

Technische Hochschule Köln

Fakultät 09 - Anlagen, Energie- und Maschinensysteme

B A C H E L O R T H E S I S

Wärmeleitung innerhalb eines Festkörpers
in drei Dimensionen

Analyse und Validierung des Berechnungsmodells
Solid Heat Transfer 3D des Fire Dynamics Simulators

Vorgelegt an der TH Köln
im Studiengang
Rettungsingenieurwesen
in der Vertiefungsrichtung
Brandschutzingenieurwesen

Studierender: Max Joseph Böhrer (11104222)

Erster Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Ompe Aimé Mudimu

Zweiter Prüfer: Dr. rer. nat. Lukas Arnold

Köln, 31. Januar 2018

Heat conduction within a solid in three dimensions

Analysis and Validation of the mathematical Model
Solid Heat Transfer 3D of the Fire Dynamics Simulator

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Bachelorthesis selbstständig, ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln verfasst habe. Alle benutzten Quellen, wörtlich oder sinngemäß entnommene Stellen, sind als solche einzeln kenntlich gemacht. Des Weiteren erkläre ich, dass alle in dieser Thesis auftauchenden Abbildungen und Grafiken von mir persönlich erstellt worden sind. Diese Arbeit ist bislang keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht worden.

Köln, den 31. Januar 2018

Max Joseph Böhler

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelorthesis wird das Berechnungsmodell *Solid Heat Transfer 3D (HT3D)* des Fire Dynamics Simulators in der Version 6.6.0 analysiert und anschließend validiert. Die Analyse umfasst die Herleitung der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung in drei Dimensionen sowie die numerische Umsetzung mittels der Finiten-Volumen-Methode. Für die Validierung wird ein Kupferblock mit verschiedenen Materialschichten beaufschlagt und anschließend erwärmt. Nach Erreichen des stationären Zustandes erfolgt die Temperaturmessung durch Thermoelemente an den Seiten der äußersten Schicht und mittels Infrarotmessung auf der Oberfläche. Für die anschließende Simulation wird eine Gittersensitivitätsanalyse durchgeführt, auf deren Grundlage die Geometrieerstellung erfolgt. Nach der Berechnung der Validierungssimulation auf dem Supercomputer Jureca am Forschungszentrum Jülich, werden die Temperaturdaten visuell durch eine Wärmekarte dargestellt. Die Entwicklung dieser Wärmekarte erfolgt über ein eigens dafür im Rahmen dieser Thesis erstelltes Python-Skript. Der darauf folgende Vergleich der Experimente mit den Simulationen zeigt, dass die physikalischen Vorgänge durch das HT3D-Modell plausibel wiedergegeben werden. Weiterhin werden Abweichungen aufgrund von unterschiedlichen Messpositionen und deren möglicher Einfluss auf das Ergebnis diskutiert.

Abstract

In this bachelor thesis the mathematical model *Solid Heat Transfer 3D (HT3D)* of the Fire Dynamics Simulator (version 6.6.0) is analyzed and subsequently validated. The analysis includes the derivation of the general heat equation in three dimensions and the numerical implementation using the Finite-Volume-Method. For validation, layers of different material are deposited on a copper block which is heated afterwards. The temperature measurement within the experiments takes place after reaching the stationary state and by using thermocouples on the sides of the outermost layer and infrared measurement on the surface. For the subsequent simulation, a mesh-study is carried out and the results are used for the geometry creation. After calculating the validation-simulation on the supercomputer *Jureca* in Jülich, the temperature data are visually displayed by a heat map. The development of the heatmap is done by a Python script, written in the framework of this thesis. Finally a comparison of the experiments with the simulations shows that the physical processes are represented correctly by the HT3D model. Furthermore, deviations due to different measurement positions and their possible influence on the result are discussed.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während meiner Bachelorthesis fachlich und moralisch begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt dabei Alexander Belt, nicht nur für die herzliche Aufnahme am Forschungszentrum Jülich, sondern auch für die Bereitstellung der experimentellen Daten und die wegweisenden Anmerkungen für meine Arbeit. Darüber hinaus danke ich Dr. Lukas Arnold für die Möglichkeit meine Bachelorarbeit am Forschungszentrum zu schreiben und die Unterstützung welche ich durch ihn zu jedem Zeitpunkt erfahren habe.

Weiterhin danke ich allen Mitglieder der Division Civil Security and Traffic für das stets freundliche und angenehme Arbeitsklima, sowie die Unterstützung durch jeden einzelnen.

Der letzte und vermutlich größte Dank möchte ich meinen Eltern aussprechen. Ohne euch wäre das Studium in dieser Form nicht möglich gewesen. Vielen Dank!

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit	1
1.2 Methodik und Gliederung der Arbeit	2
2. Theoretische Grundlagen und Stand der Technik	4
2.1 Fire Dynamics Simulator	4
2.2 Herleitung der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung	5
2.3 Numerische Umsetzung innerhalb des Fire Dynamics Simulators	8
2.4 Vergleich der Wärmeleitungsmodelle in FDS	12
3. Experimente	14
3.1 Versuchsaufbau	14
3.2 Verwendete Messtechnik	16
3.3 Versuchsdurchführung	17
4. FDS Simulation	19
4.1 Gittersensitivitätsstudie	20
4.2 Geometrieerstellung	28
4.3 Parallelisierung der Simulationen	32

5. Auswertung und Vergleich der Temperaturen	34
5.1 Auswertung der Experimente	34
5.2 Auswertung der Simulationen	35
5.3 Vergleich der Experimente und Simulationen	40
6. Fazit und Ausblick	49
Literaturverzeichnis	51
A. Messdaten Experiment	55
B. Messdaten Simulation	65

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1 - Leistungsbilanz innerhalb eines infinitesimal kleinen Volumens . . .	6
Abbildung 2 - Visuelle Darstellung der Diskretisierungsterme (FVM)	9
Abbildung 3 - Wärmeübertragung zwischen Festkörper und Gasphase im Standardmodell	13
Abbildung 4 - Aufbau der Versuchsanlage	15
Abbildung 5 - Aufbau und Schichtung der Holzwanne	15
Abbildung 6 - Positionen der Messstellen	16
Abbildung 7 - Simulationsgeometrie Gittersensitivitätsstudie	24
Abbildung 8 - Temperaturen Oberfläche	25
Abbildung 9 - Temperaturen Gasphase	25
Abbildung 10 - Stationärer Zustand	26
Abbildung 11 - Kurvenanpassung	26
Abbildung 12 - Treppenschrittmethode	28
Abbildung 13 - Geometrie der Validierungssimulation	29
Abbildung 14 - Abmessungen der Simulationsgeometrie	29
Abbildung 15 - Anordnung der Messflächen	31
Abbildung 16 - Berechnungsgitter zur Parallelisierung der Simulation	32
Abbildung 17 - Temperaturverlauf Versuch 4	34
Abbildung 18 - Temperaturverlauf der Messpunkte IR00-IR08	36
Abbildung 19 - Temperaturverlauf der Messpunkte M00-M07 (75.4 W)	37
Abbildung 20 - Temperaturverlauf der Messpunkte M00-M07 (1.4 W)	37
Abbildung 21 - Versuch 8 - Anpassung der kritischen Bedingung	38
Abbildung 22 - Versuch 8 - Wärmekarte der Unterseite	39
Abbildung 23 - Versuch 2 - Vergleich der Temperaturen	41
Abbildung 24 - Versuch 4 - Vergleich der Temperaturen	42
Abbildung 25 - Versuch 6 - Vergleich der Temperaturen	43
Abbildung 26 - Versuch 8 - Vergleich der Temperaturen	44
Abbildung 27 - Versuch 10 - Vergleich der Temperaturen	45
Abbildung 28 - Versuch 2 - Gradientenfeld der Oberseite	46
Abbildung 29 - Versuch 2 - Gradientenfeld des Messpunktes IR03	47
Abbildung 30 - Versuch 4 - Neupositionierung M00	48

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1 - Elektrische Leistung der Validierungsexperimente	17
Tabelle 2 - Validierungssimulationen - Wärmefreisetzungsrate	19
Tabelle 3 - Zusammensetzung von Luft in FDS [1]	21
Tabelle 4 - Durchschnittliche Umgebungstemperatur und Wärmefreisetzungsrate .	21
Tabelle 5 - Vergleich der Eigenschaften von Luft	23
Tabelle 6 - Zellengröße Δx	23
Tabelle 7 - Auswertung der Rechenzeit (Gittersensitivitätsstudie)	25
Tabelle 8 - Auswertung des absoluten Durchschnittsfehlers (Gittersensitivitätsstudie)	26
Tabelle 9 - Variablen des Kurvenanpassungsverfahrens	27
Tabelle 10 - Materialkennwerte der Validierungssimulation	30
Tabelle 11 - Zeitpunkt des stationären Zustandes - Versuch 4	36
Tabelle 12 - Versuch 2 - Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation	41
Tabelle 13 - Versuch 4 - Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation	42
Tabelle 14 - Versuch 6 - Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation	43
Tabelle 15 - Versuch 8 - Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation	44
Tabelle 16 - Versuch 10 - Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation	45

1. Einleitung

Die rechnergestützte Modellierung von Bränden gewinnt im Bereich des vorbeugenden Brandschutzes zunehmend an Relevanz. Im Gegensatz zur deskriptiven/präskriptiven Vorgehensweise baurechtlicher Verordnungen ermöglichen Brandsimulationen innovatives und ökonomisch vorteilhaftes Bauen, ohne dabei das gesetzlich festgelegte Sicherheitsniveau (Schutzziele) zu unterschreiten. [2]

Grundsätzlich wird zwischen vier verschiedenen Modellierungsansätzen unterschieden [3]:

- Empirisch belegte Ansätze,
- Vollbrandmodelle (post-flashover),
- Zonenmodelle und
- Feldmodelle (CFD - computational fluid dynamics)

Die einzelnen Modelle unterscheiden sich dabei in ihrer mathematischen Komplexität und der daraus resultierenden physikalischen Genauigkeit. Empirisch belegte Ansätze sind mit einfachen, meist analytisch lösbaren mathematischen Gleichungen hinterlegt und deshalb in der Simulation physikalischer Phänomene eingeschränkt. Feldmodelle hingegen werden durch gekoppelte Gleichungssysteme beschrieben und mit numerischen Methoden (iterativ) gelöst. Die hohe Anzahl verschiedener Eingangsparameter ermöglichen den Feldmodellen eine detaillierte Wiedergabe physikalischer Mechanismen. Aufgrund der örtlichen und zeitlichen Auflösung von Information ermöglichen Feldmodelle eine umfangreicher Auswertung diverser Kenngrößen.

Im Bereich der Brandmodellierung ist der Fire Dynamics Simulator (FDS) als Stand der Technik anzusehen. Neben der Simulation von komplexen Brandereignissen (Verbrennungsprozesse, Rauch- und Wärmeausbreitung, Auswirkung von Löschanlagen), ermöglichen zahlreiche Ausgabedaten eine genaue Brandanalyse. Dazu gehören die orts- und zeitabhängigen Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten, die Energiebilanzen, die Bauteiltemperaturen und mögliche Druckdifferenzen innerhalb des Berechnungsgebietes.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

Ein essentieller Punkt bei der Erstellung von mathematischen Modellen ist die Verifizierung und Validierung der auftretenden Gleichungen. Während bei der Verifikation die numerische Umsetzung auf ihre Richtigkeit überprüft wird, erfolgt bei der Validierung der Abgleich realer physikalischer Phänomene mit denen des mathematischen Modells. [4]

In seiner Dissertation *A study on buoyancy-driven flows* beschreibt Meunders Möglichkeiten zur Validierung von auftriebsgesteuerten Strömungen.

