Auswertezeitraum = 8 Sekunden

Wärmestrahlung in W/cm²									
Abstand in m	Messstelle	BRENNER 1		BRENNER 2		BRENNER 3		BRENNER 4	
		Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert
0,8	1	3,60	2,52	6,64	4,58	5,39	3,71	keine Messung bei diesem Abstand	
	2	5,47	3,55	10,10	6,18	7,72	5,01		
	3	6,71	4,14	9,01	6,47	7,65	5,43		
	4	7,39	4,31	8,40	6,10	7,62	5,47		
Durchschnitt		5,79	3,63	8,54	5,83	7,10	4,91	-	
1,0	1	2,86	1,98	2,64	2,09	3,11	2,35	3,83	2,43
	2	4,75	2,75	3,23	2,70	4,54	3,14	5,66	3,37
	3	3,97	3,05	3,63	2,91	4,44	3,32	6,10	3,80
	4	3,87	3,13	3,57	2,86	4,12	3,25	5,90	3,81
Durchschnitt		3,86	2,73	3,27	2,64	4,05	3,01	5,37	3,35
1,2	1	1,82	1,54	1,88	1,65	1,98	1,67	2,35	1,61
	2	2,45	2,04	2,41	2,09	2,52	2,09	3,25	2,27
	3	2,64	2,21	2,56	2,22	2,99	2,21	3,84	2,69
	4	2,57	2,17	2,53	2,17	3,24	2,16	4,45	2,75
Durchschnitt		2,37	1,99	2,35	2,03	2,68	2,03	3,47	2,33
1,4	1	1,35	1,19	1,32	1,14	1,54	1,29	1,43	1,26
	2	1,74	1,50	1,84	1,40	2,21	1,56	2,30	1,61
	3	1,75	1,57	1,81	1,43	2,19	1,64	2,16	1,72
	4	1,64	1,51	1,62	1,39	2,06	1,57	2,10	1,69
Durchschnitt		1,62	1,44	1,65	1,34	2,00	1,51	2,00	1,57
2,0	1	0,66	0,56	0,69	0,60	0,74	0,64	0,68	0,57
	2	0,77	0,66	0,77	0,69	0,88	0,75	0,77	0,68
	3	0,77	0,67	0,76	0,69	0,86	0,76	0,82	0,71
	4	0,74	0,64	0,72	0,65	0,82	0,72	0,76	0,68
Durchschnitt		0,74	0,63	0,74	0,66	0,83	0,72	0,76	0,66

4.2.2 Brennerkombination

4.2.2.1 Brennerkombination bei symmetrischer Anordnung der Brenner

Die symmetrische Anordnung der Brenner erfolgte gemäß Bild 4.28. Hier wurden alle vier zur Verfügung stehenden Brenner in die Untersuchung einbezogen. In Bild 3.3 ist diese Anordnung als Versuchsaufbau mit Brennereinrichtung und Dummy dargestellt. Die

Untersuchungen wurden geführt unter Zugrundelegung der Abstände Brenner - Messstände (ohne Bekleidungssimulator) von 100 cm, 80 cm und 60 cm.

In den Bildern 4.42 bis 4.44 werden die an den Messstellen des Messständers gemessenen Temperaturen in Abhängigkeit vom Abstand der Brenner zum Messständer grafisch ausgewiesen. Folgende Maximaltemperaturen nach Tabelle 4.6 wurden erreicht:

Tabelle 4.6: Erzielte Maximaltemperaturen - Untersuchung Brennerkombination bei symmetrischer Anordnung

Messstelle / Höhe ab Boden in Meter	Abstand Brenner - Messstände in Meter	Maximaltemperatur in °C
7 / 1,8	1	575
8 / 1,6	0,8	965
10 / 1,2	0,6	1150

Damit erzeugen die Brenner unter den gegebenen Bedingungen im Abstand von 60 cm an Messstelle 10 die höchste thermische Belastung. Mit Ausnahme der Messstellen 13 bis 15 ist ab der Messstelle 1 ein Temperaturanstieg bis zur höchsten Temperatur an Messstelle 10 zu verzeichnen. Die Messstellen 11 und 12 ordnen sich in den Temperaturbereich > 1000 °C ein. Die Messstellen 13 (600 mm über dem Boden), 14 (400 mm über Boden) und 15 (200 mm über Boden) werden bei allen Brennerabständen auch hier bei der symmetrischen Brenneranordnung kaum thermisch beansprucht, da die Brennerachse sich im Abstand von 500 mm über Boden befindet. Somit liegen diese Messstellen außerhalb des Bereiches der direkten Beflammung. An diesen Messstellen kommt nur der Strahlungsanteil der Brennerflamme zur Geltung.

Wie oben beschrieben, spielte der Bekleidungssimulator im Rahmen dieser Untersuchungen auf Grund der Brenneranordnung keine Rolle. Dennoch wurde, als zusätzlicher Test sozusagen, die thermische Belastung des Bekleidungssimulators bei symmetrischer Brenneranordnung qualitativ mittels einer Wärmebildkamera untersucht. Dieser Test erfolgte nur bei einem Abstand Brenner - Bekleidungssimulator von 60 cm. Bild 4.45 zeigt das Realbild vom Versuchsaufbau. Die Versuchsdurchführung (Brenner in Betrieb) ist in Bild 4.47, die mit der Wärmebildkamera aufgenommenen Infrarotbilder des Bekleidungssimulators und der Brennerflammen sind in den Bildern 4.46 und 4.48 dargestellt. Im Gegensatz zur einseitigen Beflammung des Bekleidungssimulators mit nur einem Brenner ist hier eine fast gleichmäßige thermische Beanspruchung über die gesamte Fläche wahrnehmbar (vergleiche Bild 4.46 mit den Bildern 4.19 und 4.23).

Ergebnisse der Untersuchung der Brennerkombination (BK) mit 4 Brennern in symmetrischer Anordnung

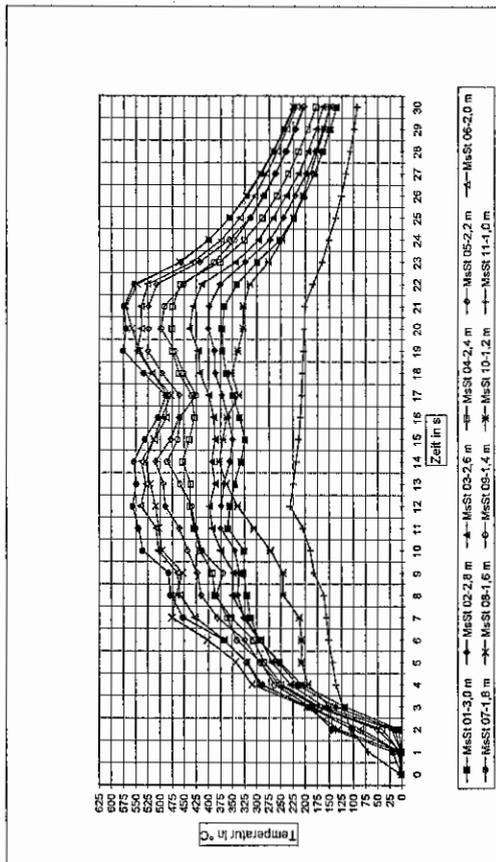


Bild 4.42: BK - Temperaturen an den Messstellen - 100 cm

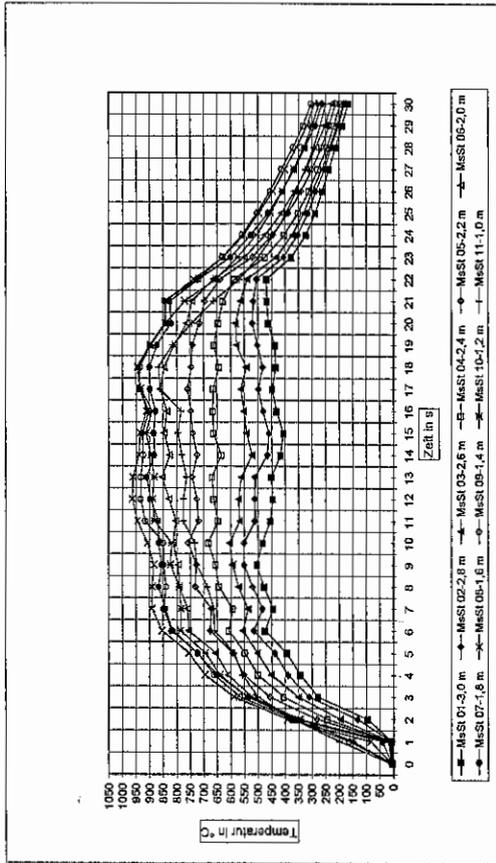


Bild 4.43: BK - Temperaturen an den Messstellen - 80 cm

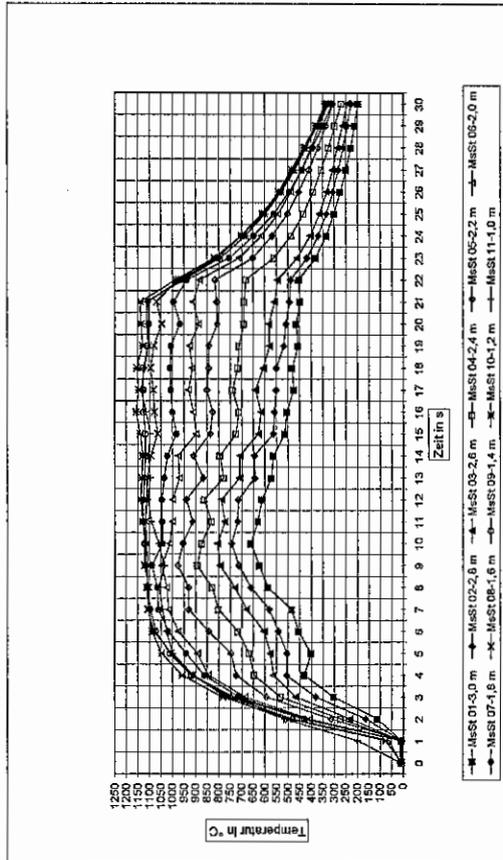


Bild 4.44: BK - Temperaturen an den Messstellen - 60 cm

Untersuchung mit Wärmebildkamera

Abstand Brennerkombination (symmetrisch) zu Bekleidungssimulator 60 cm

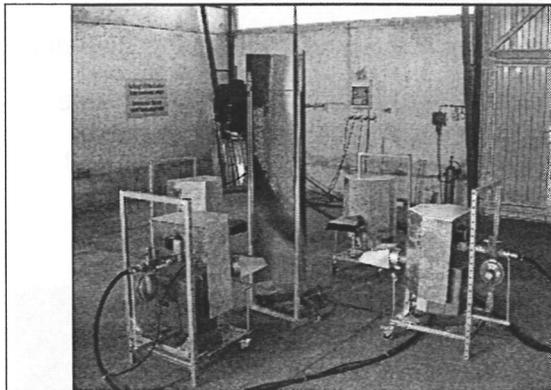


Bild 4.45: Brenner vor Bekleidungssimulator (60 cm)

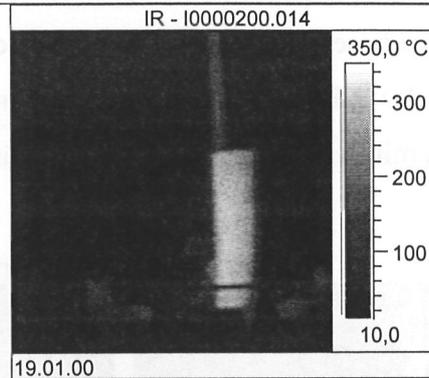


Bild 4.46: Infrarotbild Bekleidungssimulator (60 cm)

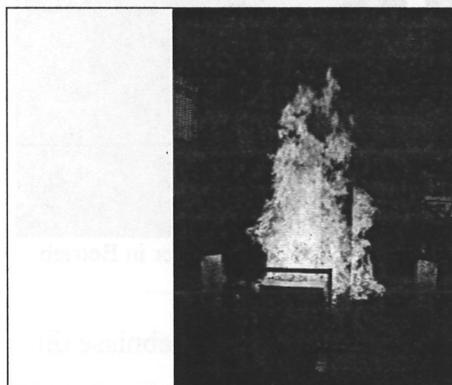


Bild 4.47: Brenner in Betrieb (60 cm)

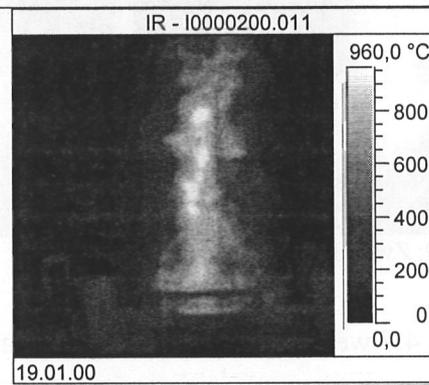


Bild 4.48: Infrarotbild Flamme (60 cm)

4.2.2.2 Brennerkombination bei einseitiger Anordnung der Brenner mit und ohne Bekleidungssimulator

Die einseitige Brenneranordnung wird grafisch in den Bildern 4.29 bis 4.31 ausgewiesen. Der Brennerbetrieb ist in den Bildern 4.49 bis 4.51 dargestellt. Die Untersuchungen erfolgten jeweils mit 2, 3 oder 4 Brennern. Ebenso wie bei den anderen Untersuchungen sollte hier in Abhängigkeit von der Anzahl und der Anordnung der in Betrieb befindlichen Brenner die durch die Brenner erzeugte thermische Belastung durch Temperaturmessung an den Messstellen des Messständers ermittelt werden. Die Abstände der Brenner vom Messständer betragen bei den Untersuchungen *ohne Bekleidungssimulator* 100 cm, 80 cm und 60 cm. Darüber hinaus erfolgten noch Referenzuntersuchungen unter Einsatz des Bekleidungssimulators mit 4, 3 und 2 Brennern. Der Abstand der einzelnen Brenner vom Bekleidungssimulator betrug hier 60 cm. Die Ergebnisse der Untersuchungen ohne Bekleidungssimulator in Abhängigkeit von der Anzahl der Brenner und deren Abstand vom Messständer werden in den Anlagen 4.1 bis 4.6 für die Messstellen 1 bis 12 grafisch dargestellt. Es ist festzustellen, dass die höchsten gemessenen Temperaturen beim Einsatz von

2, 3 und 4 Brennern jeweils im Abstand von 60 cm auftraten. Von der Rangfolge der Anzahl der eingesetzten Brenner her traten die höchsten thermischen Belastungen bei diesem Abstand beim Einsatz von 3 Brennern, gefolgt von 2 und 4 Brennern auf. Daraus ist zu schlussfolgern, dass, wie dieser Fall beweist, die Größe der thermischen Einwirkung nicht unbedingt von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner abhängt. Gründe hierfür können beispielsweise die sich mit der Anzahl der Brenner verändernden strömungstechnischen Verhältnisse sein.

Flammenbilder der einseitigen Brenneranordnung

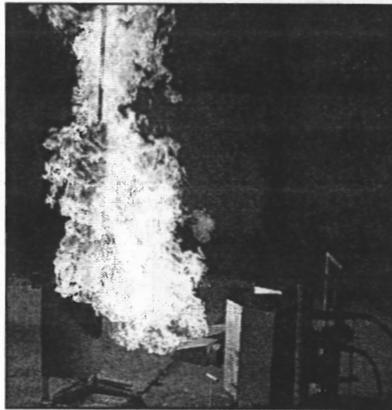


Bild 4.49: Zwei Brenner in Betrieb

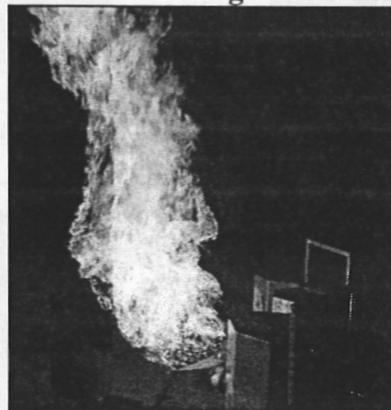


Bild 4.50: Drei Brenner in Betrieb



Bild 4.51: Vier Brenner in Betrieb

Tabelle 4.7 weist auf der Basis der in Anlage 4.5 grafisch ausgewiesenen Messergebnisse die bei diesen Untersuchungen gemessenen Maximaltemperaturen an den Messstellen des Messständers (ohne Bekleidungssimulator) beim Einsatz von 3 Brennern aus.

Tabelle 4.7: Auftretende Maximaltemperaturen (Brennerkombination einseitig ohne Bekleidungssimulator)

Messstelle / Höhe ab Boden in Meter	Abstand Brenner - Messständer in Meter	Anzahl Brenner	Maximaltemperatur in °C
6 / 1,4	1	3	310
6 / 1,4	0,8	3	810
8 / 1,6	0,6	3	1040

Damit erzeugen 3 Brenner, bezogen auf deren einseitige Anordnung, im Abstand von 60 cm an Messstelle 8 die höchste thermische Belastung.

Mit Ausnahme der Messstellen 13 bis 15 (aus Übersichtsgründen in Anlage 4.5 nicht ausgewiesen) ist gemäß Anlage 4.5 ab der Messstelle 1 ein Temperaturanstieg bis zur höchsten Temperatur an Messstelle 8 zu verzeichnen. Die Messstellen 9 bis 12 ordnen sich in den Temperaturbereich ≥ 900 °C ein. Die Messstellen 13 (600 mm über dem Boden), 14 (400 mm über Boden) und 15 (200 mm über Boden) werden, wie bei allen Brennerabständen, auch hier bei der symmetrischen Brenneranordnung kaum thermisch beansprucht, da die Brennerachse sich im Abstand von 500 mm über Boden befindet. Somit liegen diese

Messstellen außerhalb des Bereiches der direkten Beflammung. An diesen Messstellen kommt auch hier nur der Strahlungsanteil der Brennerflammen zur Geltung.

Die Untersuchungsergebnisse in Abhängigkeit von der Anzahl der Brenner bei 60 cm Abstand der Brenner vom Messständer *mit Bekleidungssimulator* werden in den Anlagen 3.4 bis 3.6 grafisch dargestellt.

Folgende Maximaltemperaturen nach Tabelle 4.8 wurden *mit Bekleidungssimulator* erreicht:

Tabelle 4.8: Auftretende Maximaltemperaturen (Brennerkombination einseitig mit Bekleidungssimulator)

Messstelle / Höhe ab Boden in Meter	Abstand Brenner - Messständer in Meter	Anzahl Brenner	Maximaltemperatur in °C
8 / 1,6	0,6	4	1050
8 / 1,6	0,6	3	1050
8 / 1,6	0,6	2	1020

Damit erzeugen 4 bzw. 3 Brenner bei einseitiger Anordnung im Abstand von 60 cm an Messstelle 8 auch hier die höchste thermische Belastung.

Im direkten Vergleich mit den gemessenen Werten nach Tabelle 4.7 (*ohne Bekleidungssimulator*) ist erkennbar, dass in Bezug auf den Vergleich der Maximaltemperaturen beider Untersuchungsvarianten keine wesentlichen Unterschiede bei den Messergebnissen feststellbar sind. Dies trifft sowohl auf den Messort (Messstelle 8) als auch auf die Messwerte zu.

4.2.2.3 Wärmestrahlungsbelastung der Brennerkombination bei einseitiger Anordnung der Brenner

Zusätzlich zur Ermittlung der auftretenden Temperaturen bei der Untersuchung der Brennerkombination bei einseitiger Anordnung der Brenner wurde die Wärmestrahlungsbelastung als Funktion der Brennerabstände ermittelt. Der Bekleidungssimulator wurde bei diesen Untersuchungen nicht eingesetzt. Das Verfahren zur Ermittlung der Wärmestrahlungsbelastung war identisch mit dem im Abschnitt 4.2.1.2 für die Einzelbrenneruntersuchung beschriebenen.

Für die in den Tabellen 4.10 und 4.11 ausgewiesene Brenneranzahl kamen nach Tabelle 4.9 die folgenden Brenner zum Einsatz:

Tabelle 4.9: Eingesetzte Brenner (einseitige Anordnung) zur Untersuchung der Wärmestrahlungsbelastung

Anzahl der Brenner	Eingesetzte Brenner
1 Brenner	Brenner Nr. 1
2 Brenner	Brenner Nr. 1 und Nr. 2
3 Brenner	Brenner Nr. 1, Nr. 2 und Nr. 3
4 Brenner	Brenner Nr. 1, Nr.2, Nr. 3 und Nr. 4

Die Ergebnisse der Wärmestrahlungsbelastung in Abhängigkeit von der Brenneranzahl und dem Abstand für einen Auswertzeitraum von 20 Sekunden werden grafisch in Anlage 5 ausgewiesen. Diese Ergebnisse, tabellarisch aufbereitet in Form der Angabe der Messwerte als Maximal- und Mittelwerte sowie als Durchschnittswerte (über alle Messstellen), werden in Tabelle 4.10 dargestellt. Auch hier, wie bei den Einzelbrenneruntersuchungen, wird nicht der gesamte Messzeitraum von 24 Sekunden betrachtet, um die Anfangsspitzenwerte (die hier beim Einsatz mehrerer Brenner gleichzeitig nicht so deutlich auftreten wie bei den Einzelbrenneruntersuchungen) bei der Auswertung auszuschließen.

Tabelle 4.10: Messergebnisse zur Wärmestrahlung bei Brennerkombination - Auswertzeitraum = 20 Sekunden

Wärmestrahlung in W/cm²									
Abstand in m	Messstelle	1 BRENNER		2 BRENNER		3 BRENNER		4 BRENNER	
		Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert
0,8	1	3,54	2,58	7,30	5,74	10,74	8,90	8,16	6,06
	2	4,61	3,46	9,85	7,05	13,65	10,28	10,53	7,38
	3	5,27	4,04	9,11	7,52	12,88	10,38	10,53	8,03
	4	5,50	4,27	9,45	7,36	12,49	9,47	10,06	7,83
Durchschnitt		4,73	3,59	8,93	6,92	12,44	9,76	9,82	7,33
1,0	1	2,86	1,87	5,27	4,10	5,03	4,31	3,53	2,85
	2	4,75	2,51	6,49	4,96	6,13	5,37	4,51	3,74
	3	3,88	2,85	6,51	5,26	6,83	5,90	5,74	4,40
	4	3,79	2,98	5,93	5,08	6,81	5,81	5,26	4,61
Durchschnitt		3,82	2,55	6,05	4,85	6,20	5,34	4,76	3,90
1,2	1	1,82	1,54	3,46	3,12	3,43	3,14	2,63	2,19
	2	2,45	1,92	4,50	3,73	4,33	3,81	3,23	2,77
	3	2,64	2,09	4,52	3,88	4,74	4,11	3,65	3,21
	4	2,57	2,08	4,28	3,74	4,70	4,07	3,62	3,29
Durchschnitt		2,37	1,91	4,19	3,62	4,30	3,78	3,28	2,86
1,4	1	1,42	1,25	2,45	2,22	2,73	2,43	2,05	1,66
	2	1,85	1,5	2,93	2,55	3,41	2,91	2,37	2,06
	3	1,88	1,58	2,94	2,66	3,54	3,03	2,60	2,27
	4	1,75	1,53	2,88	2,57	3,41	3,00	2,62	2,31
Durchschnitt		1,73	1,47	2,80	2,50	3,27	2,84	2,41	2,07
2,0	1	0,69	0,62	1,16	1,10	1,38	1,25	0,98	0,91
	2	0,79	0,69	1,33	1,21	1,58	1,39	1,13	1,03
	3	0,82	0,71	1,36	1,22	1,60	1,43	1,19	1,09
	4	0,77	0,68	1,26	1,18	1,50	1,38	1,16	1,07
Durchschnitt		0,77	0,68	1,28	1,18	1,52	1,36	1,12	1,03

In Bild 4.52 wird beispielhaft die Wärmestrahlungsbelastung beim gleichzeitigen Einsatz von 3 Brennern (hier tritt die höchste Wärmestrahlungsbelastung auf) über den Auswertzeitraum

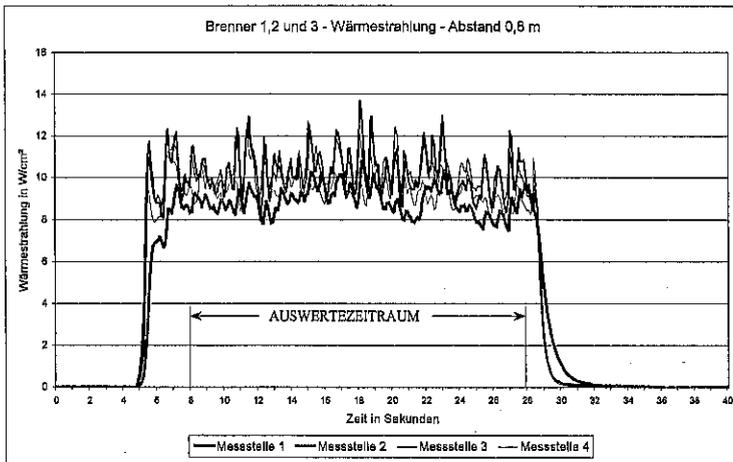


Bild 4.52: Wärmestrahlungsmessung – Auswertzeitraum = 20 s

den Einzelbrenneruntersuchungen, die Messwerte der Wärmestrahlungsintensität generell an Messstelle 3, d. h. in 1,40 m Höhe ab Boden am höchsten ausfallen. Diese Höhe entspricht gemäß Bild 4.37 einem vertikalen Abstand der Brennerachse zu Messstelle 3 von 900 mm. Die höchsten Werte werden bei allen Brennern auch hier bei einem Abstand von 0,8 m erreicht. Mit größer werdendem Abstand sinken die Werte der Wärmestrahlungsintensität weiter ab.

Mit der gleichen, wie der im Abschnitt 4.2.1.2 dargelegten Begründung für die Einzelbrenneruntersuchungen, wurden auch hier Untersuchungen der Brennerkombination bei

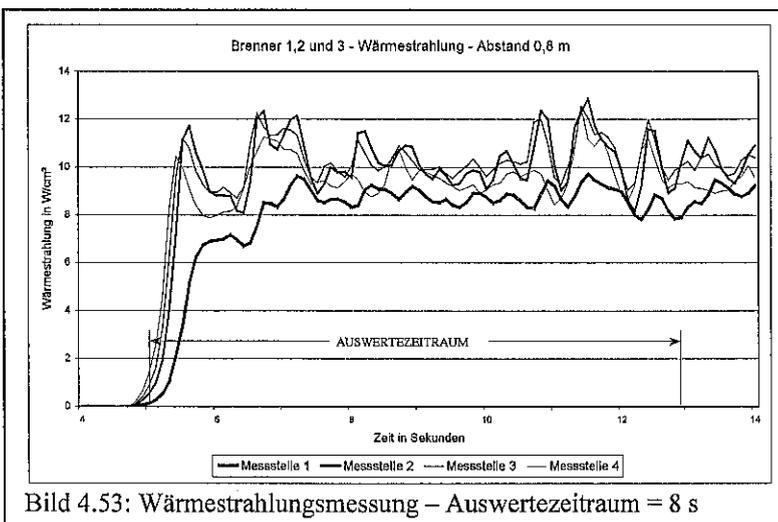


Bild 4.53: Wärmestrahlungsmessung – Auswertzeitraum = 8 s

Auswertzeitraum von 8 Sekunden werden grafisch in Anlage 6 ausgewiesen. Diese Ergebnisse, tabellarisch aufbereitet in Form der Angabe der Messwerte als Maximal- und Mittelwerte sowie als Durchschnittswerte (über alle Messstellen), werden in Tabelle 4.11 dargestellt. In Bild 4.53 wird beispielhaft die Wärmestrahlungsbelastung beim gleichzeitigen

von 20 Sekunden (Bereich 8 bis 28 s) dargestellt. Zur vergleichenden Bewertung der Wärmestrahlungsintensität wurde in Tabelle 4.10 der Durchschnitt der Mittelwerte über alle Messstellen (grau unterlegte Felder) herangezogen. Danach ist ersichtlich, dass ebenso wie bei

einseitiger Anordnung der Brenner zur Wärmestrahlungsbelastung mit einer Expositionszeit von nur 8 Sekunden durchgeführt. Die Ergebnisse der Wärmestrahlungsbelastung in Abhängigkeit von der Brenneranzahl und dem Abstand für einen

Einsatz von 3 Brennern (hier tritt die höchste Wärmestrahlungsbelastung auf) über den Auswertzeitraum von 8 Sekunden (Bereich 5 bis 13 s) dargestellt.

Tabelle 4.11: Messergebnisse zur Wärmestrahlung bei Brennerkombination – Auswertzeitraum = 8 Sekunden

Wärmestrahlung in W/cm²									
Abstand in m	Messstelle	1 BRENNER		2 BRENNER		3 BRENNER		4 BRENNER	
		Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert
0,8	1	3,60	2,52	8,09	5,79	9,71	7,91	9,20	7,14
	2	5,47	3,55	10,67	7,53	12,88	9,80	13,54	8,75
	3	6,71	4,14	11,21	8,10	12,53	9,96	13,10	9,05
	4	7,39	4,31	10,47	7,89	12,49	9,35	12,57	8,64
Durchschnitt		5,79	3,63	10,11	7,33	11,90	9,25	12,10	8,39
1,0	1	2,86	1,98	4,43	3,72	5,43	4,19	6,38	3,40
	2	4,75	2,75	5,56	4,72	8,17	5,49	9,87	4,43
	3	3,97	3,05	5,78	5,06	7,98	5,95	9,86	5,07
	4	3,87	3,13	5,63	4,96	8,22	5,89	9,04	5,16
Durchschnitt		3,86	2,73	5,35	4,61	7,45	5,38	8,79	4,51
1,2	1	1,82	1,54	3,35	2,78	3,63	3,13	4,14	2,38
	2	2,45	2,04	4,27	3,57	5,46	3,99	6,83	3,12
	3	2,64	2,21	4,48	3,75	5,50	4,32	6,68	3,52
	4	2,57	2,17	4,47	3,63	5,51	4,24	6,62	3,60
Durchschnitt		2,37	1,99	4,14	3,43	5,03	3,92	6,07	3,15
1,4	1	1,35	1,19	2,45	2,08	2,80	2,43	4,00	2,04
	2	1,74	1,50	3,02	2,57	3,66	3,01	5,82	2,52
	3	1,75	1,57	3,03	2,67	3,93	3,18	5,89	2,73
	4	1,64	1,51	2,93	2,61	3,87	3,11	4,84	2,61
Durchschnitt		1,62	1,44	2,86	2,48	3,57	2,93	5,14	2,47
2,0	1	0,66	0,56	1,13	1,00	1,39	1,20	1,24	0,93
	2	0,77	0,66	1,32	1,16	1,67	1,42	1,68	1,12
	3	0,77	0,67	1,32	1,17	1,69	1,45	1,70	1,18
	4	0,74	0,64	1,25	1,13	1,61	1,39	1,67	1,15
Durchschnitt		0,74	0,63	1,26	1,12	1,59	1,37	1,57	1,09

Ebenso wie im Auswertzeitraum von 20 Sekunden ist auch hier feststellbar, dass die höchsten Messwerte an Messstelle 3 (1,40 m Höhe ab Boden bzw. vertikaler Abstand der Brennerachse zu dieser Messstelle = 900 mm) auftreten. Auch hier werden die maximalen Werte bei allen Brennern bei einem Abstand von 0,8 m von der Brennerdüse zum Messständer erreicht.

Vergleicht man sowohl die Maximalwerte als auch die Durchschnittswerte in den Tabellen 4.10 und 4.11 (Auswertzeitraum 20 s und Auswertzeitraum 8 s), so ist hier feststellbar,

dass, bezogen auf den Auswertzeitraum von 20 Sekunden, die höchste Wärmestrahlungsbelastung bei jedem Abstand beim Einsatz von 3 Brennern vorliegt, während sie, bezogen auf den Auswertzeitraum von 8 Sekunden, beim Einsatz von 4 Brennern gegeben ist. Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang, dass, mit Ausnahme der Abstände 0,8 m und 2,0 m, bei allen anderen Abständen die Messwerte für 4 Brenner im Auswertzeitraum von 8 Sekunden fast doppelt so hoch ausfallen wie im Auswertzeitraum von 20 Sekunden.

4.3 Zusammenfassende Bewertung der Untersuchungen zur Bestimmung der thermischen Parameter der Brenner

Untersucht wurde die am IdF LSA vorhandene Brennereinrichtung, mit der insgesamt 4 propangasbetriebene Brenner betrieben werden können. Zielstellung war, die durch den Betrieb der Brenner hervorgerufene thermische Belastung abstandsabhängig (Brenner zu Messstände) durch Temperaturmessungen und Messungen zur Wärmestrahlungsbelastung zu ermitteln. Zunächst wurden Einzelbrenneruntersuchungen durchgeführt, in die u. a. auch Lastabhängigkeitsuntersuchungen einbezogen wurden. Weitere Untersuchungen konzentrierten sich auf den Einsatz von Brennerkombinationen mit bis zu 4 Brennern. Die Brenneranordnung erfolgte hier in Bezug auf einen mit Thermoelementen ausgestatteten Messstände symmetrisch bzw. einseitig.

In Auswertung der Untersuchungen nach Abschnitt 4.1 lässt sich zunächst generell die Aussage treffen, dass auf der Basis des für die vorgenommenen Untersuchungen verwendeten Versuchsaufbaus die thermischen Parameter der Brenner gegenwärtig noch weitestgehend abhängig sind sowohl von den Umgebungstemperaturen (und der Sonneneinstrahlung) der Propangas – Tankanlage als auch von der Anzahl der jeweils im Einsatz befindlichen Brenner. Die sich daraus ergebenden Konsequenzen in Bezug auf die Problematik der Reproduzierbarkeit der Parameter werden im Abschnitt 6 dargelegt.

Insofern treffen die in den folgenden Abschnitten getroffenen Aussagen zu den thermischen Parametern in Auswertung der Untersuchungen strenggenommen auch nur für die Bedingungen zu, die zum Zeitpunkt der Untersuchungen vorlagen.

4.3.1 Bewertung Temperaturbelastung

4.3.1.1 Einzelbrenner

Bei der Ermittlung der Temperaturen im Rahmen der lastabhängigen Einzelbrenneruntersuchung (Einsatz von Brenner Nr. 4 zur Beflammung, zusätzliche Brenner zur Druckreduzierung) war festzustellen, dass generell die stärkste thermische Beanspruchung an jeder Messstelle des Messständers beim geringsten Abstand des Brenners zum Messständer (40 cm) auftrat. Feststellbar ist, dass der Bekleidungssimulator kaum einen Einfluss auf die erzielten Temperaturen (vergleiche die entsprechenden Temperaturangaben in den Tabellen 4.12 und 4.13 beim Abstand von 40 cm) an den Messstellen ausübte.

Unter der Annahme, dass Stichflammenbelastungen bzw. Flash Over – relevante thermische Belastungen in der Größenordnung $> 800\text{ °C}$ liegen, wurden die Untersuchungsergebnisse hinsichtlich des Auftretens von Temperaturen $> 800\text{ °C}$ an den Messstellen analysiert. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in den Tabellen 4.12 und 4.13 dargestellt. Daraus ist zu entnehmen, dass die Maximaltemperaturen unter den gegebenen Bedingungen erzielt werden, wenn nur ein Brenner (Brenner Nr. 4) in Betrieb ist.

Tabelle 4.12: Lastabhängige Untersuchung Einzelbrenner ohne Bekleidungssimulator – Temperaturen $> 800\text{ °C}$

Messstelle Nr.	Höhe ab Boden in cm	Abstand *) in cm	gemessener Maximalwert in °C	eingesetzte Brenner Nr.
7	180	40	860	4
8	160	60	900	4
8	160	40	970	4
9	140	60	960	4
9	140	40	1010	4
10	120	60	1020	4
10	120	40	1060	4
11	100	60	980	4
11	100	40	1080	4
12	80	60	900	4 und 1
12	80	40	1060	4
13	60	40	940	4

*) Abstand zwischen Vorderkante Brennerdüse und den Thermoelementen am Messständer

Die Zuschaltung weiterer Brenner hat also einen Druckabfall zur Folge, der einhergeht mit einer Veränderung des Flammenbildes und einer dadurch verursachten Reduzierung der Temperaturen an den Messstellen. Die Grafiken in den Anlagen 1 und 2 weisen aber dennoch aus, dass Temperaturen $> 800\text{ °C}$ trotz der Druckreduzierung durch den Betrieb mehrerer Brenner erreicht werden können.

Insgesamt zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass das vorgesehene Verfahren geeignet ist, über einen relevanten Zeitraum hinweg durch Beflammung Temperaturen zu erzeugen, die einer Flash Over – Beanspruchung gleichkommen.

Tabelle 4.13: Lastabhängige Untersuchung Einzelbrenner mit Bekleidungssimulator – Abstand 40 cm ^{*)} -
Temperaturen > 800 °C

Messstelle Nr.	Höhe ab Boden in cm	gemessener Maximalwert in °C	eingesetzte Brenner Nr.
7	180	890	4
8	160	960	4
9	140	990	4
10	120	1050	4
11	100	1060	4
12	80	1050	4
13	60	950	4, 3, 2 und 1

^{*)} Abstand zwischen Vorderkante Brennerdüse und den Thermoelementen am Messständer

Die im Abschnitt 4.2.1 dargelegten Untersuchungsergebnisse zur thermischen Belastung durch den Einzelbrenner als Funktion des Brennerabstandes bestätigen die vorgenannten Aussagen und führen zu keinen weiteren diesbezüglichen Erkenntnissen, weshalb an dieser Stelle keine gesonderte Auswertung erforderlich wird.

4.3.1.2 Brennerkombination

Die durch den Einsatz von Brennerkombinationen hervorgerufenen Maximaltemperaturen an den Messstellen werden für die Kombinationen

- Brennerkombination bei symmetrischer Anordnung
- Brennerkombination einseitig ohne Bekleidungssimulator
- Brennerkombination einseitig mit Bekleidungssimulator

in Tabelle 4.14 ausgewiesen.

Die höchste auftretende Temperatur konnte bei der Brennerkombination mit symmetrischer Anordnung der Brenner (4 Brenner im Einsatz) an Messstelle 10 (Höhe ab Boden = 120 cm) bei einem Abstand der Brenner zum Messständer von 60 cm mit 1150 °C ermittelt werden.