Dazu werden mittels Particle Image Velocimetry (PIV) die Strömungsgeschwindigkeiten eines freien Auftriebsstrahls über einer Wärmequelle sowie die auftriebsgetriebene Ausströmung aus einer Raumöffnung untersucht und anschließend mit den Werten des Fire Dynamics Simulators verglichen. Das Ergebnis zeigt deutliche Abweichungen von bis zu 20 % der Simulationen gegenüber den Experimenten. [5]

In weiteren Forschungsarbeiten wurde versucht, die Ergebnisse von Meunders zu verbessern. Daher wurde in [6] und [7] Modifikationen am Versuchsaufbau vorgenommen. Der Kupferblock als Heizquelle wird nicht mehr oberhalb der Bodenplatten befestigt, sondern in diese eingelassen. Weiterhin wurde die Versuchsgeometrie von außen mit Dämmplatten beschichtet und die Auswirkungen auf das Strömungsverhalten untersucht.

Ein anschließender Vergleich zwischen der Simulation mit FDS und den Experimenten zeigt insbesondere hohe Abweichungen der Temperaturen in der Versuchsgeometrie sowie auf der Oberfläche des Kupferblocks. Die Temperaturunterschiede sind hierbei möglicherweise auf die Berechnung der Wärmeleitung in FDS zurückzuführen. Zum Zeitpunkt der Dissertation und der genannten Arbeiten wird nur die eindimensionale Wärmeleitung in den Simulationen berücksichtigt. Da es hier zu keiner lateralen Wärmeleitung kommt, wird der Temperaturverlauf in der gesamten Simulation nicht korrekt berechnet.

Ziel dieser Bachelorthesis ist es deshalb, das in der aktuellen Version von FDS implementierte dreidimensionale Wärmeleitungsmodell (Solid Heat Transfer 3D - HT3D) auf Basis von Experimentaldaten erstmalig zu validieren. Auf Grundlage dieser Validierung kann in zukünftigen Arbeiten auch die laterale Wärmeausbreitung berücksichtigt und eine korrekte Aussage über den Temperaturverlauf in solchen getroffen werden.

1.2 Methodik und Gliederung der Arbeit

Die Ausarbeitung der genannten Problemstellung unterteilt sich in drei Abschnitte. Der erste Teil (Kap. 2) beschreibt die theoretischen Grundlagen und den aktuellen Stand der Technik. Dazu gehört die Herleitung der allgemein gültigen Wärmeleitungsgleichung sowie ihre numerische Umsetzung innerhalb des Fire Dynamics Simulators. Weiterhin wird der Unterschied zwischen dem Standardmodell (eindimensional) sowie dem HT3D Modell aufgezeigt.

Im zweiten Teil dieser Arbeit (Kap.3 und 4) erfolgt die Durchführung der Experimente und der Simulationen. Für die Simulation wird im Vorhinein eine Gittersensitivitätsanalyse durchgeführt, welche das Ziel hat die ideale Zellenabmessungen zu ermitteln. Dadurch wird sichergestellt, dass die zur Verfügungen stehenden Rechenressourcen unter Beachtung der Zeit optimal für die Validierungssimulation eingesetzt werden.

Weiterhin wird durch dieses Vorgehen die Konvergenz der Temperaturen unter Verwendung unterschiedlicher Zellendimensionen überprüft.

Abschließend werden die Ergebnisse der Experimente und Simulationen miteinander verglichen (Kap. 5). Zur Verarbeitung der dadurch entstehenden großen Datensätze wird auf die Programmiersprache Python zurückgegriffen. Weiterhin werden die Auswirkung durch Temperaturgradienten und alternativen Messpositionen diskutiert. Dies ermöglicht eine Aussage über die Plausibilität der ermittelten Ergebnisse.

2. Theoretische Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Fire Dynamics Simulator

FDS wird durch das Building and Fire Research Laboratory (BFRL) am National Institute of Standards and Technology (NIST) des U. S. Departement of Commerce in Gaithersburg, USA, in Zusammenarbeit mit dem VTT Technical Research Center of Finland entwickelt und kostenlos sowie als open-source zu Verfügung gestellt. Die Programmierung erfolgt unter Verwendung der höheren Programmiersprache FORTRAN 90, welche eine verständliche und klar strukturierte Digitalisierung mathematischer Formeln und deren Lösung ermöglicht [8]. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit befindet sich der Fire Dynamics Simulator in der Version 6.6.0 [9].

Die Anfänge von FDS gehen mit der Veröffentlichung der ersten Version bereits in das Jahr 2000 zurück. Insbesondere nach den Anschlägen des 11. September 2001 verzeichnete FDS einen deutlichen Fortschritt in seiner Entwicklung. Im Rahmen der Ermittlungen wurde das National Institute of Standards and Technology beauftragt die Einstürze beider Türme zu untersuchen, weshalb dafür benötigte Funktionen innerhalb kürzester Zeit für den Fire Dynamics Simulator entwickelt wurden.[10]

FDS löst numerisch eine Form der Navier-Stokes Gleichungen auf Grundlage der Finiten Differenzen Methode (FDM). Dazu wird das Rechengebiet in ein Netz aus quadratischen Zellen unterteilt. Eine lokale Verfeinerung (Größenveränderungen) der Zellen innerhalb eines Netzes ist nicht möglich. Turbulenzen werden innerhalb des Fire Dynamics Simulators auf Basis einer Large-Eddy-Simulation berechnet, beziehungsweise modelliert [1]. Aufgrund der dadurch entstehenden hohen Rechenlast sind FDS Simulationen sehr zeitintensiv. Durch die parallele Berechnung einer Simulation auf einem Rechencluster kann die Rechenzeit deutlich reduziert werden (high performance computing - HPC). Die Parallelisierung wird dabei über OpenMP (Open Multi-Processing) und MPI (Message Passing Interface) realisiert. [11]

Die visuelle Darstellung der Ergebnisse ermöglicht das Programm Smokeview, welches ebenfalls durch das National Institute of Standards and Technology (NIST) entwickelt und kostenlos vertrieben wird.

Validierung innerhalb von FDS

Im Rahmen der Entwicklung des Fire Dynamics Simulators entstand über die Jahre eine Vielzahl an unterschiedlichen Validierungsexperimenten. Eine Sammlung der wichtigsten Experimente ist dabei in [12] gegeben. Im Kontext zu diesem Dokument wird zwischen drei Arten von Validierungssimulationen unterschieden. Eine blinde Validierung stellt die Absenz von Informationen dar. Die Validierungssimulation basiert auf Annahmen und das spätere Ergebnis ist weniger belastbar. Im Gegensatz dazu sind bei der spezifischen Validierung alle Parameter der Experimente bekannt und können in der Simulation exakt nachgebildet werden. Eine offene Validierung enthält alle Eigenschaften der spezifischen und ergänzt diese um mehrere Messreihen sowie durch diverse Verifizierungsrechnungen [13]. Letztere stellt den Standard für Validierungen bezüglich des Fire Dynamics Simulators dar [12].

2.2 Herleitung der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung

Die Bezeichnung Wärmeleitung ist ein fest definierter Begriff in der Thermodynamik. Wärme ist demnach als Energie definiert, welche allein durch ein Temperaturgefälle über die Systemgrenzen transportiert wird. Dabei fließt unter Berücksichtigung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik die thermische Energie immer von der warmen Quelle zur kalten Senke. [14]

Für die Herleitung der Wärmeleitungsgleichung wird auf den ersten Hauptsatz der Thermodynamik zurückgegriffen. Die Änderung der inneren Energie dU ist gleich die dem System zu- oder abgeführte Wärme Q und die am System oder vom System verrichtete Arbeit W ,

$$dU = dQ + dW. \quad (2.1)$$

Unter Berücksichtigung der Begriffsdefinition von Wärme nimmt der Arbeitsterm W den Wert $W = 0$ an und wird für die Herleitung der Wärmeleitungsgleichung nicht weiter betrachtet.

Aus dem Prinzip der Energieerhaltung folgt daraus für ein infinitesimales Volumen (Abb. 1) die Energiebilanz über einen Zeitraum dt

$$\frac{dU}{dt} = (\dot{q}_x|_x - \dot{q}_x|_{x+dx}) + (\dot{q}_y|_y - \dot{q}_y|_{y+dy}) + (\dot{q}_z|_z - \dot{q}_z|_{z+dz}) + \dot{E}_{source}. \quad (2.2)$$

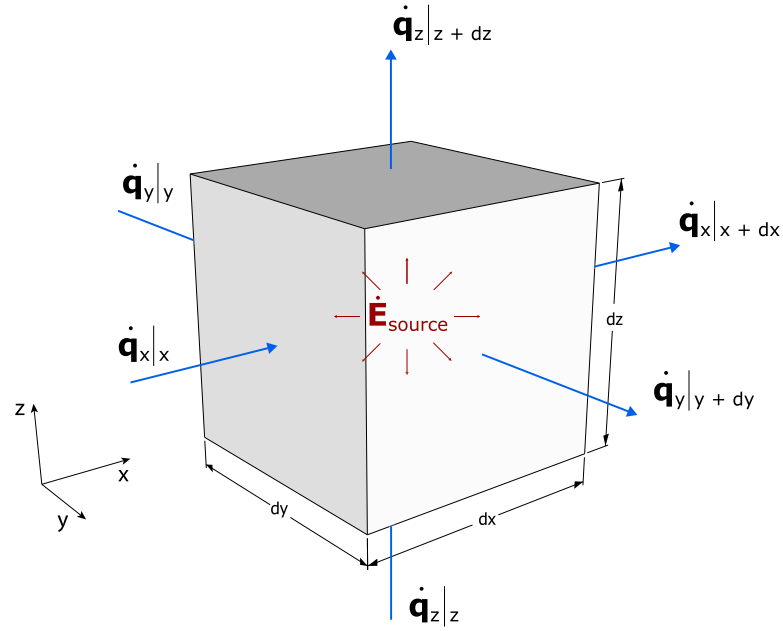


Abbildung 1: Leistungsbilanz innerhalb eines infinitesimal kleinen Volumens

Folglich gilt, dass die Änderung der Energie innerhalb eines Systems über den Zeitraum dt gleich der Summe der Änderung der Wärmeströme $\dot{q}|_n - \dot{q}|_{n+dn}$ und die im System generierte Energie ist:

$$\dot{E}_{source} = \int_V \dot{e}_{source} \cdot dV. \quad (2.3)$$

Da in einem infinitesimal kleinen Volumen von einer homogenen Wärmeerzeugung auszugehen ist, folgt aus 2.3 die vereinfachte Schreibweise des Quellterms,

$$\dot{E}_{source} = \dot{e}_{source} \cdot dV. \quad (2.4)$$

Unter Hinzunahme der spezifischen Wärmekapazität c , der Dichte ρ und unter Beachtung der Energieerhaltung, folgt für die Änderung der Energie im Volumen ($\rho c = \text{const.}$),

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt}(\rho \cdot c \cdot dV \cdot T) = \rho \cdot c \cdot dV \cdot \frac{dT}{dt}. \quad (2.5)$$

Weiterhin gilt für die Wärmeströme in einem infinitesimal kleinen Volumen unter Anwendung der Taylor-Entwicklung [15]:

$$\dot{q}_x|_x - \dot{q}_x|_{x+dx} = \dot{q}_x|_x - \left[\dot{q}_x|_x + \frac{\partial \dot{q}}{\partial x} \cdot dx \right] = -\frac{\partial \dot{q}}{\partial x} \cdot dx, \quad (2.6)$$

$$\dot{q}_y|_y - \dot{q}_y|_{y+dy} = \dot{q}_y|_y - \left[\dot{q}_y|_y + \frac{\partial \dot{q}}{\partial y} \cdot dy \right] = -\frac{\partial \dot{q}}{\partial y} \cdot dy, \quad (2.7)$$

$$\dot{q}_z|_z - \dot{q}_z|_{z+dz} = \dot{q}_z|_z - \left[\dot{q}_z|_z + \frac{\partial \dot{q}}{\partial z} \cdot dz \right] = -\frac{\partial \dot{q}}{\partial z} \cdot dz. \quad (2.8)$$

Das hier auftretende Minus berücksichtigt den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, welcher besagt, dass Wärme in Richtung der Temperaturgefälle strömt.

Der letzte Schritt erfolgt unter Beachtung des Fourier'schen Gesetzes. Dieses besagt, dass der Wärmestrom über die Fläche A proportional zum Betrag des Temperaturgradienten und entgegengesetzt zu seinem Vorzeichen ist [16]:

$$\dot{q}_n = -k A \frac{dT}{dn}. \quad (2.9)$$

Der Proportionalitätsfaktor k ist dabei die Wärmeleitfähigkeit des Materials. In isotropen Materialien ist die Wärmeleitfähigkeit ein Skalar, in nichtisotropen dagegen Medien eine Matrix. [17]

Für die Formulierung der Wärmeleitungsgleichung setzt man 2.9 in 2.6 bis 2.8, diese anschließend in 2.2 und dividiert durch das Volumen $dx dy dz$:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{source}. \quad (2.10)$$

Die daraus resultierende Gleichung ist, für isotrope Materialien mit konstanter Dichte und konstanter spezifischer Wärmekapazität, die allgemeine Form der Fourier'schen Differentialgleichung und somit die Grundgleichung der dreidimensionalen Wärmeleitung.

Sie ist der Klasse der parabolischen partiellen Differentialgleichungen (PDE) zuzuordnen. Aufgrund der einfachen Zeitabhängigkeit ∂t sowie der doppelten Ortsabhängigkeit $\partial^2 n$ werden zur Lösung der PDE eine Anfangsbedingung und zwei Randbedingungen benötigt. Hierbei ist zu beachten, dass jede Anfangsbedingung nur in Verbindung mit einer Randbedingung formuliert werden kann. [18]

Grundsätzlich können drei Arten von Randbedingungen formuliert werden,

- die Dirichlet-Randbedingung $f(x)$ (Temperaturbeaufschlagung),
- die Neumann-Randbedingungen $\frac{\partial f}{\partial n}$ (definierter Wärmestrom),
- sowie die Gemischte-Randbedingungen $f + \frac{\partial f}{\partial n}$ (Dirichlet und Neumann).

Weiterhin können aus 2.10 Spezialfälle abgeleitet werden. Der stationäre Zustand ist erreicht, wenn es zu keiner Veränderung der Temperatur über der Zeit kommt:

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{source}. \quad (2.11)$$

Sofern es sich um ein homogenes und isotropes Material handelt, die Materialeigenschaften also nicht orts- und richtungsabhängig sind, erhält man die Poisson-Gleichung:

$$\frac{\dot{e}_{source}}{k} = \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z} = \nabla^2 T. \quad (2.12)$$

Die Laplace-Gleichung ist die spezielle Form der homogenen Poisson-Gleichung:

$$0 = \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z} = \nabla^2 T. \quad (2.13)$$

2.3 Numerische Umsetzung innerhalb des Fire Dynamics Simulators

Die Diskretisierung der dreidimensionalen Wärmeleitungsgleichung erfolgt in FDS mit Hilfe der Finiten Volumen Methode (FVM) [19] unter Anwendung der folgenden vier grundlegenden Schritte [20]:

1. Unterteilung des Rechengebietes in endliche Kontrollvolumen (Abb. 1)
2. Bestimmung der Integralform für die Differentialgleichung
3. Bestimmung des Wärmestromes an den Wänden der Volumen (Konsistenz)
4. Iterative Bestimmung der Temperaturwerte pro Volumen und Zeitschritt

Die daraus resultierende Diskretisierungsgleichung repräsentiert das Prinzip der Energieerhaltung für jedes Kontrollvolumen im Berechnungsgebiet.

Weiterhin werden in FDS zwei wichtige Annahmen bezüglich der Wärmeleitungsgleichung (Gl. 2.10) getroffen. Zum einen sind die Materialeigenschaften Dichte ρ sowie spezifische Wärmekapazität c über den gesamten Zeitraum als konstant anzusehen. Zum anderen wird der Quellterm $\dot{e}_{source}$ nicht in die Berechnung miteinbezogen. Insbesondere die letzte Annahme ist darauf zurückzuführen, dass sich das HT3D Modell derzeit noch in der Entwicklung befindet. In späteren Versionen wird der Quellterm Pyrolysevorgänge und die dadurch erzeugte Wärme im Material berücksichtigen.

Die zu diskretisierende Gleichung innerhalb des HT3D Modells hat demnach die Form [19]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (2.14)$$

Diskretisierung in einer Dimension

Zur übersichtlichen Darstellung wird die Diskretisierung anhand der eindimensionalen Wärmeleichung aufgezeigt

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.15)$$

und anschließend auf die dreidimensionale Situation übertragen.

In Abbildung 2 werden die in der Diskretisierung verwendeten Terme visuell dargestellt. Das betrachtete Kontrollvolumen (Zelle) ist grau hinterlegt und besitzt den Temperaturwert T_0 . Die Temperaturen der benachbarten Zellen sind folglich T_{+1} und T_{-1} . Der Abstand von Zellmitte zu Zellmitte ist mit Δx_{m-1} beziehungsweise mit Δx_m charakterisiert. Die Breite einer Zelle ist mit Δx gegeben. Die mittlere Wärmeleitfähigkeit zwischen zwei Zellen ist mit $k_{-1/2}$ und $k_{1/2}$ angegeben.

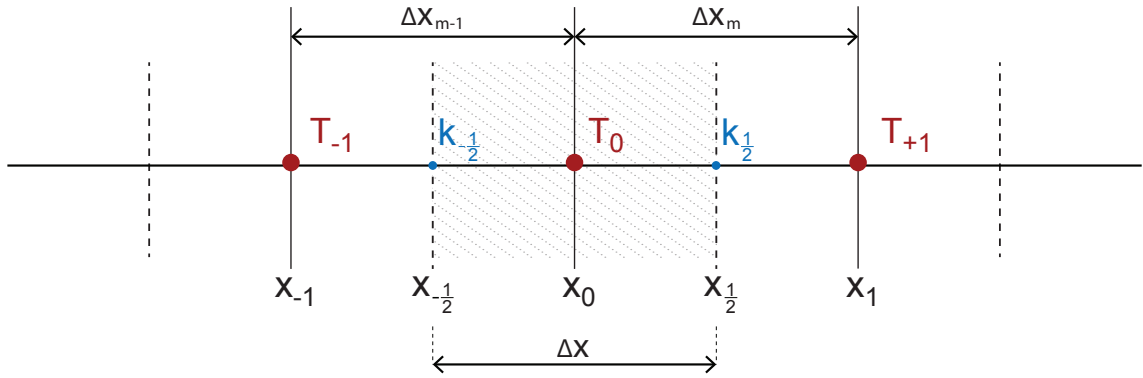


Abbildung 2: Visuelle Darstellung der Diskretisierungsterme (FVM)

Zu Beginn erfolgt die Integration der Differentialgleichung 2.15 über das Volumen (eindimensional) und über den Zeitraum t bis $t + \Delta t$. Zur besseren Darstellung werden Temperaturwerte zum Zeitpunkt t mit T^0 gekennzeichnet und folglich für $t + \Delta t$ mit T^1

$$\rho c \int_{x_{-1/2}}^{x_{1/2}} \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \int_t^{t+\Delta t} \int_{x_{-1/2}}^{x_{1/2}} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt. \quad (2.16)$$

Unter der Annahme, dass die Temperatur an jedem Ort des Volumens konstant ist, folgt für die linke Seite von 2.16 [20]:

$$\rho c \int_{x_{-1/2}}^{x_{1/2}} \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dx dt = \rho c \Delta x (T_0^1 - T_0^0). \quad (2.17)$$

Die anschließende Integration der rechten Seite in Gleichung 2.16 führt zu:

$$\rho c \Delta x (T_0^1 - T_0^0) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(k_{-1/2} \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{\Delta x_{m-1}} - \left(k_{1/2} \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{\Delta x_m} \right] dt. \quad (2.18)$$

An dieser Stelle muss eine Annäherung an den Verlauf des Wärmestroms (Profil) zwischen den Zellen gewählt werden, um die Konsistenz an den Zellwänden zu gewährleisten. Es muss also sichergestellt werden, dass der Wärmestrom $\frac{\partial T}{\partial x}$, der eine Zelle verlässt, identisch mit dem eintretenden Wärmestrom der Nachbarzelle ist (Energieerhaltung) [20].

Um dies zu gewährleisten wird der Wärmestrom zwischen zwei Zellen und somit an der Zellwand linear angenähert (Abb. 2). Der Wärmestrom an den Zellwänden wird über einer linear Taylorreihe ermittelt [21]:

$$T(x, x_0) = T_P + \frac{\partial T}{\partial x}(x - x_0) + \mathcal{O}x^2. \quad (2.19)$$

Entwickelt man 2.19 um die Punkte x_{-1} und x_1 , erhält man für den Wärmestrom zwischen zwei Zellen die Annäherung:

$$\begin{aligned} \left(k_{1/2} \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{\Delta x_m} &= \left(k_{1/2} \frac{T_{+1} - T_0}{\Delta x_m} \right), \\ \left(k_{-1/2} \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{\Delta x_{m-1}} &= \left(k_{-1/2} \frac{T_0 - T_{-1}}{\Delta x_{m-1}} \right). \end{aligned} \quad (2.20)$$

Durch Substitution der Wärmeströme in 2.18 mit den Werten von 2.20 folgt:

$$\rho c \Delta x (T_0^1 - T_0^0) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(k_{1/2} \frac{T_{+1} - T_0}{\Delta x_m} \right) - \left(k_{-1/2} \frac{T_0 - T_{-1}}{\Delta x_{m-1}} \right) \right] dt. \quad (2.21)$$

Die Integration über die Zeit erfolgt durch die sogenannte *Explizite-Euler-Methode* [19] und resultiert in folgender diskretisierten Differentialgleichung:

$$\rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_0^1 - T_0^0) = \left(k_{1/2} \frac{T_{+1}^0 - T_0^0}{\Delta x_m} \right) - \left(k_{-1/2} \frac{T_0^0 - T_{-1}^0}{\Delta x_{m-1}} \right). \quad (2.22)$$

Diskretisierung in drei Dimensionen

Das im vorherigen Kapitel gezeigte Verfahren kann gleichermaßen auf die Diskretisierung der dreidimensionalen Wärmeleitung angewandt werden. Dazu erfolgt die Integration der Differentialgleichung über das dreidimensionale Volumen $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$:

$$\rho c \int_V \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dV = \int_t^{t+\Delta t} \int_V \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dV dt. \quad (2.23)$$

2.24 zeigt die daraus resultierende Diskretisierungsgleichung. Die Notation der Indizes orientiert sich dabei am Kompasschema. Es gilt $W = x - 1$, $E = x + 1$, $S = y - 1$, $N = y + 1$, $L = z - 1$ und $U = z + 1$:

$$\begin{aligned} \rho c \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} (T_0^1 - T_0^0) = & \left(\left(k_{1/2} \frac{T_E^0 - T_0^0}{\Delta x_E} \right) - \left(k_{-1/2} \frac{T_0^0 - T_W^0}{\Delta x_W} \right) \right) \Delta y \Delta z + \\ & \left(\left(k_{1/2} \frac{T_N^0 - T_0^0}{\Delta x_N} \right) - \left(k_{-1/2} \frac{T_0^0 - T_S^0}{\Delta x_S} \right) \right) \Delta x \Delta z + \\ & \left(\left(k_{1/2} \frac{T_U^0 - T_0^0}{\Delta x_U} \right) - \left(k_{-1/2} \frac{T_0^0 - T_L^0}{\Delta x_L} \right) \right) \Delta x \Delta y. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Der letzte Schritt, in der numerischen Umsetzung der dreidimensionalen Wärmeleitung innerhalb von FDS, ist die Ermittlung der Zelltemperatur zum Zeitpunkt $t + \Delta t$. Da die dafür benötigte Variable T_0^1 leicht aus 2.24 herausgelöst werden kann, erfolgt die anschließende Implementierung in den Fire Dynamics Simulator durch:

$$\begin{aligned} T_0^1 = T_0^0 + \left(\frac{\Delta t}{\rho c} \right) \cdot & \left[\left(\left(k_{1/2} \frac{T_E^0 - T_0^0}{\Delta x_E} \right) - \left(k_{-1/2} \frac{T_0^0 - T_W^0}{\Delta x_W} \right) \right) \frac{1}{\Delta x} + \right. \\ & \left(\left(k_{1/2} \frac{T_N^0 - T_0^0}{\Delta x_N} \right) - \left(k_{-1/2} \frac{T_0^0 - T_S^0}{\Delta x_S} \right) \right) \frac{1}{\Delta y} + \\ & \left. \left(\left(k_{1/2} \frac{T_U^0 - T_0^0}{\Delta x_U} \right) - \left(k_{-1/2} \frac{T_0^0 - T_L^0}{\Delta x_L} \right) \right) \frac{1}{\Delta z} \right]. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Wie in Kapitel 2.2 angemerkt, werden für die Lösung von 2.25 eine Anfangsbedingung und mindestens zwei Randbedingungen benötigt. Die Anfangsbedingung resultiert aus der in der Simulation definierten Umgebungstemperatur.