Diese Temperatur ist die überhaupt bei allen Untersuchungen zur Bestimmung der thermischen Parameter erreichte Höchsttemperatur. Der direkte Vergleich der verschiedenen Brennerkombinationen, bezogen auf den Abstand von 60 cm, zeigt, dass hinsichtlich der auftretenden Maximaltemperaturen keine gravierenden Unterschiede bestehen. Hier liegen die Temperaturen generell im Bereich > 1000 °C. Diese Tatsache veranlasst zu der bereits im

Abschnitt 4.3.1.1 geäußerten Feststellung, dass auch unter den Bedingungen des Einsatzes von Brennerkombinationen das vorgesehene Verfahren geeignet ist, über einen relevanten Zeitraum hinweg durch Beflammung Temperaturen zu erzeugen, die einer Flash Over – Beanspruchung gleichkommen.

Ebenso, wie bei der Einzelbrenneruntersuchung ist festzustellen, dass der Bekleidungssimulator einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die erzielten Temperaturen (vergleiche in Tabelle 4.14 die entsprechenden Temperaturangaben an Messstelle 8) hat.

Tabelle 4.14: Erzielte Maximaltemperaturen durch den Einsatz von Brennerkombinationen

Messstelle / Höhe ab Boden in Meter	Abstand ^{*)} Brenner - Messständer in Meter	Anzahl Brenner	Maximaltemperatur in °C
Brennerkombination bei symmetrischer Anordnung			
7 / 1,8	1	4	575
8 / 1,6	0,8	4	965
10 / 1,2	0,6	4	1150
Brennerkombination einseitig ohne Bekleidungssimulator			
6 / 1,4	1	3	310
6 / 1,4	0,8	3	810
8 / 1,6	0,6	3	1040
Brennerkombination einseitig mit Bekleidungssimulator			
8 / 1,6	0,6	4	1050
8 / 1,6	0,6	3	1050
8 / 1,6	0,6	2	1020

^{*)} Abstand zwischen Vorderkante Brennerdüse und den Thermoelementen am Messständer

4.3.2 Bewertung der Wärmestrahlungsbelastung

Zur Bewertung der Wärmestrahlungsbelastung durch die Flammen der Einzelbrenner und der Brennerkombinationen werden die Durchschnittswerte der in den Tabellen 4.4 und 4.5 sowie 4.10 und 4.11 ausgewiesenen Messwerte herangezogen.

Diese Durchschnittswerte werden nochmals gesondert in Tabelle 4.15 für die Einzelbrenner und in Tabelle 4.16 für die Brennerkombinationen ausgewiesen.

Wie zu erwarten, ist, unabhängig vom Auswertzeitraum, bei beiden Varianten des Brennereinsatzes die Wärmestrahlungsbelastung am höchsten bei dem mit 80 cm geringsten Abstand der Brenner zum Messständer. Der höchste Wert der Wärmestrahlungsbelastung überhaupt tritt gemäß Tabelle 4.16 bei der Brennerkombination mit einseitiger Anordnung von 3 Brennern im Auswertzeitraum von 20 Sekunden auf (Mittelwert = 9,76 W/cm²).

Tabelle 4.15: Durchschnittswerte zur Wärmestrahlung bei Einzelbrennern

Wärmestrahlung in W/cm ²								
Durchschnitt über alle Messstellen beim Abstand *)	BRENNER 1		BRENNER 2		BRENNER 3		BRENNER 4	
	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert
Auswertezeitraum = 20 Sekunden								
0,8 m	4,73	3,59	8,68	4,63	7,59	4,92	Keine Messung	
1,0 m	3,82	2,55	3,30	2,68	3,76	2,9	6,48	4,10
1,2 m	2,37	1,91	2,34	1,89	2,47	2,07	3,02	2,14
1,4 m	1,73	1,47	1,55	1,37	1,79	1,55	1,82	1,54
2,0 m	0,77	0,68	0,73	0,64	0,93	0,76	0,77	0,69
Auswertezeitraum = 8 Sekunden								
0,8 m	5,79	3,63	8,54	5,83	7,10	4,91	-	
1,0 m	3,86	2,73	3,27	2,64	4,05	3,01	5,37	3,35
1,2 m	2,37	1,99	2,35	2,03	2,68	2,03	3,47	2,33
1,4 m	1,62	1,44	1,65	1,34	2,00	1,51	2,00	1,57
2,0 m	0,74	0,63	0,74	0,66	0,83	0,72	0,76	0,66

*) Abstand zwischen Vorderkante Brennerdüse und den Thermoelementen am Messständer

Tabelle 4.16: Durchschnittswerte zur Wärmestrahlung bei Brennerkombinationen

Wärmestrahlung in W/cm ²								
Durchschnitt über alle Messstellen beim Abstand *)	1 BRENNER		2 BRENNER		3 BRENNER		4 BRENNER	
	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert
Auswertezeitraum = 20 Sekunden								
0,8 m	4,73	3,59	8,93	6,92	12,44	9,76	9,82	7,33
1,0 m	3,82	2,55	6,05	4,85	6,20	5,34	4,76	3,90
1,2 m	2,37	1,91	4,19	3,62	4,30	3,78	3,28	2,86
1,4 m	1,73	1,47	2,80	2,50	3,27	2,84	2,41	2,07
2,0 m	0,77	0,68	1,28	1,18	1,52	1,36	1,12	1,03
Auswertezeitraum = 8 Sekunden								
0,8 m	5,79	3,63	10,11	7,33	11,90	9,25	12,10	8,39
1,0 m	3,86	2,73	5,35	4,61	7,45	5,38	8,79	4,51
1,2 m	2,37	1,99	4,14	3,43	5,03	3,92	6,07	3,15
1,4 m	1,62	1,44	2,86	2,48	3,57	2,93	5,14	2,47
2,0 m	0,74	0,63	1,26	1,12	1,59	1,37	1,57	1,09

*) Abstand zwischen Vorderkante Brennerdüse und den Thermoelementen am Messständer

Ansonsten ist festzustellen, dass die Wärmestrahlungsbelastung beim Einsatz von Brennerkombinationen (mehr als 1 Brenner) und unabhängig vom Auswertezeitraum gegenüber den Einzelbrennern um bis zu 100 % höher ist.

Der Unterschied zwischen den Auswertezeiträumen 20 Sekunden und 8 Sekunden bei den Durchschnittswerten für die Maximalwerte und die Mittelwerte der Einzelbrenner ist gemäß Tabelle 4.15 als relativ gering einzuschätzen. Die gleiche Aussage trifft zu auf den

Unterschied zwischen den Auswertezeiträumen 20 Sekunden und 8 Sekunden bei den Durchschnittswerten für die Maximalwerte und die Mittelwerte der Brennerkombinationen (siehe hierzu Tabelle 4.16). Lediglich bei der Brennerkombination mit der einseitigen Anordnung von 4 Brennern liegen die genannten Durchschnittswerte für den Auswertezeitraum von 8 Sekunden um teilweise bis zu 100 % über denen des Auswertezeitraumes von 20 Sekunden.

4.4 Physiologisch relevante Ausrüstung des Dummy mit Wärmeflussensoren

Wie in der Beschreibung des Untersuchungsverfahrens im Abschnitt 2 bereits ausgeführt, soll

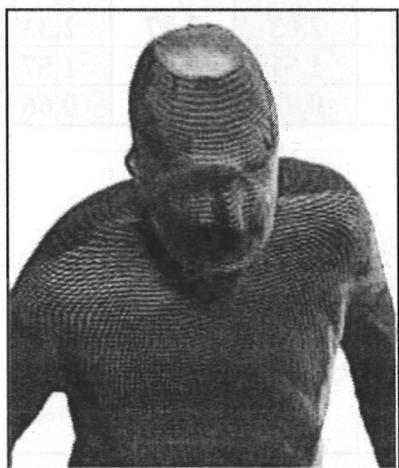


Bild 4.54: 3D – OT Profil

ein mit Wärmeflussensoren ausgerüsteter Dummy dazu dienen, die durch die Brenner hervorgerufene thermische Belastung zu quantifizieren. Aus messtechnischer Sicht wird dazu ein System der Prozessvisualisierung eingesetzt, welches in der Lage ist, die Messwerte der Wärmeflussensoren zu erfassen, zwischen ihnen zu interpolieren, entsprechende Berechnungen auszuführen und letztlich die Ergebnisse als dreidimensionales Oberflächentemperaturprofil (3D – OT Profil) online am Bildschirm darzustellen. Beispielhaft wird eine solche

Darstellung in Bild 4.54 gezeigt. Die Ausrüstung des Dummy mit Wärmeflussensoren war Gegenstand umfangreicher Untersuchungen, die im Rahmen einer Diplomarbeit [Nicolai 01] gelöst wurde. Die Zielstellung bestand darin, einen Lösungsvorschlag für eine, unter den gegebenen Bedingungen geeignete, Instrumentierung des Dummy mit Wärmeflussensoren zu erarbeiten. Dafür standen der Dummy selbst sowie 35 Wärmeflussensoren zur Verfügung.

4.4.1 Beschreibung der Komponenten

4.4.1.1 Der Dummy

Der Dummy, der in Bild 4.55 dargestellt wird, ist ein im Gussverfahren aus Aluminium (AlSi 12) hergestellter Hohlkörper. Aus fertigungstechnischen Gründen war es nicht möglich, den Dummy mit einer gleichbleibenden Wanddicke zu versehen. Die Wanddicke variiert an den unterschiedlichen Positionen im Bereich von 4 bis 10 mm. Der Körper des Dummy ist zudem reliefartig ausgeprägt. Durch verschiedene verschließbare Öffnungen im Bereich der

Rückseite des Körpers und der Schädeldecke ist es möglich, in das Innere des Dummy zu gelangen, um diesen instrumentieren zu können. Beispielhaft ist eine derartige Öffnung an den Beinen des Dummy in Bild 4.56 dargestellt. Der gesamte Körper wird durch eine Art Galgen, der am hinteren Halsbereich befestigt ist, getragen. Durch diesen aus 4-Kant - Stahlprofil bestehenden Galgen werden die somit vor Hitze geschützten Messleitungen nach außen geführt. Die Arme des Dummy sind beweglich angeordnet, um ein leichteres Ankleiden zu ermöglichen.

Die gesamte Oberfläche des Dummy ist zur Erzielung einer rauhen Oberfläche gebürstet. Der Dummy ist auf einem fahrbaren Gestell gelagert und lässt sich somit leicht positionieren. Er hat ein Gesamtgewicht von ca. 35 kg.

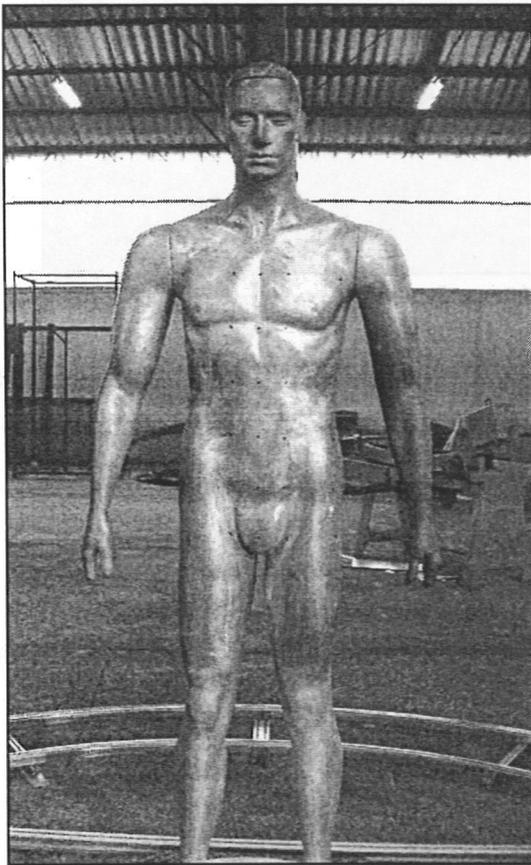


Bild 4.55: Der zu instrumentierende Dummy

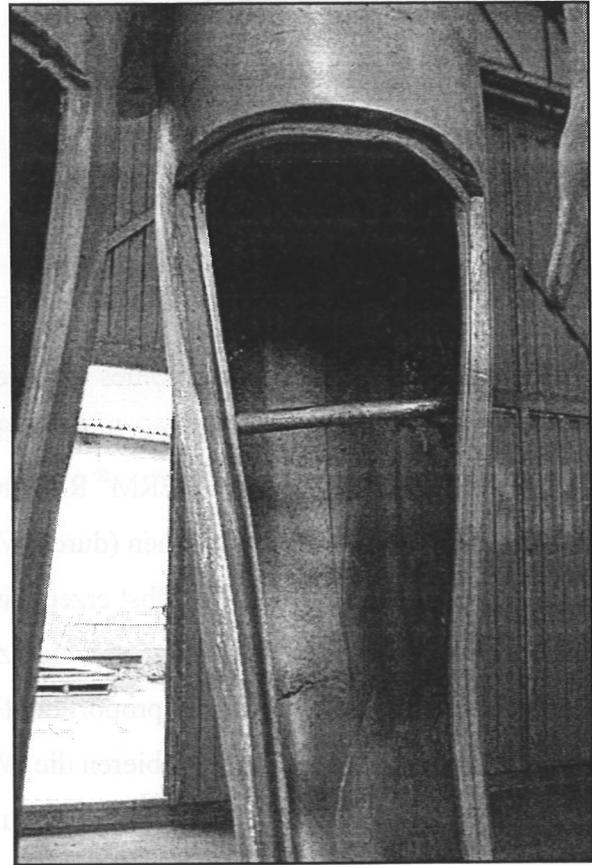


Bild 4.56: Verschiebbare Öffnung im Beinbereich

Eine flächendeckende Ausstattung des Dummy mit Wärmeflussensoren würde ca. 200 Stück dieser Sensoren erfordern. Aus Kostengründen (650 € / Stück) standen zum Zeitpunkt der Untersuchungen nur 35 Stück zur Verfügung. Allein aus diesem Grunde ergaben sich hinsichtlich der zu erarbeitenden Einbauvariante besondere Anforderungen, die im folgenden Abschnitt näher untersetzt werden.

4.4.1.2 Die Wärmeflussensoren

Zur Anwendung gelangen Wärmeflussensoren der Firma MEDTHERM[®] Corporation vom Typ MEDTHERM[®]- Schmidt-Boelter-Thermosäulen-Sensoren (Waffel-Typ (0,2 bis 5 BTU/ft²sec)) der 64er Serie.

Bei diesem in den Bildern 4.57 und 4.58 dargestellten Sensor (Modell 24-1-21581) wird der Wärmestrom an der Sensoroberfläche absorbiert und weitergeleitet zu einer integrierten Messfläche, die eine Temperatur hat, die unterhalb der Sensoroberflächentemperatur liegt. Die unterschiedlichen Temperaturen zwischen den beiden Punkten entlang des

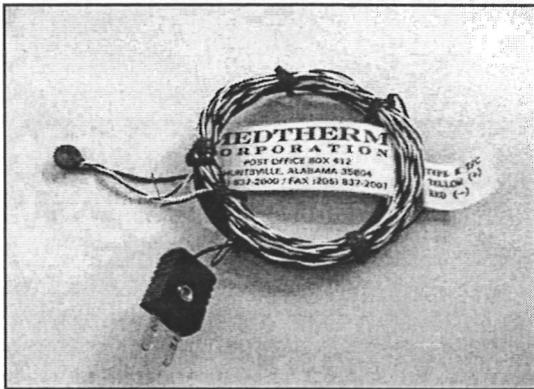


Bild 4.57: Wärmeflussensor mit Anschlusskabel

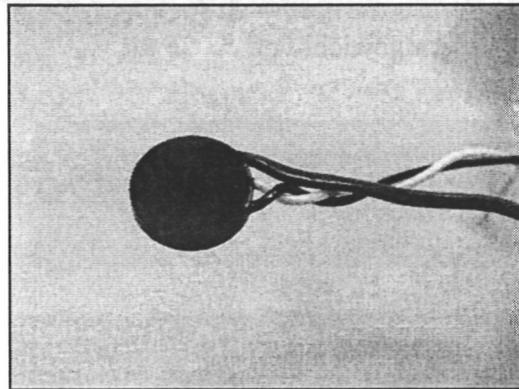


Bild 4.58: MEDTHERM[®] Wärmeflussensor

Übertragungsweges des Wärmestromes vom Sensor zur kühleren Fläche sind proportional der übertragenen Wärme und deshalb auch proportional dem absorbierten Wärmestrom. An den zwei Punkten haben die MEDTHERM[®] Radiometer Thermoelemente, die einen unterschiedlichen thermoelektrischen (durch Wärmeunterschied erzeugte Elektrizität) Stromkreis bilden, der eine sich selbst erzeugende EMF (Electro Motive Force = elektrobewegende Kraft, Potentialunterschied zwischen zwei Punkten, der elektrischen Strom bewirkt) hervorruft, welche direkt proportional dem Wärmefluss ist.

Schmidt-Boelter-Messgeräte absorbieren die Wärme auf einer Fläche und übertragen die Wärme mittels einer Thermosäule senkrecht zu der aufnehmenden Oberfläche, so dass der Temperaturunterschied zwischen der Oberfläche und einer Ebene unter der Oberfläche entsteht. Eine Thermosäule besteht im Grunde aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Thermoelementen, die in elektrischer Hintereinanderschaltung verbunden sind, wobei die Ausgabe von jedem Thermoelement (NiCr-Ni) proportional zum Abfall der Temperatur über der Thermosäule und deshalb direkt proportional zur Geschwindigkeit der Wärmeübertragung ist. Weil alle Gruppen von Verbindungsstellen in Reihe verbunden sind, sind die individuellen Thermoelement-Ausgaben überlagernd und resultieren somit in einem großen Signal, das die

gleichen Merkmale wie die individuellen Signale hat. Der Wärmeflussensor verfügt über ein selbstgenerierendes Ausgangssignal (Ausgangsspannung) in mV.

Der Sensor ist nicht nur in der Lage, den Wärmefluss zu bestimmen, sondern er kann über ein integriertes Thermoelement gleichzeitig auch die Temperatur des Sensors bestimmen.

Die folgende Tabelle 4.17 enthält die technischen Daten des Wärmeflussensors.

Tabelle 4.17: Technische Daten des Wärmeflussensors

Messbereich Wärmefluss	0 – 1 Btu/ft ² sec (1,135 W/cm ²) kann bis 2 Btu/ft ² sec eingesetzt werden
Temperaturmessbereich	0 – 250°C
Integriertes Thermoelement	Typ K – NiCr-Ni
Linearität	+/- 2%
Zeitkonstante	< 3 Sekunden
Empfindlichkeit	300 Btu/ft ² h/mV (0,0946 W/cm ² /mV)
Ausführung	rund
Durchmesser	9,65 mm (= 0,38 Zoll)
Dicke	1,65 – 1,91 mm (0,065 – 0,075 Zoll)
Kabellänge	2,04 m (80 Zoll)

Da bereits bei den Werksangaben auf differierende Dicken der Sensoren hingewiesen wird, und die Dicke ausschlaggebend ist für deren späteren Einbau, wurde bei allen 35 vorhandenen Sensoren die Dicke mittels einer Mikrometerschraube bestimmt. Die Dicken der 35 Sensoren variierten im Bereich von 1,815 mm bis 1,915 mm. Durch Mittelwertbildung wurde die mittlere Schichtdicke der Sensoren mit 1,869 mm festgelegt.

4.4.1.3 Anforderungen an die Instrumentierung des Dummy mit Wärmeflussensoren

In Bezug auf die Instrumentierung des Dummy mit den Wärmeflussensoren ergaben sich spezielle Anforderungen für einen fach- und sachgerechten Einbau. Dieses sowohl aus der Sicht des Dummys selbst, als auch aus der Sicht der Wärmeflussensoren.

Nachfolgend werden die wichtigsten Anforderungen genannt:

- Aus der Tatsache, dass von ca. 200 erforderlichen Sensoren nur 35 Stück zur Verfügung stehen, ergibt sich das Erfordernis, die vorhandenen Sensoren ortsvariabel, je nach Erfordernis, einbauen zu können.
- Die Sensoren müssen bei etwaiger Beschädigung schnell und unkompliziert ausgetauscht werden können.

- Es sollte die Möglichkeit bestehen, die Sensoren auch an schlecht zugänglichen Stellen einsetzen zu können.
- Sie sollten weitestgehend plan zur Oberfläche des Dummy eingebaut werden.
- Trotz der unterschiedlichen Wanddicken des Dummy soll es möglich sein, die Sensoren an jeder Position einsetzen zu können.
- Der Einbau soll auch an Oberflächen erfolgen können, die sehr kleine Radien (z.B. Gesicht, Hand, Unterarm) aufweisen.
- Die Sensoren sollten so bemessen sein oder hergerichtet werden, dass ihre Wärmeleitfähigkeit im Einbauzustand der menschlichen Haut entspricht (physiologisch relevante Ausrüstung). Damit wäre durch die Messwerte der Sensoren ein direkter Bezug zu wahrscheinlichen Schädigungen der Haut in Folge einer thermischen Einwirkung möglich. Wäre eine derartige Bemessung nicht möglich, so sollte die angestrebte Entsprechung über eine mathematische Beziehung herstellbar sein. Zu berücksichtigen sind bei dieser Problematik mögliche unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten des Dummymaterials und des Sensormaterials bzw. des den Sensor aufnehmenden Materials für den Einbau.
- Die Realisierung sollte keinen großen finanziellen, materiellen und arbeitstechnischen Aufwand nach sich ziehen.

Zur Realisierung der vorgenannten Anforderungen waren folgende grundsätzliche Lösungsschritte erforderlich:

Um bei der Lösung der Aufgabe systematisch vorgehen zu können, wurde ein Konzept entwickelt, welches eine Vorgehensweise nach folgenden Schritten vorsieht:

- Umfassende Literaturrecherche.
- Ermittlung der physiologischen und thermodynamischen Aspekte der Haut.
- Bestimmung auftretender Maximaltemperaturen auf der Oberfläche des Dummy bei der Beflammung.
- Untersuchung der Kompatibilität der Sensoren zum Temperierungsverhalten der Haut
 - Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Haut
 - Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Sensoren

- Erarbeitung von Varianten zur Angleichung der Messergebnisse (Sensor an Haut)
- Festlegung möglicher Einbauvarianten des Sensors
- Fertigung eines Einbaumusters nach Entscheid über die optimalste Einbauvariante.

4.4.2 Thermische Anforderungen an den Wärmeflussensor

Ausgehend von der laut Herstellerangaben ausgewiesenen Temperaturverträglichkeit des Sensors bis zu 250 °C war zunächst zu überprüfen, welche Temperaturen am unbekleideten Dummy bei direkter Flammeneinwirkung auftreten. Direkte Rückschlüsse aus den Ergebnissen der Untersuchungen zur Bestimmung der thermischen Parameter der Brenner gemäß Abschnitt 4.2 konnten hier nicht gezogen werden, da jetzt zusätzlich das Wärmeleitverhalten des Dummy, der ja aus dem gut wärmeleitenden Material Aluminium hergestellt ist, zu berücksichtigen war. Zielstellung dieser Untersuchungen war also der Nachweis, ob der Sensor den bei der Beflammung auftretenden Temperaturen über einen angemessenen Zeitraum standhalten kann. Sollte dieser Nachweis nicht erbracht werden können, so hätte dies Auswirkungen auf die Konzipierung der Einbauvariante des Sensors (z.B. Schutz vor direkter Beflammung).

4.4.2.1 Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der thermischen Anforderungen

Bei den Untersuchungen wurden die vorhandenen vier Brenner eingesetzt, um die maximalste thermische Beanspruchung zu erzielen. Zur Anwendung gelangten die Verfahren Brennerkombination mit symmetrischer Anordnung der Brenner und Brennerkombination mit einseitiger Anordnung der Brenner. Die Bilder 4.59 und 4.60 verdeutlichen nochmals den Versuchsaufbau dieser beiden Varianten.

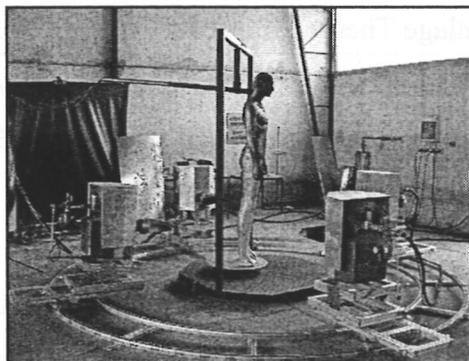


Bild 4.59: symmetrische Brenneranordnung

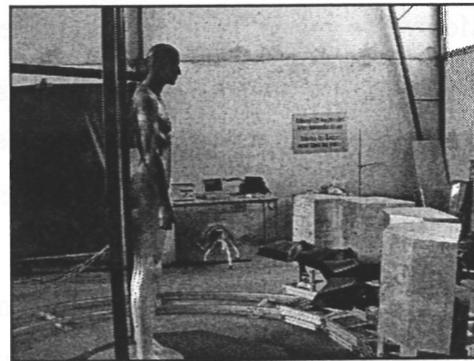
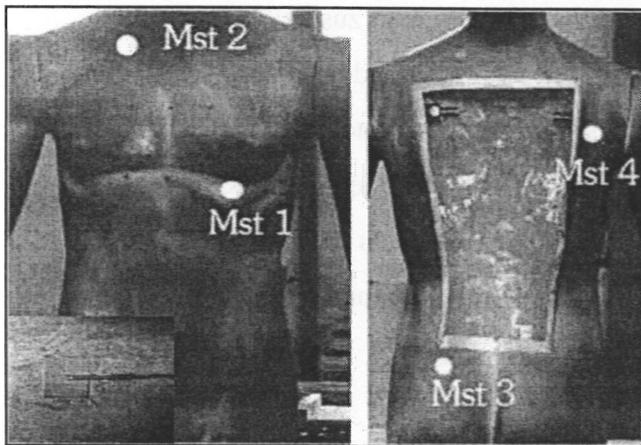


Bild 4.60: einseitige Brenneranordnung

Wie aus den Bildern ersichtlich ist, wurde der Dummy mittig der Brenneinrichtung positioniert. Bei der Variante „symmetrische Brenneranordnung“ wurde der Dummy zusätzlich so positioniert, dass keine Beeinflussung des Flammeneintrages auf den Dummy durch die seitlichen Dummyhalterungen auftrat. Die Untersuchungen wurden geführt mit den Brenner – Dummy – Abständen 0,8 m und 1,2 m sowie den Beflammungszeiten 8 und 20 Sekunden. Der Brennerabstand 0,8 m ist bei den Untersuchungen mit der einseitigen Brenneranordnung beim Einsatz von 4 Brennern der geringstmögliche.

Am Dummy selbst wurden insgesamt 10 Temperaturmessstellen angebracht, wobei die Messstellen 1 bis 8 direkt auf der Oberfläche des Dummys mittels Aufnahmeplättchen (siehe Bild 4.61, links unten) angebracht wurden. Es wurden jeweils 2 Thermoelemente an der Vorder- und an der Rückseite des Dummy mittels thermisch hochleitendem und thermisch



beständigem Kleber aufgebracht. Diese Messstellen werden in Bild 4.61 ausgewiesen. An der jeweils gleichen Position wurden auf der Innenseite des Dummy Thermoelemente installiert. Dabei ist berücksichtigt worden, dass jeweils ein Pärchen der Thermoelemente an von der Dicke des Dummymaterials her unterschiedlichen Positionen

Bild 4.61: Messstellen am Dummy angebracht wurde. Die Messstellen 2 und 4 befinden sich an den Positionen, an denen stärkeres (dickeres) Material auftritt. Des Weiteren wurde eine Messstelle im Innenraum des Dummy installiert, um die Temperatur der Luft im Inneren des Körpers zu erfassen. Um die wärmeleitenden Effekte des Aluminiumkörpers zu erkennen, wurde eine weitere Messstelle auf einer runden Gummiunterlage direkt neben der sich außen auf der Körpervorderseite befindenden Messstelle 2 aufgeklebt.

Die Messwerte wurden mit der Messwerterfassungsanlage Therm 5500-3 der Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH (AMR) aufgezeichnet. Es wurde im 2 Sekunden Messintervall über einen Zeitraum von ca. 15 min gemessen. Der Zeitraum wurde deshalb so lang gewählt, um die Temperatenausgleichsprozesse nach der Beflammung im Inneren des Dummy zu erfassen.

Um sich ein noch genaueres und umfassenderes Bild von der Temperaturverteilung auf dem Dummy machen zu können, wurden zusätzlich bei einigen Versuchen Aufnahmen mit der Wärmebildkamera (WBK) Thermovision® 470 PRO gemacht. Hier wurden insbesondere

Aufnahmen nach der Beflammung von der Außenseite und, nach Öffnen der Rückenklappe des Dummys, auch vom Inneren des Dummy gemacht. So konnte veranschaulicht werden, wie sich die Wärme im Aluminium verteilt.

In der nachfolgenden Tabelle 5.5 werden alle durchgeführten Versuche, gegliedert nach den einzelnen Versuchsteilen, ausgewiesen.

Tabelle 4.18: Durchgeführte Versuche im Überblick

Nr.	Dauer Beflammung in Sekunden	Anordnung Brenner	Abstand in m	WBK)	Bemerkung
Versuchsteil 1					
1	20 sek.	einseitig	1,2	ja	Messstelle außen_auf_Gummi im Brustbereich
2			0,8	ja	Messstelle außen_auf_Gummi im Brustbereich Brenner auf Position 0
3			0,8	ja	Brenner auf Position 0
Versuchsteil 2					
4	8 sek.	symmetrisch	0,8	nein	Brenner auf Position 0 Dummy um 45° gedreht
5			0,8	nein	Brenner auf Position 0 Dummy um 45° gedreht
6			0,8	nein	Brenner auf Position 0 Dummy um 45° gedreht
Versuchsteil 3					
7	20 sek.	symmetrisch	0,8	ja	Brenner auf Position 0 Dummy um 45° gedreht
8			0,8	nein	Brenner auf Position 0 Dummy um 45° gedreht
9			0,8	nein	Brenner auf Position 0 Dummy um 45° gedreht

) Infrarotbilder mit Wärmebildkamera (WBK)

4.4.2.2 Auswertung der Ergebnisse der Untersuchungen nach den Versuchsteilen

Versuchsteil 1

Begonnen wurde im Versuchsteil 1 mit dem Versuch 1 bei einem Abstand von 1,2 m. Bei den Versuchen 2 und 3 wurde der Abstand auf 0,8 m verkürzt. Durch die einseitige Beflammung wurden nur die äußeren Messstellen 1 und 2 sowie die Messstelle auf dem Gummiplättchen den Flammen ausgesetzt.

Folgende Temperaturhöchstwerte nach Tabelle 4.19 wurden erreicht.

Tabelle 4.19: Maximaltemperaturen bei Versuchsteil 1

Versuch Nr.	Temperatur-Höchstwert in °C beim Abstand 80 cm	
	am Dummy	auf Gummiunterlage
1	217,2 (Messstelle 1 - außen)	267,8
2	581,0 (Messstelle 1 - außen)	784,2
3	380,3 (Messstelle 2 - außen)	559,0

Generell war feststellbar, dass sich die Temperaturen bei der Verkürzung des Abstandes wesentlich erhöhen. Die Temperaturen auf der Gummiunterlage können nicht direkt miteinander verglichen werden, da die Position vom Brustbereich zur Messstelle außen_2 gewechselt wurde, um einen besseren Vergleich zu ermöglichen. Grundsätzlich sind jedoch die erhöhten Werte mit der wesentlich schlechteren Wärmeleitfähigkeit des Gummis gegenüber dem Aluminium zu erklären. Die Gummiunterlage erfüllt somit die Funktion eines thermischen Isolators. Auf Grund der unterschiedlichen Temperaturen auf der Außenseite bei einseitiger Beflammung aus einer Entfernung von 0,8 m kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass sich die Flammen der einzelnen Brenner durch die Thermik stark beeinflussen und somit keine konstanten Temperaturen auf dem Dummy erzeugt werden können.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass sich die Temperatenausgleichsprozesse bei niedrigeren Ausgangstemperaturen wesentlich schneller vollziehen. Bereits nach 300 s tritt bei einem Abstand von 1,2 m keine Temperatur größer als 37 °C auf. Beim Abstand von 0,8 m sind nach 300 s noch 70,8 °C bzw. 63,0 °C im vorderen Bereich des Dummy messbar.

Am Beispiel des Versuches Nr. 3 werden in den Bildern 4.62 bis 4.65 Infrarotaufnahmen der Wärmebildkamera gezeigt.

Hier ist ersichtlich, und diese Aussage trifft für alle drei Versuche zu, dass bereits wenige Sekunden nach der Beflammung ein fast vollständiger Temperatenausgleich im Bereich des vorderen Oberkörpers (siehe Bild 4.63) eintritt. Da der Kopfbereich aufgrund der Thermik stärker beflammt und damit auch stärker erwärmt wird, stellt er sich auf den Infrarotbildern wesentlich heller dar als der Oberkörper. Wie auf den Infrarotbildern ansonsten zu erkennen ist, verteilt sich die Wärme im Inneren des Dummy nahezu gleichmäßig.

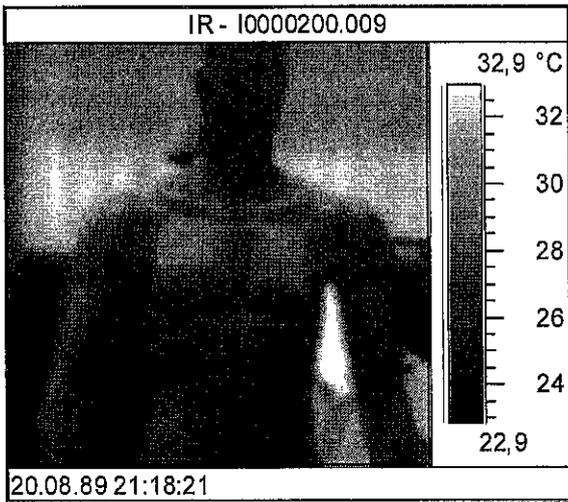


Bild 4.62: Dummy – Vorderansicht vor der Beflammung

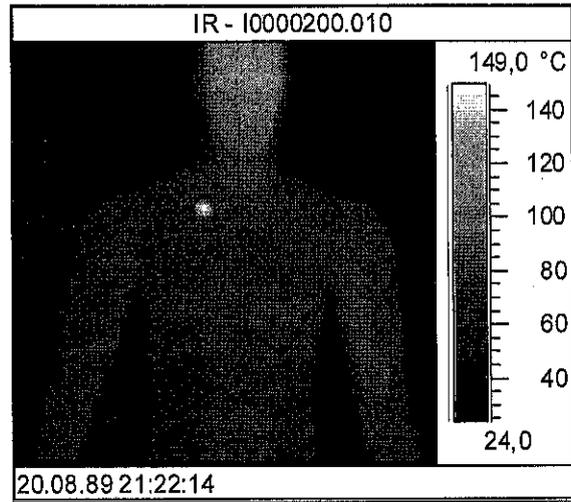


Bild 4.63: Dummy – Vorderansicht 4 s nach der Beflammung

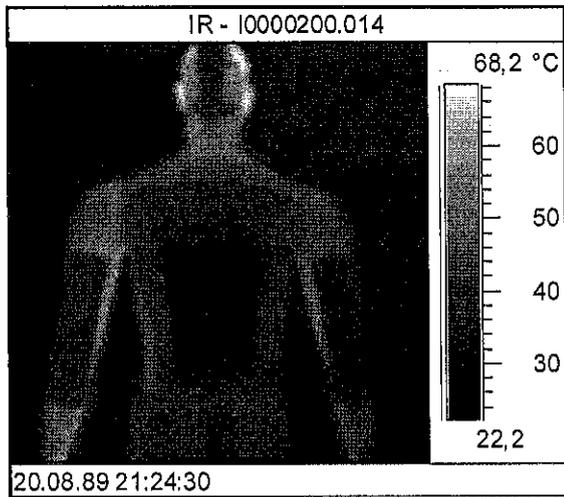


Bild 4.64: Dummy – Rückansicht - 130 Sekunden nach Versuch – Rückenklappe geschlossen

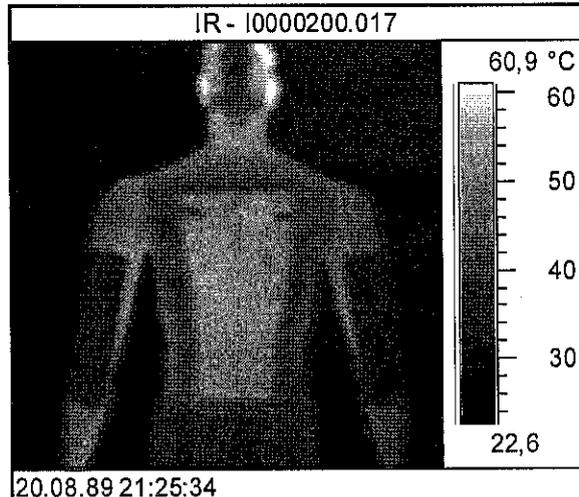


Bild 4.65: Dummy – Rückansicht - 190 Sekunden nach Versuch – Rückenklappe geöffnet

In Bild 4.64 ist zu erkennen, dass ein komplexer Temperatenausgleich auf der Rückseite des Dummy durch die Luftspalte (Wärmebrücken) zwischen der Abdeckung (Rückenklappe) und dem übrigen Körper behindert wird. Im Bild 4.63 verweist der helle Punkt im Bereich der Brust auf das Thermoelement mit der Gummiunterlage. Dies verdeutlicht die dadurch verursachte schlechte Wärmeableitung auf Grund des höheren Wärmeübergangswiderstandes, was punktuell zu einer höheren Temperatur gegenüber der der Umgebung führt.

Versuchsteil 2

Im zweiten Teil der Versuchsreihe wurden drei Versuche mit einer Beflammungszeit von 8 Sekunden durchgeführt. Die Brenner wurden symmetrisch (90°) angeordnet und der Dummy um 45° gedreht.

Folgende Temperaturhöchstwerte nach Tabelle 4.20 wurden erreicht.