Demnach hat jedes Material zum Zeitpunkt $t = 0$ den Temperaturwert der Umgebung.

Für die Definition der Randbedingungen kann im Rahmen des HT3D Modells auf drei verschiedene Methoden zurückgegriffen werden:

- Definierte Oberflächentemperatur (Dirichlet-Randbedingung)
- Definierter Wärmestrom (Neumann-Randbedingung)
- Einbindung der Gasphase (Konvektion, Strahlung) (Gemischte-Randbedingung)

Weiterhin gilt es, die Stabilität der numerischen Umsetzung zu beachten. Die Definition des Begriffs der numerischen Stabilität ist davon abhängig, in welchem mathematischen Zusammenhang diese betrachtet wird [22]. Allgemein gesprochen gilt ein Algorithmus f^* als numerisch stabil, wenn die Werte von $f^*(x)$ in der Umgebung der Werte der theoretischen Lösung $f(x)$ liegen [23]. In anderen Worten ist eine numerische Lösung dann stabil, wenn sie die Phänomene der Wirklichkeit adäquat wiedergibt.

Ausschlaggebend für die numerische Stabilität innerhalb des HT3D Modells ist die Zeitintegration der *Expliziten-Euler-Methode*.

Diese wiederum ist stabil, wenn die *Von-Neumann-Bedingung* erfüllt ist: [24]

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta x)^2(\Delta y)^2(\Delta z)^2}{k/(\rho c)}. \quad (2.26)$$

2.4 Vergleich der Wärmeleitungsmodelle in FDS

Grundsätzlich unterscheidet der Fire Dynamics Simulator zwischen zwei Modellen für die Berechnung der Wärmeleitung. Während der eindimensionale Fall (Standardmodell) nur den Temperaturverlauf normal zur Oberfläche betrachtet, berechnet das HT3D Modell auch die laterale Wärmediffusion. Aus Sicht der Numerik liegt der Unterschied in der Methode der Diskretisierung. Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, wird die dreidimensionale Wärmeleitung über ein Finites Volumen Modell angenähert, während für die eindimensionale Berechnung eine Finite Differenzen Methode (Crank-Nicolson) zur Diskretisierung verwendet wird. [19]

Ferner unterscheiden sich beide Methoden in ihrer Anwendung innerhalb einer Simulation. Das Standardmodell basiert auf der Ein-Zellen-Methode. Für die Kopplung zwischen Festkörper und Gasphase ist es wichtig, dass der Materialblock (englisch: Obstruction) nicht breiter als eine Zelle ist, da ansonsten die Wärmeabgabe nicht mehr zwischen Oberfläche und Gasphase berechnet (Abb. 3a) wird, sondern zwischen Oberfläche und einer Pufferzone (mit Umgebungstemperatur T_∞) (Abb. 3b). Diese wird in weiteren Berechnungen nicht berücksichtigt. Sollen mehrere Materialsichten simuliert werden, müssen diese Prozentual in einer Zelle verteilt werden (Ein-Zellen-Methode). [1]

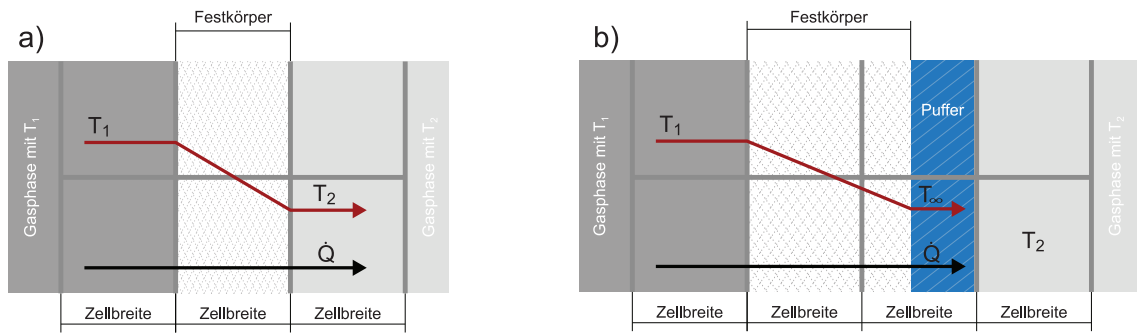


Abbildung 3: Wärmeübertragung zwischen Festkörper und Gasphase im Standardmodell

Gegenüber der gezeigten Ein-Zellen-Methode verwendet das HT3D Modell die Multi-Zellen-Methode. Die Darstellung verschiedener Materialschichten erfolgt durch die Aneinanderreihung verschiedener Zellen. Dadurch entfällt auch die im Standardmodell auftretende Pufferzone. Gleichzeitig erlaubt die dreidimensionale Wärmeleitung eine Diffusion der Wärme in alle Raumrichtungen. Dies ermöglicht die thermische Analyse komplexerer Geometrien wie Stahlträger mit I-Profilen oder die korrekte Bestimmung des Temperaturverlaufes in den Wänden eines Brandraumes. [1]

Es muss also bereits bei der Geometrieerstellung einer Simulation bekannt sein, welches Wärmeleitungsmodell verwendet wird. Bei der Verwendung verschiedener Materialschichten und der dreidimensionalen Wärmeleitung ist die Zellengröße entscheidend für die Dicke einer Materialschicht, wohingegen das Standardmodell bei der Dimensionierung von Materialschichten nicht an die Zellbreite gebunden ist. Lediglich für die Wechselwirkung zwischen Festkörper und Gasphase darf das Standardmodell eine Zellenbreite nicht überschreiten. Der Vorteil des HT3D Modells gegenüber der eindimensionalen Wärmeleitung liegt also in der genaueren Darstellung des Temperaturverlaufs innerhalb eines Festkörpers sowie die realitätsnähere Geometriegestaltung aufgrund der Multi-Zellen-Methode. Weiterhin gilt es, die Berechnungszeit beider Methoden zu berücksichtigen. Aufgrund der Komplexität der dreidimensionalen Wärmeleitung ist hier von einer deutlich höheren Berechnungszeit auszugehen, weshalb die Verwendung dieses Modells in größeren Geometrien als weniger sinnvoll angesehen wird.

3. Experimente

Die Grundlage der Versuche dieser Bachelorthesis bilden die Experimente von A. Meunders in seiner Dissertation *A study on buoyancy-driven flows* [5]. Der dort beschriebene Versuchsaufbau setzt sich aus einem Gehäuse aus Acrylglas (Polymethylmethacrylat) zusammen, dessen unterer Abschluss eine Holzplatte darstellt. Auf dieser Holzplatte befindet sich ein Kupferblock, der die elektrische Energie in Wärmeenergie umwandelt, welche wiederum eine thermische Strömung erzeugt. Zur Einschränkung der Wärmeleitung zwischen Holzplatte und Kupferblock wird die Unterseite des Kupferblocks mit einer Dämmschicht der Firma *Promat* (im Folgenden Promatdämmung) ausgestattet.

Im Rahmen weiterer Forschungstätigkeiten erfolgte die Optimierung des Versuchsaufbaus von A. Meunders. In [6] und [7] wird der Kupferblock in die Bodenplatte eingebettet und somit Grenzschichtablösungen an den Seiten des Kupferblocks vermieden. [25]

Im Rahmen dieser Bachelorthesis wird der Versuchsaufbau aus [6] und [7] vereinfacht übernommen. Die Einhausung der Bodenplatte wird für die Messung mittels Infrarotpistole entfernt und diverse Messpunkte werden an der Einschalung des Kupferblocks angebracht. Das folgende Kapitel beschreibt und visualisiert den Versuchsaufbau, die verwendete Messtechnik und ihre Positionen sowie die Durchführung der Experimente.

3.1 Versuchsaufbau

Der Aufbau der Versuchsanlage besteht aus einer Edelstahlplatte (X6CrNiMoTi17-12-2) mit den Abmessungen $722\text{ mm} \times 700\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ und einem darin eingelassenen Holztopf (Abb. 4). Dieser wiederum beinhaltet den Kupferblock und die Promatdämmung (Abb. 5).

Während die Promatdämmung in den Experimenten von [6] und [7] dazu dient eine laterale Wärmeausbreitung zu vermeiden, ist hier die Schichtung von Kupfer, Promat und Holz von anderem Vorteil. Durch diese Aneinanderreihung kann das HT3D-Berechnungsmodell in Hinsicht auf die Wärmeleitung durch verschiedene Materialien geprüft werden. Eine detaillierte Darstellung der Holzwanne ist in Abbildung 5 gegeben. Zur vereinfachten Messung mittels Infrarotpistole werden die Oberflächen aller Materialien mit einem Kalkspray beaufschlagt. Dadurch wird ein einheitlicher Emissionsgrad von 0.9 sichergestellt.