Tabelle 4.20: Maximaltemperaturen bei Versuchsteil 2

Versuch Nr.	Temperatur-Höchstwert in °C beim Abstand 80 cm	
	am Dummy	auf Gummiunterlage
4	248,3 (Messstelle 2 - außen)	258,3
5	248,0 (Messstelle 2 - außen)	210,0
6	250,4 (Messstelle 2 - außen)	234,2

An den Messstellen 3 und 1 lagen die Temperaturen bei allen Versuchen im Bereich um ca. 100 °C. Es war feststellbar, dass sich ein Temperatúrausgleich über den gesamten Aluminiumkörper des Dummy bereits 40 s nach der Beflammung einstellte. Die Temperaturen lagen danach an allen Messstellen im Bereich von nur noch ca. 30 °C. Eine Ausnahme bildet hier jedoch Messstelle 4, da hier der Ausgleichsprozess sowohl bei der äußeren als auch bei der inneren Messstelle einen längeren Zeitraum in Anspruch nahm. Dies lässt sich durch die Nähe zur Rückenabdeckung (Luftspalt) und durch die sehr dünne Wandung an dieser Stelle erklären, da dadurch die Ableitung der Wärme in andere Bereiche gestört wird. Die Temperatur an der Messstelle auf dem Gummiplättchen sinkt ebenfalls langsamer als die der Messstellen auf der Oberfläche des Dummy, da hier die Wärmeleitung durch die isolierende Wirkung des Gummis negativ beeinflusst wird. Da perspektivisch bei zu führenden Untersuchungen überwiegend über einen Zeitraum von 8 Sekunden beflammt werden soll, können die hier beschriebenen Versuche als maßgebend bezeichnet werden. Temperaturen am Aluminiumkörper von über 250 °C werden in der Regel nicht überschritten.

Versuchsteil 3

Im Teil 3 der Untersuchungen wurde eine Beflammungszeit von 20 Sekunden zu Grunde gelegt, da hiermit das Maximum der thermischen Belastung simuliert werden sollte. Es soll festgestellt werden, ob die Temperaturen am und im Dummy bei längerer Exposition weiterhin ansteigen. Die Brenner und der Dummy wurden in ihrer Position nicht verändert, der Abstand wurde beibehalten.

Folgende Temperaturhöchstwerte nach Tabelle 4.21 wurden erreicht.

Tabelle 4.21: Maximaltemperaturen bei Versuchsteil 3

Versuch Nr.	Temperatur-Höchstwert in °C	
	am Dummy	auf Gummiunterlage
7	269,8 (Messstelle 2 - außen)	304,4
8	275,6 (Messstelle 2 - außen)	305,7
9	274,7 (Messstelle 2 - außen)	307,8

Im Versuchsteil 3 konnte festgestellt werden, dass sich die gemessenen Temperaturwerte an der Dummyoberfläche auch bei einer 20 Sekunden andauernden Beflammung in Grenzen halten. Die Temperaturhöchstwerte können bei 275 °C bis 280 °C angesetzt werden. Die Maximaltemperaturen an den Messstellen 3 und 1 (jeweils außen) wurden mit jeweils ca. 150 °C gemessen. Die beim Versuch 7 aufgenommenen Infrarotbilder mit der Wärmebildkamera werden in den Bildern 5.66 bis 4.70 dargestellt. Sie verdeutlichen den guten Wärmeausgleich im Dummy. Beispielhaft ist im Bild 4.70 zu erkennen, dass auch im Inneren des Dummy die Temperaturen fast völlig ausgeglichen sind. Lediglich die Extremitäten (Kopf und Arme) haben, bedingt durch die schlechtere Möglichkeit der Wärmeableitung, höhere Temperaturen als der übrige Körper. Nach 300 s sind nahezu alle Temperaturen am Dummy auf das gleiche Niveau unter 50 °C gesunken.

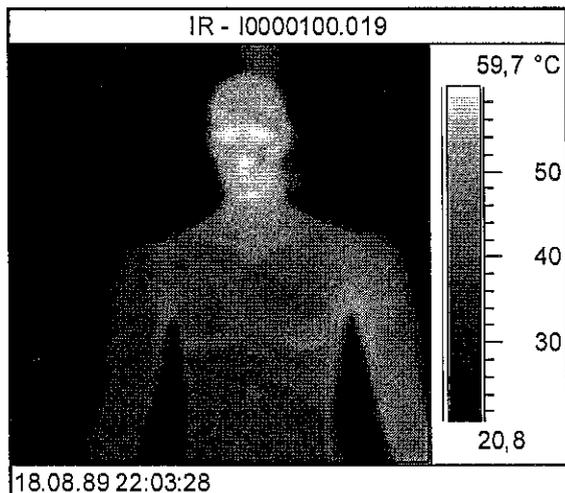


Bild 4.66: Dummy – Vorderansicht vor der Beflammung

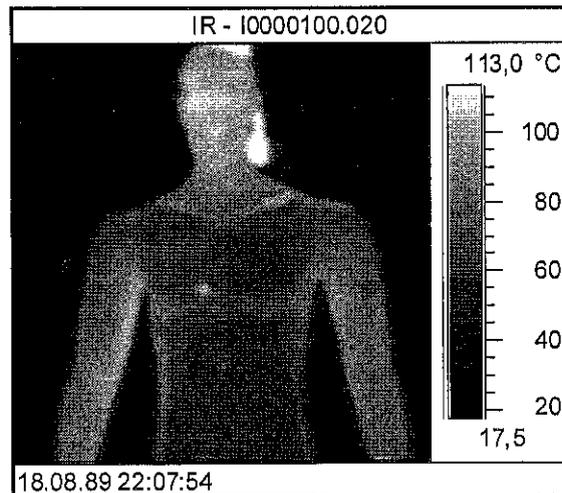


Bild 4.67: Dummy – Vorderansicht 4 s nach der Beflammung

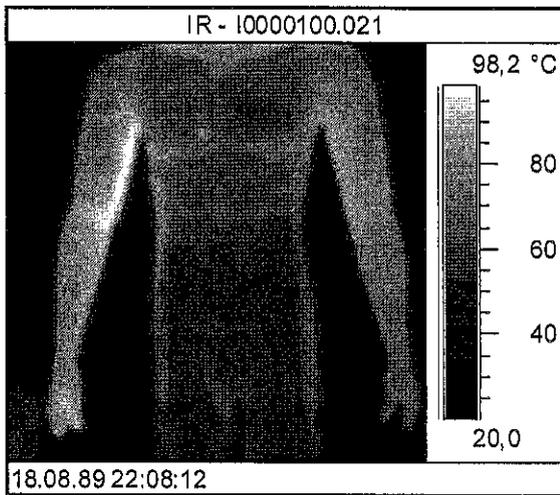


Bild 4.68: Dummy – Vorderansicht - 20 Sekunden nach Versuch

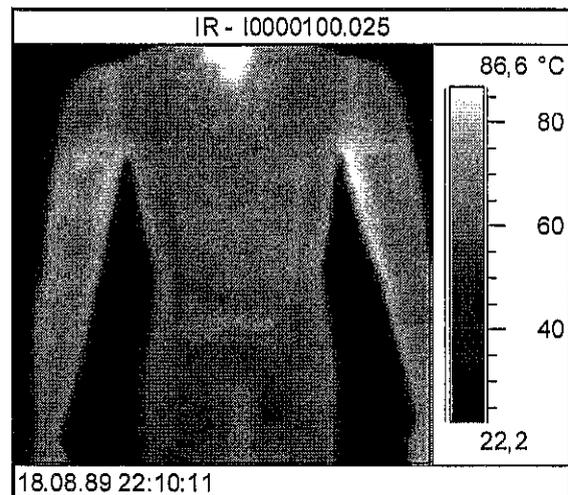


Bild 4.69: Dummy – Rückansicht - 140 Sekunden nach Versuch – Rückenklappe geschlossen

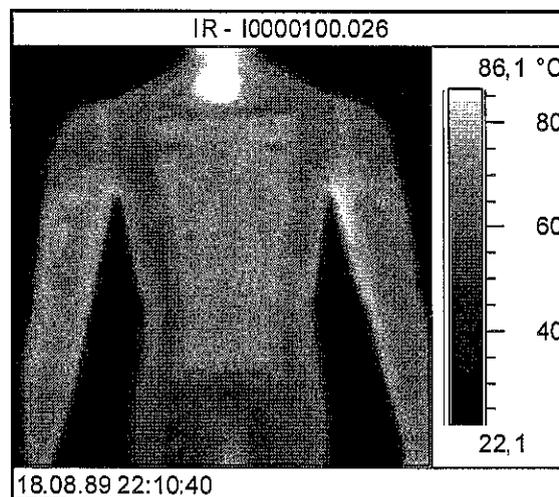


Bild 4.70: Dummy – Rückansicht - 170 Sekunden nach Versuch – Rückenklappe geöffnet

4.4.2.3 Schlussfolgerungen zur thermischen Beanspruchung des Wärmeflussensors

Aus Versuchsteil 1 ergab sich, dass die Temperaturmesswerte bei einem Abstand von 0,8 m fast dreimal so hoch sind als beim Abstand von 1,2 m. Die Infrarotbilder haben gezeigt, dass sich ein gleichmäßiger Wärmeausgleich auf dem Oberkörper einstellt. Im Versuchsteil 2 konnte festgestellt werden, dass nahezu gleichbleibende Temperaturen mit einem Maximum von 250 °C auf der Dummyoberfläche erzeugt werden. Nach 300 s sind alle Temperaturwerte unter den Wert von 35 °C gesunken. Durch die Tatsache, dass im Wesentlichen keine Temperaturen über 250 °C auftreten, können die einzusetzenden Wärmeflussensoren der Firma MEDTHERM[®] zur Anwendung gelangen, da sie dauerhaft für den Temperaturbereich bis 250 °C ausgelegt sind und somit eine Beflammung über einen Zeitraum von mindestens

8 s ungeschützt überstehen. Kurzzeitige Beaufschlagungen von Temperaturen über 250 °C können durch die schnelle Kühlwirkung des Aluminiumkörpers des Dummy kompensiert werden.

Bei der Beflammung des Dummy über 20 Sekunden im Versuchsteil 3 wurde festgestellt, dass keine wesentliche Temperaturerhöhung gegenüber der Beflammung von 8 Sekunden aufgetreten ist. Im Schnitt liegen die Temperaturen auf der Oberfläche des Dummy um ca. 25 K höher. Nach 300 s haben sich auch hier nahezu alle Messwerte der Temperatur von ca. 50 °C angeglichen. Es ist jedoch zu erkennen, dass der Ausgleichsprozess im Inneren des Dummy einen längeren Zeitraum in Anspruch nimmt als bei der Beflammung über 8 Sekunden. Durch die symmetrische Anordnung der Brenner zum Dummy lassen sich nahezu reproduzierbare Ergebnisse liefern. Geringe Abweichung werden auf Grund des relativ instabilen Flammenbildes immer auftreten können.

Im Ergebnis aller zu diesem Komplex vorgenommenen Untersuchungen kann die Grundaussage getroffen werden, dass, aus thermischer Sicht, die Sensoren bei einer 8 Sekunden andauernden Beflammung, ohne Schaden zu nehmen, einsetzbar sind. Diese Aussage (diese Begrenzung) gilt jedoch strenggenommen nur für den Fall einer erforderlichen Kalibrierung der Wärmeflussensoren im Zustand des unbekleideten Dummy (direkte Beflammung der Sensoren). Im bekleideten Zustand des Dummy realisiert natürlich die Kleidung selbst wegen ihrer wärmeisolierenden Wirkung eine gewisse thermische Schutzfunktion für die Sensoren. Insofern kann im Ergebnis der Untersuchungen durchaus die Aussage getroffen werden, dass in diesem Fall auch höhere thermische Belastungen, wie sie nachgewiesenermaßen insbesondere durch höhere Expositionszeiten zustande kommen, zur Anwendung gelangen können, ohne dass die Wärmeflussensoren Schaden nehmen.

4.4.3 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Haut

4.4.3.1 Anatomie der Haut

Die anatomische Struktur entspricht den Aufgaben und Funktionen der Haut als Grenzorgan zwischen Umwelt und Organismus. Die normale Hautoberfläche beim erwachsenen Menschen beträgt ca. 1,5 bis 2 m² und hat eine ungefähre Masse von 18 bis 20 kg. Das Hautorgan besteht gemäß Bild 4.71 aus drei Schichten:

- Epidermis (Oberhaut)
- Corium (Lederhaut, Cutis, Dermis)
- Subcutis (Unterhaut)

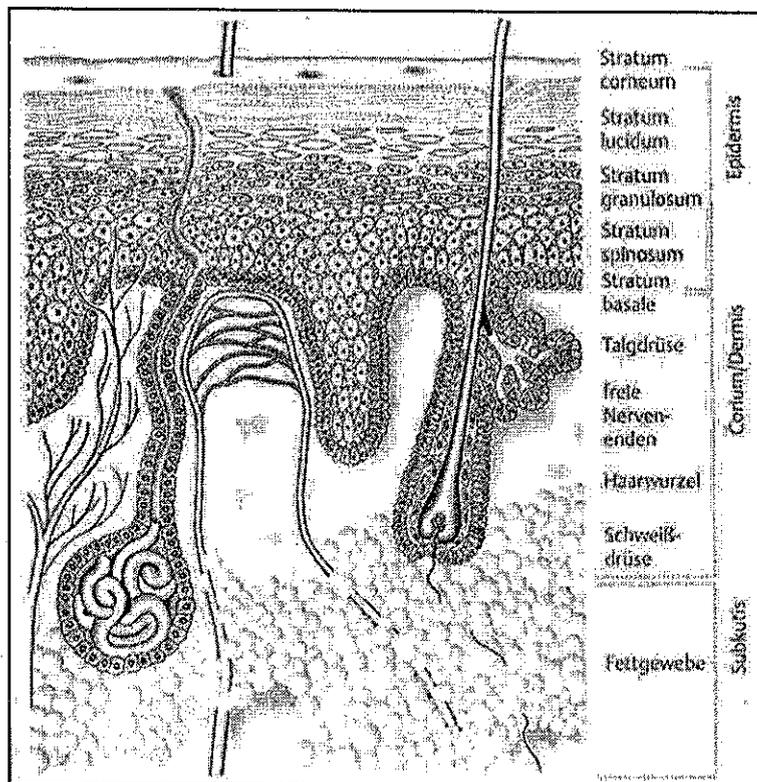


Bild 4.71: Aufbau der Haut [Lippert 98]

Die einzelnen Schichten sind dabei von Mensch zu Mensch unterschiedlich dick. In der Literatur schwanken die Angaben über die Dicke der einzelnen Schichten erheblich. Die Epidermisdicke ist von der Lokalisation abhängig (30 μm bis 3 mm) und dort am dicksten, wo sie am stärksten beansprucht wird (z.B. Fußsohle 2 mm), wobei die durchschnittliche Dicke etwa 0,1 mm beträgt. Das Corium hat eine mittlere Dicke von 1,5 mm (zwischen 1 bis 2 mm). Die Subcutis unterliegt den größten Schwankungen, da sie das Fettzellengewebe darstellt und mit Stärken von 0,5 bis 3 cm gerechnet werden kann (durchschnittlich wird von 1 cm ausgegangen).

4.4.3.2 Auswirkungen von Hitze auf die Haut

Die durch Hitzeeinwirkung entstehenden Wunden der Haut sind abhängig von den im Hautniveau erreichten Temperaturen. Ist die auftretende Wärme relativ niedrig, also geringer als 100 °C, so spricht man von einer Verbrühung. Entstehen durch Flammeneinwirkung (900 °C = mittlere Flammentemperatur) hohe Temperaturen in der Haut, so spricht man in diesem Fall von Verbrennungen. Da die Wärmeleitung und die Wärmekapazitäten der Haut- und Untergewebsschichten unterschiedlich sind, ist die Höhe der Außentemperatur nicht

allein entscheidend. Die Einwirkzeit ist ebenso maßgebend. So werden beispielsweise bei Wasserdampfeinwirkungen während 20 Sekunden in 1 mm Hauttiefe 66 °C gemessen. Aufgrund ihrer hohen spezifischen Wärme und geringen thermischen Leitfähigkeit vermag die Haut durch Verdampfen von intra- und extrazellulärem Wasser, einer Temperaturerhöhung über 100 °C kurzzeitig entgegenzuwirken [ANR_online].

Das Ausmaß der Schädigung wird von der Verbrennungstiefe und der Höhe bzw. der Einwirkungsdauer der Temperatur bestimmt. Grundsätzlich kann man davon ausgehen, dass bei Temperaturen zwischen 50 und 55 °C mit Hautschädigungen zu rechnen ist. Allerdings entstehen Hautverbrennungen bei längerer Einwirkzeit schon bei Temperaturen um 43 – 44 °C. Durch Temperaturerhöhungen auf über 42 °C erhöht sich die Durchlässigkeit der Kapillaren, die innere Zellbeschichtung wie auch die Basalmembran dieser kleinen Gefäße werden zerstört. Zwischen 44 – 51 °C wird die für vergleichbare Schädigungen notwendige Einwirkzeit bei einem Temperaturanstieg pro 1 °C jeweils um die Hälfte verkürzt. Die Kapillarerweiterung und damit die Hautrötung beginnt bei 35 °C nach 120 Sekunden, die

Tabelle 4.22: Einteilung der Verbrennungsgrade [AWMF online]

Schweregrad	Befund	Pathophysiologie ^{*)}
1. Grad „superficial“	Hautrötung oder Erythem, lokales Ödem, keine Narbenbildung vollkommen reversible	oberflächliche Epithelschädigung ohne Zelltod, Hyperämie, Vasodilatation
2. Grad „partial thickness“ oberflächlich dermale Verbrennung tiefe dermale Verbrennung	Blasenbildung untere Epidermis, Rötung, klinische relevante Flüssigkeitsverschiebung, vollkommen reversibel bei geeigneter Therapie, stark schmerzhaft blutige Blasenbildung, Schädigung weit ins Corium reichend, trockener Wundgrund, Nadelstiche schmerzhaft, Narbenbildung	Vereinzelt Epithelnekrosen, Schädigung der Epidermis und des oberflächlichen Anteils der Dermis mit Sequestrierung Hautanhangsdrüsen wie Schweiß- und Talgdrüsen erhalten, Denaturierung von Proteinen ⇒ weißliches Corium
3. Grad „full thickness“	Nekrosen, Schorfbildung, schmerzlos, Narbenbildung, fehlende Rekapilisierung, Übergang in Verkohlung	Koagulationsnekrosen, Zerstörung der gesamten Haut und der Hautanhangsgebilden
4. Grad	Verkohlung des Gewebes	Zerstörung weitgehender Schichten mit Unterhautfettgewebe, eventuell Muskeln, Sehnen, Knochen und Gelenke

*) Funktionsstörungen des menschlichen Gewebes

Blasenbildung bei 53 – 57 °C nach 30 – 120 Sekunden. Bei Temperaturen von mehr als 60°C kommt es infolge von Eiweißdenaturierung zur Nekrosenbildung (griechisch: örtlich begrenzter Gewebstod, das Absterben von Geweben) [ANR_online]. Um die unterschiedlichen Schädigungen besser spezifizieren zu können, wurden die unterschiedlichen Verbrennungsstadien in Grade eingeteilt. Pathophysiologisch lassen sich nach Tabelle 4.22 vier Grade der Verbrennungstiefe unterscheiden.

Durch Bild 4.72 wird die Hautschädigung entsprechend der Verbrennungsgrade dargestellt.

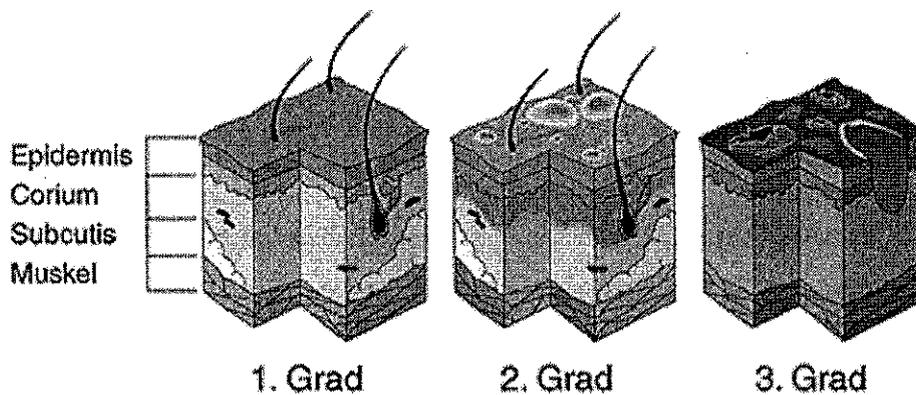


Bild 4.72: Hautschädigung entsprechend der Verbrennungsgrade

4.4.3.3 Berechnung des Wärmeflusses in der Haut und der Wärmeleitfähigkeit der Haut

Ziel ist es, einen Zusammenhang zwischen Wärmefluss, Temperatur und dem Grad der Verbrennung herstellen zu können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Haut aus unterschiedlichen Gewebeschichten mit unterschiedlichen Dicken und Wärmeleitfähigkeiten besteht. Tabelle 4.23 weist Wärmeleitfähigkeit und Schichtdicke der einzelnen Gewebeschichten aus [DIN EN ISO 13506].

Tabelle 4.23: Wärmeleitfähigkeiten und Schichtdicken der Hautschichten

Gewebe	Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK	Schichtdicke δ in cm
Epidermis	0,255	0,1
Corium	0,523	0,15
Subcutis	0,167	1

Aus diesen bekannten Parametern lässt sich der in der Haut auftretende Wärmefluss zu jeder der auf der Haut anliegenden Temperatur nach Formel (4.1) [Grabski et al. 01] bestimmen.

Am Beispiel der in Tabelle 4.23 ausgewiesenen Parameter und einer auf der Außenhaut (Epidermes) anliegenden Temperatur von 51 °C soll der Wärmefluss berechnet werden. Mit der Festlegung einer Körperkerntemperatur von 38 °C ergibt sich somit die Temperaturdifferenz $\Delta T = 13 \text{ K}$ (51 °C – 38 °C).

$$q = \frac{\Delta T_{ges}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} \quad \begin{array}{l} q \quad - \text{Wärmefluss in } W/cm^2 \\ \Delta T \quad - \text{Temperaturdifferenz in } K \\ \delta \quad - \text{Dicke in } cm \\ \lambda \quad - \text{Wärmeleitfähigkeit in } W/mK \end{array} \quad (4.1)$$

$$q = \frac{13}{\left[\left(\frac{0,1}{0,255 \cdot 10^{-2}} \right) + \left(\frac{0,15}{0,523 \cdot 10^{-2}} \right) + \left(\frac{1}{0,167 \cdot 10^{-2}} \right) \right]} = 0,019 \frac{W}{cm^2}$$

Der Wärmefluss beträgt somit 0,019 W/cm².

In der nachstehenden Tabelle 4.24 wird in Abhängigkeit von der Tiefe der Verbrennung, der Temperatur und des Wärmeflusses der Grad der Verbrennung ausgewiesen. Hierbei werden Einwirkzeiten von 30 bis 120 Sekunden angenommen. Beispielsweise werden Verbrennungen 3. Grades hervorgerufen durch thermische Beaufschlagung der Haut mit einer Temperatur von ca. 60 °C über einen Zeitraum von 120 Sekunden.

Tabelle 4.24: Grad der Verbrennung in Abhängigkeit vom Wärmefluss

Grad der Verbrennung	Tiefe der Verbrennung	Temperatur auf der Oberfläche der Haut in °C	Wärmefluss in W/cm ²
1. Grades	Epidermis	42 – 44	0,006 bis 0,009
2. Grades	untere Epidermis	44 – 51	0,009 bis 0,019
a) oberflächlich	oberflächlich Corium		
b) tief	tiefes Corium	52 – 57	0,020 bis 0,028
3. Grades	Subcutis	ab 57	0,028
4. Grades	Muskel, Knochen	mehr als 60	über 0,033

Die Wärmeflusswerte nach Tabelle 4.24 sind auf Grund der schlechten Wärmeleitfähigkeit der Haut verhältnismäßig klein. Bedeutsam ist jedoch, dass bereits Temperaturerhöhungen von 10 °C zu Verbrennungen führen können. Entscheidend in bezug auf die Wirkungen ist die jeweilige Einwirkzeit.

Unter Anwendung von Formel (4.2) [Grabski et al. 01] wurde die Wärmeleitfähigkeit der Haut mit $\lambda=0,1827 \text{ W/mK}$ berechnet.

Zum Vergleich der sich einstellenden (berechneten) Wärmeflüsse durch die Haut mit den sich bei gleicher Temperatureinwirkung am Sensor einstellenden, ist die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des Sensors erforderlich. Deren experimentelle Ermittlung wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

4.4.4 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Wärmeflussensors

Die Wärmeflussensoren sollen zur Ermittlung des bei äußerer thermischer Beanspruchung auftretenden Wärmeflusses am menschlichen Körper eingesetzt werden. Deshalb sollten sie idealerweise ein analoges thermisches Verhalten wie das der menschlichen Haut aufweisen. Im Abschnitt 4.4.3.2 wurden diesbezügliche, auf die menschliche Haut bezogene Betrachtungen angestellt und eine anzunehmende Wärmeleitfähigkeit λ für die Haut berechnet. Um Vergleiche mit dem berechneten Hautwert vornehmen zu können, ist es notwendig, die Wärmeleitfähigkeit der Wärmeflussensoren, die nicht bekannt war, experimentell zu bestimmen. Da bekannt ist, dass eine Temperaturdifferenz innerhalb eines Körpers einen Wärmefluss hervorruft, sollte experimentell diese Temperaturdifferenz innerhalb des Sensors erzeugt werden. Sie würde dann ein dem Wärmefluss adäquates Ausgangssignal am Wärmeflussensor erzeugen.

Wenn die Temperaturdifferenz an der Ober- und Unterseite des Wärmeflussensors bekannt ist, lässt sich die Wärmeleitfähigkeit wie folgt bestimmen:

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{\Delta T} \quad \text{in} \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right] \quad (4.2)$$

$q =$ Wärmestrom

$\delta =$ Dicke des Körpers (Wärmeflussensor)

$\Delta T =$ Temperaturdifferenz.

4.4.4.1 Versuchsaufbau zur Bestimmung des Wärmeflusses im Sensor

Es wurde ein Versuchsaufbau gewählt, der es ermöglichte, unterschiedliche Temperaturdifferenzen zu erzeugen. Der Wärmeflussensor wurde zwischen zwei Messingzylindern positioniert, wobei der untere im Wasser-Eis-Bad gekühlt und der obere

entsprechend temperiert wurde. Der obere Messingzylinder wurde durch einen Stativarm gehalten und positioniert. Bei diesen Untersuchungen wurde als Material Messing gewählt, da es eine sehr gute thermische Leitfähigkeit (81 bis 116 W/mK) besitzt, so dass thermische Ausgleichsvorgänge schnell vollzogen werden können. Um die Temperaturen der beiden Messingblöcke in unmittelbarer Nähe des Wärmeflussensors ständig ermitteln und überwachen sowie protokollieren zu können, wurden in die beiden Messingblöcke dicht unter

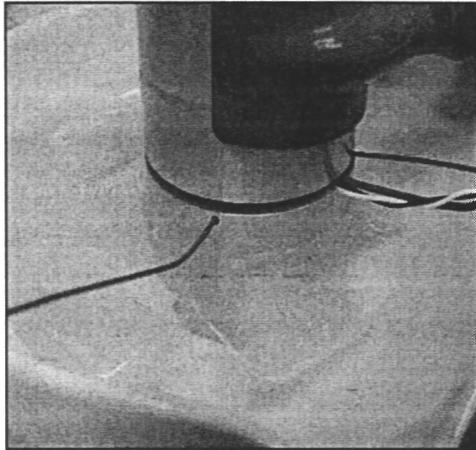


Bild 4.73: Wärmeflussensor zwischen den beiden Messingzylindern

der Oberfläche Bohrungen eingebracht, die bis zur Mitte der Zylinder reichen.

In diese wurden Thermoelemente gemäß Bild 4.73 eingeführt. Die Temperatur des Wärmeflussensors wurde außerdem durch das Thermoelement im Sensor selbst gemessen. Ermittelt wurde der durch die unterschiedlichen Temperaturen in den Messingblöcken entstehende Wärmefluss im Sensor.

Zur Messwernerfassung und Speicherung kam wiederum die Messwernerfassungsanlage Therm 5500-

3 (siehe Bild 4.74) der Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH (AMR) zum Einsatz. Das System erlaubt Temperaturmessungen im Bereich von -270 °C bis 1800 °C . Es ermöglicht

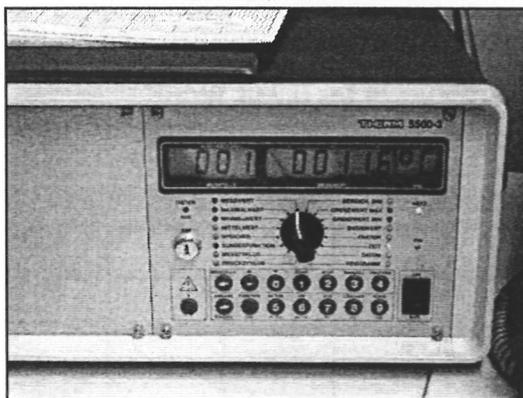


Bild 4.74: Bedienfeld des Therm 5500

den Anschluss von 9 verschiedenen Fühlerarten, die zudem ständig auf Fühlerbruch kontrolliert werden. Die integrierte USV und ein Systemspeicher gestatten das Abspeichern von ca. 200.000 Messwerten. Zur Ausgabe der Messwerte sind eine 11-stellige LCD Anzeige, ein hochauflösender linearisierter Analogausgang sowie eine Centronics- und V24-Schnittstelle

vorhanden. Die Programmierung des Datenloggers erfolgt wahlweise über die geräteinterne Tastatur oder wie bei diesem Versuch über einen an die serielle Schnittstelle angeschlossenen Computer und dem dazugehörigen Programm AMR Win Control. Die erfassten Messdaten wurden mit der Software Excel ausgewertet.

Die Versuchsdurchführung erfolgte derart, dass der obere Messingzylinder zunächst in einem Trockenschrank auf ca. 70 °C vorgewärmt wurde. Der untere Messingzylinder wurde in Eiswasser gestellt. Auf den unteren kalten Messingzylinder wurde der Wärmeflussensor positioniert, auf den wiederum der vorgeheizte Messingzylinder aufgebracht wurde. Auf

Planparallelität der Auflageflächen wurde geachtet. Die Messung wurde gestartet, wobei die Messwerte im 2 Sekunden - Intervall bis zum Ende des Versuchs nach ca. 30 Minuten abgefragt wurden. Innerhalb dieser Zeit kühlte sich einerseits der obere Zylinder kontinuierlich ab, andererseits erwärmte sich der untere leicht, so dass der Wärmefluss zeitabhängig geringer wurde. Die Messwerte für Versuch Nr. 1 werden durch die Grafik im Bild 4.75 dargestellt. Die nach Formel (4.2) berechnete Wärmeleitzahl wird in der Grafik ebenfalls dargestellt. Es wurden 4 Versuche nach dieser Methode durchgeführt, wobei sich herausstellte, dass bei jedem neuen Versuch eine andere Wärmeleitzahl ermittelt wurde. In Tabelle 4.25 werden die bei diesen Versuchen ermittelten durchschnittlichen Wärmeleitzahlen ausgewiesen.

Tabelle 4.25: Wärmeleitzahlen Versuche 1 bis 4

	durchschnittliche Wärmeleitzahl λ in W/mK
Versuch 1	0,574
Versuch 2	0,647
Versuch 3	0,619
Versuch 4	0,738

Es lag die Vermutung nahe, dass die unterschiedlichen und sich ständig ändernden Temperaturdifferenzen den Wärmefluss qualitativ beeinflussten. Es konnte nicht zweifelsfrei ermittelt werden, ob die Flächen (Sensor und Messingzylinder) tatsächlich planparallel zueinander auflagen, oder ob kleine Luftzwischenräume ursächlich verantwortlich sind für die ermittelten unterschiedlichen Wärmeleitzahlen (Bereich von 0,574 bis 0,738 W/mK).

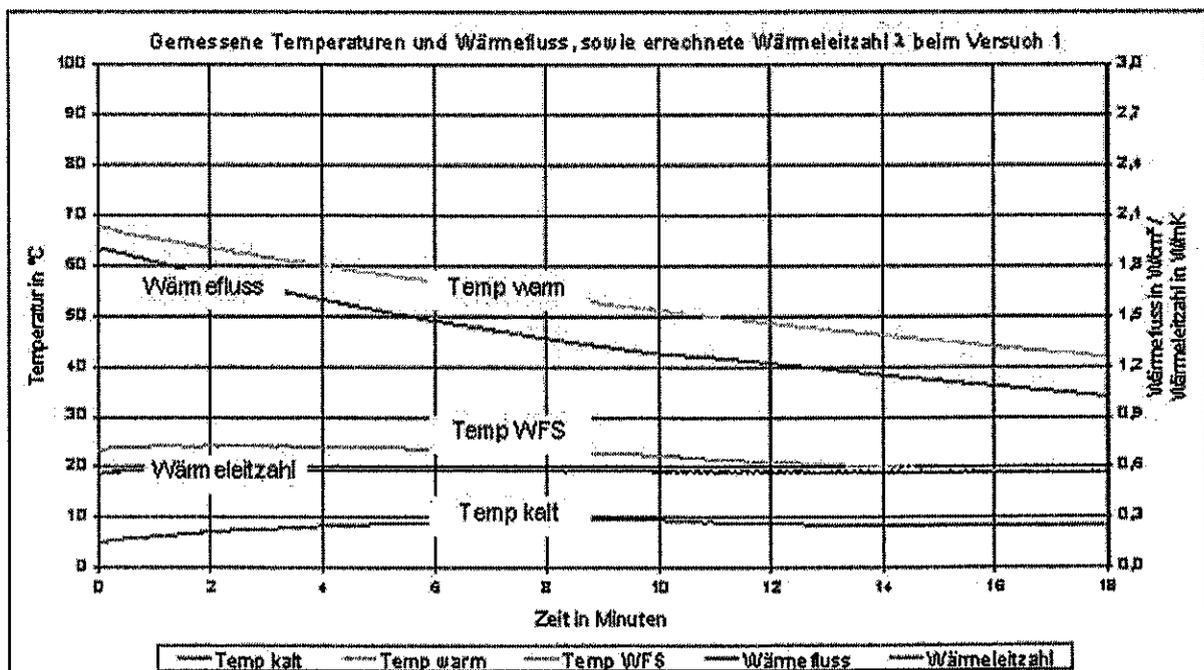


Bild 4.75: Versuchsauswertung am Beispiel des Versuches 1

Diese Annahmen waren Veranlassung, weitere Untersuchungen durchzuführen. Um die eventuell vorhandenen Luftzwischenräume zu überbrücken und einen nahtlosen Übergang zwischen Messingzylinder und Sensor zu gewährleisten, wurde die Ober- und Unterseite des Sensors mit Wärmeleitpaste bestrichen. Dabei wurde darauf geachtet, beidseitig eine gleichmäßige Schichtdicke zu erzeugen. Um den oberen Messingzylinder auf einer konstanten Temperatur zu halten, wurde dieser im Verlauf der weiteren Untersuchungen gemäß Bild 4.76 mit einer Heizschnur der Fa. Electrothermal (S.-Nr. 10042108) umwickelt. Diese Heizschnur wurde durch einen Temperaturregler Tempat[®]-D der Firma messner emtronic nach Bild 4.77 gesteuert. Sobald die Ist-Temperatur der externen Messstelle (Thermoelement) unter die vorher eingegebenen Soll-Temperatur sinkt, wird die Heizung zugeschaltet. Sie heizt den Messingzylinder auf und wird nach Erreichen der Soll-Temperatur wieder abgeschaltet. Um die genaue Ist-Temperatur zu ermitteln, wurde eine Bohrung in der Mitte des Messingzylinders eingebracht, in die dann das Thermoelement des Temperaturreglers eingebracht wurde. So konnte die Kerntemperatur des Messingzylinders als Referenztemperatur für die Ist-Temperatur zu Grunde gelegt werden. Es bestand nun die Möglichkeit, den oberen Messingblock auf einer zuvor gewählten Temperatur zu halten. Bei den Versuchen wurden die Soll-Temperaturen 60 °C und 70 °C gewählt.

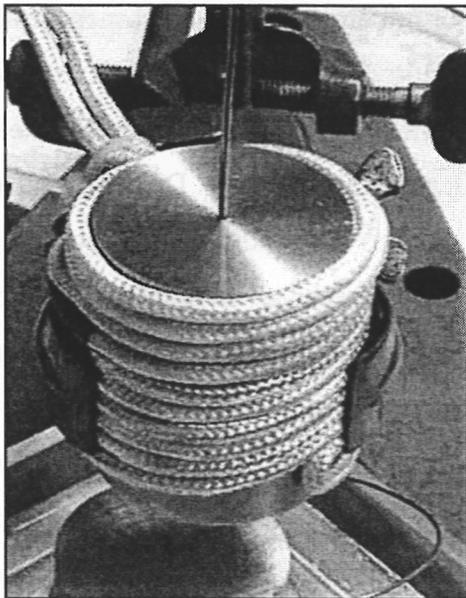


Bild 4.76: Oberer Messingzylinder mit Heizschnur



Bild 4.77: Temperaturregler Tempat[®]-D

Es zeigte sich, dass bei diesen Versuchen die ermittelten Wärmeleitzahlen nicht so stark voneinander abwichen (Differenz nur 0,001 W/mK), wie dies in den zuvor durchgeführten Versuchen der Fall war. Tabelle 4.26 weist die ermittelten durchschnittlichen Wärmeleitzahlen für die Versuche 5 bis 7 aus.

Tabelle 4.26: Wärmeleitahlen Versuche 5 bis 7

	durchschnittliche Wärmeleitahl λ in W/mK
Versuch 5	1,123
Versuch 6	1,122
Versuch 7	1,131

Dass trotz alledem noch Schwankungen auftraten, ist etwaigen Messungenauigkeiten und nicht 100-prozentig gleichen Übergangsbedingungen anzulasten. Die Wärmeleitahl des Wärmeflussensors wird durch Mittelwertbildung der Ergebnisse aus diesen drei Versuchen bestimmt und entspricht damit 1,125 W/mK. Damit entspricht die Wärmeleitahl des Wärmeflussensors nicht der der Haut, die in Abschnitt 4.4.3.2 mit 0,1827 W/mK ausgewiesen wird.

Deshalb wurden weitere Untersuchungen mit der Zielstellung der Anpassung der Wärmeleitahl des Wärmeflussensors an die der Haut durchgeführt. Zugleich sollten damit Reaktionen des Sensors auf etwaige Einbaumöglichkeiten in Kombination mit anderen Stoffen untersucht werden.

Es ist bekannt, dass die Wärmeleitwiderstände sich addieren, wenn Wärmeleiter in Reihe geschaltet werden. Das heißt, ein erhöhter Wärmeleitwiderstand und somit ein geringerer Wärmefluss, lassen sich durch das Hintereinanderschalten von schlecht leitenden Stoffen erreichen. Es besteht also die Möglichkeit, den Sensor mit einem schlecht wärmeleitenden Stoff zu kombinieren, so dass der Wärmefluss quantitativ derart minimiert wird, um so dem der Haut bei gleicher thermischer Beanspruchung zu entsprechen. Dies hätte den Vorteil, dass die am Sensor gemessenen Werte direkt auf die Haut übertragbar wären. Da die menschliche Haut ein schlechter Wärmeleiter ist (0,1827 W/mK), war es notwendig, den Sensor mit einem Wärmeisolator zu kombinieren, einem Stoff, der die Wärme sehr schlecht leitet. Im Vorfeld wurde recherchiert, mit welchem Stoff eine mögliche Angleichung erreicht werden könnte. Zum Einsatz kamen eine Gummiunterlage sowie eine Unterlage aus Kork.

Es wurden zwei Versuche mit einer Gummiunterlage durchgeführt, wobei unterschiedliche Temperaturen bei der Erwärmung des oberen Zylinders und unterschiedliche Schichtdicken beim Gummi zur Anwendung gelangten. Die jeweilige Gummiunterlage in der Größe des Sensors wurde zwischen diesem und dem unteren Messingzylinder positioniert. Beim Versuch 8 wurde der obere Zylinder auf 100 °C aufgewärmt und eine Gummidicke von 2,0 mm verwendet. Hier zeigte sich, dass die resultierende Wärmeleitahl deutlich nach unten auf einen Wert von 0,269 W/mK sank. Da dies noch nicht ausreichend war, wurde im nächsten Versuch die Gummiunterlage verstärkt. Im Versuch 9 wurde auf 40 °C temperiert und eine Gummistärke von 9,0 mm verwendet. Das Resultat ergab eine Wärmeleitahl von 0,085

W/mK, welche nunmehr unter dem vergleichbaren Wert der Haut lag. Im Ergebnis musste konstatiert werden, dass eine Materialdicke von nahezu einem Zentimeter unter dem Aspekt der Wanddicken des Dummy beim späteren Einbau unrealistisch ist.

Bei weiteren Versuchen kam deshalb Kork als Unterlage zur Anwendung. Nach vorausgegangenen Berechnungen sollte eine Schichtdicke von ungefähr 3 mm gewählt werden. Bei der Herstellung der Unterlage musste äußerst sorgsam gearbeitet werden, da ein von der Struktur her möglichst homogenes Stück zu verwenden war und die Schichtdicke an allen Stellen gleich sein sollte. Es wurde zunächst im Versuch 10 Naturkork der Dicke 3,2 mm unter dem Sensor verwendet, wobei der obere Zylinder auf 40 °C vorgewärmt wurde. Das Ergebnis von 0,040 W/mK lag unter dem zuvor auf der Grundlage von 9 mm Gummi berechneten und unter dem der Haut. In einem weiteren Versuch Nr. 11 wurde nunmehr industriell hergestellter Kork mit gleichmäßiger Struktur und der gleichen Dicke wie beim vorhergehenden Versuch verwendet. Es wurde wiederum die Temperatur des oberen Zylinders auf 40 °C gehalten. Das Ergebnis lag diesmal mit 0,054 W/mK immer noch unter dem erwarteten. Die Dicke des Korks müsste demzufolge noch weitergehend minimiert werden, was fertigungstechnisch jedoch nicht möglich war. Demzufolge wurden keine weiteren Versuche in dieser Richtung unternommen.

Tabelle 4.27 stellt alle durchgeführten Versuche in der Übersicht dar.

Tabelle 4.27: Versuche im Überblick

	mittlerer Wärmefluss	mittlere errechnete Wärmeleitfähigkeit	Beschreibung
Versuch 1	1,374	0,574	- Wärmeflussensor zwischen zwei Messingzylindern
Versuch 2	2,194	0,647	- Wärmeflussensor zwischen zwei Messingzylindern
Versuch 3	1,587	0,619	- Wärmeflussensor zwischen zwei Messingzylindern
Versuch 4	1,339	0,738	- Wärmeflussensor zwischen zwei Messingzylindern
Versuch 5	2,640	1,123	- Wärmeflussensor zwischen zwei Messingzylindern - der wärmere Block wird mittels Heizschnur auf ca. 60 °C gehalten - Wärmeleitpaste verwendet
Versuch 6	3,126	1,122	- Wärmeflussensor zwischen zwei Messingzylindern - der wärmere Block wird mittels Heizschnur auf ca. 70 °C gehalten - Wärmeleitpaste verwendet
Versuch 7	2,949	1,131	- Wärmeflussensor zwischen zwei Messingzylindern - der wärmere Block wird mittels Heizschnur auf ca. 70 °C gehalten - Wärmeleitpaste verwendet

Noch Tabelle 4.27: Versuche im Überblick

	mittlerer Wärmefluss	mittlere errechnete Wärmeleitzahl	Beschreibung
Versuch 8	1,268	0,269	- Wärmeflussensor zwischen zwei Messingzylindern - der wärmere Block wird mittels Heizschnur auf ca. 100 °C gehalten - zwischen Sensor und unterem Messingzylinder wurde eine Gummiplatte (2 mm) gelegt
Versuch 9	0,084	0,085	- Wärmeflussensor zwischen zwei Messingzylindern - der wärmere Block wird mittels Heizschnur auf ca. 40 °C gehalten - zwischen Sensor und unterem Messingzylinder wurde eine Gummiplatte (9 mm) gelegt
Versuch 10	0,041	0,040	- Wärmeflussensor zwischen zwei Messingzylindern - der wärmere Block wird mittels Heizschnur auf ca. 40 °C gehalten - zwischen Sensor und unterem Messingzylinder wurde eine Korkunterlage (3,2 mm) gelegt
Versuch 11	0,052	0,054	- Wärmeflussensor zwischen zwei Messingzylindern - der wärmere Block wird mittels Heizschnur auf ca. 40 °C gehalten - zwischen Sensor und unterem Messingzylinder wurde eine Korkunterlage (3,2 mm) gelegt

4.4.4.2 Schlussfolgerungen zum Vergleich Haut und Wärmeflussensor

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass allein aus technologischen Gründen eine Anpassung der Wärmeleitzahl des Sensors an die der menschlichen Haut durch Reduzierung der Wärmeleitzahl des Sensors mittels geeignet erscheinender Materialien (Gummi und Kork) nicht praktikabel ist. Als Ergebnis der Bestimmung der Wärmeleitzahl des Wärmeflussensors wird deshalb der Mittelwert der in Tabelle 4.26 ausgewiesenen Wärmeleitzahlen für die Versuche 5 bis 7 festgelegt. Die Wärmeleitzahl des Wärmeflussensors beträgt damit $\lambda=1,125$ W/mK. Dieser Wert entspricht dem ca. 6fachen Wert der Wärmeleitzahl der menschlichen Haut ($\lambda=0,1827$ W/mK).

Vergleichsmessungen mit dem Wärmeflussensor und Vergleichsberechnungen unter Zugrundelegung der Hautparameter ergaben, jeweils bezogen auf gleiche Temperaturdifferenzen ΔT , dass der durch Messung mit dem Wärmeflussensor erzielte Wärmeflusswert generell ca. 39 mal so hoch war wie der berechnete für die Haut.

Um dieselben Wärmeflüsse, wie sie bei der Haut auftreten würden, zu erhalten, müssten demzufolge die Messwerte des Sensors mit dem Faktor 0,025065 multipliziert werden. Damit ist die Möglichkeit gegeben, die gemessenen Werte der Wärmeflussensoren über diesen Korrekturfaktor denen der Haut anzugleichen, um so einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Durch diese Verfahrensweise vereinfacht sich der Einbau der

Wärmeflussensensoren in den Dummy durch die damit verbundene Minimierung des fertigungstechnischen Aufwandes erheblich.

4.4.5 Instrumentierung des Dummy mit Wärmeflussensensoren

Nachdem durch die bereits durchgeführten Untersuchungen erkannt wurde, dass die Sensoren direkt, d. h. ohne jede weitere Kombination mit zusätzlichen Stoffen zur Minderung des Wärmefflusses in den Dummy integriert werden können, und der Sensor bei einer Beflammungszeit von 8 Sekunden direkt den Flammen ausgesetzt werden kann, stand das Problem der konkreten Instrumentierung des Dummy mit den Wärmefflussensoren. Dabei sollte eine Lösung gefunden werden, die alle bisher genannten Anforderungen und Gegebenheiten berücksichtigt.

4.4.5.1 Aufbringen des Sensors auf dem Dummy

Zunächst wurde die Möglichkeit gesehen, den Sensor gemäß Bild 4.78 direkt auf die Dummyoberfläche mit einem hochleitenden und thermisch beständigen Kleber aufzubringen und die Messleitungen des Sensors durch Bohrungen in das Innere des Dummy zu führen.

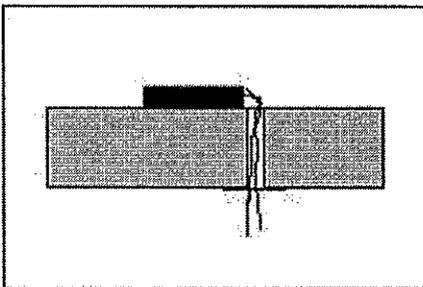


Bild 4.78: Aufgeklebter Sensor

Diese Verfahrensweise hätte folgende Vorteile:

- leicht realisierbar
- an allen Stellen am Dummy aufsetzbar
- Dummyoberfläche wird nur in geringem Maße mechanisch beansprucht (Bohrungen zur Kabeldurchführung)
- kostengünstig.

Folgende Nachteile sprachen gegen diese Variante:

- Sensor an Klebeort gebunden, keine Austauschbarkeit gegeben.
- Wegen der nur 35 vorhandenen Sensoren ist eine nur lokale Messfläche festgelegt.
- Ein Entfernen des Sensors wäre mit dessen Zerstörung verbunden.
- Durch Sensor hervorgerufener ungewünschter Luftzwischenraum zwischen Dummyoberfläche und der zu untersuchenden PSA.

Aus den genannten Gründen wurde diese Variante verworfen. Statt dessen wurde zur Realisierung der bestehenden Anforderungen eine Adaptervariante favorisiert.

Diese Variante sollte folgenden Anforderungen genügen:

- Die Abmaße sollten so gewählt werden, dass der Sensor mit Adapter überall am Dummy, also unabhängig vom Ort und der dort vorhandenen Wandstärke, eingesetzt werden kann.
- Er sollte schnell und einfach ausgewechselt werden können.
- Er sollte keinen störenden Einfluss in Bezug auf die Wärmeleitungsprozesse des Dummy ausüben (keine Störstelle).
- Der Sensor sollte mit Hilfe des Adapters höhenvariabel (leicht erhöht oder versenkt, entsprechend der Materialdicke des Dummy) eingesetzt werden können.
- Der Adapter sollte leicht zu fertigen sein, um damit die Fertigungskosten gering zu halten.

Des Weiteren musste bedacht werden, dass wegen der komplizierten Geometrie des Dummy keine aufwändigen fertigungstechnischen Arbeiten (Fräsen, Drehen) am Dummy durchgeführt werden können. Um die Probleme der Wärmeleitung zu berücksichtigen, wurde der Adapter wegen der guten und vor allem gleichen (Adapter und Dummy) Wärmeleiteigenschaften zunächst aus Aluminium hergestellt.

Es wurde ein aus Aluminium-Rundmaterial (entsprach derselben Legierung, aus die der Dummy hergestellt wurde) bestehender Stopfen hergestellt, der in eine Bohrung im Dummy (im Vorversuch in eine Versuchsplatte aus Aluminium) unter leichtem Druck und unter Zugabe von Wärmeleitpaste eingeschoben wurde. Auf diesen Stopfen sollte der Sensor mittels Kleber aufgebracht und die Kabel seitlich in einer Nut nach innen geführt werden. Es stellte sich heraus, dass eine Spielpassung mit leichtem Übermaß nicht herzustellen war, was maßgeblich daran lag, dass die verwendete Aluminiumlegierung zu „weich“ war und nicht innerhalb der erforderlichen Toleranzen gedreht bzw. gebohrt werden konnte. Der hergestellte Stopfen saß entweder zu locker, verkantete oder ließ sich grundsätzlich nicht einbringen. Daraufhin wurde versucht, den Aluminiumstopfen mit Gewinde zu versehen und, wie in Bild 4.79 dargestellt, in die Versuchsplatte einzuschrauben. Dabei kamen unterschiedliche Gewinde-Anstiege zur Anwendung. Dennoch war auch diese Variante keine befriedigende Lösung, da einerseits das Material beim Gewindedrehen „schmierte“ und andererseits der Stopfen dadurch mit zu viel Spiel im Gewinde saß, wodurch der notwendige Flächenkontakt mit dem umgebenden Material des Dummy nicht realisiert werden konnte. Aus diese Versuchen konnten zwei grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden.

- Das Einbringen des Adapters in den Dummy lässt sich nicht über ein Gewinde lösen.
- Das Material Aluminium eignet sich wegen seiner schlechten Verarbeitbarkeit nicht für die Herstellung des Adapters.

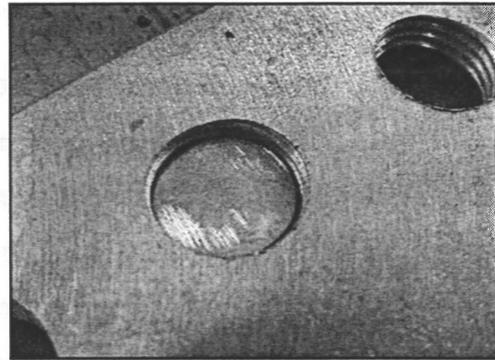


Bild 4.79: Eingeschraubter Adapter

Wegen seiner guten Wärmeleitfähigkeit und wesentlich besseren Verarbeitbarkeit wurden alle weiteren Untersuchungen mit dem Material Messing durchgeführt. Auf Grund der Feststellung, dass grundsätzlich ein Einschrauben des Adapters in den Körper nicht möglich ist, wurde über eine weitere Lösung nachgedacht, den Adapter mit hoher Stabilität und Formschlüssigkeit in den Dummy einzubringen. Diese

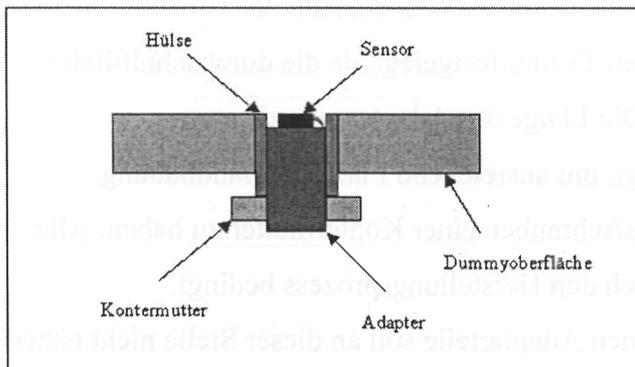


Bild 4.80: Adapter für Wärmeflussensor (schematisch)

wurde darin gesehen, durch Pressen bzw. Schrumpfen eine formschlüssige Verbindung herzustellen. Diese Variante einer „Adapter-Hülse-Kombination“ sieht vor, eine Einheitshülse mit Innengewinde in den Dummy einzupressen oder einzuschrumpfen, mit der Möglichkeit, einen

Adapter mit integriertem Sensor in die Hülse einzuschrauben. Die Hülse verbleibt an der vorgesehenen Stelle und wird zu keinem Zeitpunkt versetzt. Lediglich der Adapter mit dem Sensor wird an den gewünschten Stellen eingeschraubt, wobei in die nicht genutzten Hülsen im Bedarfsfall ein Blindstopfen eingeschraubt werden kann. Der Adapter kann an verschiedenen Positionen eingeschraubt werden und wird mittels einer Kontermutter an seiner Position gehalten und an das Gewinde gepresst (besserer Wärmeübergang). Der Sensor kann somit materialdickenunabhängig (Dummy) und plan zur Oberfläche des Dummy eingeschraubt werden. In Bild 4.80 ist der so angedachte Aufbau schematisch dargestellt. Über eine seitlich in den Adapter eingefräste Nut werden die Kabel des Sensors in das Innere des Dummy geführt. Die Nut mit dem einliegenden Kabel wird sodann mit Keramikkleber mit hoher thermischer Leitfähigkeit verschlossen. Die Rückseite des Adapters wird mit einem Schlitz versehen, um bei etwaigem Festsitzen des Adapters diesen mit einem Werkzeug (ähnlich eines kurzen Schraubendrehers) lösen zu können. Um diese Adapterversion bezüglich ihrer Praktikabilität testen zu können, wurde ein Muster bzw. Prototyp hergestellt.

4.4.5.2 Herstellung eines Adapter-Prototypen

Bevor mit der Erstellung eines Musters des Adapters, bestehend aus den Adapterteilen Hülse, Stopfen mit Sensor bzw. Blindstopfen und der Kontermutter begonnen werden konnte, mussten deren Abmaße festgelegt werden. Wegen des vorgesehenen Einsatzspektrums waren diese weitestgehend zu minimieren. Der angestrebte minimalste Durchmesser des Adapters wird durch den Durchmesser des Sensors von 9,65 mm mit den zusätzlich seitlich austretenden Leitungen bestimmt. Da die Leitungen nur mit einem Radius von ungefähr 1,5 mm gebogen werden dürfen, ergibt sich somit ein Durchmesser von 12,65 mm (der Sensor sollte mittig des Adapters liegen). Zusätzlich soll zur seitlichen thermischen Isolierung des Sensors ein Luftspalt vorgesehen werden. Damit liegt das nächste mögliche Gewinde, auch um den allseitig geforderten Luftspalt zu ermöglichen, beim Durchmesser 14 mm. Um ausreichend Gewinde und somit Kontaktfläche nutzen zu können, kam das Gewinde M 14x1 zum Einsatz. Für die Länge der Hülse wurden 11 mm festgelegt, da die durchschnittliche Dicke der Dummywandung 8 mm beträgt. Die Länge des Adapters wurde aus Praktikabilitätsgründen mit 18 mm festgelegt, um ausreichend Platz zur Handhabung (Einschrauben) des Adapters und für das Aufschrauben einer Kontermutter zu haben. Alle weiteren Maße sind dann technologisch durch den Herstellungsprozess bedingt. Auf Einzelheiten der Herstellung der einzelnen Adapterteile soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Im Ergebnis konnte ein Fertigungsmuster des Adapters zunächst in eigener Werkstatt hergestellt werden. Die einzelnen Bestandteile des Adapters werden in den Bildern 4.81 bis 4.84 dargestellt.

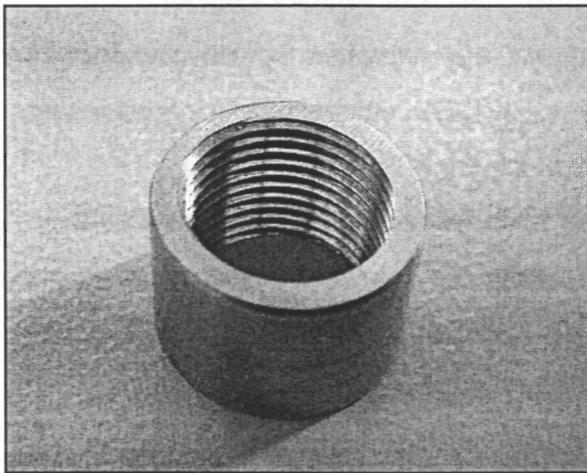


Bild 4.81: Adapterteil Hülse

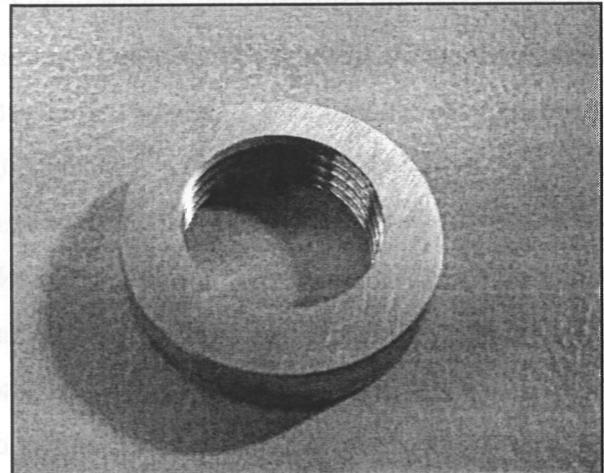


Bild 4.82: Adapterteil Kontermutter

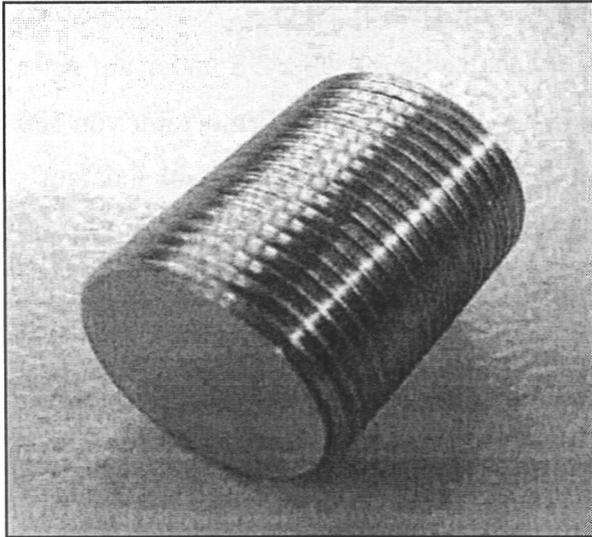


Bild 4.83: Adapterteil Blindstopfen/Sensorträger

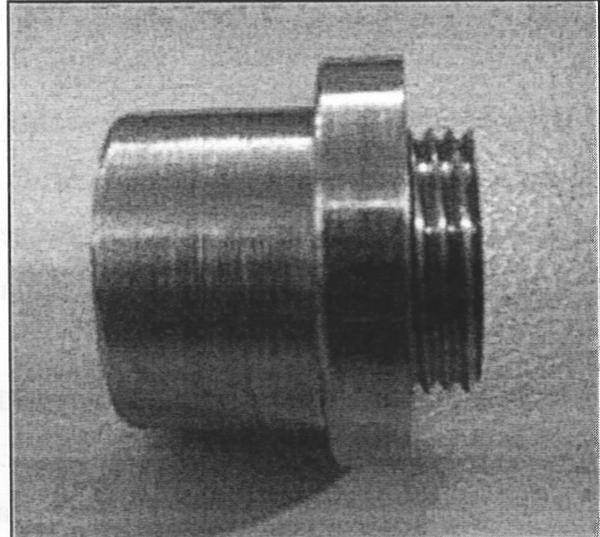


Bild 4.84: Kompletter Adapter

Das Adapterteil Blindstopfen wird auch als Trägerteil für den Wärmeflussensor (Sensorträger) verwendet.

Zusätzlich wird hier eine Nut, die zur Aufnahme der Kabel des Sensors dienen, senkrecht zum Gewinde eingefräst.

An dieser Stelle einige Hinweise zur Instrumentierung des Dummy mit den Adaptern.

Um einen guten Wärmeübergang zu ermöglichen und den Adaptern einen festen Sitz zu geben, werden die Hülsen eingeschrumpft. In den Dummy sind an ausgewählten Stellen Bohrungen mit einem Durchmesser von 17 mm einzubringen. Dabei ist darauf zu achten, dass diese orthogonal zur Oberfläche eingebracht werden. Grundsätzlich sollte äußerste Präzision angewandt werden. Um die Hülse einschrumpfen zu können, muss sie zuvor abgekühlt werden. Hierzu kann ein Tiefkühlfach (-18 °C) zur Anwendung gelangen, die Nutzung von flüssigem Stickstoff oder Sauerstoff wäre eine weitere denkbare Möglichkeit. Der Bereich der Stelle, an der die Hülse eingesetzt werden soll, wird mit einem Brenner erwärmt. Dabei ist auf eine gleichmäßige Erwärmung zu achten. Die tiefgekühlte Hülse wird anschließend zentrisch auf die Bohrung aufgesetzt und unter Zuhilfenahme eines Gummihammers eingeschlagen. Die Hülse muss bündig mit der Oberfläche des Dummy abschließen und ist auf seinen festen Sitz zu prüfen.

Das Aufkleben des Sensors auf den Sensorträger erfolgte bei den Untersuchungen wie folgt: Es kamen, entsprechend dem jeweiligen Erfordernis, zwei unterschiedliche Kleber zum Einsatz.

Zum Aufkleben des Sensors wurde der Silberleitkleber Duralco 124[®] (Datenblatt siehe Anlage 7) der Firma Polytec GmbH mit besonders hoher Temperaturbeständigkeit (max. Betriebstemperatur 325 °C) und Wärmeleitfähigkeit (9,29 W/mK !) verwendet. Um dem

Kleber eine optimale Aushärtung und Wirksamkeit zu ermöglichen, ist beim Aushärteprozess eine Temperaturkurve zu fahren. Dazu muss der aufgeklebte Sensor über 2 Stunden auf einer Temperatur von 120 °C gehalten und anschließend über 4 Stunden einer Temperatur von 180 °C ausgesetzt werden. Der Sensor ist zentrisch auf den Adapter aufzubringen, wobei darauf zu achten ist, dass die Kabel in Richtung der seitlichen Nut des Sensorträgers zeigen. Der Sensor sollte während des Aushärteprozesses möglichst an seiner vorgesehenen Position fixiert werden.

Zum Verfüllen der seitlichen Nut des Sensorträgers mit den eingelegten Kabeln des Sensors und zum Schutz derselben vor mechanischen Einflüssen kam ein auf Aluminiumoxid basierender Keramikkleber Cotronics 920[®] (Datenblatt siehe Anlage 8) der Firma Polytec mit hoher thermischer Leitfähigkeit zum Einsatz. Dieser Keramikkleber kann für Temperaturen bis zu 1650 °C dauerhaft eingesetzt werden und besitzt eine Wärmeleitfähigkeit von 2,14 W/mK. Zum Aushärten dieses Klebers sind Zeiten von 24 h bei Raumtemperatur oder 4 h bei 65 °C vorgeschrieben. Da die Nut vollständig verfüllt werden soll, ist es erforderlich, nach dem Aushärten des Klebers das Adaptergewinde nachzuschneiden.

Am Ende der gesamten vorgenommenen Untersuchungen zur Problematik „Adapter“ wurde noch dessen thermisches Verhalten im Einbauzustand untersucht. Da das zur Herstellung der Adapter verwendete Material Messing eine andere Wärmeleitfähigkeit als das Aluminium des Dummy aufweist, war zu untersuchen, inwieweit ein Temperatursausgleich auf der Oberfläche des Dummy durch die eingebauten Adapter beeinflusst wird. Im Bild 4.85 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Um noch keine Eingriffe am Dummy vornehmen zu müssen und um eine gleichbleibende Materialstärke zu gewährleisten, wurde für diese Versuche eine

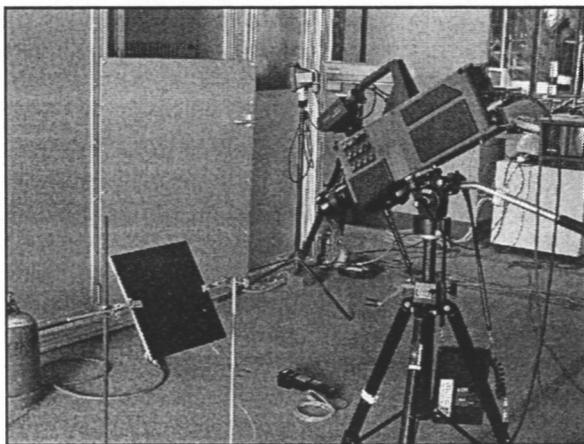


Bild 4.85: Versuchsaufbau Einbauzustand

Aluminiumguss-Platte verwendet. Diese Platte wurde aus dem gleichen Material hergestellt wie der Dummy. Sie hatte die Abmaße 300x330x10 mm und wog 2185 g. Sie war somit etwas stärker (10 mm) als die originale Dummywandung (4 bis 8 mm), wies jedoch keine Differenzen in der Dicke auf. In die Platte wurde mittig eine Adapter-Hülse in das dafür vorgesehene Loch

eingepresst. In diese Hülse wurde dann ein Adapter-Blindstopfen eingeschraubt. Um den Wärmefluss innerhalb der Platte sichtbar machen zu können, kam die Wärmebildkamera

Thermovision® 470 PRO (siehe Bild 4.85) zum Einsatz. Um optimale Ergebnisse zu erzielen und etwaige Reflexionen auf der Plattenoberfläche zu vermeiden, wurde diese mit schwarzer hochtemperaturbeständiger Farbe (S-Nr. 975-B435) der Firma MEDTHERM® Corporation mit einem Absorptionsfaktor von 0,92 besprüht. Die so behandelte Platte wurde mittels zweier Stativarme stabilisiert und gleichzeitig seitlich geneigt, um mit der Kamera einen Einstellwinkel von 90° zu erreichen. Mit dem rechten Stativarm wurde gleichzeitig ein Thermoelement zur Temperaturmessung auf der Plattenoberfläche gehalten. Die ermittelten Temperaturwerte wurden als Referenzwerte für die Wärmebildkamera genutzt. Es wurden mehrere Versuche durchgeführt.

Beim ersten durchgeführten Versuch wurde zunächst kein Blindstopfen eingeschraubt. Die Wärmebildkamera wurde in Stellung gebracht und es wurde eine Aufnahme vom Grundzustand der Platte (kalt) gemacht. Anschließend wurde an einer definierten Stelle im oberen rechten Bereich über einen Zeitraum von ca. 5 bis 7 s die Platte mittels einer Lötlampe thermisch belastet. Nach Entfernung der Wärmequelle wurden in kurzen Zeitabständen Infrarotbilder aufgenommen. Beim zweiten Versuch wurde ein Blindstopfen bis 2 mm unter die Oberfläche der Platte eingeschraubt. Dieser Abstand entspricht der Sensordicke. Beim dritten Versuch befand sich der Blindstopfen 6 mm unter der Plattenoberfläche. Durch die in den Bildern 4.86 bis 4.89 dargestellten Infrarotaufnahmen soll beispielhaft für die Versuche 1 (mit eingepresster Hülse) und 2 (mit Hülse und Blindstopfen) der zeitlich abhängige Temperaturengleich auf der Plattenoberfläche dargestellt werden.

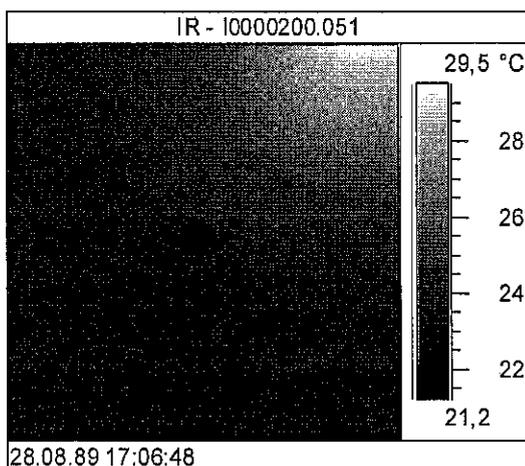


Bild 4.86: Hülse in Platte
2 s nach Erwärmung

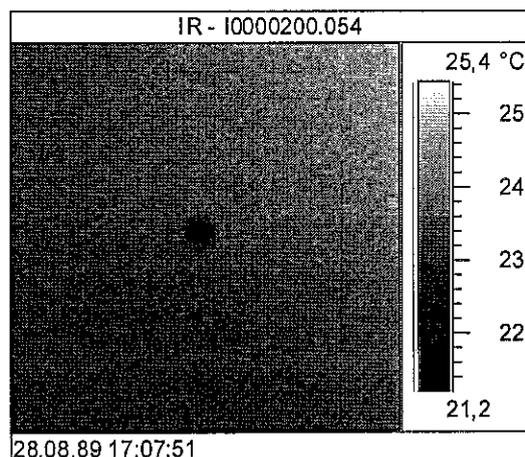


Bild 4.87: Hülse in Platte
60 s nach Erwärmung

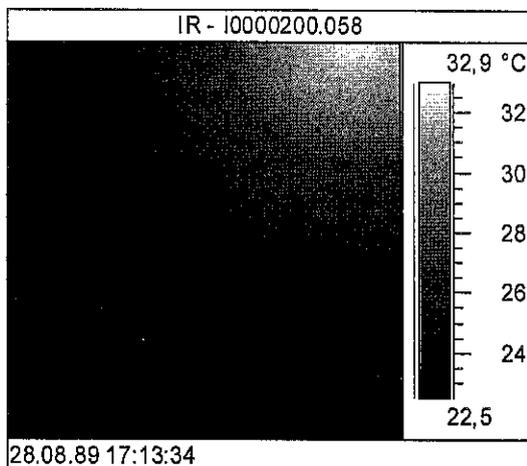


Bild 4.88: Blindstopfen in Platte
2 s nach Erwärmung

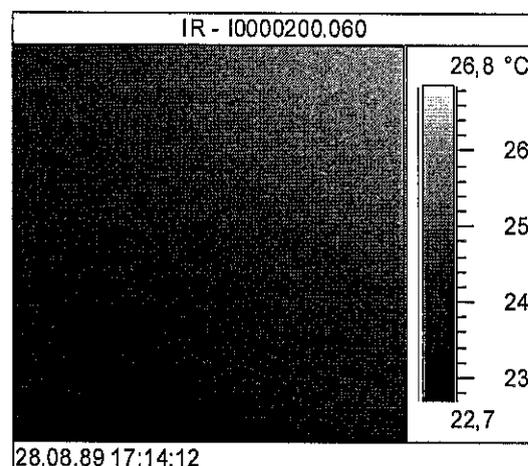


Bild 4.89: Blindstopfen in Platte
40 s nach Erwärmung

Die Bilder 4.86 und 4.87 verdeutlichen, dass durch das Einbringen einer Hülse in die Platte, auch ohne eingeschraubten Blindstopfen, der Wärmefluss nicht gestört wird, weder in der Flussrichtung noch in seiner Dichte. Es ist hinter der eingebrachten Bohrung kein „Temperaturschatten“ zu erkennen und die Wärme verteilt sich gleichmäßig weiter. Auch beim Versuch 2 zeigt sich, dass ein ungehinderter Temperatúrausgleich an der Position der Hülse mit eingeschraubtem Blindstopfen stattfinden kann. Der Wärmefluss wird nicht gestört. Zu erkennen ist in Bild 4.89, dass auf Grund ihrer etwas niedrigeren Wärmeleitfähigkeit, sich die aus Messing gefertigte Hülse und der Blindstopfen etwas langsamer erwärmen. Nach einigen Sekunden ist jedoch auch hier der Temperatúrausgleich vollzogen, weswegen auf dem Infrarotbild die Position des Adapters nur schwer zu erkennen ist.

Zusammenfassend kann im Ergebnis aller drei durchgeführten Versuche die Aussage getroffen werden, dass in Bezug auf einen ungehinderten Temperatúrausgleich die eingebauten Adapter sich nicht störend auswirken.

Durch die Untersuchungen konnten die erforderlichen Grundlagen für eine physiologisch relevante Instrumentierung des Dummy geschaffen werden.

Als perspektivisch zu realisierende Lösungsschritte für eine vollkommene Instrumentierung des Dummy und zur Realisierung der Funktionalität des Gesamtsystems werden gesehen:

⇒ Auf der Grundlage des erstellten Funktionsmusters ist die erforderliche Stückzahl an Adaptern zu fertigen.

- ⇒ Komplettierung aller vorhandenen Messstellen mit einer ausreichenden Anzahl an Wärmeflussensoren.
- ⇒ Die Adapter-Hülsen sind funktionsgerecht in die Dummyoberfläche zu integrieren. Bei den Bohrungen in die Dummyoberfläche ist auf deren orthogonale Einbringung zu achten.
- ⇒ Nach erfolgter Instrumentierung des Dummy sind Versuchsreihen zur Überprüfung der Funktionalität des Gesamtsystems durchzuführen.
- ⇒ Die erhaltenen Messwerte sind mit den real am Dummy auftretenden Temperaturen durch Vergleichsmessungen zu überprüfen.
- ⇒ Alle vorhandenen Messstellen sind im Softwareprogramm Temp View zu programmieren. Versuche zur realitätsnahen Erfassung und Auswertung der Messwerte in Verbindung mit der Prozessvisualisierung sind durchzuführen.

5 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Rahmen der Realisierung des Forschungsvorhabens waren experimentelle Untersuchungen zu führen, die Aufschluss geben sollten über die Eignung der Komponenten eines konzipierten Versuchsstandes für einen Materialtest zur Bewertung der Eigenschaften persönlicher Schutzausrüstung bei Einwirkung von Stichflammen.

Untersucht wurden in diesem Zusammenhang

- Die Propangasversorgungsanlage für die Brenneinrichtung unter dem Aspekt der Veränderung ihrer Parameter durch Umwelteinflüsse.
- Die Leistungsabhängigkeit der Brenner in Abhängigkeit von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner.
- Die thermischen Parameter der Brenner in Abhängigkeit von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner und den möglichen Positionen der Brenner zum zu beflammenden Objekt.
- Die physiologisch relevante Instrumentierung eines Dummy mit Wärmeflussensoren zur Quantifizierung der thermischen Beanspruchung durch Stichflammen.