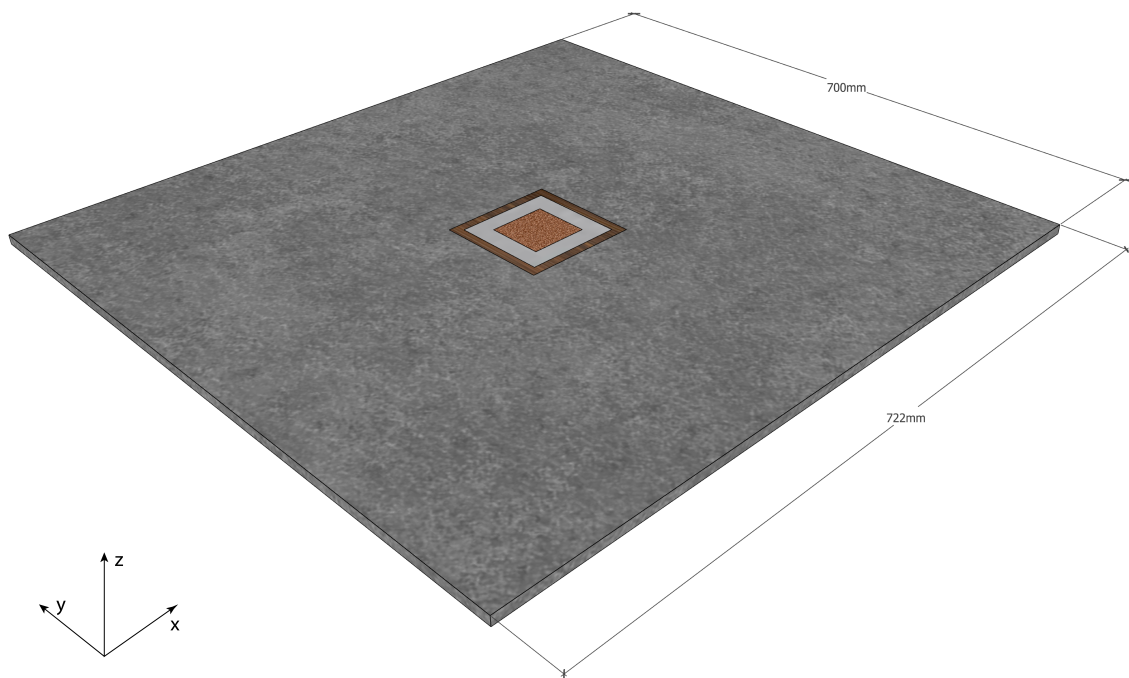


Abbildung 4: Aufbau der Versuchsanlage

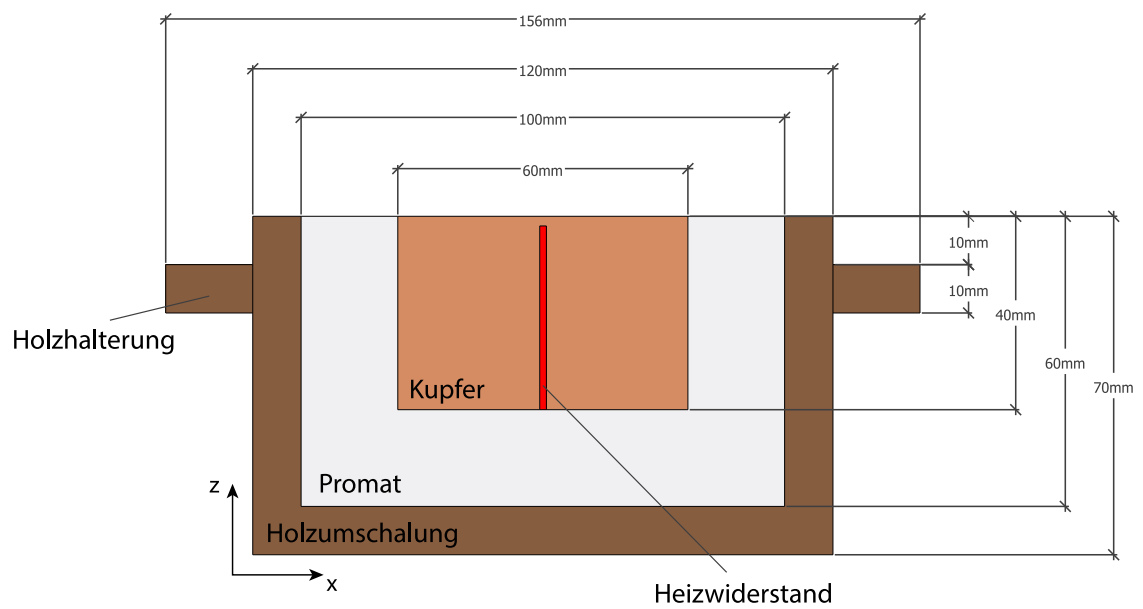


Abbildung 5: Aufbau und Schichtung der Holzwanne

3.2 Verwendete Messtechnik

Die Erfassung der Oberflächentemperaturen erfolgt durch die Verwendung von sieben Thermoelementen (M) und einer Infrarotpistole (IR). Zeitgleich erfolgt die Ermittlung der Umgebungstemperatur über ein achttes Thermoelement, welches in der unmittelbaren Nähe des Versuchsaufbaus platziert ist. Die Positionierung der restlichen Messpunkte ist der Abbildung 6 zu entnehmen.

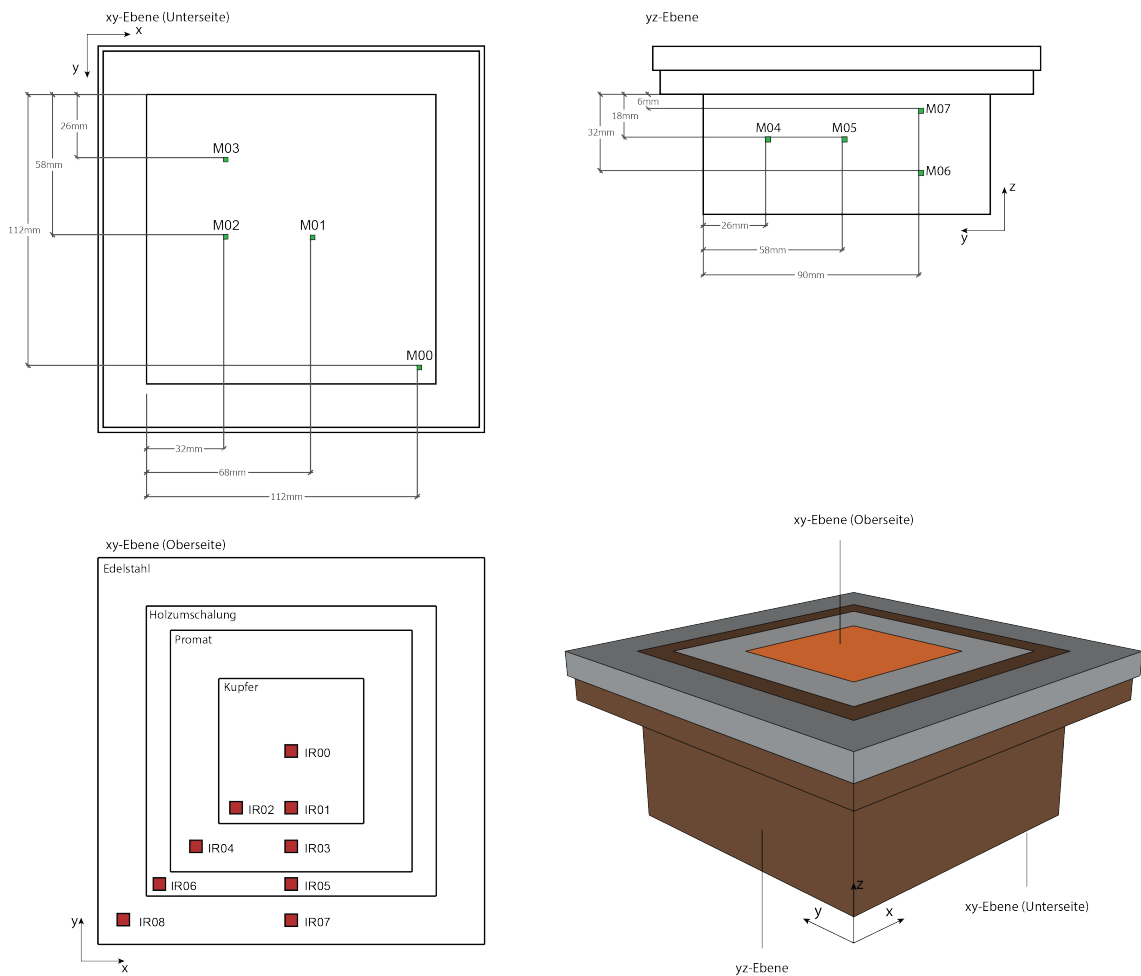


Abbildung 6: Positionen der Messstellen

Während die Messpunkte M00 bis M07 dauerhaft an der Außenfläche angebracht sind (Thermoelemente), geben die Werte IR00 bis IR08 lediglich die Position der (einmaligen) Temperaturaufnahme mittels Infrarotpistole wieder. Es ist zu beachten, dass es sich bei den Messpositionen lediglich um ungefähre Werte handelt. Insbesondere bei der Infrarotmessung kommt es aufgrund der Handmessungen zu Abweichungen bei der Temperaturermittlung. Die daraus resultierenden Ungenauigkeiten werden im Rahmen der Auswertung berücksichtigt.

Die Messung mittels Infrarottechnik erfolgt durch die Infrarotpistole der Firma *Testo*. Diese erfasst Temperaturen zwischen -90 und 900 °C und besitzt bei einem 300 mm großen Abstand zur Oberfläche einen Messflächendurchmesser von 3 mm. Die Fehlertoleranz der Messung liegt bei ± 0.75 %, wenigstens jedoch bei ± 0.75 °C. [26]

Die Temperaturen innerhalb der yz-Ebene und xy-Ebene (Unterseite) werden durch Thermoelemente des Typs CO3-K der Firma *Omega* gemessen. Der Messkopf hat einen Umfang von 0.25 mm und kann bei Temperaturen bis zu 260 °C eingesetzt werden. Die Messunsicherheit liegt im Bereich ± 0.75 %, mindestens jedoch bei ± 2.2 °C. [27]

3.3 Versuchsdurchführung

Insgesamt werden im Rahmen dieser Bachelorthesis 12 Validierungsexperimente durchgeführt (Tab. 1). Die einzelnen Durchläufe sind in ihrem Aufbau und der Durchführung identisch. Lediglich die elektrische Leistung P , welche dem Kupferblock zugeführt wird, variiert mit jedem Experiment.

		Versuch					
		1	2	3	4	5	6
Spannung	[V]	80	120	70	130	40	70
Stromstärke	[A]	0.35	0.53	0.3	0.58	0.16	0.3
Leistung	[W]	28	63.6	21	75.4	6.4	21

		7	8	9	10	11	12
Spannung	[V]	90	20	40	50	60	110
Stromstärke	[A]	0.39	0.07	0.16	0.2	0.25	0.48
Leistung	[W]	35.1	1.4	6.4	10	15	52.8

Tabelle 1: Elektrische Leistung der Validierungsexperimente

Bevor die Temperaturmessung vorgenommen wird, ist es wichtig, dass sich die Temperaturen der Materialien nicht weiter erhöhen. Dazu wird mittels eines Thermoelements im Inneren des Kupferblocks die Innentemperatur über einen Zeitraum von zehn Minuten überwacht. Kommt es innerhalb des Zeitraumes zu keinen oder nur sehr geringen Temperaturschwankungen, ist davon auszugehen, dass der stationäre Zustand erreicht ist. Die Grenzen der Temperaturschwankungen liegen im Bereich von ± 0.5 %. Gleichzeitig mit Beginn der Temperaturüberwachung im Kupferblock erfolgt über ein Zeitraum von zehn Minuten die Temperaturmessung am Holztopf (Thermoelemente M00-M07).

Nach Beendigung der Temperaturoaufzeichnung durch die Thermoelemente erfolgt die Überprüfung der Innentemperaturen des Kupferblocks. Treten keine Temperaturschwankungen auf oder sind diese innerhalb der genannten Grenzen, wird mit der Infrarotmessung fortgefahren.

Die Dokumentation der Ergebnisse erfolgt für die Thermoelemente digital auf einer angeschlossenen SD-Karte und für die Infrarotpistole analog mittels Messprotokoll. Das Ergebnis der Temperatur innerhalb des Kupferblocks wird zu Beginn und am Ende der Überwachungszeit dokumentiert.

4. FDS Simulation

Insgesamt werden im Rahmen der Erarbeitung dieser Thesis fünf Simulationen durchgeführt. Die Berechnungen unterscheiden sich dabei nur in der jeweiligen Wärmefreisetzung innerhalb des Kupferblocks. In Tabelle 2 werden die Versuchsbezeichnungen aufgelistet, welche den Simulationen zugrunde gelegt und später ausgewertet werden. Die Auswahl der fünf Versuche basiert auf der Abdeckung der Leistungsbereiche gering (1.4 W), mittel (21 W) und hoch (75.4 W), sowie auf der Qualität der aufgezeichneten Experimentaldaten. Eine bessere Abstufung des Leistungsbereiches wird erzielt, wenn Versuch 6 (21 W) durch Versuch 7 (35.1 W) ersetzt wird. Im Rahmen einer ersten Auswertung der Experimentaldaten ist aber zu erkennen, dass der Datensatz des Versuches 7 lückenhaft ist, weshalb der mittlere Leistungsbereich durch den Versuch 6 vertreten wird.

	Versuch				
	2	4	6	8	10
$\dot{Q}$ [W]	63.6	75.4	21	1.4	10

Tabelle 2: Validierungssimulationen - Wärmefreisetzungsraten

Sobald eine Simulation den stationären Zustand erreicht, werden die Berechnungen beendet und die Simulation gilt als abgeschlossen.

Das folgende Kapitel beschreibt die Erstellung der Simulation zur Validierung für das Berechnungsmodell *Solid Heat Transfer 3D* des Fire Dynamics Simulators in der Version 6.6.0. Zunächst wird die Gittersensitivitätsstudie anhand einer kleinskalierten Validierungssimulation durchgeführt und ausgewertet. Anschließend werden die Schritte der Geometrieerstellung beschrieben und visualisiert. Das Kapitel *Parallelisierung* beschreibt kurz die Methoden OpenMP und MPI und deren Verwendung in der Validierungssimulation.