Im Ergebnis der vorgenannten Untersuchungen können folgende grundsätzliche Aussagen getroffen werden:

1. Der konzipierte Versuchsstand ist grundsätzlich geeignet für den angedachten Verwendungszweck, Komponenten persönlicher Schutzausrüstung und Komplettausrüstungen einer Stichflammenbelastung auszusetzen und diese im Ergebnis des vorgenommenen Materialtests aus thermischer Sicht zu bewerten.
2. Die gegenwärtige Variante der Gasversorgung der Brenner über nicht eingebettete und daher den Witterungsbedingungen ausgesetzte Tanks realisiert bisher noch nicht die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse von Untersuchungen. Es ist perspektivisch zu gewährleisten, dass die Brenneingangsdrücke unabhängig sind vom sich verändernden Dampfdruck des Propangases in den Tanks durch die Umweltbedingungen. Hier bieten sich einerseits gastechnische Lösungen an, andererseits aber auch andere Aufstellungsvarianten der die Gasversorgung übernehmenden Tanks (z.B. eingebettete oder unterirdische Tanks). Die bestehende Gasversorgungsvariante im Stadium der Grundlagenuntersuchungen ist an sich sowieso nur als Übergangsvariante zu betrachten. Im Zuge der Neubebauung des Ausbildungs- und Übungsgeländes der Brandschutz- und Katastrophenschutzschule (BKS) wird es eine zentrale Gasversorgung geben, über die dann auch die Brenner des Versuchsstandes für den Materialtest versorgt werden. Damit dürften die derzeit bestehenden Probleme dann gelöst sein.
3. Es hat sich erwiesen, dass die 4 untersuchten Einzelbrenner in ihren Parametern nicht vollkommen identisch sind. Dieses äußert sich vor allem durch unterschiedliche Druckverhältnisse, die sich wiederum auf die jeweiligen Flammenbilder und damit auf die durch sie erzeugte thermische Beanspruchung auswirkt. Dieses Problem ist jedoch beherrschbar, da hier lediglich entsprechende Einstellungen an den Regeleinrichtungen der einzelnen Brenner vorgenommen werden müssen.
4. Die lastabhängigen Brenneruntersuchungen haben ergeben, dass sich bei Inbetriebnahme mehrerer Brenner die Parameter der Einzelbrenner derart ändern, dass ihr Eingangsdruck (gegenüber dem Einzelbrennerbetrieb) reduziert wird. Damit verändert sich auch hier das Flammenbild und damit die thermische Leistung der Brenner. Hinter diesem Problem verbirgt sich ein Mangel im gegenwärtigen

Gasversorgungskonzept, der perspektivisch mit der unter 2. genannten Maßnahme ebenfalls behoben sein dürfte.

5. Zur Frage der thermischen Parameter der Brenner in Hinblick auf die Erfordernisse der realitätsnahen Nachbildung der Parameter von Stichflammen und einem Flash Over kann zum Ausdruck gebracht werden, dass sowohl bei den Einzelbrenneruntersuchungen als auch bei den Untersuchungen mit Brennerkombinationen Temperaturen am Beflammungsobjekt erreicht wurden, die diesen Parametern entsprachen, ja sogar über diesen lagen. Die höchste thermische Beanspruchung konnte mittels der symmetrischen Brenneranordnung erzielt werden. Eine entsprechend variable thermische Belastung kann einerseits über die Abstandsregelung der Brenner zum Beflammungsobjekt realisiert werden, andererseits ist dieses möglich durch Variation der Anzahl der Brenner und durch deren variable Anordnung.
6. Mit dem Bau des Fertigungsmusters eines Adapters zur Instrumentierung des Dummy mit Wärmeflussensoren auf der Grundlage umfangreiche Untersuchungen und Experimente wurden die Voraussetzungen für eine messtechnische Erfassung und Auswertung der durch Stichflammen hervorgerufenen thermischen Beanspruchung geschaffen. Zugleich wird damit eine exakte Bewertung der thermischen Schutzwirkung persönlicher Schutzausrüstung möglich werden.

Insgesamt kann im Ergebnis der Untersuchungen zum Forschungsvorhaben eingeschätzt werden, dass die grundlegenden Voraussetzungen zur Realisierung des Verfahrens eines Materialtests zur Bewertung der Eigenschaften persönlicher Schutzausrüstung geschaffen wurden. Es bedarf noch, die aufgezeigten Mängel abzustellen und die Funktionsfähigkeit des Verfahrens in allen seinen Komponenten einem umfangreichen Test zu unterziehen.

VERZEICHNIS DER LITERATUR

- [ANR_online] Lackner, Chr. K.; Schweiberer, L.; Erhard, J.: Erstbehandlungsstrategie bei Verbrennungen, Arbeitskreis Notfallmedizin und Rettungswesen der Ludwig-Maximilians-Universität München,
www.anr.de/anr_online/richtlinien/verbrennung.html
- [AWMF online] Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaft, Leitlinien für thermische und chemische Verletzungen, AWMF-Leitlinien-Register Nr. 044/001, Januar 1999
www.rz.uni-duesseldorf.de/WWW/AWMF
- [DIN EN ISO 13506] Prüfverfahren für eine vollständige Bekleidung, Normenausschuss Persönliche Schutzausrüstung (NPS), DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Feb. 1990
- [Grabski et al. 01] Grabski, Reinhard; Pasch, Ulrich; Starke, Horst: Verhalten moderner Feuerwehr-Einsatzkleidung bei thermischer Beanspruchung unter Feuchte und Nässe. Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 2001
- [HuPF 99] Herstellungs- und Prüfungsbeschreibung für eine universelle Feuerwehrsutzhleidung. Arbeitsgruppe Feuerwehrsutzhleidung, Hessisches Ministerium des Innern und für Sport, 1999, Stand 8/99
- [Kurth 75] Kurth, Klaus: Flüssiggashandbuch, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1975
- [Lippert 98] Lippert, Hans: Praxis der Chirurgie, Allgemein- und Viszeralchirurgie, Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme, Georg Thieme Verlag, 1998
- [Nicolai 01_1] Nicolai, Marco: Grundlagen für den Aufbau eines Versuchsplatzes zur Simulation einer Stichflammenbelastung von Feuerwehrsutzhleidung mit prozessvisualisierender Messwerterfassung und – auswertung. Technische Fachhochschule Berlin, Studiengang Sicherheitstechnik, Praktikumsbericht, 2001

VERZEICHNIS DER LITERATUR

- [Nicolai 01_2] Nicolai, Marco: Verfahren zur physiologisch relevanten Instrumentierung eines thermisch beanspruchten Dummys mittels Wärmeflussensoren. Technische Fachhochschule Berlin, Studiengang Sicherheitstechnik, Diplomarbeit, 2001
- [Pasch 00] Pasch, Ulrich: Parameterbestimmung einer Beflammungseinrichtung. Zwischenbericht IMK 2000, Heyrothsberge, 2000

VERZEICHNIS DER BILDER

Bild		SEITE
2.1	Schematische Darstellung des Untersuchungsverfahrens	5
3.1	Brenneranordnung einseitig	6
3.2	Brenneranordnung symmetrisch	6
3.3	Versuchsaufbau mit Brennereinrichtung und Dummy	8
3.4	Seitenansicht eines Brenners	8
3.5	Brenner, Ansicht von hinten	8
3.6	Ansteuereinheit für 4 Brenner	8
3.7	Gaszuführung zu den Brennern	8
4.1	Tanks der Brennereinrichtung	10
4.2	Temperaturabhängigkeit des Dampfdruckes von Propan	10
4.3	Wetterstation CWS 7	11
4.4	Thermoelement auf Tankoberfläche	11
4.5	Infrarotbild der Propangastanks	12
4.6	Druckaufnehmer von Pero	12
4.7	Therm 5500-3, Pero Digitalanzeige und USV	12
4.8	Tageszeitlich Darstellung der Messgrößen (Beispiel: 02.11.2000)	13
4.9	Darstellung der Messgrößen über mehrere Tage (01.11. bis 08.11.2000)	14
4.10	Zwei Brenner in Betrieb	16
4.11	Drei Brenner in Betrieb	16
4.12	Vier Brenner in Betrieb	16
4.13	Brennereingangsdrücke als Funktion der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner	16
4.14	Brenner vor Bekleidungssimulator (40 cm)	18
4.15	Infrarotbild Bekleidungssimulator (40 cm)	18
4.16	Brenner in Betrieb (40 cm)	18
4.17	Infrarotbild Flamme (40 cm)	18
4.18	Brenner vor Bekleidungssimulator (60 cm)	19
4.19	Infrarotbild Bekleidungssimulator (60 cm)	19

VERZEICHNIS DER BILDER

Bild	SEITE
4.20 Brenner in Betrieb (60 cm)	19
4.21 Infrarotbild Flamme (60 cm)	19
4.22 Brenner vor Bekleidungssimulator (100 cm)	19
4.23 Infrarotbild Bekleidungssimulator (100 cm)	19
4.24 Brenner in Betrieb (100 cm)	19
4.25 Infrarotbild Flamme (100 cm)	19
4.26 Position des Brenners zum Messständer.....	22
4.27 Messständer	22
4.28 Symmetrische Anordnung von 4 Brennern	22
4.29 Einseitige Anordnung von 4 Brennern	23
4.30 Einseitige Anordnung von 3 Brennern	23
4.31 Einseitige Anordnung von 2 Brennern	23
4.32 EB – Temperaturen an den Messstellen – 100 cm	24
4.33 EB – Temperaturen an den Messstellen – 80 cm	24
4.34 EB – Temperaturen an den Messstellen – 60 cm	24
4.35 EB – Temperaturen an den Messstellen – 40 cm	24
4.36 Radiometer mit Kühlung	26
4.37 Messständer schematisch	26
4.38 Messständer	26
4.39 Versuchsaufbau Einzelbrennerbetrieb	26
4.40 Wärmestrahlungsmessung – Auswertzeitraum = 20 s	28
4.41 Wärmestrahlungsmessung – Auswertzeitraum = 8 s	29
4.42 BK - Temperaturen an den Messstellen – 100 cm	32
4.43 BK - Temperaturen an den Messstellen – 80 cm	32
4.44 BK - Temperaturen an den Messstellen – 60 cm	32
4.45 Brenner vor Bekleidungssimulator (60 cm)	33
4.46 Infrarotbild Bekleidungssimulator (60 cm)	33
4.47 Brenner in Betrieb (60 cm)	33

VERZEICHNIS DER BILDER

Bild	SEITE
4.48	Infrarotbild Flamme (60 cm) 33
4.49	Zwei Brenner in Betrieb 34
4.50	Drei Brenner in Betrieb 34
4.51	Vier Brenner in Betrieb 34
4.52	Wärmestrahlungsmessung – Auswertezeitraum = 20 s 37
4.53	Wärmestrahlungsmessung – Auswertezeitraum = 8 s 37
4.54	3D – OT Profil 44
4.55	Der zu instrumentierende Dummy 45
4.56	Verschließbare Öffnung im Beinbereich 45
4.57	Wärmeflussensor mit Anschlusskabel 46
4.58	MEDTHERM [®] Wärmeflussensor 46
4.59	symmetrische Brenneranordnung 49
4.60	einseitige Brenneranordnung 49
4.61	Messstellen am Dummy 50
4.62	Dummy – Vorderansicht vor der Beflammung 53
4.63	Dummy – Vorderansicht 4 s nach der Beflammung 53
4.64	Dummy – Rückansicht - 130 Sekunden nach Versuch – Rückenklappe geschlossen 53
4.65	Dummy – Rückansicht - 190 Sekunden nach Versuch – Rückenklappe geöffnet 53
4.66	Dummy – Vorderansicht vor der Beflammung 55
4.67	Dummy – Vorderansicht 4 s nach der Beflammung 55
4.68	Dummy – Vorderansicht - 20 Sekunden nach Versuch 56
4.69	Dummy – Rückansicht - 140 Sekunden nach Versuch – Rückenklappe geschlossen 56
4.70	Dummy – Rückansicht - 170 Sekunden nach Versuch – Rückenklappe geöffnet 56
4.71	Aufbau der Haut [Lippert 98] 58
4.72	Hautschädigung entsprechend der Verbrennungsgrade 60
4.73	Wärmeflussensor zwischen den beiden Messingzylindern 63

VERZEICHNIS DER BILDER

Bild	SEITE
4.74	Bedienfeld des Therm 5500 63
4.75	Versuchsauswertung am Beispiel des Versuches 1 64
4.76	Oberer Messingzylinder mit Heizschnur 65
4.77	Temperaturregler Tempat [®] -D 65
4.78	Aufgeklebter Sensor 69
4.79	Eingeschraubter Adapter 71
4.80	Adapter für Wärmeflussensor (schematisch) 71
4.81	Adapterteil Hülse 72
4.82	Adapterteil Kontermutter 72
4.83	Adapterteil Blindstopfen/Sensorträger 73
4.84	Kompletter Adapter 73
4.85	Versuchsaufbau Einbauzustand 74
4.86	Hülse in Platte 2 s nach Erwärmung 75
4.87	Hülse in Platte 60 s nach Erwärmung 75
4.88	Blindstopfen in Platte 2 s nach Erwärmung 76
4.89	Blindstopfen in Platte 40 s nach Erwärmung 76

VERZEICHNIS DER TABELLEN

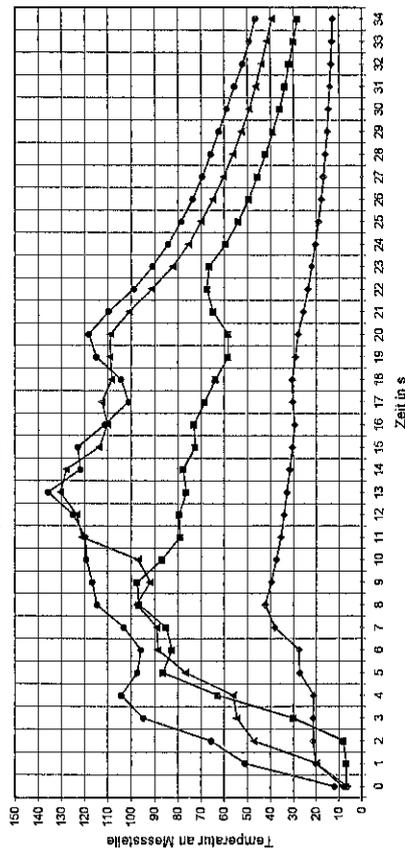
Tabelle	SEITE
4.1 Erfasste Maximal –und Minimalmesswerte über den Messzeitraum nach Bild 4.8	13
4.2 Erzielte Maximaltemperaturen bei der Einzelbrenneruntersuchung	21
4.3 Parameter der Radiometer zur Untersuchung der Wärmestrahlungsbelastung	25
4.4 Messergebnisse zur Wärmestrahlung bei Einzelbrennern – Auswertezeitraum = 20 s	27
4.5 Messergebnisse zur Wärmestrahlung bei Einzelbrennern - Auswertezeitraum = 8 Sekunden	30
4.6 Erzielte Maximaltemperaturen - Untersuchung Brennerkombination bei symmetrischer Anordnung	31
4.7 Auftretende Maximaltemperaturen (Brennerkombination einseitig ohne Bekleidungssimulator)	34
4.8 Auftretende Maximaltemperaturen (Brennerkombination einseitig mit Bekleidungssimulator)	35
4.9 Eingesetzte Brenner (einseitige Anordnung) zur Untersuchung der Wärmestrahlungsbelastung	35
4.10 Messergebnisse zur Wärmestrahlung bei Brennerkombination - Auswertezeitraum = 20 s	36
4.11 Messergebnisse zur Wärmestrahlung bei Brennerkombination – Auswertezeitraum = 8 s	38
4.12 Lastabhängige Untersuchung Einzelbrenner mit Bekleidungssimulator – Temperaturen > 800 °C	40
4.13 Lastabhängige Untersuchung Einzelbrenner mit Bekleidungssimulator – Abstand 40 cm *) - Temperaturen > 800 °C	41
4.14 Erzielte Maximaltemperaturen durch den Einsatz von Brennerkombinationen	42
4.15 Durchschnittswerte zur Wärmestrahlung bei Einzelbrennern	43
4.16 Durchschnittswerte zur Wärmestrahlung bei Brennerkombinationen	43
4.17 Technische Daten des Wärmeflussensors	47
4.18 Durchgeführte Versuche im Überblick	51
4.19 Maximaltemperaturen bei Versuchsteil 1	52
4.20 Maximaltemperaturen bei Versuchsteil 2	54
4.21 Maximaltemperaturen bei Versuchsteil 3	55

VERZEICHNIS DER TABELLEN

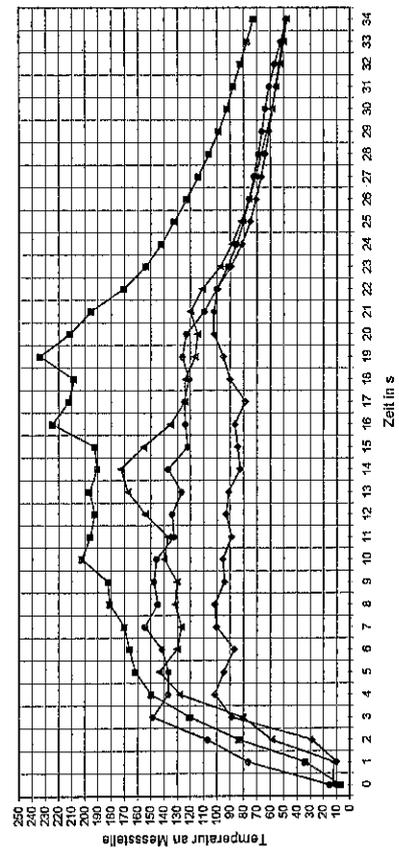
Tabelle		SEITE
4.22	Einteilung der Verbrennungsgrade [AWMF online]	59
4.23	Wärmeleitfähigkeiten und Schichtdicken der Hautschichten	60
4.24	Grad der Verbrennung in Abhängigkeit vom Wärmefluss	61
4.25	Wärmeleitzahlen Versuche 1 bis 4	64
4.26	Wärmeleitzahlen Versuche 5 bis 7	66
4.27	Versuche im Überblick	67

Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 1 - ohne Bekleidungsimulator

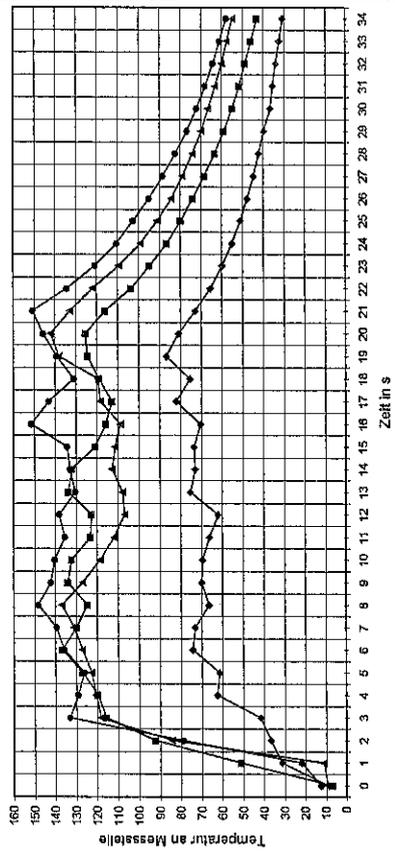
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 1 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 1



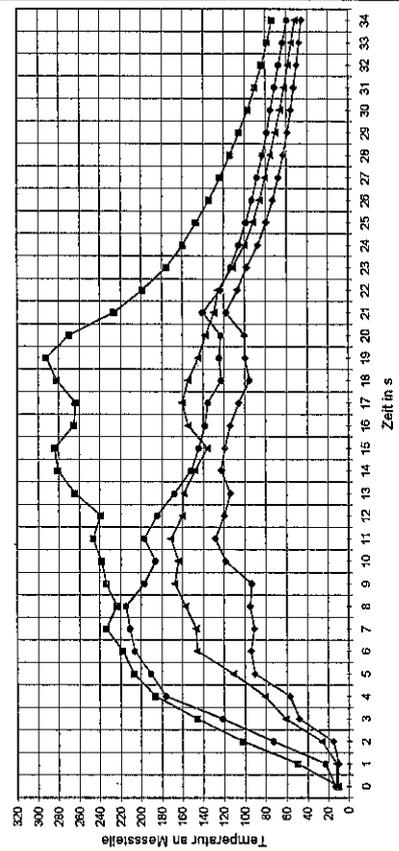
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 60 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 1



Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 80 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 1

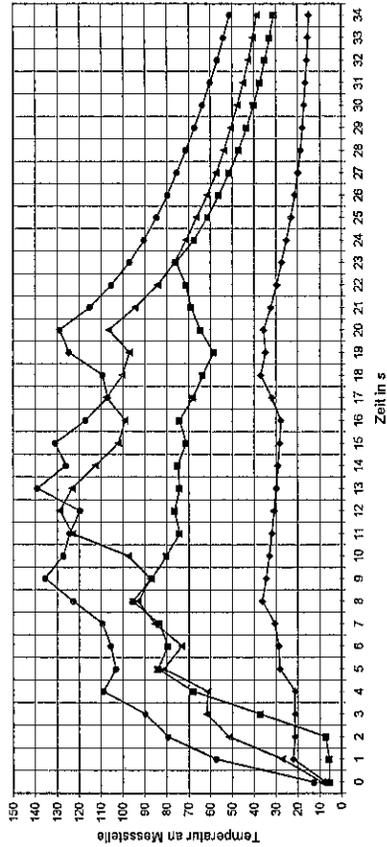


Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 1

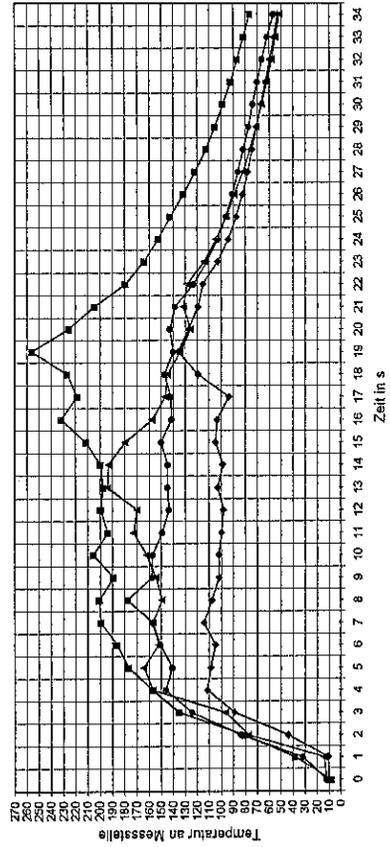


Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 2 - ohne Bekleidungsimulator

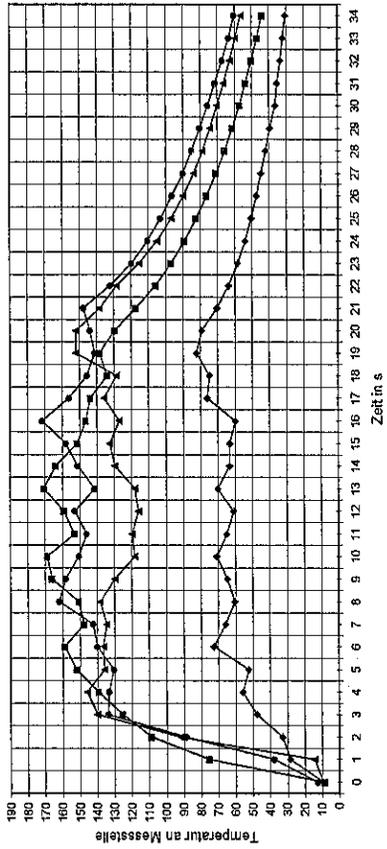
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 1 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 2



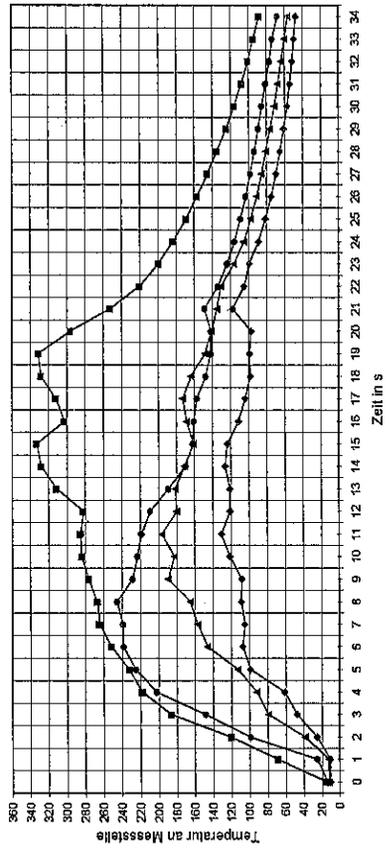
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 60 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 2



Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 80 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 2

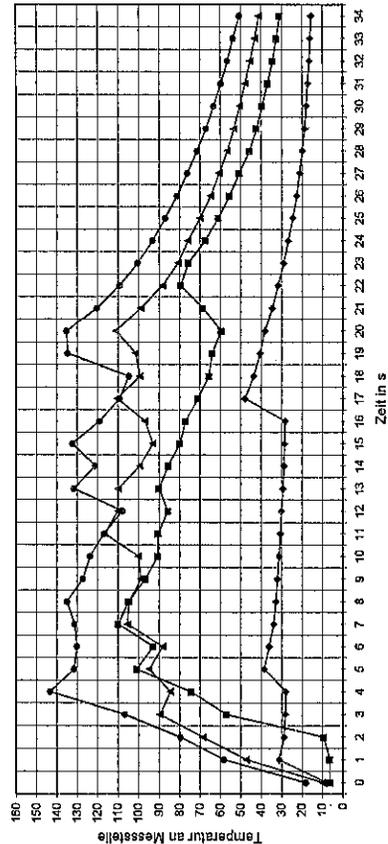


Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 2



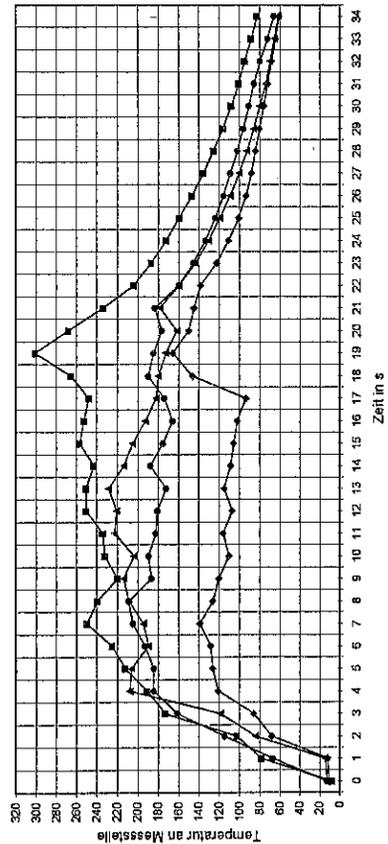
Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 3 - ohne Bekleidungsimulator

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 1 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 3



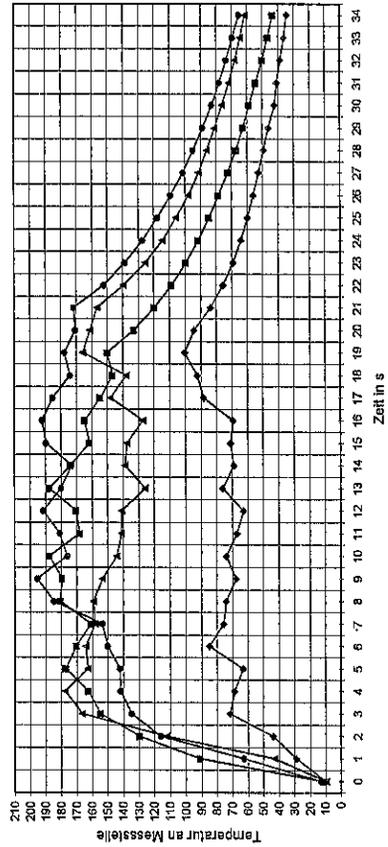
■ MsSt 03-Brenner 4 ▲ MsSt 03-Brenner 4,1,2,3 ● MsSt 03-Brenner 4,1,2 ◆ MsSt 03-Brenner 4,1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 60 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 3



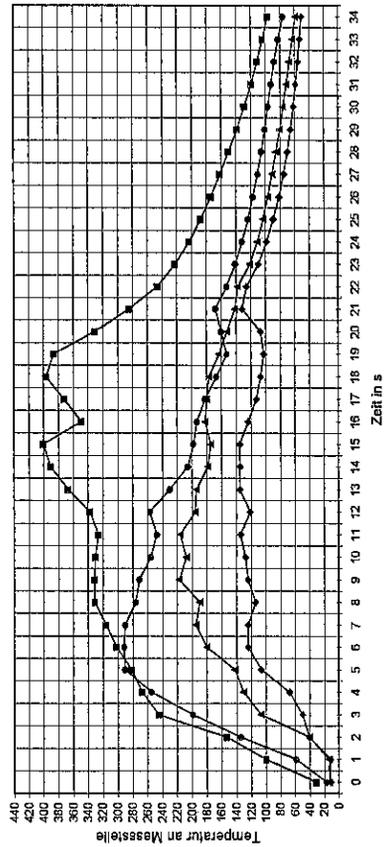
■ MsSt 03-Brenner 4 ▲ MsSt 03-Brenner 4,1,2,3 ● MsSt 03-Brenner 4,1,2 ◆ MsSt 03-Brenner 4,1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 80 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 3



■ MsSt 03-Brenner 4 ▲ MsSt 03-Brenner 4,1,2,3 ● MsSt 03-Brenner 4,1,2 ◆ MsSt 03-Brenner 4,1

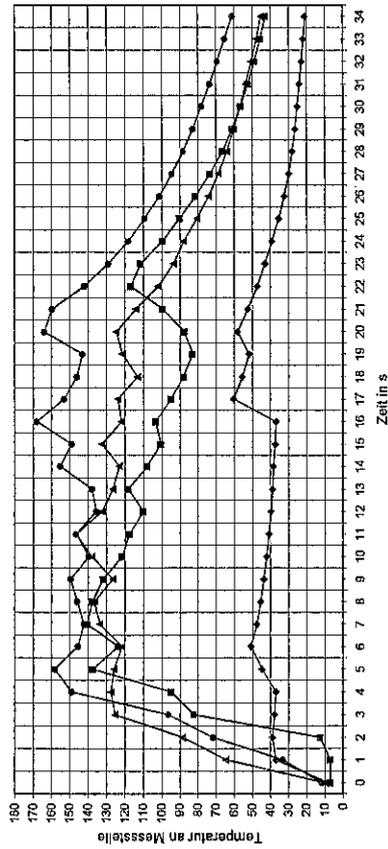
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 3



■ MsSt 03-Brenner 4 ▲ MsSt 03-Brenner 4,1,2,3 ● MsSt 03-Brenner 4,1,2 ◆ MsSt 03-Brenner 4,1

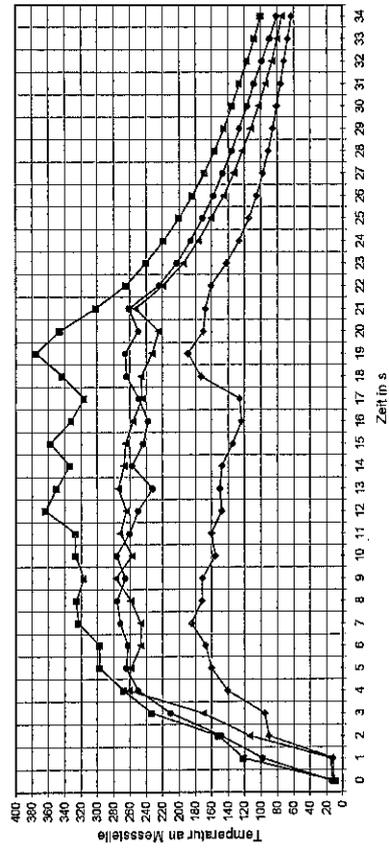
Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 4 - ohne Bekleidungsimulator

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 1 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 4



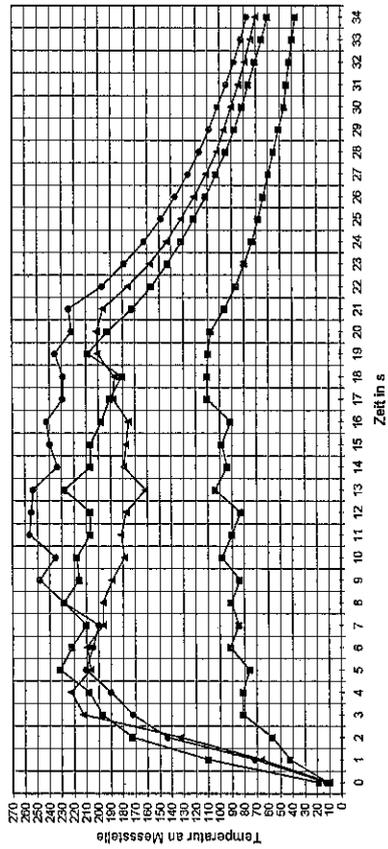
— MsSt 04-Brenner 4 — MsSt 04-Brenner 4,1,2,3 — MsSt 04-Brenner 4,1,2 — MsSt 04-Brenner 4,1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 60 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 4



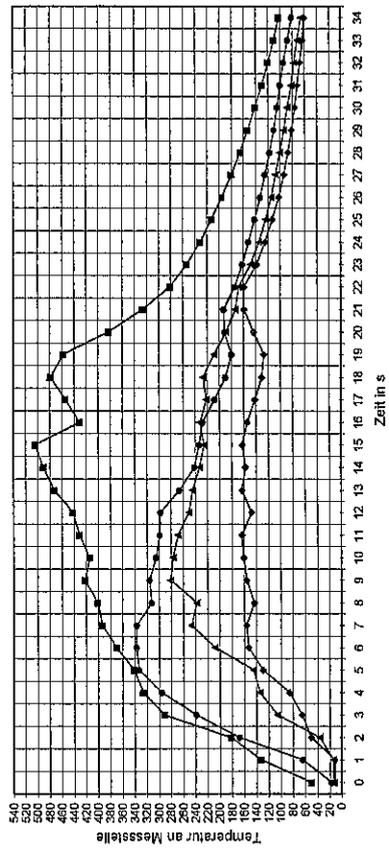
— MsSt 04-Brenner 4 — MsSt 04-Brenner 4,1,2,3 — MsSt 04-Brenner 4,1,2 — MsSt 04-Brenner 4,1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 80 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 4



— MsSt 04-Brenner 4 — MsSt 04-Brenner 4,1,2,3 — MsSt 04-Brenner 4,1,2 — MsSt 04-Brenner 4,1

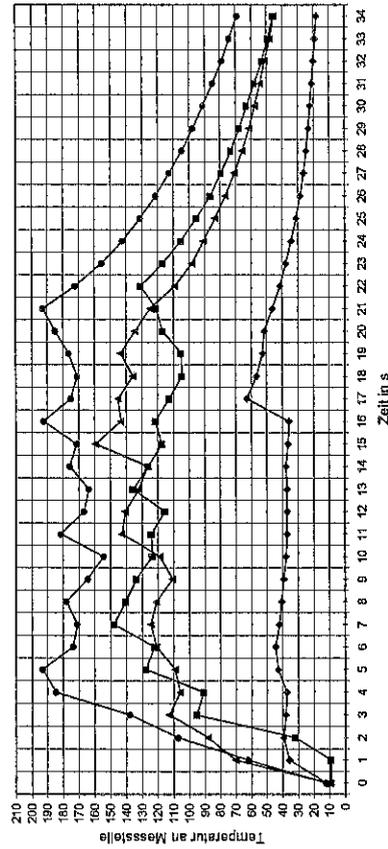
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 4



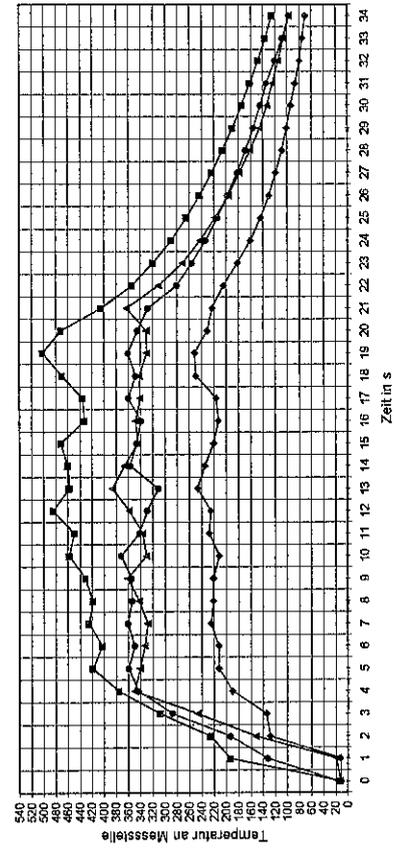
— MsSt 04-Brenner 4 — MsSt 04-Brenner 4,1,2,3 — MsSt 04-Brenner 4,1,2 — MsSt 04-Brenner 4,1

Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 5 - ohne Bekleidungsimulator

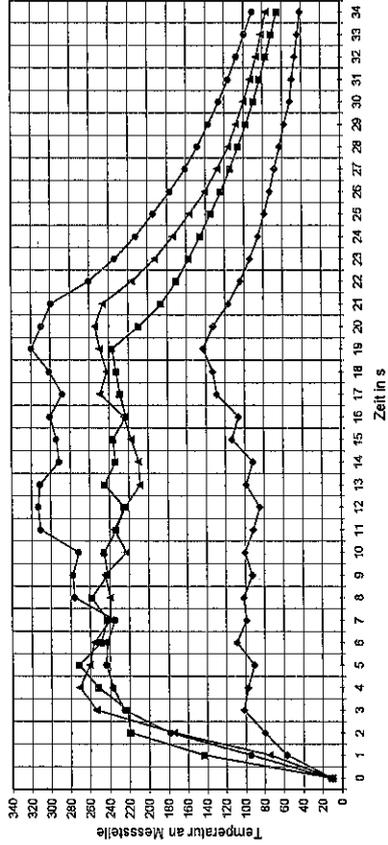
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 1 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 5



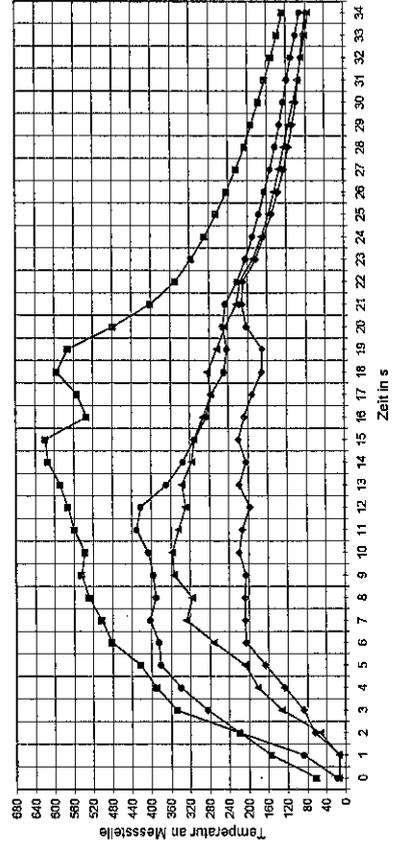
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 60 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 5



Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 80 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 5

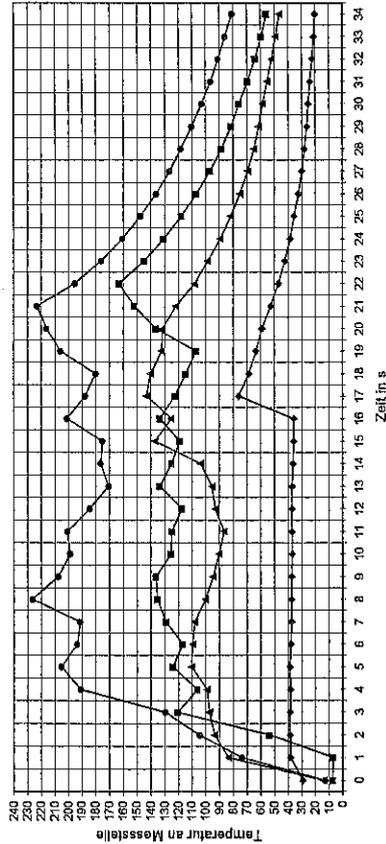


Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 5



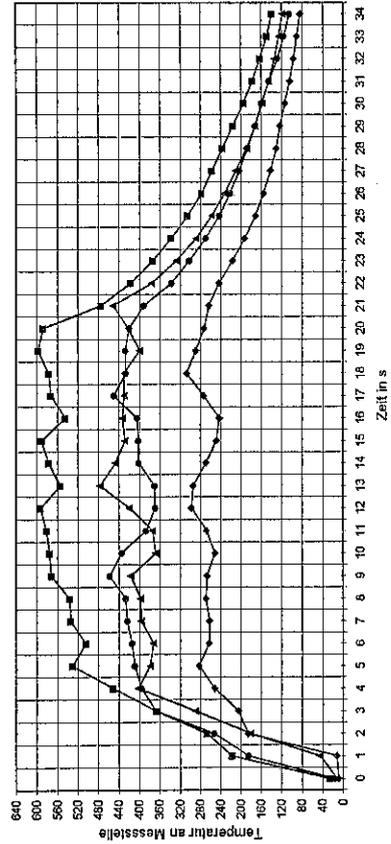
Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 6 - ohne Bekleidungssimulator

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 1 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 6



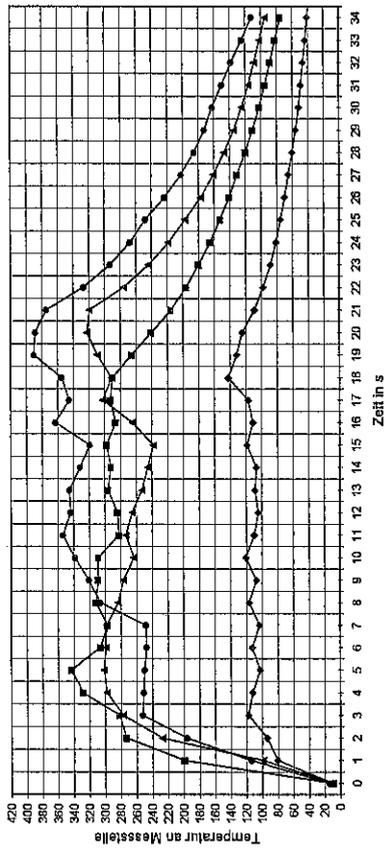
■ MsSt 06-Brenner 4 ▲ MsSt 06-Brenner 4,1,2,3 ● MsSt 06-Brenner 4,1,2 ◆ MsSt 06-Brenner 4,1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 60 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 6



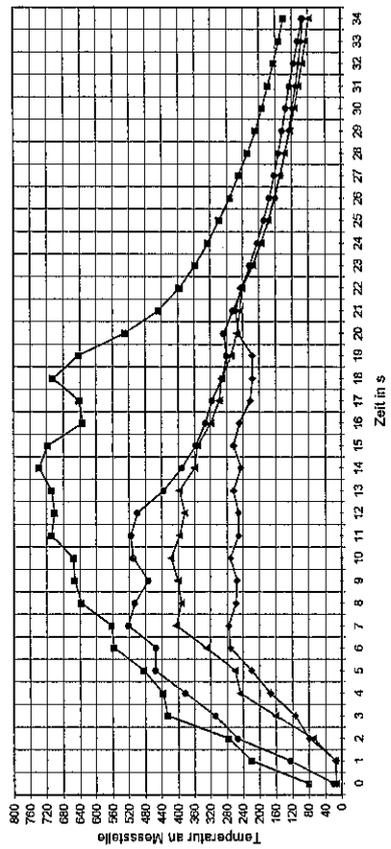
■ MsSt 06-Brenner 4 ▲ MsSt 06-Brenner 4,1,2,3 ● MsSt 06-Brenner 4,1,2 ◆ MsSt 06-Brenner 4,1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 80 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 6



■ MsSt 06-Brenner 4 ▲ MsSt 06-Brenner 4,1,2,3 ● MsSt 06-Brenner 4,1,2 ◆ MsSt 06-Brenner 4,1

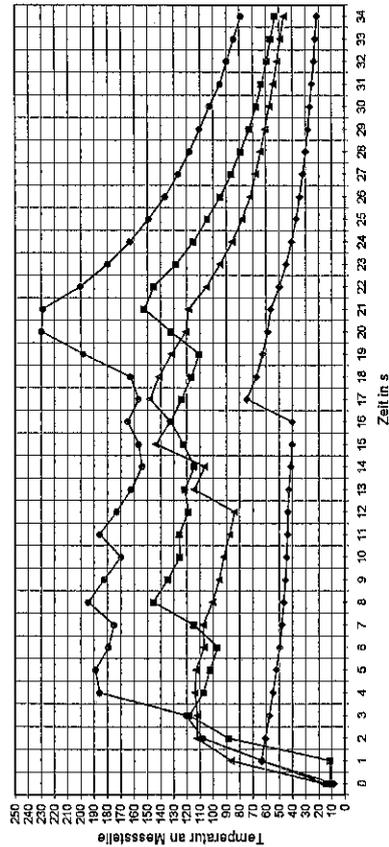
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 6



■ MsSt 06-Brenner 4 ▲ MsSt 06-Brenner 4,1,2,3 ● MsSt 06-Brenner 4,1,2 ◆ MsSt 06-Brenner 4,1

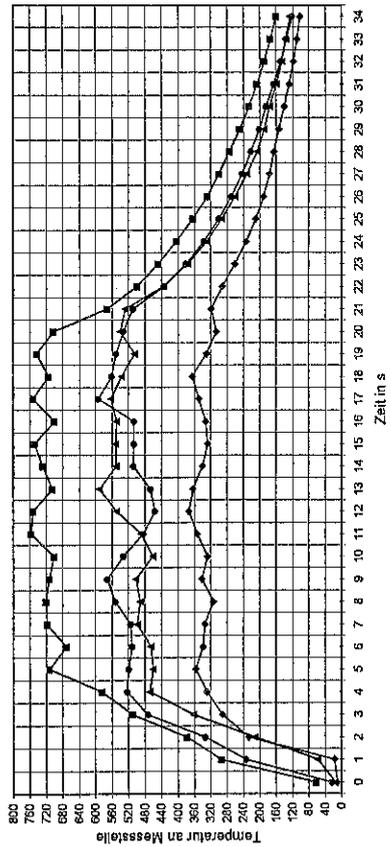
Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 7 - ohne Bekleidungsimulator

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 1 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 7



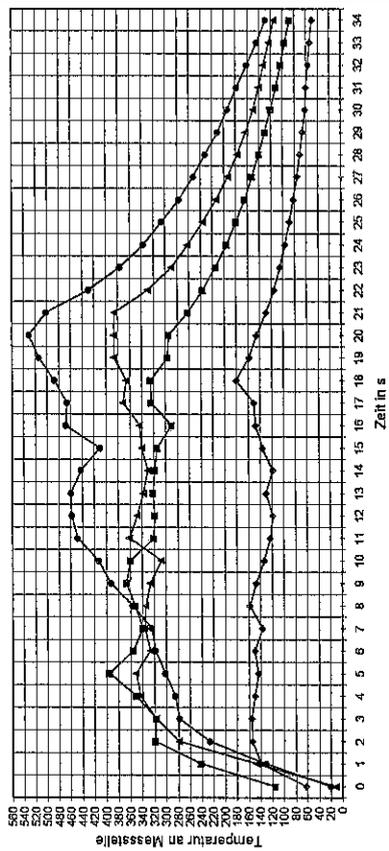
MsSt 07-Brenner 4 MsSt 07-Brenner 4,1,2,3 MsSt 07-Brenner 4,1,2 MsSt 07-Brenner 4,1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 60 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 7



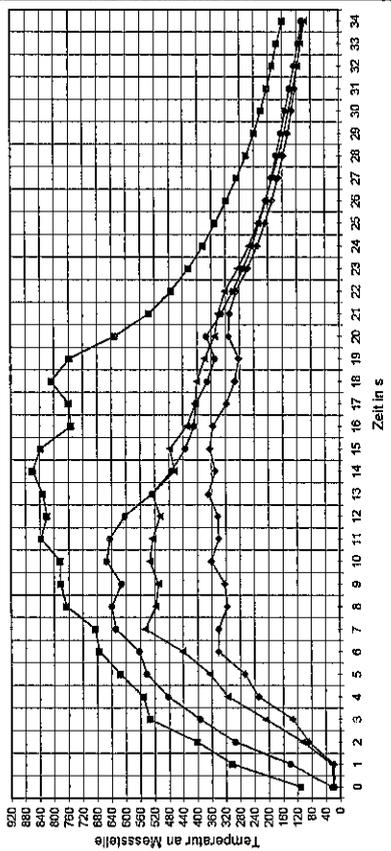
MsSt 07-Brenner 4 MsSt 07-Brenner 4,1,2,3 MsSt 07-Brenner 4,1,2 MsSt 07-Brenner 4,1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 80 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 7



MsSt 07-Brenner 4 MsSt 07-Brenner 4,1,2,3 MsSt 07-Brenner 4,1,2 MsSt 07-Brenner 4,1

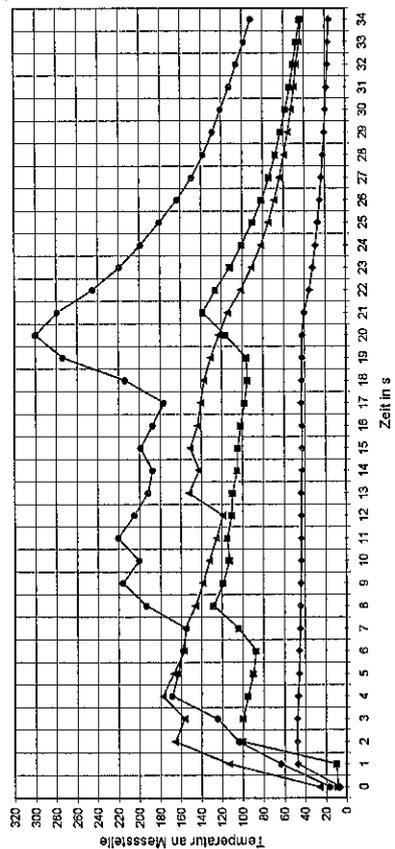
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 7



MsSt 07-Brenner 4 MsSt 07-Brenner 4,1,2,3 MsSt 07-Brenner 4,1,2 MsSt 07-Brenner 4,1

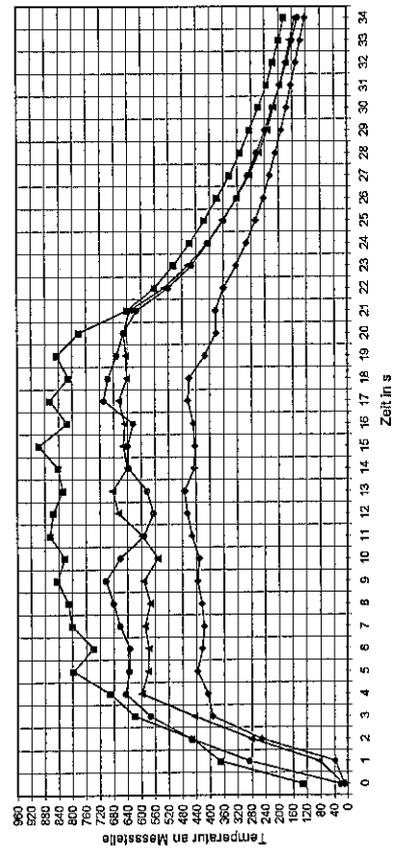
Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 8 - ohne Bekleidungsimulator

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 1 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 8



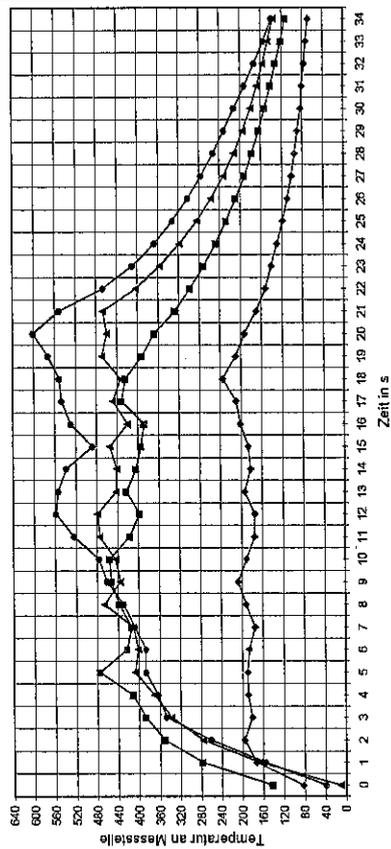
—■— MsSt 08-Brenner 4 —▲— MsSt 08-Brenner 4,1,2,3 —●— MsSt 08-Brenner 4,1,2 —◆— MsSt 08-Brenner 4,1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 60 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 8



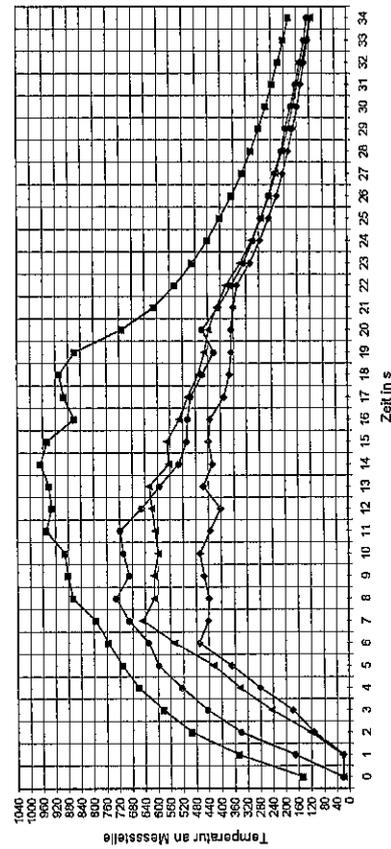
—■— MsSt 08-Brenner 4 —▲— MsSt 08-Brenner 4,1,2,3 —●— MsSt 08-Brenner 4,1,2 —◆— MsSt 08-Brenner 4,1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 80 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 8



—■— MsSt 08-Brenner 4 —▲— MsSt 08-Brenner 4,1,2,3 —●— MsSt 08-Brenner 4,1,2 —◆— MsSt 08-Brenner 4,1

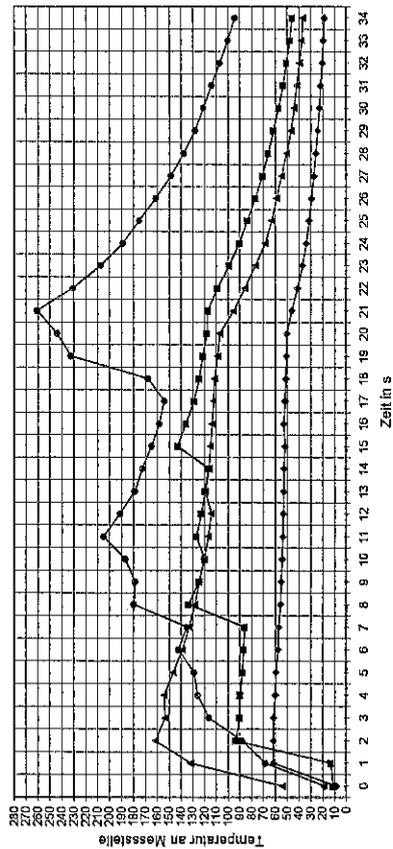
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 8



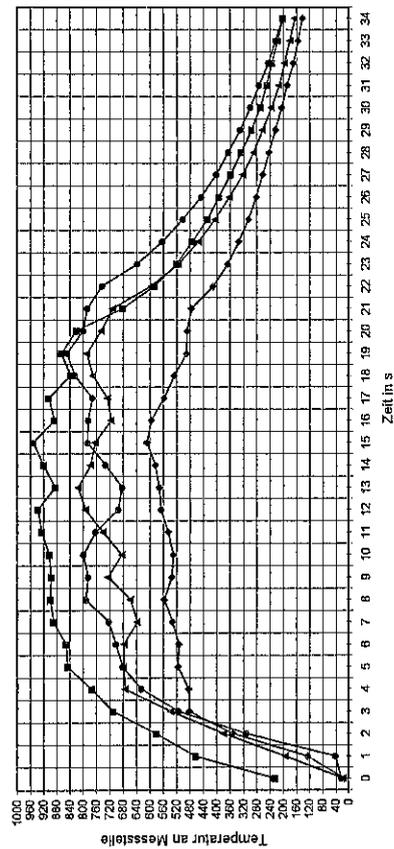
—■— MsSt 08-Brenner 4 —▲— MsSt 08-Brenner 4,1,2,3 —●— MsSt 08-Brenner 4,1,2 —◆— MsSt 08-Brenner 4,1

Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 9 - ohne Bekleidungsimulator

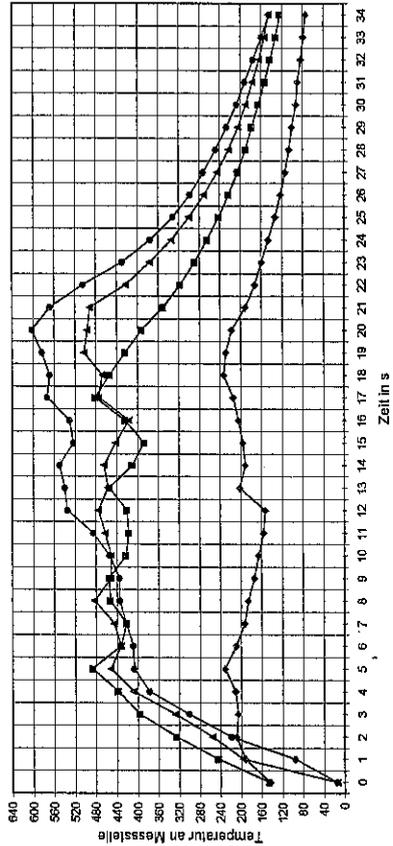
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 1 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 9



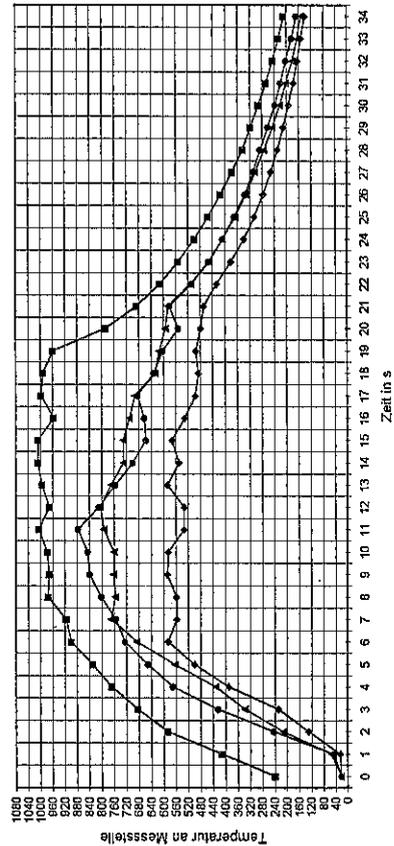
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 60 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 9



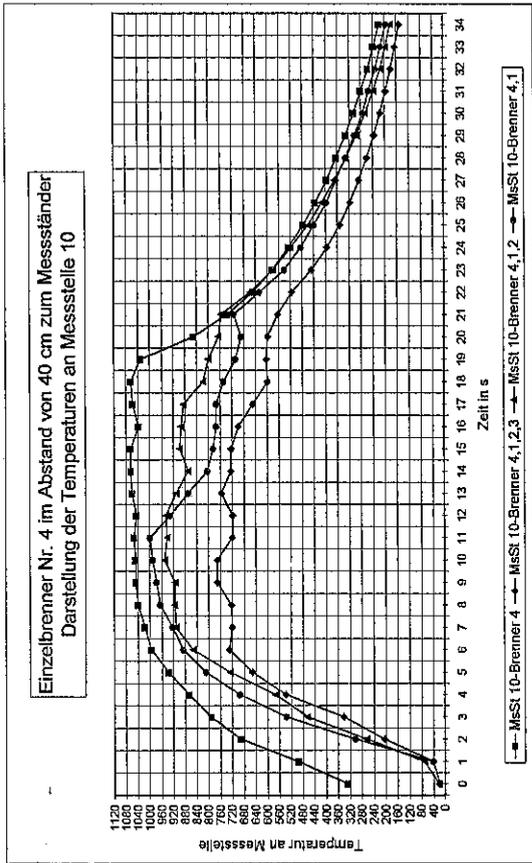
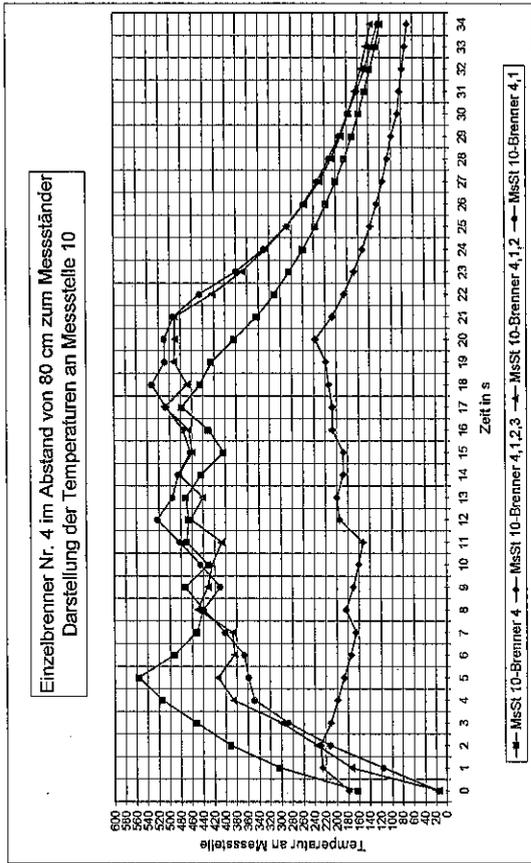
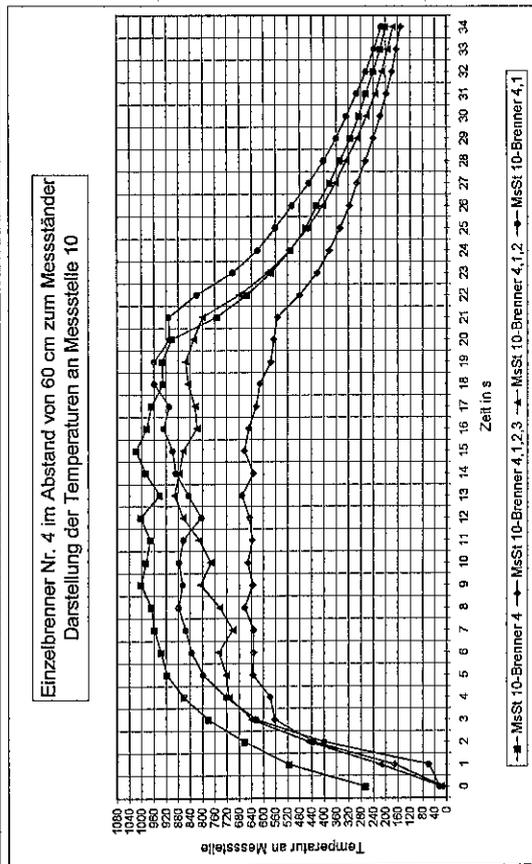
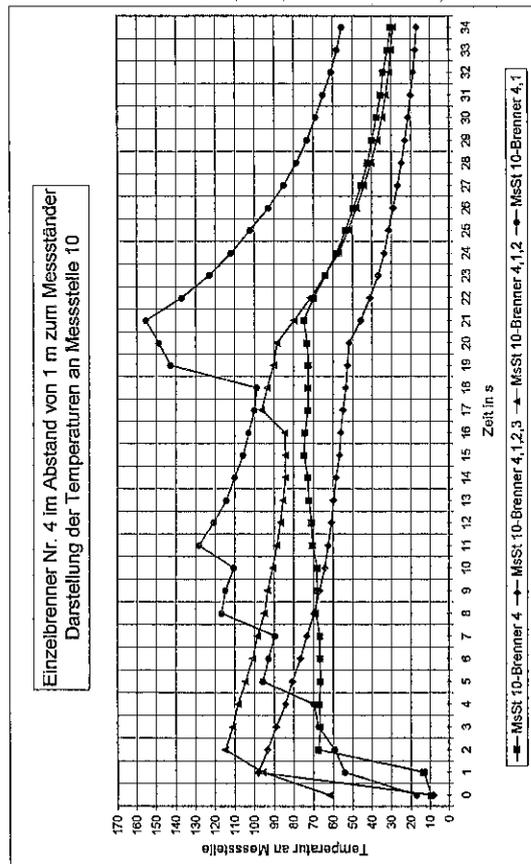
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 80 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 9



Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 9

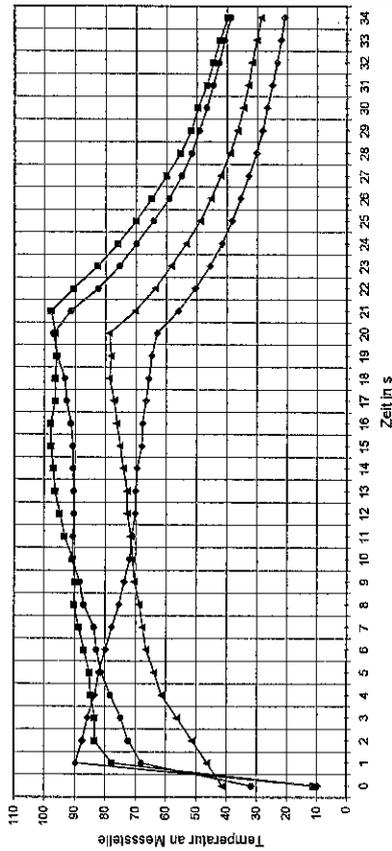


Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 10 - ohne Bekleidungsimulator

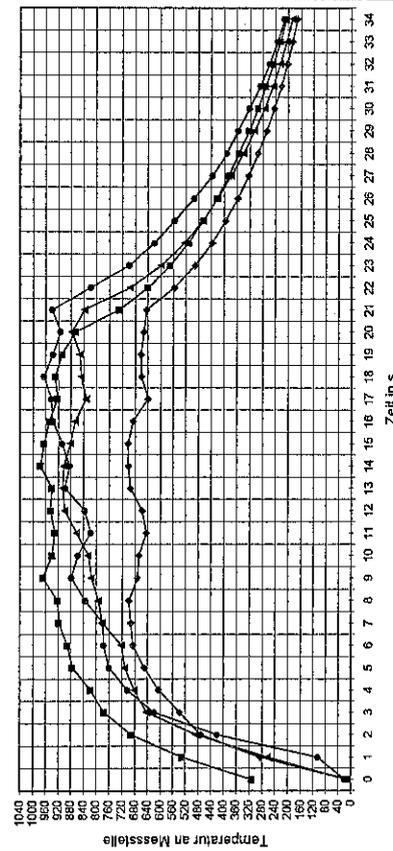


Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 11 - ohne Bekleidungsimulator

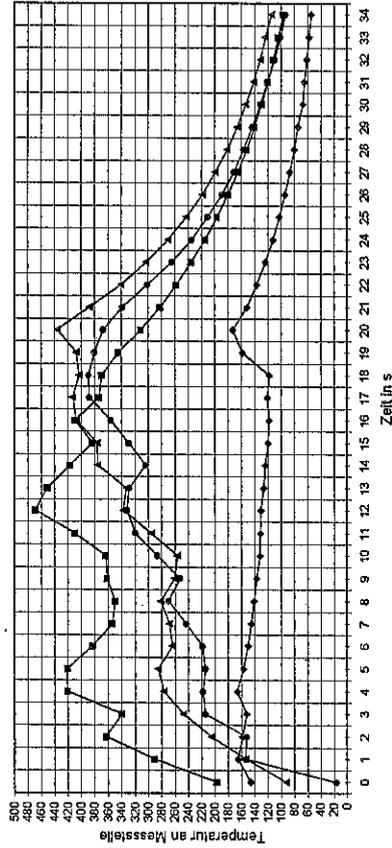
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 1 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 11



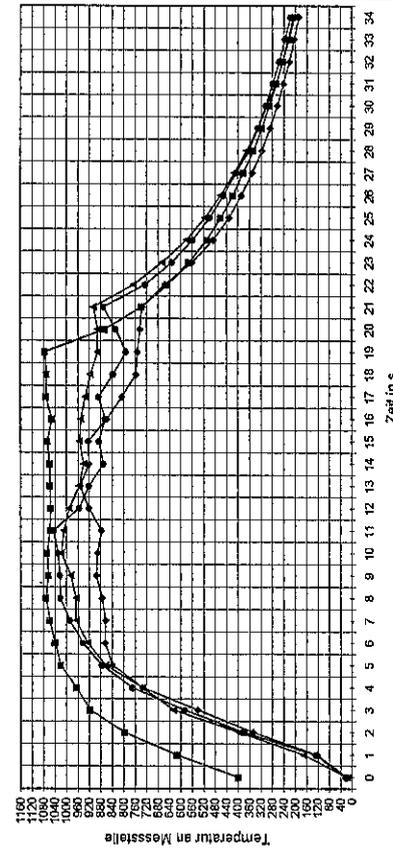
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 60 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 11



Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 80 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 11

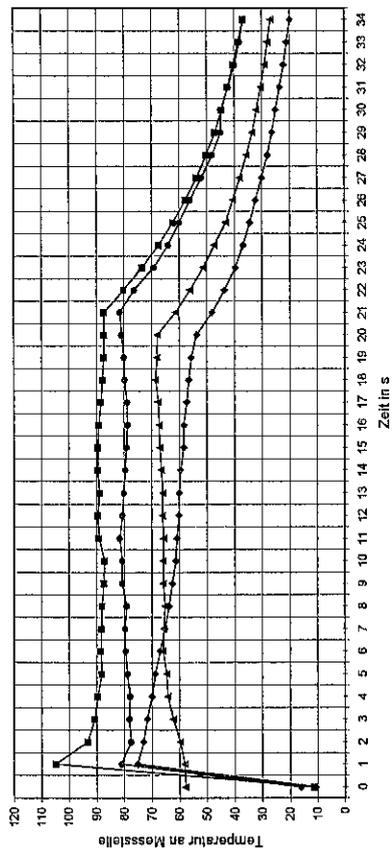


Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 11

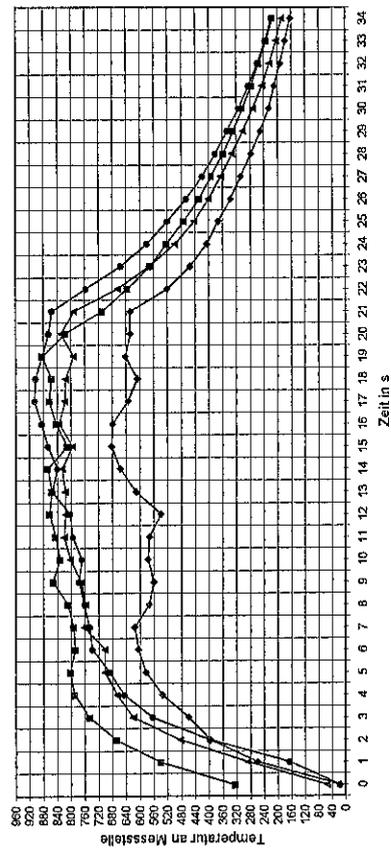


Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 12 - ohne Bekleidungssimulator

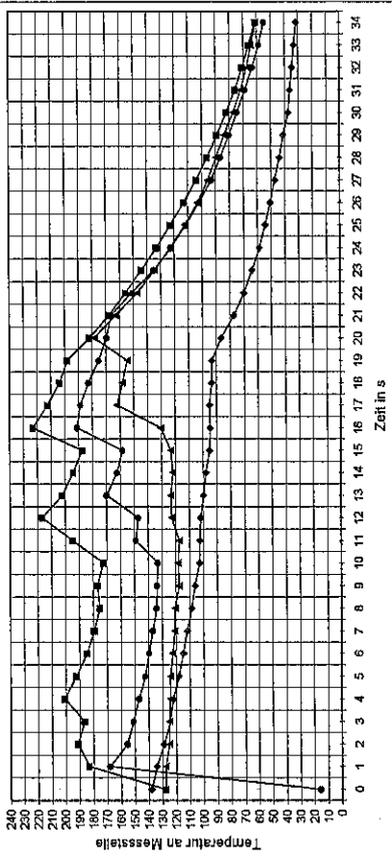
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 1 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 12



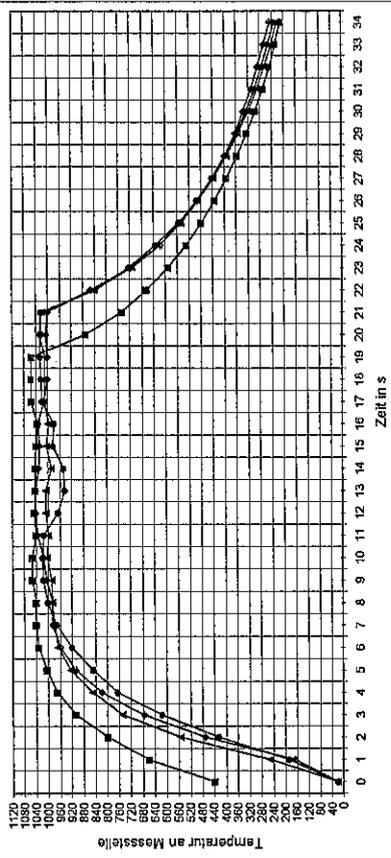
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 60 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 12



Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 80 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 12

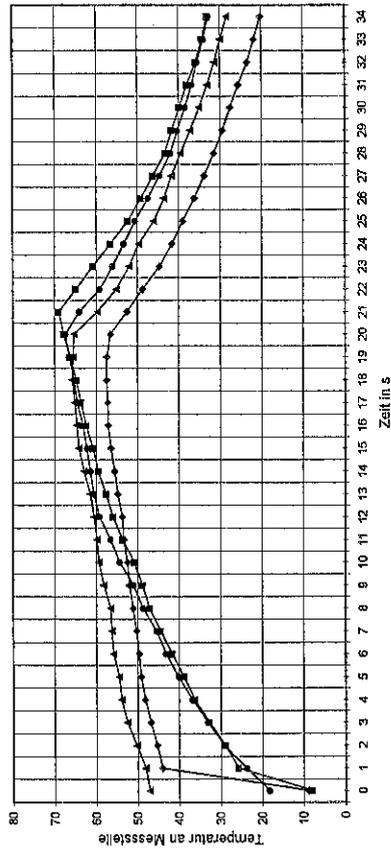


Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 12



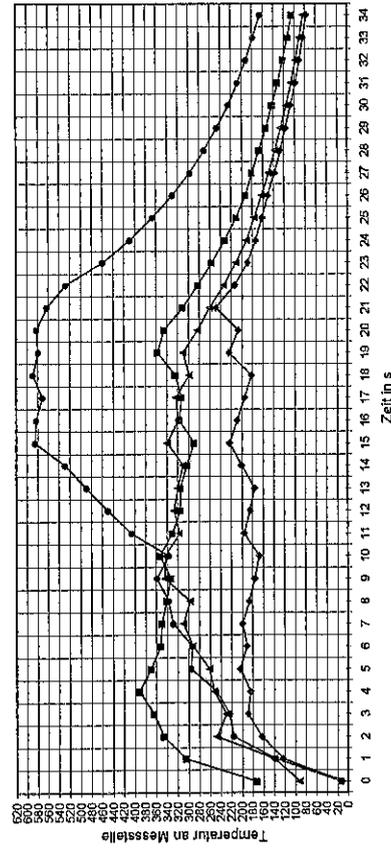
Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 13 - ohne Bekleidungsimulator

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 1 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 13



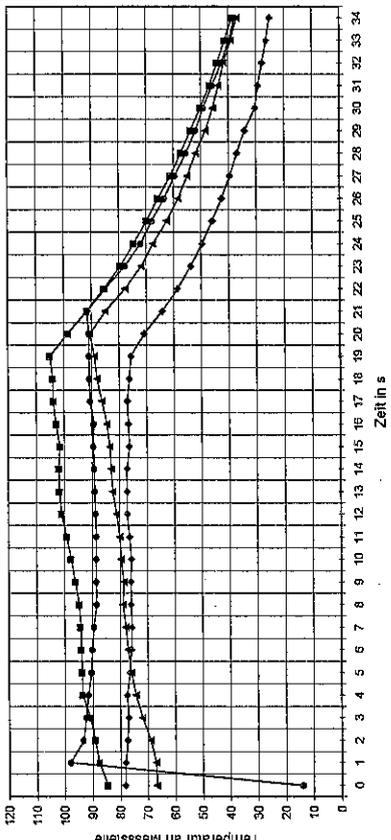
MsSt 13-Brenner 4 MsSt 13-Brenner 4,1,2,3 MsSt 13-Brenner 4,1,2 MsSt 13-Brenner 4,1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 60 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 13



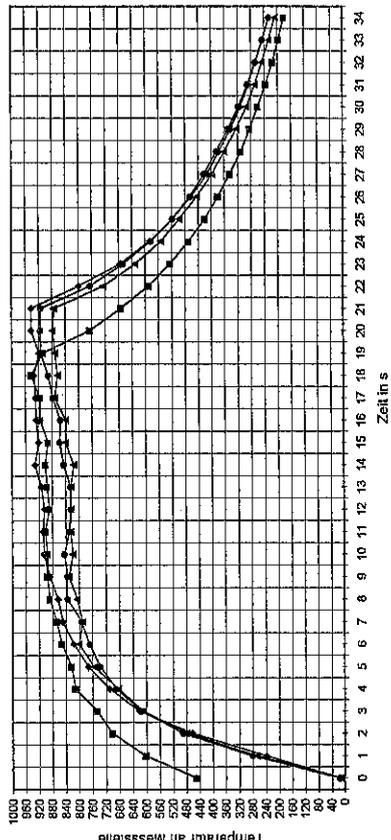
MsSt 13-Brenner 4 MsSt 13-Brenner 4,1,2,3 MsSt 13-Brenner 4,1,2 MsSt 13-Brenner 4,1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 80 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 13