4.1 Gittersensitivitätsstudie

Die Grundlage einer numerischen Berechnung bildet die Diskretisierung eines kontinuierlichen Problems in endlich viele Punkte. Da die numerische Lösung nur eine Annäherung an die tatsächliche Lösung darstellt, ist jede Diskretisierung mit einem Fehler behaftet. Der Diskretisierungsfehler ist dabei zum einen abhängig von der Größe der Zelle und zum anderen von der Art der Differenzierung. [28]

Die Diskretisierung innerhalb von FDS erfolgt hauptsächlich durch die Finite Differenzen Methode auf Basis von quadratischen Zellen. Eine Ausnahme bildet das Berechnungsmodell der dreidimensionalen Wärmeleitung (HT3D). Hier erfolgt die Diskretisierung durch die Finite Volumen Methode. Die angenäherten Lösungen der Erhaltungsgleichungen besitzen die Genauigkeit der zweiten Ordnung. Der Diskretisierungsfehler ist demnach proportional zum Quadrat der Zellengröße. Eine Reduzierung der Zellenabmessungen um den Faktor zwei bewirkt somit eine Verkleinerung des Diskretisierungsfehlers um das Vierfache. Gleichzeitig erhöht sich die Berechnungszeit um das Zweifache pro Raumrichtung (x , y , z) und Zeitschritt, was zu einer insgesamt 16-fach längeren Berechnungszeit führt [19]. Eine Gittersensitivitätsanalyse ist demnach zu Beginn einer Simulation essentiell, damit der Diskretisierungsfehler unter Beachtung der Rechenzeit minimal wird.

Ein Anhaltspunkt zur ersten Einschätzung der erforderlichen Zellengröße für Simulationen mit auftriebsgetriebenen Strömungen ist der in [1] gegebene dimensionslose Ausdruck $D^*/\Delta x$. Dabei ist D^* (Gl. 4.1) der charakteristische Durchmesser des Feuers und Δx die nominale Zellengröße. Je größer das Verhältnis der beiden Werte, desto feiner ist die Auflösung der Fluidodynamik innerhalb der Simulation. Beispielhafte Relationswerte werden in [28] (Tabelle 6-1) genannt. Eine Zellengröße von einem Viertel des charakteristischen Durchmessers entspricht einem groben Gitter, wohingegen ein feines Gitter bei einer Zellengröße von einem Sechzehntel erreicht wird.

Zur Ermittlung der idealen Zellengröße innerhalb der Validierungssimulationen wird als erstes D^* errechnet. Anschließend werden auf Basis der genannten Relationswerte drei Zellengrößen ermittelt und in einer vereinfachten¹ Simulation miteinander verglichen. Aus dem daraus resultierenden Ergebnis werden folglich die Zellendimensionen abgeleitet.

¹Simulation mit den wesentlichen physikalischen Eigenschaften der Validierungssimulation: Wärmeleitung innerhalb eines Festkörpers und Kopplung zwischen Oberfläche des Körpers und Gasphase

Schritt I - D^*

Der charakteristische Durchmesser des Feuers wird anhand der Dichte ρ , der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p , der Temperatur T , der Erdbeschleunigung g und der Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q}$ berechnet:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}. \quad (4.1)$$

Da in der späteren Simulation ein stationärer Zustand zur Vergleichbarkeit mit den Experimentalergebnissen erreicht werden soll, ist es wichtig, die Fluidodynamik (Konvektion, Strahlung) in der Gasphase genau aufzulösen, da diese aufgrund der Wechselwirkung einen entscheidenden Einfluss auf den stationären Zustand hat. Die Eigenschaften der Gasphase bilden deshalb die Grundlage der Zellendimensionierung.

Standardmäßig ist innerhalb des *Fire Dynamics Simulators* Luft als Umgebungsfluid definiert. Die Zusammensetzung ist der Tabelle 3 zu entnehmen. Zur besseren Reproduzierbarkeit der späteren Simulationsgeometrie werden für alle Validierungssimulationen die gleichen Zellengrößen angenommen, weshalb die Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q}$ und die Temperatur T den Durchschnitt aus allen fünf Versuchen darstellt (Tabelle 4).

Stoff	Anteil	molekulare Masse
-	[%]	[g/mol]
Stickstoff	76.274	28.0134
Sauerstoff	23.054	31.9988
Kohlenstoffdioxid	0.046	44.0095
Wasserdampf	0.626	18.01528
Luft	100	28.8696

Tabelle 3: Zusammensetzung von Luft in FDS [1]

	Versuch					Ø
	2	4	6	8	10	
$\dot{Q}$ [W]	63.6	75.4	21	1.4	10	34.28
T [°C]	23.08	23.33	23.43	22.28	22.17	22.86

Tabelle 4: Durchschnittliche Umgebungstemperatur und Wärmefreisetzungsrate

Die Dokumentationen zu FDS beinhalten keine direkten Werte bezüglich der Dichte ρ , weshalb diese über die Zustandsgleichung idealer Gase berechnet wird:

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T. \quad (4.2)$$

Setzt man für Masse $m = \rho \cdot V$, erhält man durch Umformen die Formel für die Berechnung der Dichte ρ :

$$\rho = \frac{p}{R_s \cdot T}. \quad (4.3)$$

In dieser Gleichung sind der Druck $p = 101\,325$ Pa (Standardwert in FDS), sowie die Temperatur $T = 22.86\,^\circ\text{C} = 296.01$ K (siehe Tabelle 4) bekannt. Die spezifische Gaskonstante R_s errechnet sich durch 4.4, wobei $R = 8.31446 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$ die universelle Gaskonstante [29] und $M = 0.0288696 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$ die molekulare Masse von Luft (Tabelle 4) bezeichnen.

$$R_s = \frac{R}{M} \quad (4.4)$$

Nach einsetzen von 4.4 und die Parameter p und T in 4.3, erhält man für die Dichte $\rho = 1.1885 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p lässt sich über die in [19] gegebene Gleichung,

$$c_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{R}{M}, \quad (4.5)$$

ermitteln. Ergänzt man 4.5 mit den bekannten Parametern R und M und setzt für den Isentropenexponent γ den Wert 1.4 (vordefiniert in FDS) [1] ein, erhält man für die spezifische Wärmekapazität $c_p = 1.008 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$.

Ein Vergleich mit der Fachliteratur [30] zeigt, dass die errechneten Werte plausibel und für die Berechnung von D^* geeignet sind (Tabelle 5).

Unter Verwendung von 4.2, 4.5, den Werten aus der Tabelle 4, sowie dem Wert der Erdbeschleunigung $g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, resultiert aus 4.1 das Ergebnis für den charakteristischen Durchmesser $D^* = 0.0157$.

	c_p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$]	M [$\frac{\text{g}}{\text{mol}}$]	ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]
Rechnung	1.008	28.8696	1.1885
Fachliteratur [30]	1.007	28.9700	1.1767

Tabelle 5: Vergleich der Eigenschaften von LuftSchritt II - Δx

Die Berechnung der Zelldimensionen Δx erfolgt unter Verwendung des berechneten charakteristischen Durchmessers des Feuers, sowie den in [28] genannten Relationswerten $R_{\Delta x}$:

$$\Delta x = \frac{D^*}{R_{\Delta x}}. \quad (4.6)$$

Die Relationswerte $R_{\Delta x}$ wurden so gewählt, dass ein feines, mittelfeines und grobes Gitter entsteht. Die entsprechenden Zellengrößen sind der Tabelle 6 zu entnehmen.

	fein	mittelfein	grob
$R_{\Delta x}$ [-]	16	8	4
Δx [mm]	$0.98125 \approx \mathbf{1}$	$1.9625 \approx \mathbf{2}$	$3.925 \approx \mathbf{4}$

Tabelle 6: Zellengröße Δx Schritt III - Vergleichssimulation

Die Vergleichssimulation ist eine verkleinerte Abbildung der späteren Validierungssimulation und beinhaltet alle physikalischen Eigenschaften dieser. Dazu gehören die thermischen Eigenschaften des Kupferblocks, die Kopplung der Gasphase mit der Festkörperoberfläche (stationäres Stadium) sowie die Temperaturmessung auf und oberhalb der Festkörperoberfläche. Insgesamt werden drei Vergleichssimulationen mit jeweils einer fest definierten Zellengröße (Tab. 6) über einen Zeitraum von 120 Sekunden durchgeführt.

Der Aufbau der FDS-Simulation umfasst ein Rechengebiet in Form eines Würfels mit einer Seitenlänge von 100 mm, in welchem sich ein Quader mit den Abmessungen $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ (xyz) befindet (Abb. 7). Dieser erhält die Materialeigenschaften von Kupfer, welche der Tabelle 10 im Kapitel 4.2 zu entnehmen sind. Die Randbedingungen des Rechengebiets werden als offen (konstant Umgebungstemperatur) definiert. Eine frei gewählte Temperaturbeaufschlagung von $500 \text{ }^\circ\text{C}$ erwärmt den Kupferblock auf seiner Unterseite.

Die Aufnahme der Temperaturwerte erfolgt durch jeweils 100 an der x-Achse angeordneten Messpunkte ($x = [-0.05; 0.05]$ m, $y = 0$ m) auf der Festkörperoberfläche und innerhalb der Gasphase. Die Anzahl der Messpunkte resultiert aus der Anzahl der Zellen bei kleinster Zellengröße (100 in jede Raumrichtung bei $\Delta x = 1$ mm). Zur logischen Gegenüberstellung der Ergebnisse erhalten alle drei Simulationen die gleiche Anzahl an Messpunkten. Aus diesem Vorgehen folgt, dass bei den größeren Zellendimensionen (2 mm, 4 mm) die Temperaturen innerhalb der Zelle redundant gemessen werden. Eine daraus resultierende Auswirkung auf das Ergebnis ist nicht zu erwarten.

Die Berechnung der Vergleichssimulationen erfolgt auf einem Intel® Core™ i5-4308U Prozessor. Da dieser zwei physikalisch unabhängige Kerne besitzt [31], wird eine MPI-Parallelisierung (Message Passing Interface) zur Reduzierung der Rechenzeit genutzt. Dazu wird das Rechenggebiet in zwei Netze mit gleicher Zellenanzahl aufgeteilt und dem jeweiligen Prozessor zugeordnet. Die Berechnungszeiten der jeweiligen Simulation sind der Tabelle 7 zu entnehmen.

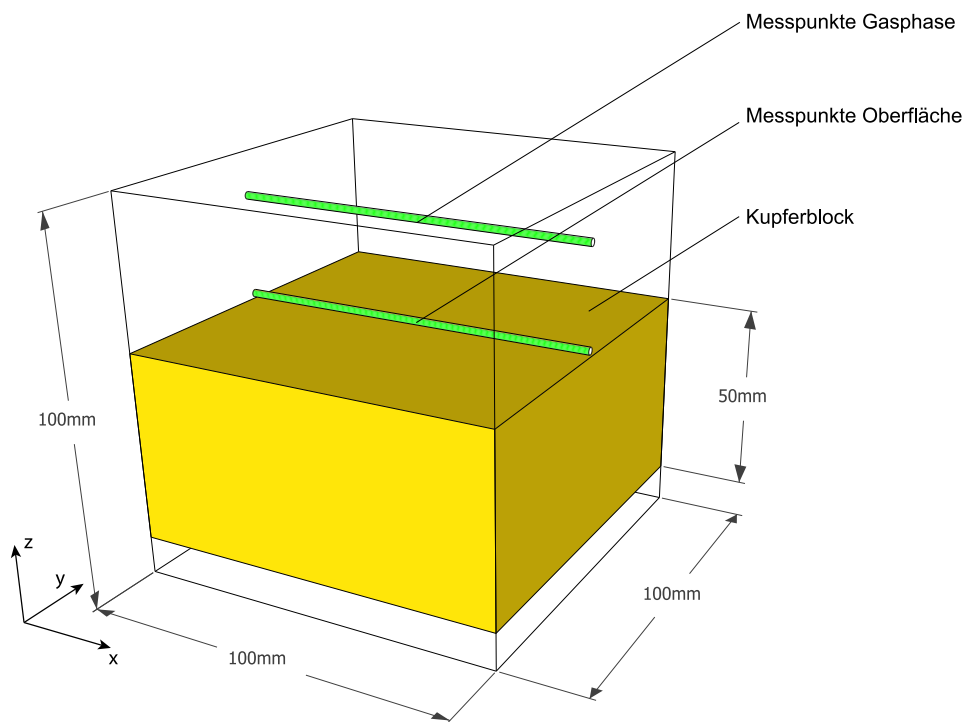


Abbildung 7: *Simulationsgeometrie Gittersensitivitätsstudie*

Schritt IV - Ergebnis

Die Auswertung der Simulationen bestätigt, dass eine Reduzierung der Zellengröße um den Faktor zwei eine ungefähre Verlängerung der Rechenzeit um das 16-fache bewirkt (Tab. 7).

		fein	mittelfein	grob
$R_{\Delta x}$	[-]	16	8	4
Δx	[mm]	1	2	4
Anzahl Zellen	[-]	1 000 000	125 000	15 625
Rechenzeit	[s]	78 392	4 739	346.7
Zeitfaktor	[-]	225.9	13.7	1

Tabelle 7: Auswertung der Rechenzeit (Gittersensitivitätsstudie)

Da zur genannten Problemstellung keine analytische Lösung vorliegt, werden die Temperaturen der Simulation mit der Zellengröße $\Delta x = 1$ mm als Referenzwert genommen, da hier der kleinste Diskretisierungsfehler vorliegt. Die Abbildungen 8 und 9 zeigen den Temperaturverlauf der Oberflächen- und Gastemperaturen nach 120 Sekunden. Die Abszisse gibt die x-Werte der FDS Geometrie in Metern wieder und die Ordinate die Temperaturen in Grad Celsius.

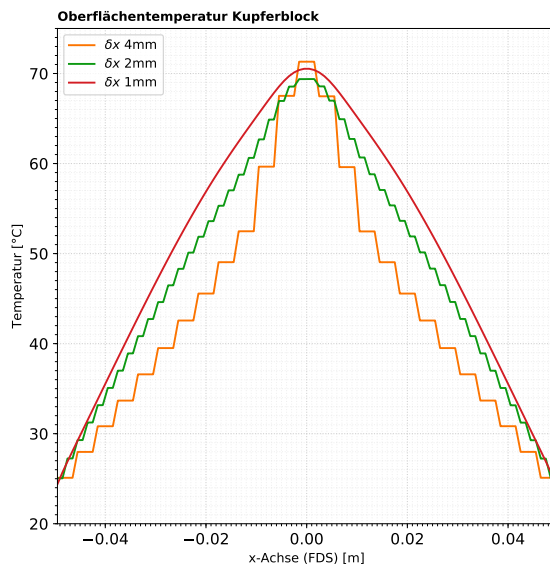


Abbildung 8: Temperaturen Oberfläche

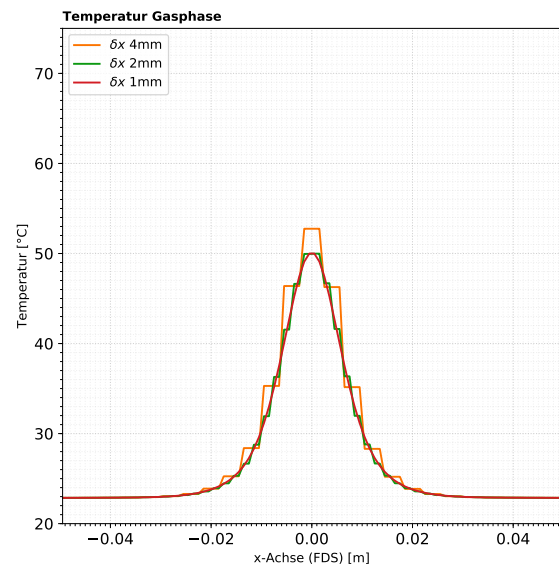


Abbildung 9: Temperaturen Gasphase

Die Auswertung der Graphen in den Abbildungen 8 und 9 erfolgt durch die Ermittlung des absoluten Durchschnittsfehlers MAE (mean absolute error):

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_{i_{1mm}} - T_{i_{\Delta x}}|. \quad (4.7)$$

Alternativ kann die Auswertung über das RMSE Verfahren (root mean squared error) erfolgen. Da diese Fehlerberechnung große Abweichungen höher gewichtet als kleinere, ist es für die Bestimmung der durchschnittlichen Abweichung in diesem Abschnitt nicht geeignet.

Die Variable i ist dabei der Laufindex der jeweiligen Zelle (1 bis $n=100$). Die Ergebnisse sind in der Tabelle 8 zusammengefasst.

	fein	mittelfein	grob
Δx [mm]	1	2	4
T_{i_x} [-]	-	$T_{i_{2mm}}$	$T_{i_{4mm}}$
MAE Oberfläche [°C]	Referenzwert	2.57	6.93
MAE Gasphase [°C]	Referenzwert	0.27	0.69

Tabelle 8: Auswertung des absoluten Durchschnittsfehlers (Gittersensitivitätsstudie)

Als Letztes wird die Dauer bis zum Erreichen des stationären Zustandes ausgewertet. Dazu werden die Temperaturen aller drei Vergleichssimulationen über den gesamten Zeitraum (120 s) in der Mitte des Kupferblocks erfasst und in einem Graphen wiedergegeben (Abb. 10).

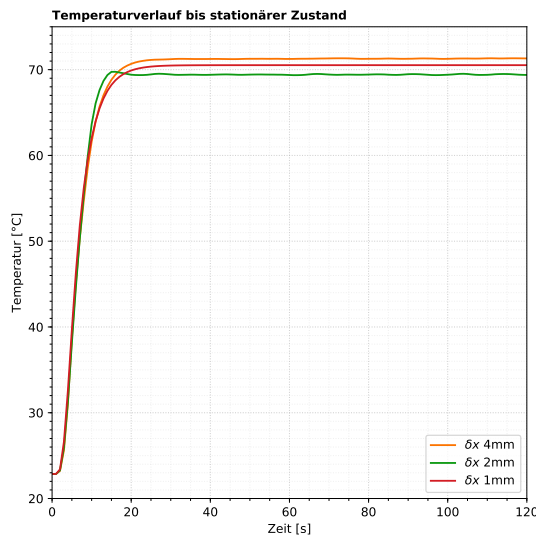


Abbildung 10: Stationärer Zustand

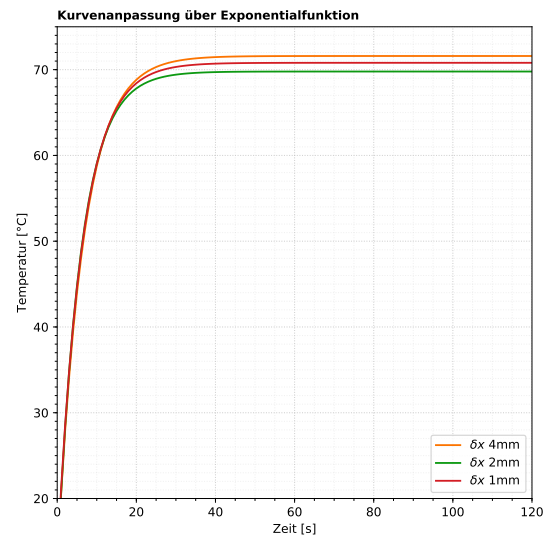


Abbildung 11: Kurvenanpassung

Der stationäre Zustand ist erreicht, wenn die Steigung des jeweiligen Temperaturverlaufs gegen null läuft bzw. den Wert null annimmt.

Da die Temperaturgraphen in ihrer Steigung fluktuieren, werden zu Ermittlung des stationären Zustandes die Datenpunkte auf Basis einer Exponentialfunktion

$$f(t) = -a \cdot e^{-b \cdot t} + c \quad (4.8)$$

geglättet (Abb. 11). Bei diesem Kurvenanpassungsverfahren werden die Variablen a , b und c auf Basis der Datenpunkte iterativ bestimmt (Tab. 9), sodass die Exponentialfunktion die Kurve der Datenpunkte optimal wiedergibt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die schnelle Bestimmung des stationären Zustandes. Je gestauchter die Exponentialfunktion in Richtung der Abszisse wird, desto eher stellt sich der stationäre Zustand ein. Ausschlaggebend für die Stauchung, beziehungsweise Streckung ist der Parameter b . Daraus folgt: Je größer b , desto eher tritt der stationäre Zustand ein. Überprüft wird diese Annahme durch die Bestimmung einer kritischen Bedingung. Der Zeitpunkt des stationären Zustandes ist demnach erreicht, wenn die Steigung der Funktion den Wert kleiner oder gleich $f'(t) = 0.001$ annimmt. Hierfür wird zunächst die erste Ableitung von 4.8 gebildet

$$f'(t) = 0.001 = (-a) \cdot (-b) \cdot e^{-b \cdot t} \quad (4.9)$$

und anschließend nach der Zeit aufgelöst

$$t = \frac{\ln\left(\frac{f'(t)}{ab}\right)}{-b}. \quad (4.10)$$

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Ergebnissen für die jeweiligen Variablen nach der Kurvenanpassung.

	a	b	c	t [s]
$\Delta x = 1 \text{ mm}$	58.109	0.160	70.799	57.11
$\Delta x = 2 \text{ mm}$	58.130	0.170	69.782	54.11
$\Delta x = 4 \text{ mm}$	59.430	0.153	71.593	59.58

Tabelle 9: Variablen des Kurvenanpassungsverfahrens

Ein Vergleich des Parameters b und des Zeitpunktes konstanter Temperaturen t zeigt, dass die Simulation mit einer Zellengröße von $\Delta x = 2 \text{ mm}$ den stationären Zustand am schnellsten erreicht.

Da die Simulation mit der Zellengröße $\Delta x = 1$ mm den geringsten Diskretisierungsfehler aufweist, ist davon auszugehen, dass diese die genauesten Werte berechnet. Die Gittersensitivitätsstudie zeigt aber, dass die Zellengröße von $\Delta x = 2$ mm bei einer 16.4-fach schnelleren Rechenzeit nur gering von den Werten der feinen Gitterstruktur abweichen. Das grobe Rechengitter weist erwartungsgemäß die größten Abweichungen auf. Insbesondere werden die Temperaturen innerhalb der Gasphase gegenüber der feinen Gitterauflösungen überschätzt.

Unter Beachtung der Bearbeitungszeit dieser Thesis, der geringen Abweichung der mittelfeinen Gitterstruktur gegenüber dem feinen Gitter, sowie unter Einbeziehung des Zeitpunktes konstanter Temperaturen, wird für die Validierungssimulation eine Zellengröße von $\Delta x = 2$ mm verwendet.

4.2 Geometrieerstellung

Innerhalb des Fire Dynamics Simulators erfolgt die Erstellung der Geometrie auf Basis der sogenannten *Treppenschritt-Methode* [32]. Komplexe Geometrien, wie runde oder schräge Formen, sind zwar möglich, werden aber an das quadratische Rechengitter (Abb. 12) angepasst.

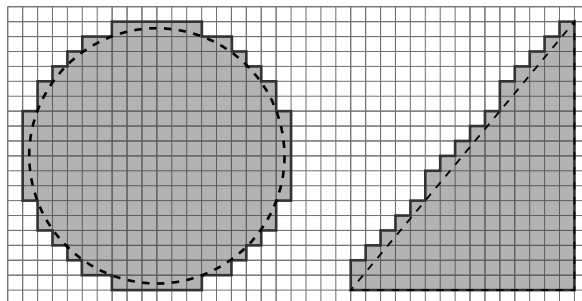


Abbildung 12: Treppenschrittmethode

In [33] wird die sogenannte *Cut-Cell-Methode* beschrieben, welche in zukünftigen FDS Versionen die formtreue Einbindung von komplexen Geometrien ermöglichen soll. Da der Versuchsaufbau das rechteckige Berechnungsgitter von FDS berücksichtigt [5], treten im betrachteten Bereich nur quadratische Formen auf. Problematiken aufgrund von komplexen Geometrien sind daher nicht vorhanden.