MsSt 13-Brenner 4 MsSt 13-Brenner 4,1,2,3 MsSt 13-Brenner 4,1,2 MsSt 13-Brenner 4,1

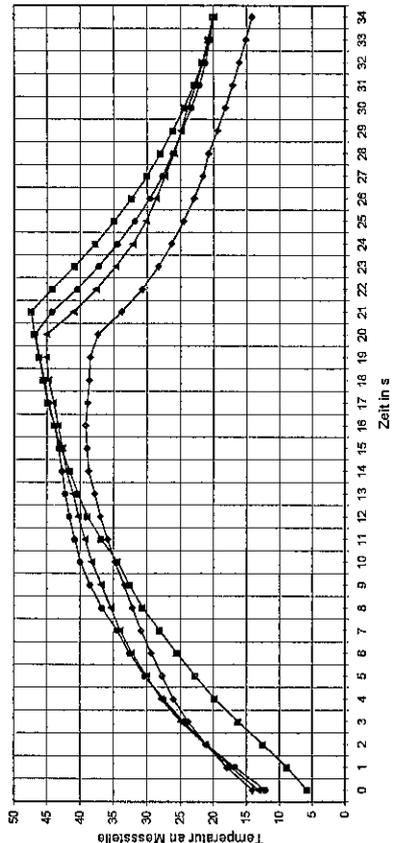
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 13



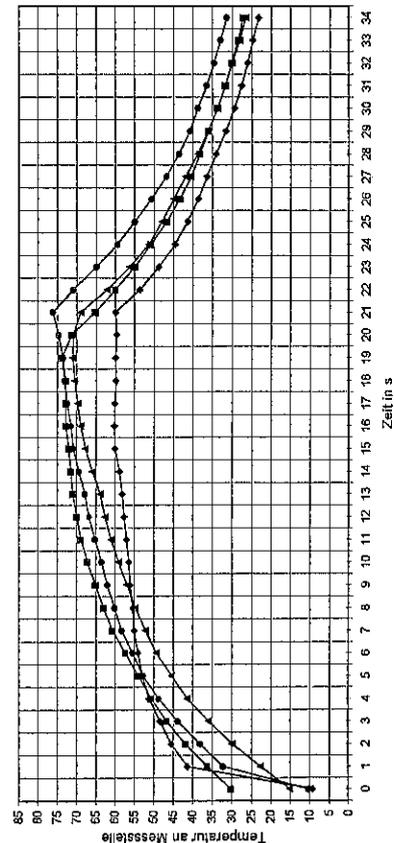
MsSt 13-Brenner 4 MsSt 13-Brenner 4,1,2,3 MsSt 13-Brenner 4,1,2 MsSt 13-Brenner 4,1

Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 14 - ohne Bekleidungsimulator

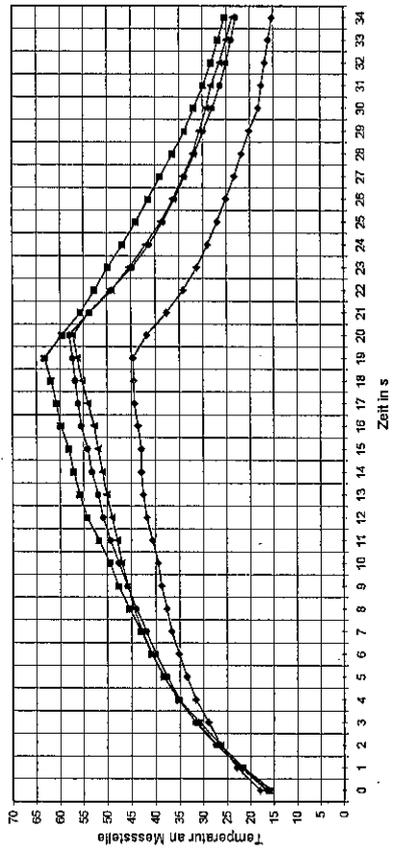
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 1 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 14



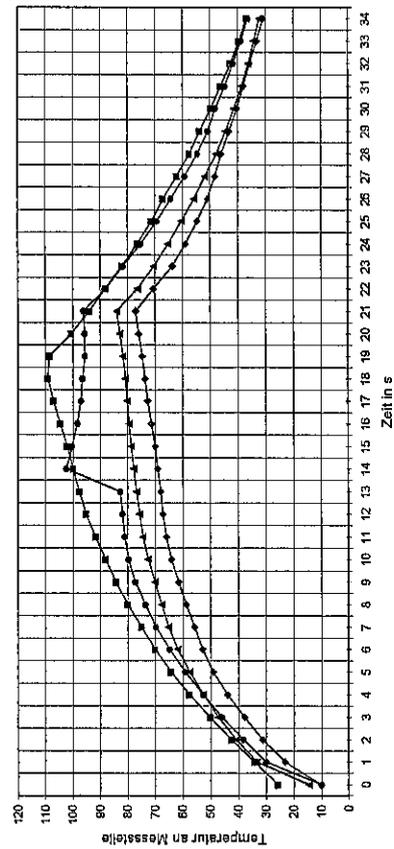
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 60 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 14



Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 80 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 14

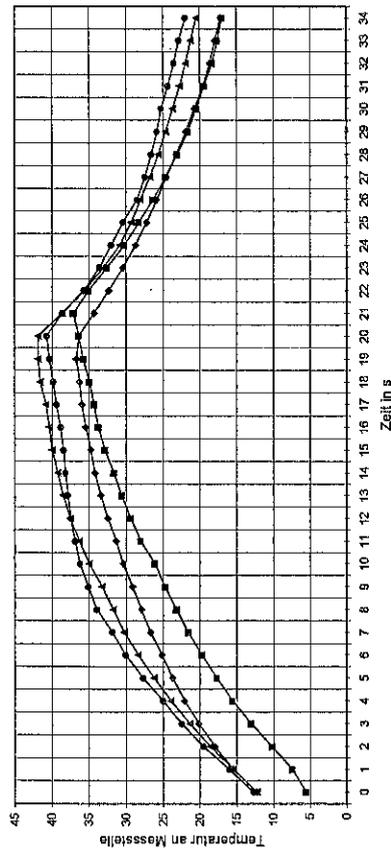


Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 14

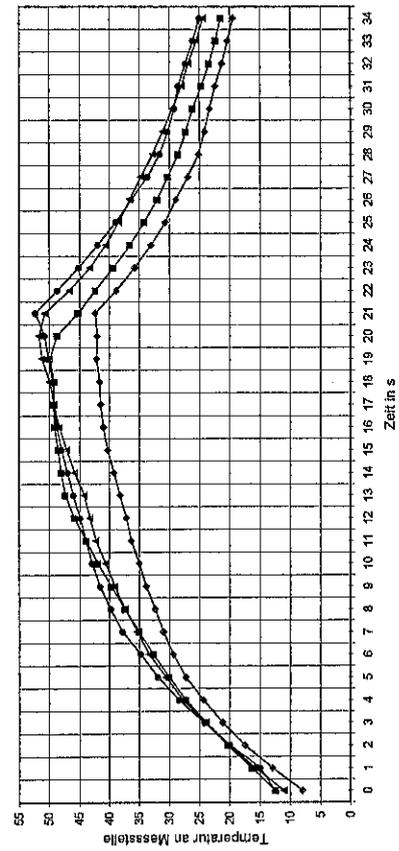


Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung in Abhängigkeit vom Abstand und von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Messstelle 15 - ohne Bekleidungsimulator

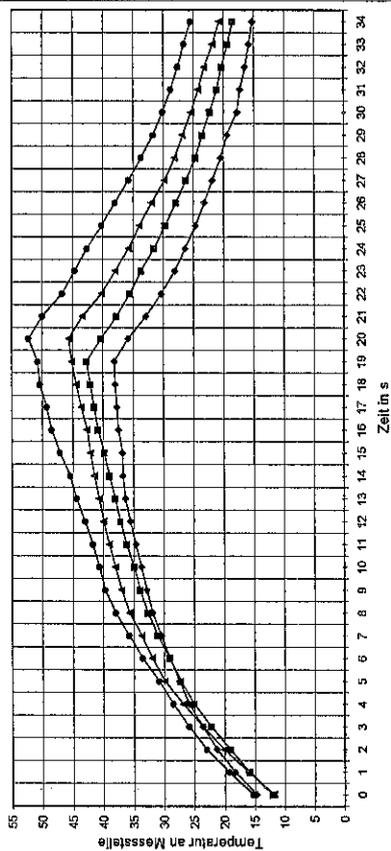
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 1 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 15



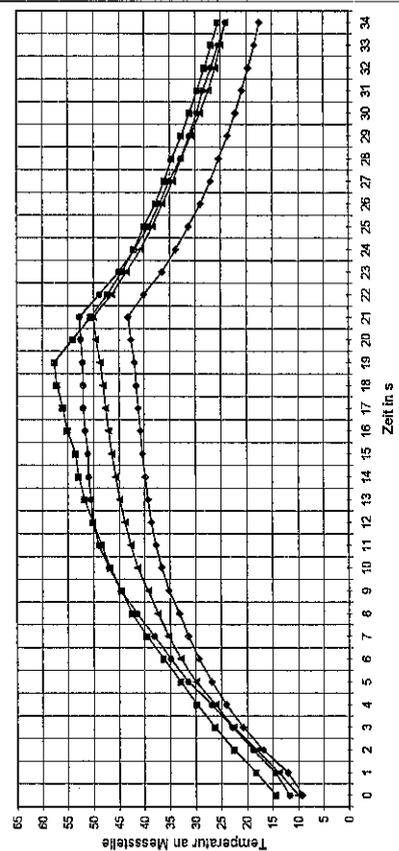
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 60 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 15



Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 80 cm zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 15

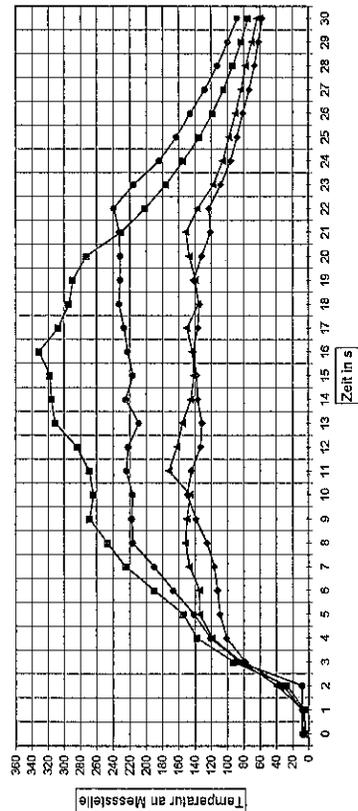


Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 m zum Messstand
Darstellung der Temperaturen an Messstelle 15



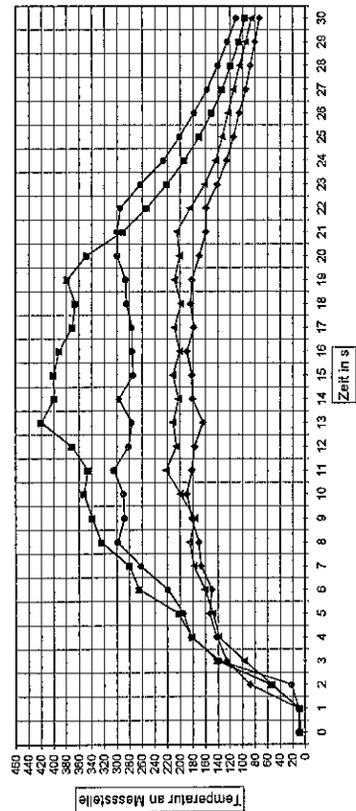
Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung mit Bekleidungssimulator in Abhängigkeit von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Abstand = 40 cm - Messstellen 1 bis 4

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messständer mit Bekleidungssimulator - Darstellung der Temperaturen an Messstelle 1 - Referenzmessung -



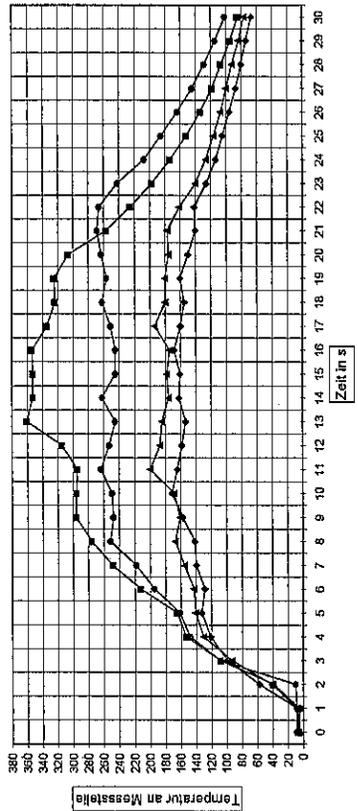
■ MsSt 01 - Brenner 4 ● MsSt 01 - Brenner 4, 1, 2 ▲ MsSt 01 - Brenner 4, 1, 2, 3 ◆ MsSt 01 - Brenner 4, 1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messständer mit Bekleidungssimulator - Darstellung der Temperaturen an Messstelle 3 - Referenzmessung -



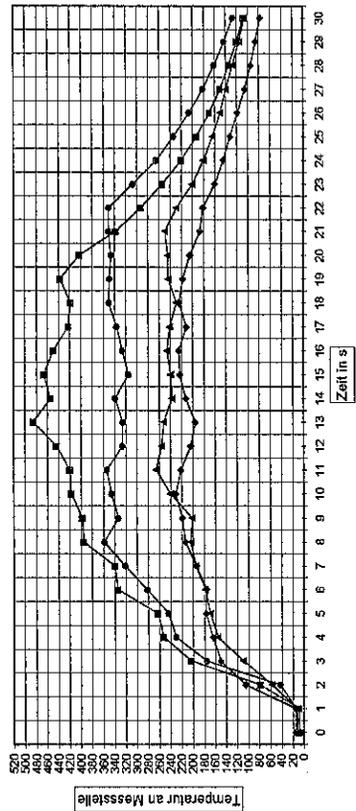
■ MsSt 03 - Brenner 4 ● MsSt 03 - Brenner 4, 1, 2, 3 ▲ MsSt 03 - Brenner 4, 1, 2 ◆ MsSt 03 - Brenner 4, 1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messständer mit Bekleidungssimulator - Darstellung der Temperaturen an Messstelle 2 - Referenzmessung -



■ MsSt 02 - Brenner 4 ● MsSt 02 - Brenner 4, 1, 2, 3 ▲ MsSt 02 - Brenner 4, 1, 2 ◆ MsSt 02 - Brenner 4, 1

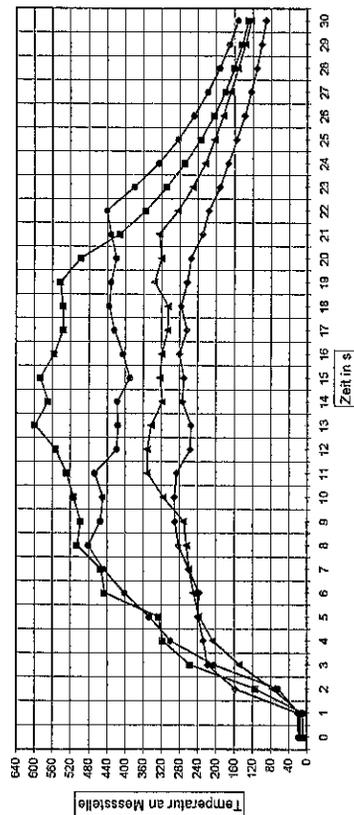
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messständer mit Bekleidungssimulator - Darstellung der Temperaturen an Messstelle 4 - Referenzmessung -



■ MsSt 04 - Brenner 4 ● MsSt 04 - Brenner 4, 1, 2, 3 ▲ MsSt 04 - Brenner 4, 1, 2 ◆ MsSt 04 - Brenner 4, 1

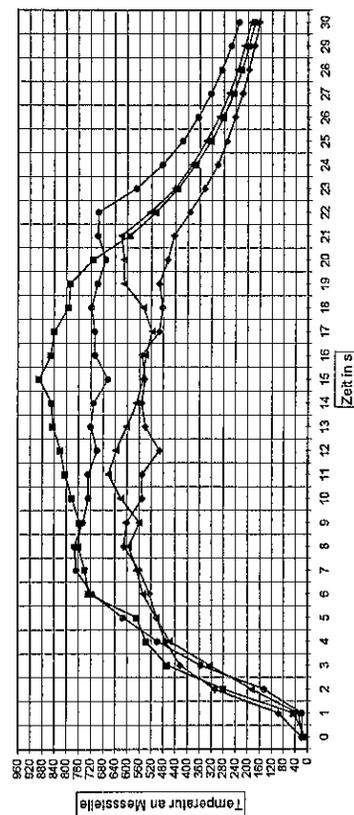
Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung mit Bekleidungsimulator in Abhängigkeit von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Abstand = 40 cm – Messstellen 5 bis 8

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messständer mit Bekleidungsimulator - Darstellung der Temperaturen an Messstelle 5 - Referenzmessung -



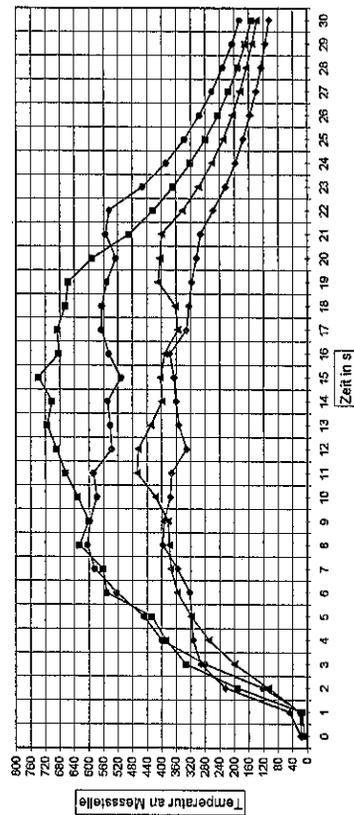
—■— MsSt 05 - Brenner 4 —▲— MsSt 05 - Brenner 4,1,2 —●— MsSt 05 - Brenner 4,1,2,3 —◆— MsSt 05 - Brenner 4,1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messständer mit Bekleidungsimulator - Darstellung der Temperaturen an Messstelle 7 - Referenzmessung -



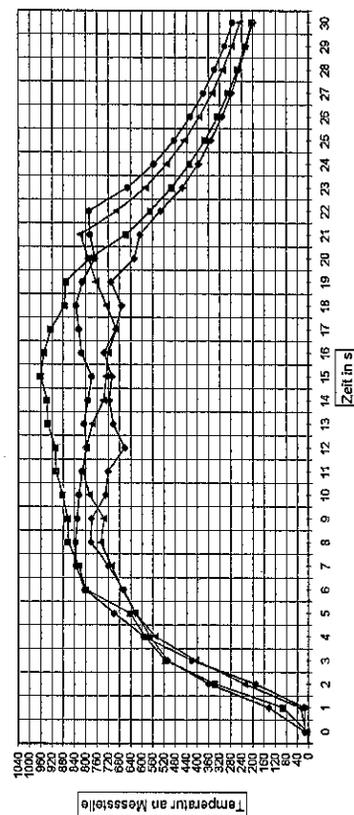
—■— MsSt 07 - Brenner 4 —▲— MsSt 07 - Brenner 4,1,2,3 —●— MsSt 07 - Brenner 4,1,2 —◆— MsSt 07 - Brenner 4,1

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messständer mit Bekleidungsimulator - Darstellung der Temperaturen an Messstelle 6 - Referenzmessung -



—■— MsSt 06 - Brenner 4 —▲— MsSt 06 - Brenner 4,1,2,3 —●— MsSt 06 - Brenner 4,1,2 —◆— MsSt 06 - Brenner 4,1

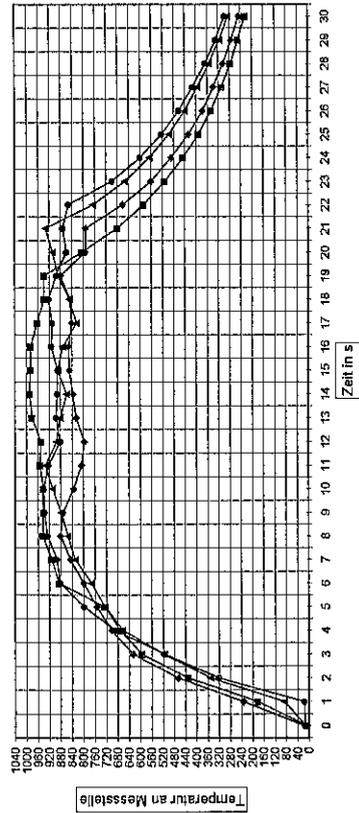
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messständer mit Bekleidungsimulator - Darstellung der Temperaturen an Messstelle 8 - Referenzmessung -



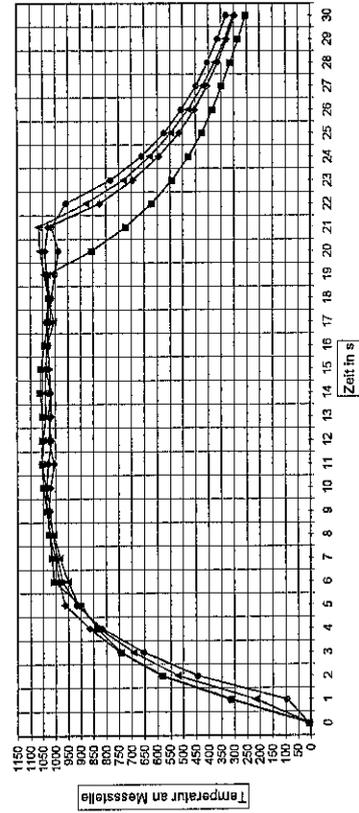
—■— MsSt 08 - Brenner 4 —▲— MsSt 08 - Brenner 4,1,2,3 —●— MsSt 08 - Brenner 4,1,2 —◆— MsSt 08 - Brenner 4,1

Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung mit Bekleidungssimulator mit Bekleidungsabhängigkeit von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Abstand = 40 cm - Messstellen 9 bis 12

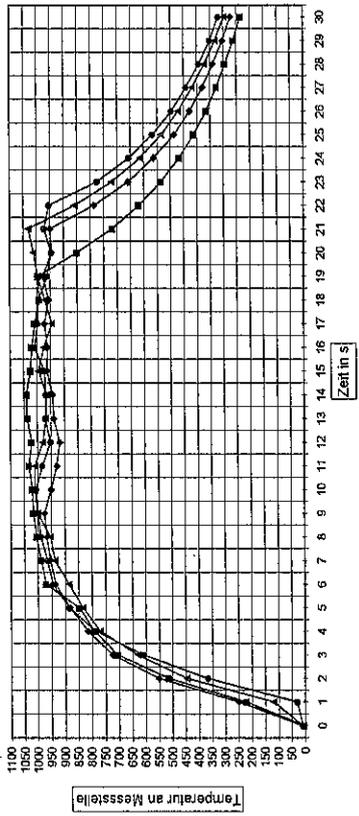
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messständer mit Bekleidungssimulator - Darstellung der Temperaturen an Messstelle 9 - Referenzmessung -



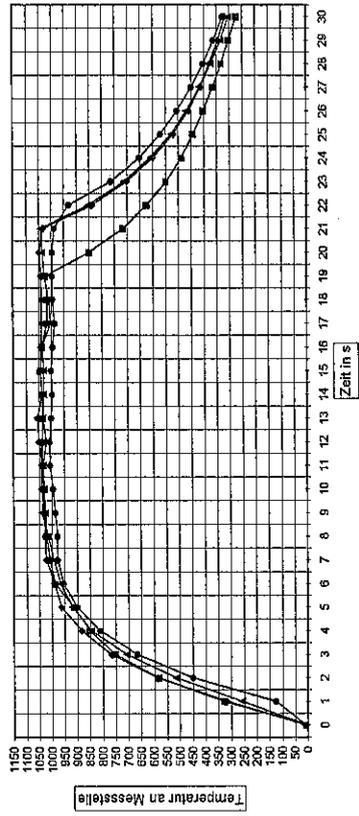
Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messständer mit Bekleidungssimulator - Darstellung der Temperaturen an Messstelle 11 - Referenzmessung -



Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messständer mit Bekleidungssimulator - Darstellung der Temperaturen an Messstelle 10 - Referenzmessung -

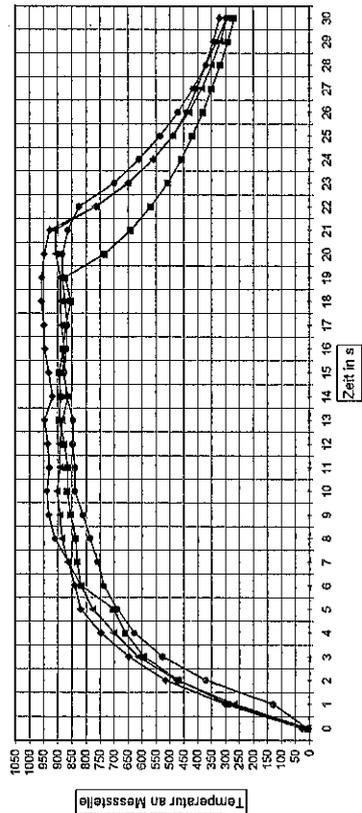


Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Messständer mit Bekleidungssimulator - Darstellung der Temperaturen an Messstelle 12 - Referenzmessung -



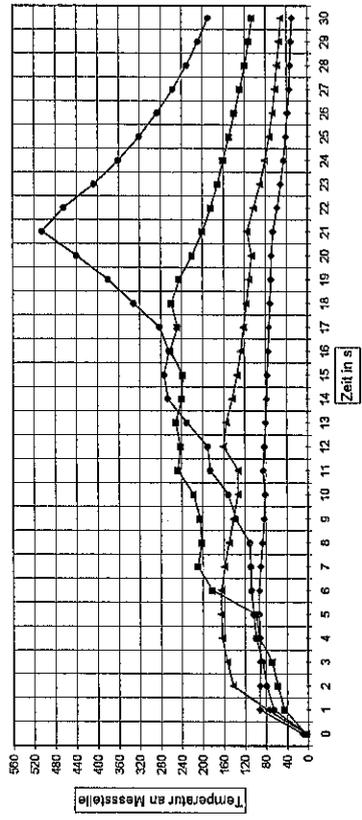
Lastabhängige Einzelbrenneruntersuchung mit Bekleidungs­simulator in Abhängigkeit von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Brenner - Abstand = 40 cm – Messstellen 13 bis 15

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Mess­ständer mit Bekleidungs­simulator - Darstellung der Temperaturen an Mess­stelle 13 - Referenzmessung -



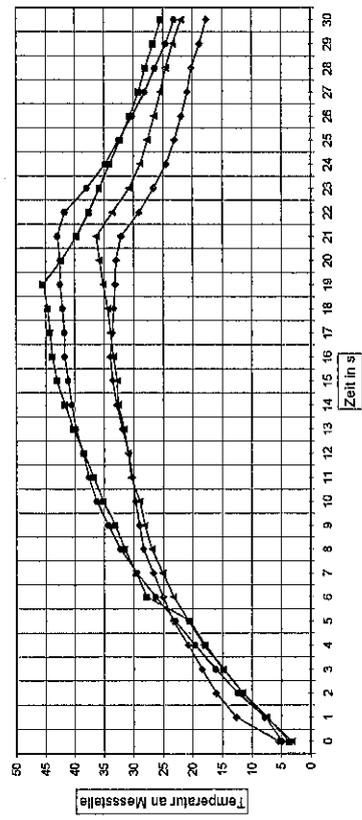
—■— MsSt 13 - Brenner 4 —●— MsSt 13 - Brenner 4,1,2 —▲— MsSt 13 - Brenner 4,1,2,3 —◆— MsSt 13 - Brenner 4,1,2,3,4

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Mess­ständer mit Bekleidungs­simulator - Darstellung der Temperaturen an Mess­stelle 14 - Referenzmessung -



—■— MsSt 14 - Brenner 4 —●— MsSt 14 - Brenner 4,1,2 —▲— MsSt 14 - Brenner 4,1,2,3 —◆— MsSt 14 - Brenner 4,1,2,3,4

Einzelbrenner Nr. 4 im Abstand von 40 cm zum Mess­ständer mit Bekleidungs­simulator - Darstellung der Temperaturen an Mess­stelle 15 - Referenzmessung -

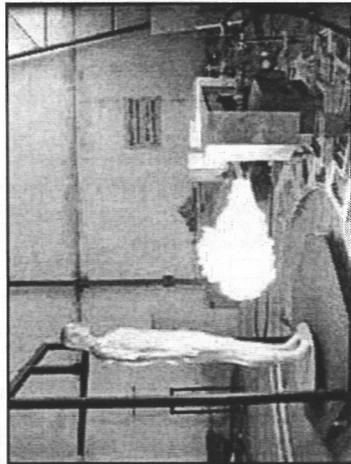


—■— MsSt 15 - Brenner 4 —●— MsSt 15 - Brenner 4,1,2 —▲— MsSt 15 - Brenner 4,1,2,3 —◆— MsSt 15 - Brenner 4,1,2,3,4

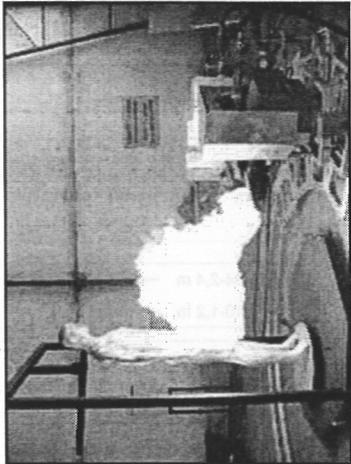
Zeitabhängige Flammenbilder des Einzelbrenners 1



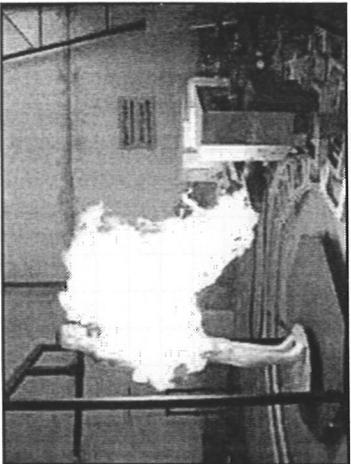
Vor dem Start



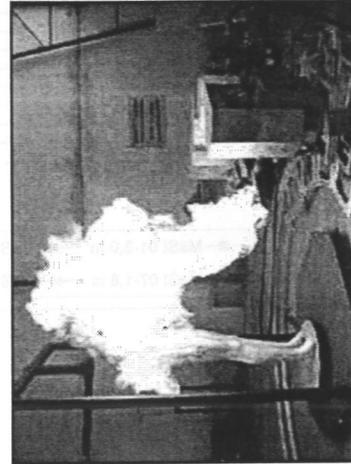
Zündung (nach 0,05 s)



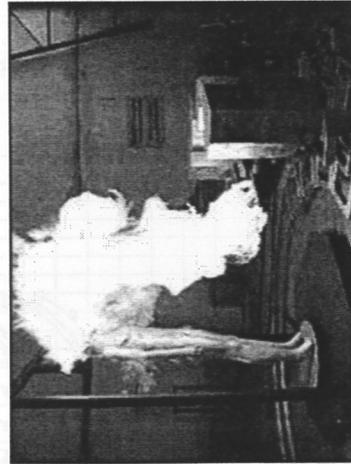
Flammenbild nach 0,075 s



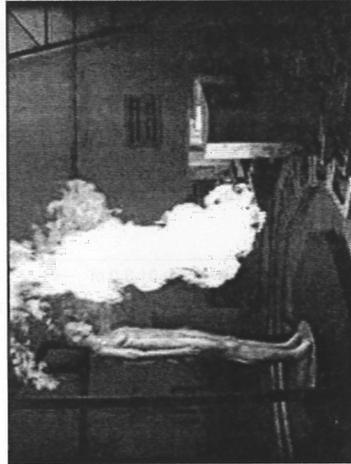
Flammenbild nach 0,1 s



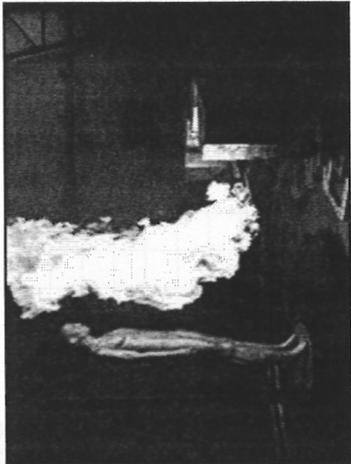
Flammenbild nach 0,125 s



Flammenbild nach 0,15 s

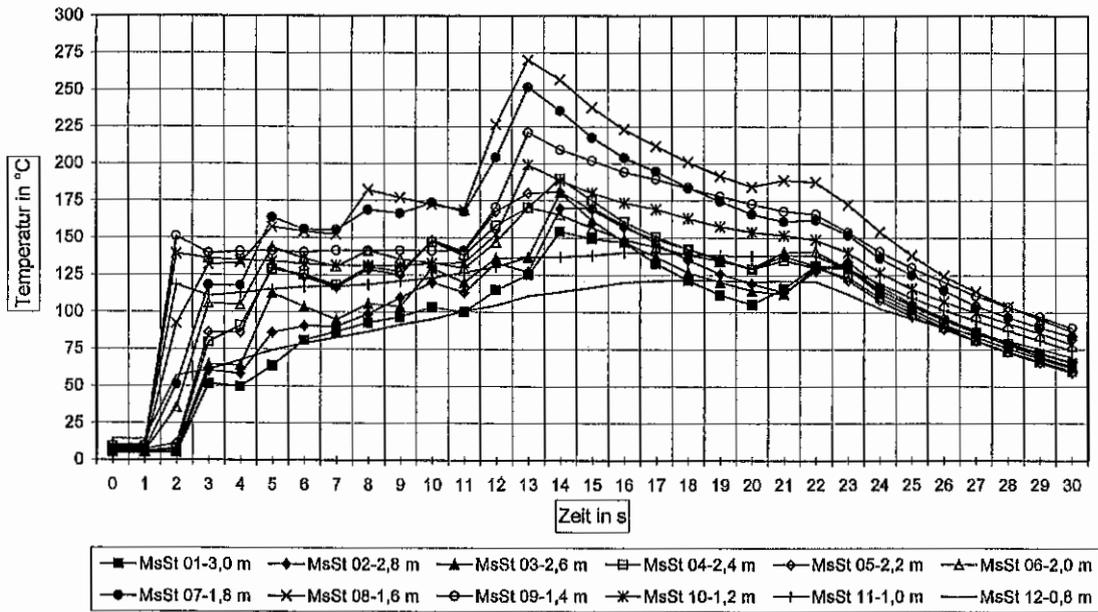


Flammenbild nach 0,175 s

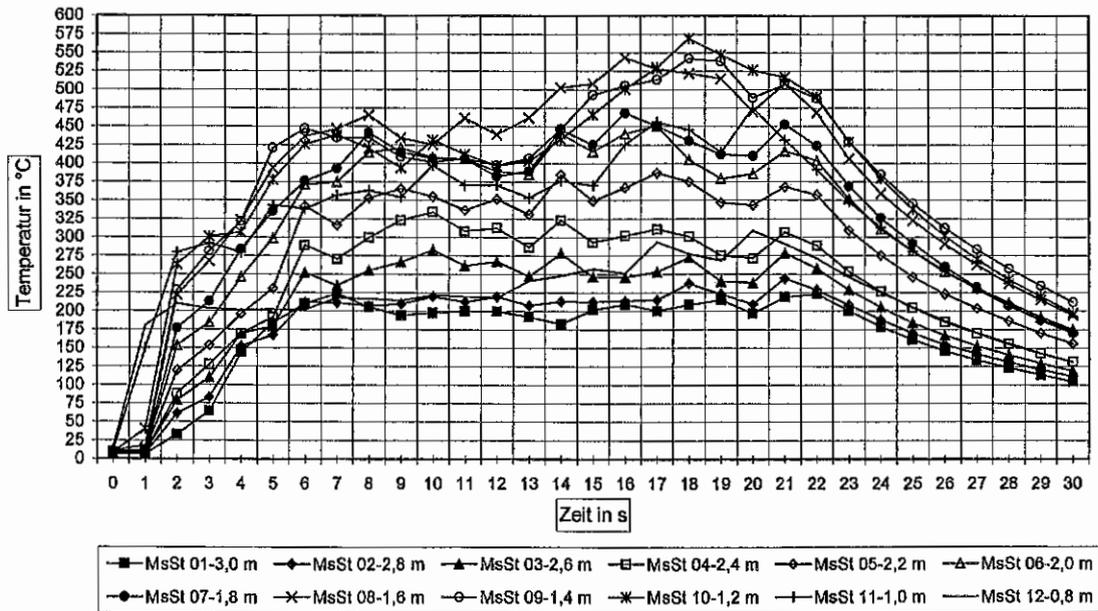


Flammenbild nach 0.2 s

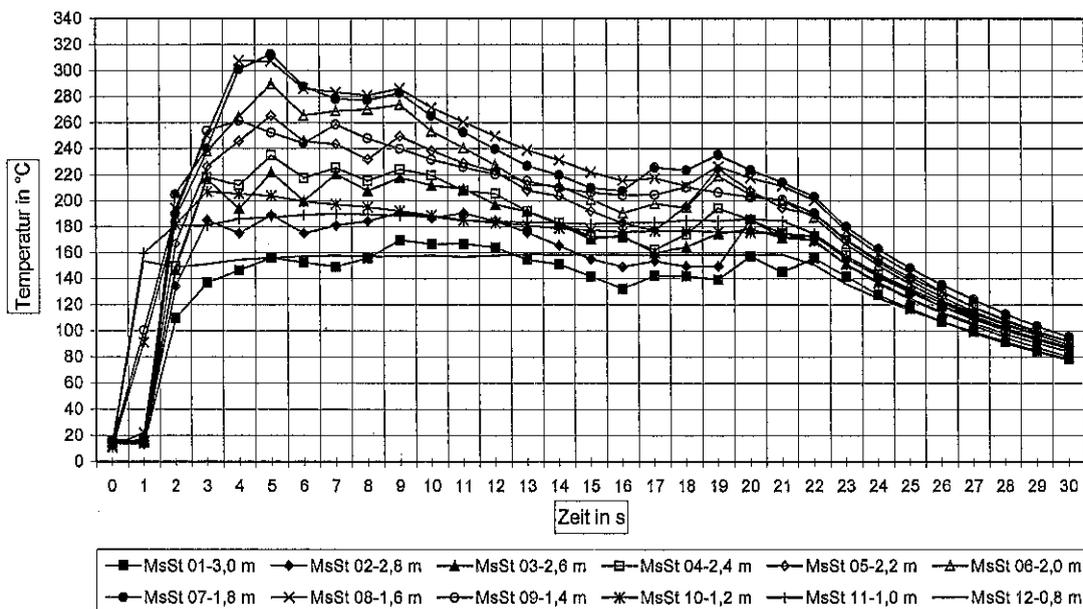
Untersuchung Brennerkombination aus 2 Brennern
 einseitige Anordnung - Abstand = 1 m
 - ohne Bekleidungssimulator -



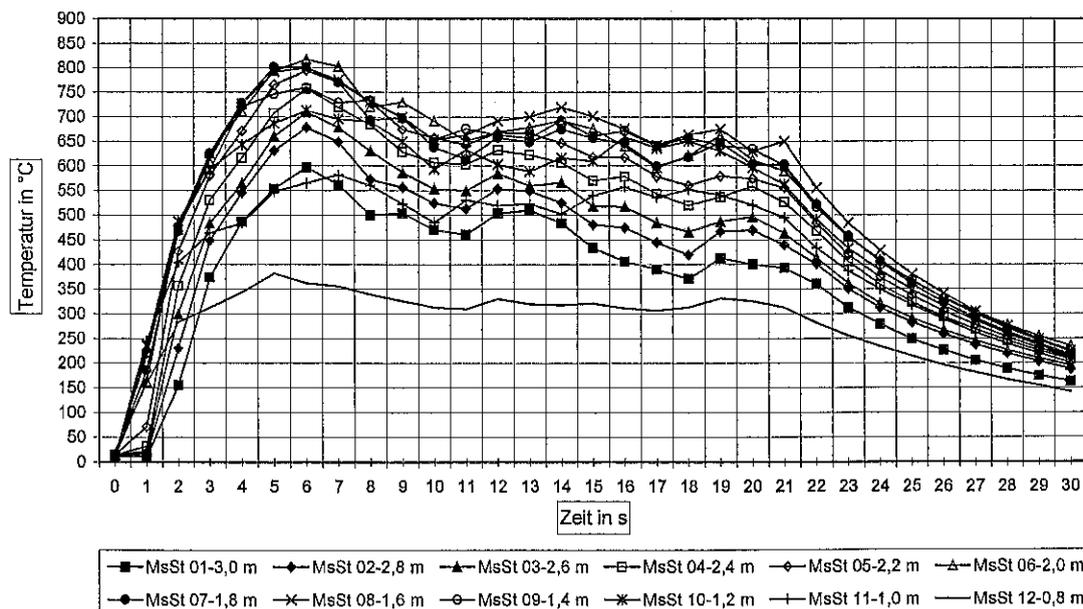
Untersuchung Brennerkombination aus 2 Brennern
 einseitige Anordnung - Abstand = 80 cm
 - ohne Bekleidungssimulator -



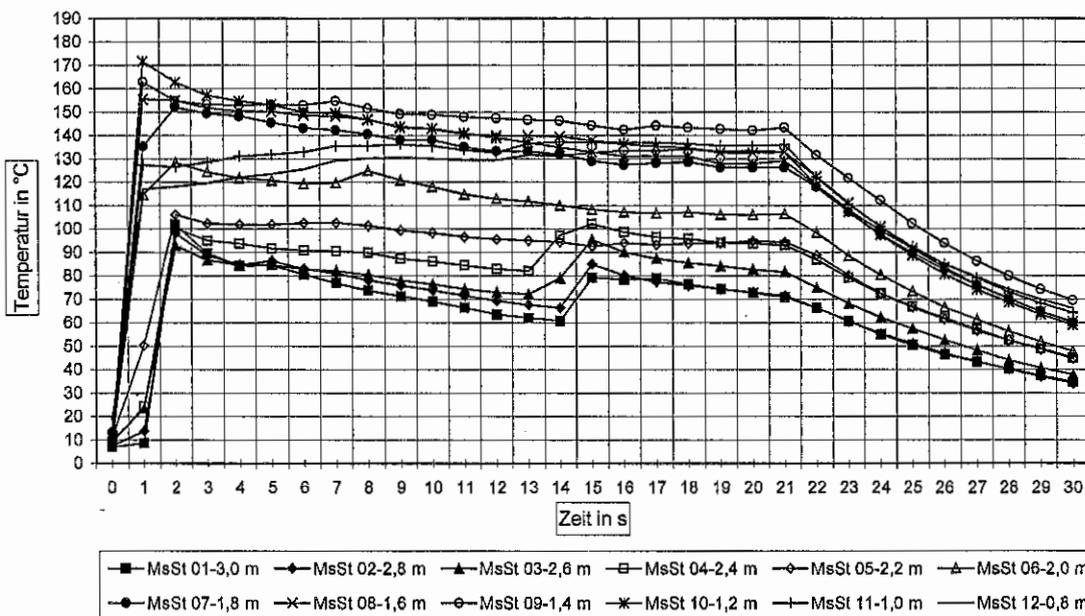
Untersuchung Brennerkombination aus 3 Brennern
 einseitige Anordnung - Abstand = 1 m
 - ohne Bekleidungssimulator -



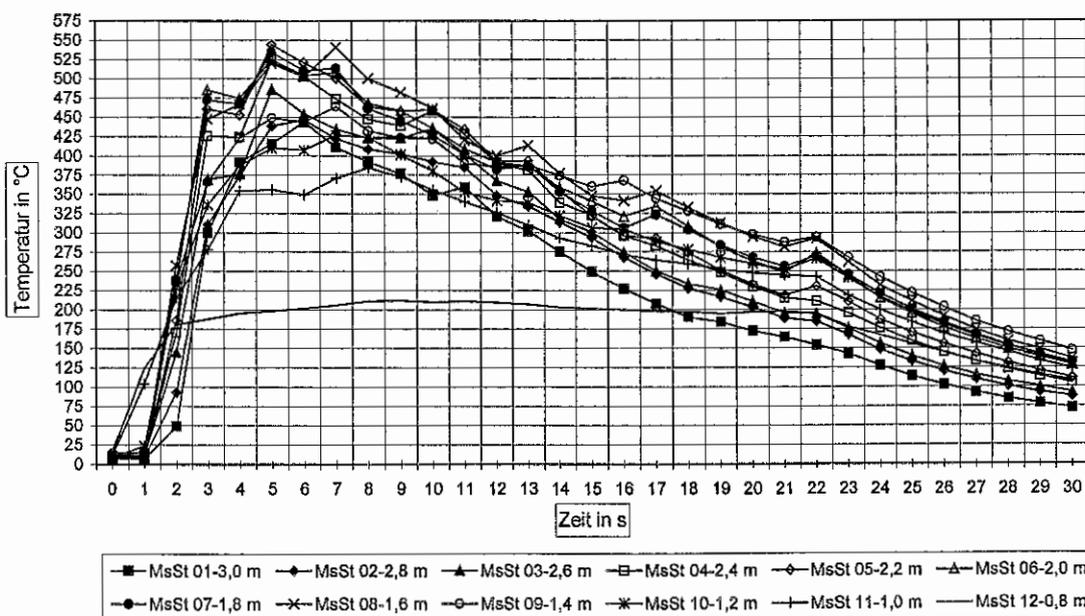
Untersuchung Brennerkombination aus 3 Brennern
 einseitige Anordnung - Abstand = 80 cm
 - ohne Bekleidungssimulator -



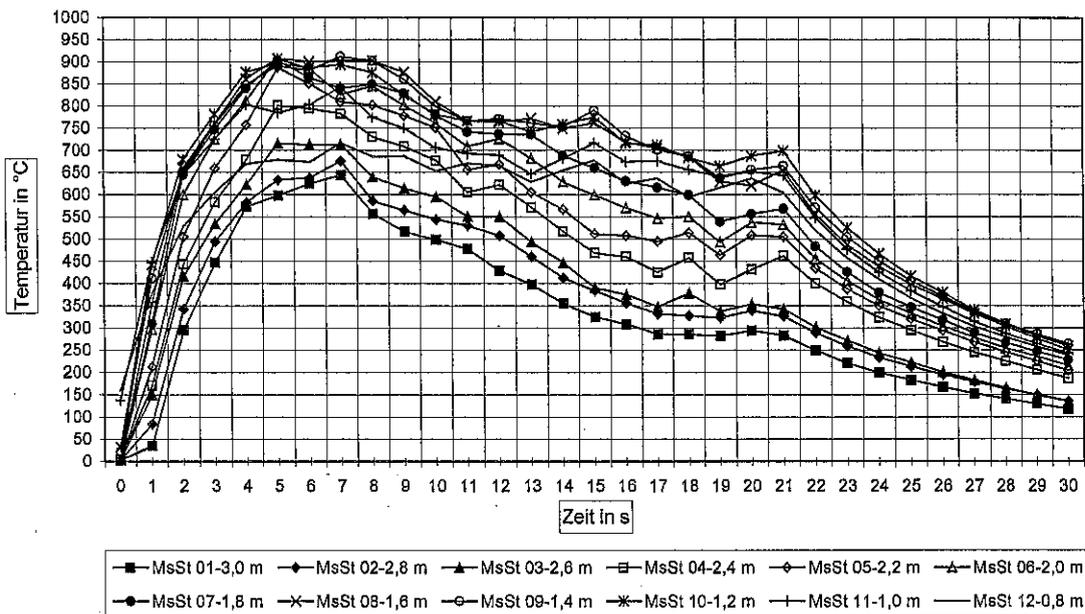
Untersuchung Brennerkombination aus 4 Brennern
 einseitige Anordnung - Abstand = 1 m
 - ohne Bekleidungssimulator -



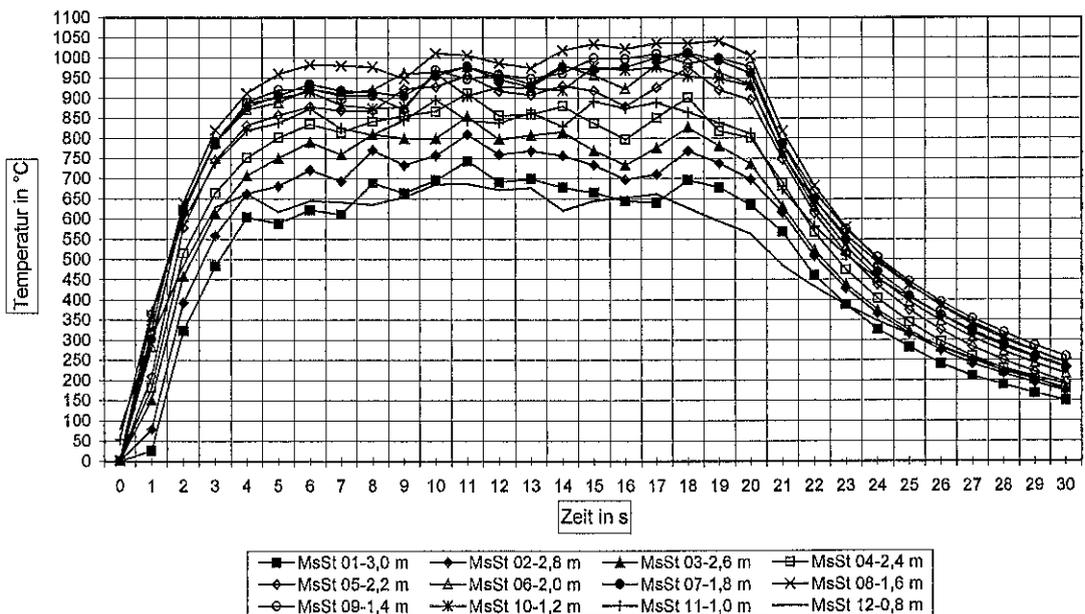
Untersuchung Brennerkombination aus 4 Brennern
 einseitige Anordnung - Abstand = 80 cm
 - ohne Bekleidungssimulator -



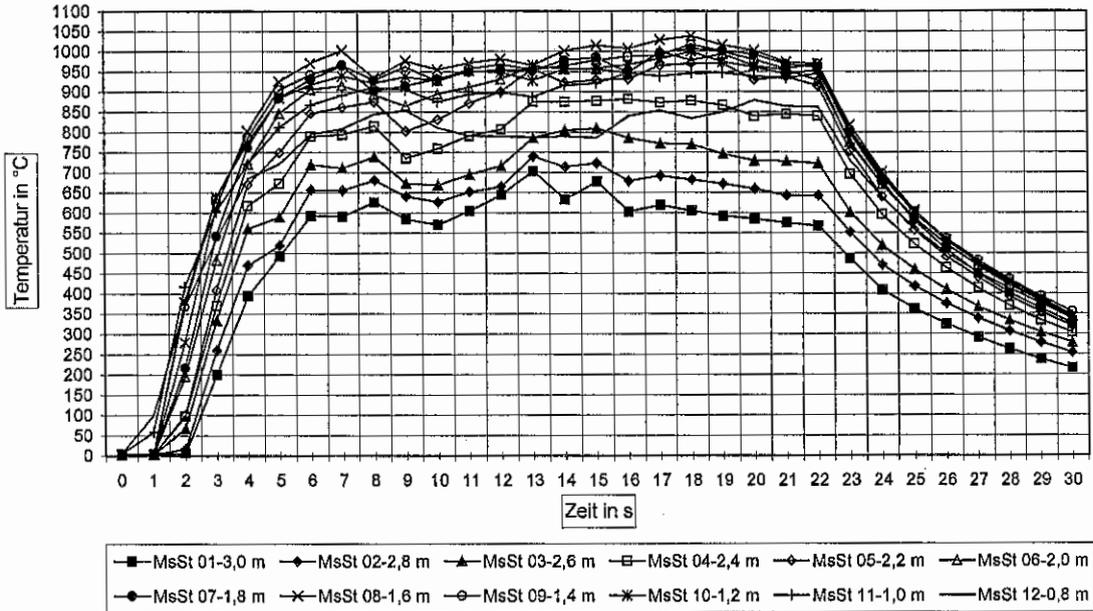
Untersuchung Brennerkombination aus 4 Brennern
 einseitige Anordnung - Abstand = 60 cm
 - ohne Bekleidungssimulator -



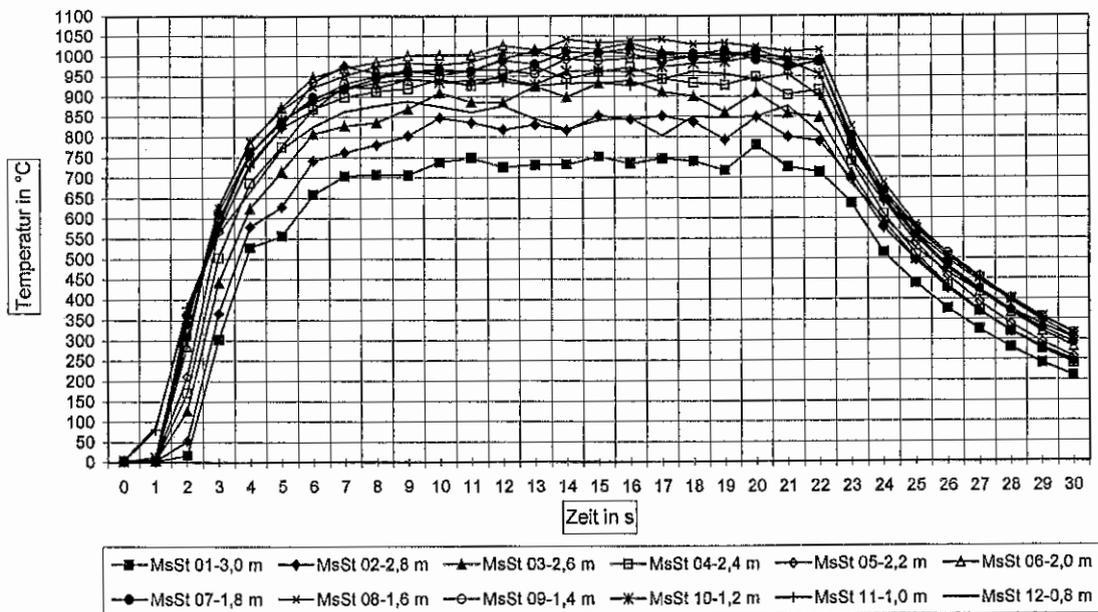
Untersuchung Brennerkombination aus 4 Brennern
 einseitige Anordnung - Abstand = 60 cm
 mit Bekleidungssimulator (Referenzuntersuchung)



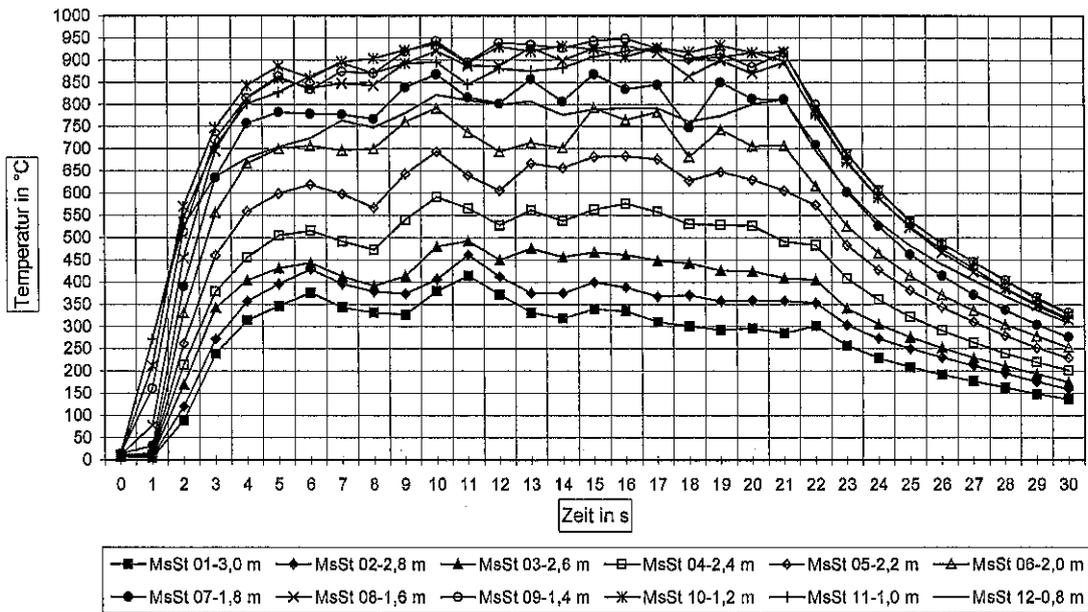
Untersuchung Brennerkombination aus 3 Brennern
 einseitige Anordnung - Abstand = 60 cm
 - ohne Bekleidungssimulator -



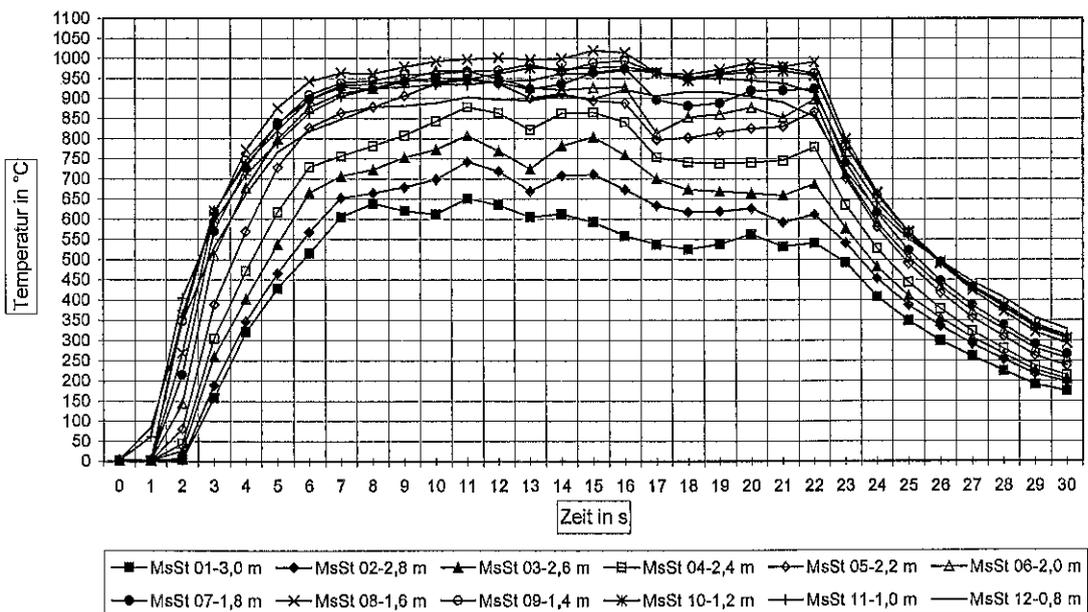
Untersuchung Brennerkombination aus 3 Brennern
 einseitige Anordnung - Abstand = 60 cm
 mit Bekleidungssimulator (Referenzuntersuchung)



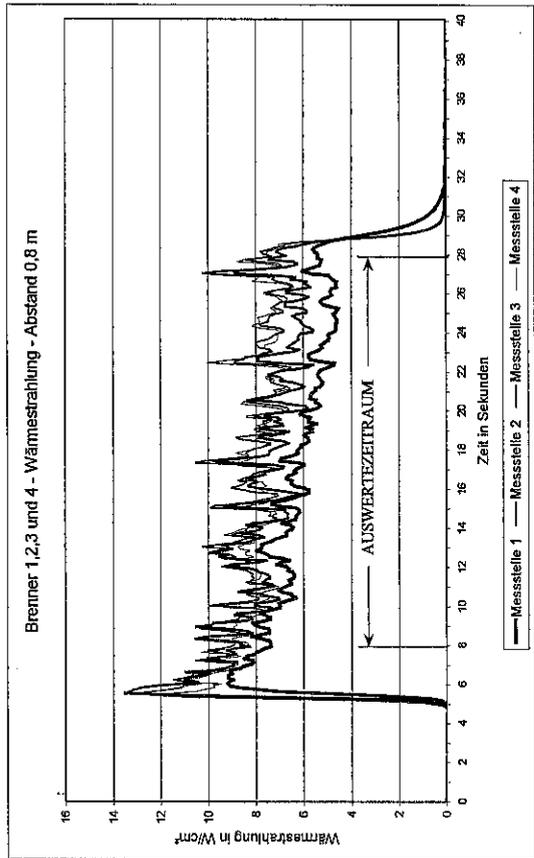
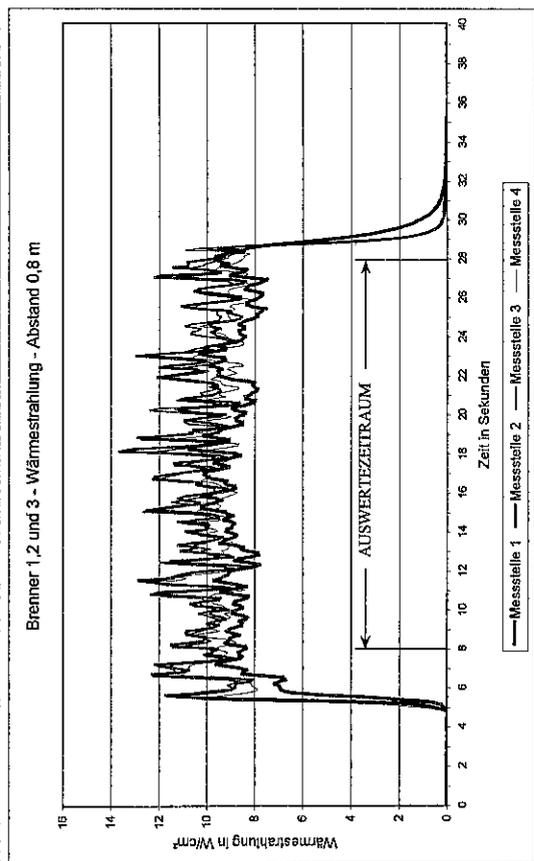
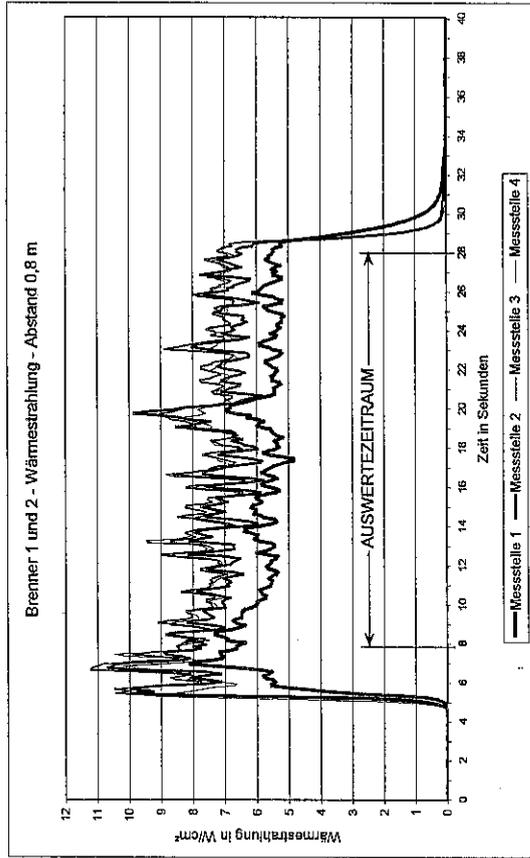
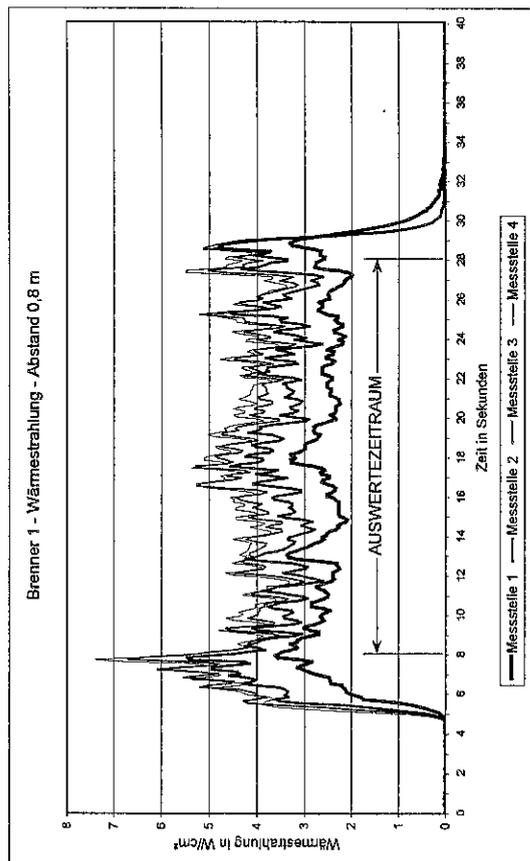
Untersuchung Brennerkombination aus 2 Brennern
 einseitige Anordnung - Abstand = 60 cm
 - ohne Bekleidungssimulator -



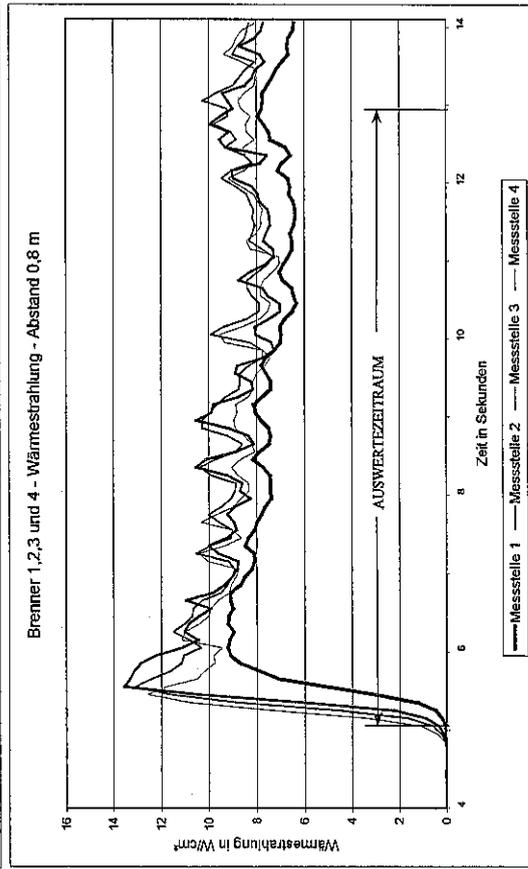
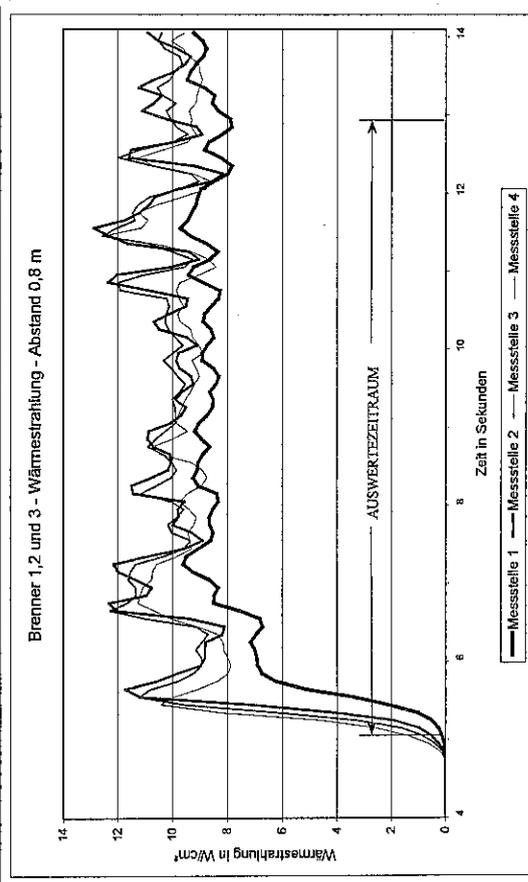
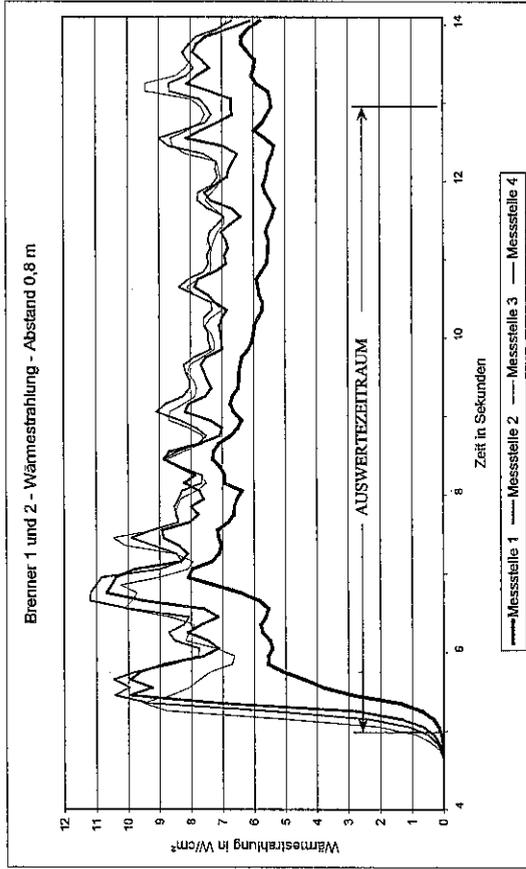
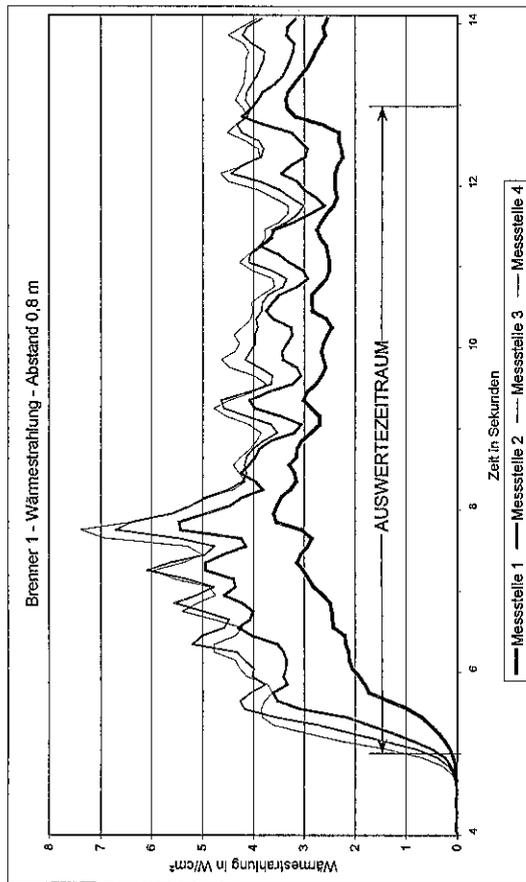
Untersuchung Brennerkombination aus 2 Brennern
 einseitige Anordnung - Abstand = 60 cm
 mit Bekleidungssimulator (Referenzuntersuchung)



Wärmestrahlungsbelastung in Abhängigkeit von der Brenneranzahl und dem Abstand Brennerkombination – einseitig – Auswertzeitraum = 20 Sekunden



Wärmestrahlungsbelastung in Abhängigkeit von der Brenneranzahl und dem Abstand Brennerkombination – einseitig – Auswertzeitraum = 8 Sekunden



Datenblatt Cotronics 124

Version 2, 7/99

Bezeichnung auf der Verpackungseinheit:
Duralco 124

Silberleitkleber mit besonders hoher Temperaturbeständigkeit

Spezifikationen

Anzahl der Komponenten	2
Mischungsverhältnis	Gewichtsanteile
Teil 'A' Harz (Resin)	1
Teil 'B' Härter (Hardener)	1

Pro Mischvorgang sollten nicht mehr als 100 g eingesetzt werden.

Lagerfähigkeit bei 23°C	6	Monate
Topfzeit bei 23 °C	4	Stunden

Härtung (alternativ)		
120 °C	2	Stunden
und anschließend		
180 °C	4	Stunden

Optische Eigenschaften	
Farbe	silber

Thermische Eigenschaften		
Max. Betriebstemperatur	325	°C
(Gew.-verlust 2 % innerh. 24 h)		
Gewichtsverlust (1000 h / 200 °C)	N.A.	%
Verformungstemperatur	N.A.	°C
Wärmeleitfähigkeit	9,29	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Thermische Ausdehnung	60·10 ⁻⁶	K ⁻¹

Mechanische Eigenschaften		
Dichte	1,2	g/cm ³
Zugscherfestigkeit	7050	N/cm ²
Bruchdehnung	N.A.	%
Shore-Härte	D75	
Volumenschrumpf b. Härten	0,2	%
Wasseraufnahme	0,04	%
(30 d bei 50 °C)		

Elektrische Eigenschaften		
Spez. el. Volumenwiderstand	0,002	Ω cm
Dielekt. Spannungsfestigkeit	N.A.	
Dielektrizitätskonstante (100 kHz)	N.A.	
Verlustfaktor (100 kHz)	N.A.	

Fließ- und Verarbeitungseigenschaften		
Viskosität	20000	mPa*s
	pastös	
Füllstoff	Silber	
Max. Partikelgröße	44	µm

Der Zweikomponenten-Epoxidklebstoff Duralco 124 eignet sich besonders für Anwendungen, bei denen elektrisch leitende Klebeverbindungen hergestellt werden müssen, die hohen Temperaturbelastungen ausgesetzt sind.
Die maximale Betriebstemperatur beträgt 325 °C.

Duralco 124 gibt es in folgender Verpackungsgröße:

- 56 g (2 US oz.)

KleVme/124.doc
Version 2.0/2001-07-04

Weitere Informationen finden Sie :

- im Sicherheitsdatenblatt von Duralco 124
- im Übersichtskatalog
- in den Verarbeitungshinweisen

Polytec GmbH

Produktbereich Klebstoffe • Polytec-Platz 1-7 • 76337 Waldbronn • Germany
Tel. ++49(0) 7243 604-113 • FAX ++49 (0) 7243 69944 • Email: kleber@polytec.de • http://www.polytec.de

Cotronics 920

Datenblatt Version 1, 1/97

Keramikleber mit hoher thermischer Leitfähigkeit

Spezifikationen

Anzahl der Komponenten	2
Mischungsverhältnis	Gewichtsanteile
Pulver (Powder)	7,7
Wasser	1

Härtungsbedingungen

Raumtemperatur:	24 Stunden
oder 65°C	4 Stunden
Topfzeit:	20 Minuten
Lagerfähigkeit bei 23°C	12 Monate
Farbe	weiß

Mechanische Eigenschaften

Druckfestigkeit	3150	N/cm ²
Biegezugfestigkeit	315	N/cm ²
Füllstoff	Al ₂ O ₃	
Partikelgröße durchschnittlich	40	µm (Fine)
Partikelgröße maximal	150	µm (Fine)
Partikelgröße durchschnittlich	150	µm (Reg)
Partikelgröße maximal	1000	µm (Reg)

Thermische Eigenschaften

Max. Betriebstemperatur	1650	°C
Wärmeleitfähigkeit	2,14	W m ⁻¹ K ⁻¹
Thermische Ausdehnung	8,1 · 10 ⁻⁶	K ⁻¹

Elektrische Eigenschaften

Spez. el. Volumenwiderstand	10 ¹¹	Ωcm
Dielektr. Spannungsfestigkeit	10,6	KV/mm

Der auf Aluminiumoxid basierende Kleber Cotronics 920 wird überall dort eingesetzt, wo eine hohe thermische Leitfähigkeit bei gleichzeitig hoher Spannungsfestigkeit nötig ist.

Cotronics 920 wird in Pulverform geliefert und mit Wasser zu einer Paste gemischt. Das Material ist den Versionen 920 Fine (feinkörnig) und 920 Reg (grobkörnig) erhältlich.

POLYTEC GmbH

Polytec-Platz 1

D-76337 Waldbrunn



Telefon (0 72 43) 604-0

Telefax (0 72 43) 6 99 44

E-Mail: info@polytec.de

http://www.polytec.de