Die Geometrieerstellung der Validierungssimulationen (Abb. 13) erfolgt auf Grundlage des in Kapitel 3.1 beschriebenen Versuchsaufbaus und der ermittelten optimalen Zellengröße von $\Delta x = 2$ mm.

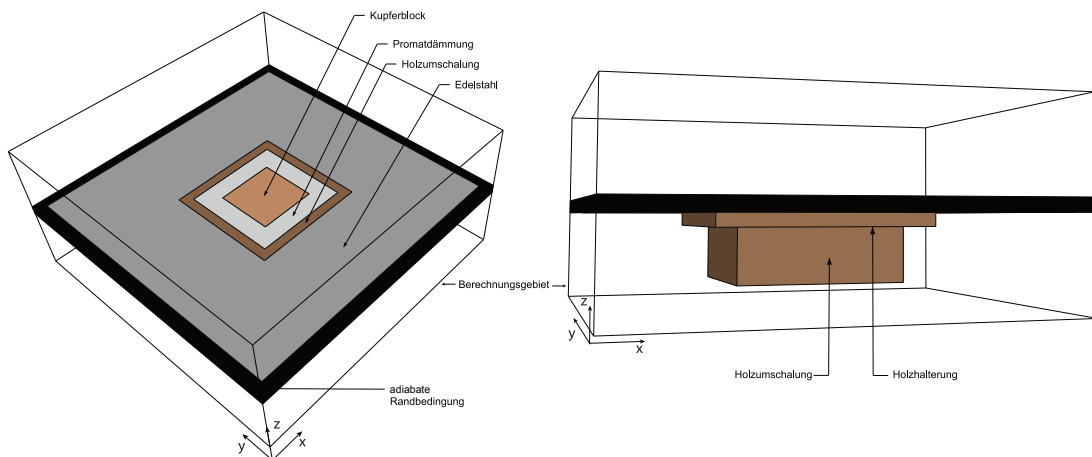


Abbildung 13: Geometrie der Validierungssimulation

Eine Abweichung der Versuchs- zur Simulationsgeometrie ist im Bereich der Edelstahlplatte vorzufinden. Diese wird zur Reduzierung der Zellenanzahl und somit der Rechenzeit nicht im Ganzen simuliert (Abb. 14) und stellt nur einen $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ großen Ausschnitt dar.

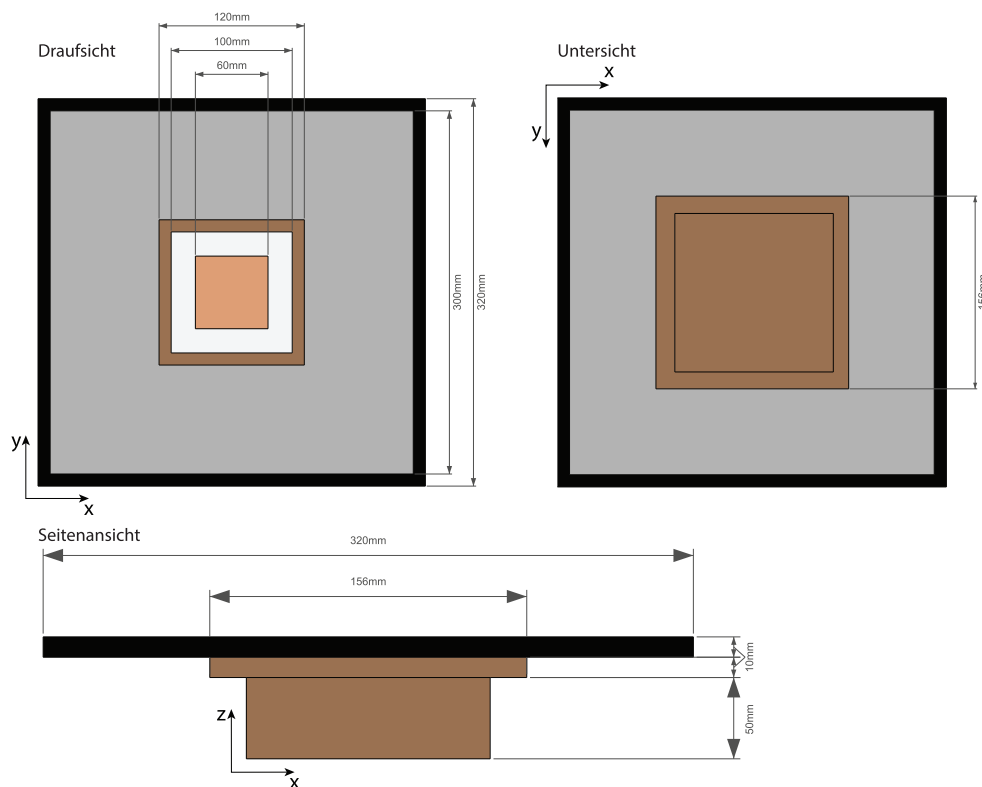


Abbildung 14: Abmessungen der Simulationsgeometrie

Aufgrund der offenen Randbedingungen der Simulation werden die seitlichen Enden der Edelstahlplatte mit einem adiabaten Rand versehen. Dieser soll verhindern, dass die Wärmeenergie bereits nach wenigen Zentimetern aus der Edelstahlplatte über die Ränder der Simulation abgeleitet wird. Ein möglicher Nachteil dieser Vorgehensweise ist die Entstehung eines Wärmestaus innerhalb der Edelstahlplatte. Die daraus resultierenden höheren Oberflächentemperaturen werden in der späteren Auswertung berücksichtigt.

Die Energiezufuhr im Kupferblock wird innerhalb der Simulation vereinfacht über eine volumetrische Wärmequelle nachgebildet. Dazu wird innerhalb des Kupferblocks ein Volumen mit den Abmessungen $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 38\text{ mm}$ definiert, welches über den gesamten Zeitraum der Simulation die gleiche Wärmeleistung $[\frac{\text{kW}}{\text{m}^3}]$ freisetzt und diese direkt an den Kupferblock abgibt.

Ein wichtiger Parameter für die Berechnung der Wärmeleitung ist die Temperaturleitfähigkeit α . Diese setzt sich aus dem Quotienten der Wärmeleitfähigkeit λ und dem Produkt der spezifischen Wärmekapazität c_p mit der Dichte ρ zusammen:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}. \quad (4.11)$$

Die Kennwerte für die jeweiligen Materialien sind der Tabelle 10 zu entnehmen. Ein wichtiger Parameter für die Berechnung der Wärmestrahlung ist die Emissivität ε der Materialien. Diese beträgt für alle Festkörper 0.9, was aus der Tatsache resultiert, dass die Oberfläche des Versuchsaufbaus eine einheitliche Emissivität von 0.9 besitzt. Grund hierfür ist die Kalkbeschichtung der Oberfläche.

	c_p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$]	λ [$\frac{\text{W}}{\text{m K}}$]	ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]
Kupfer	0.385	400	8920
Promat	0.95	0.083	450
Holz	1.7	0.3	1350
Edelstahl	0.5	15	8000

Tabelle 10: Materialkennwerte der Validierungssimulation

Ein wichtiger Aspekt für die Validierungssimulation ist die Positionierung der Messpunkte. Eine Möglichkeit der Temperaturmessung besteht darin, die einzelne Messpunkte an der jeweils exakten Messstelle zu positionieren. Die Datenmengen bleiben dabei klein und können in der späteren Auswertung schnell aufbereitet werden. Der Nachteil ist, dass einmal gesetzte Messpunkte später nicht in ihrer Position variiert werden können.

Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von sogenannten *Slice-Files*. Diese ermöglichen die Aufzeichnung aller Zellenwerte in zwei Raumrichtungen (Ebene), welche vom Nutzer frei bestimmt werden können. Nachteilig ist bei dieser Vorgehensweise die Komplexität der Datenauswertung. Insbesondere bei der Verwendung mehrerer Rechengebiete können die Daten nur noch mit großem Aufwand ausgelesen werden. Für die Validierungssimulation wird deshalb eine Hybridversion der genannten Möglichkeiten entwickelt. Jeder Zelle einer betrachteten zweidimensionalen Ebene wird dabei ein Messpunkt zugeordnet und es entstehen sogenannte Messflächen. Die Positionierung dieser Messflächen resultiert aus den Positionen der Messpunkte am Experimentalaufbau. Insgesamt werden drei Flächen betrachtet, die *yz-Ebene*, sowie die obere und untere *xy-Ebene* (Abb. 15).

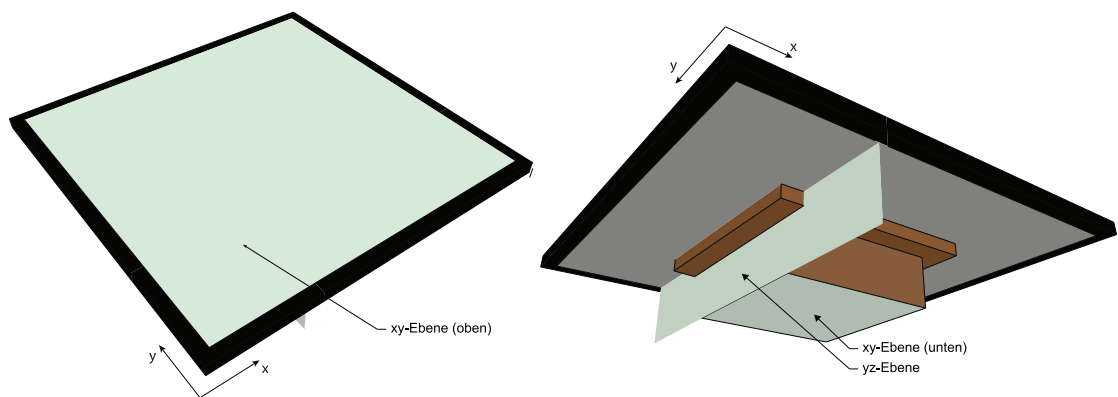


Abbildung 15: Anordnung der Messflächen

Diese Vorgehensweise verbindet somit die Vorteile der üblichen Messmöglichkeiten in FDS Simulationen. Zum einen können die Messpunkte, wie bei den *Slice-Files* auch, nach dem Simulationsdurchlauf neu positioniert werden. Zum anderen können sie aber auch gleichzeitig vereinfacht ausgelesen werden. Lediglich die Datenmengen (ca. 20 000 Messpunkte pro Zeitschritt) innerhalb der .csv Datei und die daraus resultierende Dateigröße (ca. 1 GB) sind als ungünstig anzusehen.

Die Dimensionierung des Berechnungsgitters geschieht unter Beachtung der Simulationsgeometrie sowie einer ausreichend großen Gasphase oberhalb und unterhalb des Aufbaus. Daraus folgen die Abmessungen von 320 mm × 320 mm × 150 mm und die absolute Zellenzahl von 1 920 000 bei einer Zellengröße von $\Delta x = 2$ mm.

4.3 Parallelisierung der Simulationen

Eine wichtige Thematik in den Simulationswissenschaften ist die Parallelisierung von Berechnungen auf mehreren Recheneinheiten. Die gleichzeitige Berechnung der einzelnen Rechenschritte wird in FDS über OpenMP (Open Multi Processing) und MPI (Message Passing Interface) realisiert. [1]

Die Funktionsweise hinter MPI ist die Aufteilung verschiedener Prozesse auf verschiedene Recheneinheiten. In FDS stellt jedes Berechnungsgitter einen eigenen Prozess dar. Dies führt dazu, dass mittels MPI jedes Gitter auf einer eigenen Recheneinheit berechnet werden kann. OpenMP hingegen erlaubt die Parallelisierung eines einzelnen Prozesses, indem dieser in einzelne Unterprozesse (Threads) aufgeteilt wird. Grundsätzlich gilt, dass die MPI Methode der OpenMP Methode im Hinblick auf die Schnelligkeit der Berechnungen überlegen ist. [11]

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Parallelisierung einer Berechnung ist die Architektur der Recheneinheit. Die Simulationen in dieser Thesis werden, sofern nicht anders erwähnt, auf dem Supercomputer JURECA am Forschungszentrum Jülich durchgeführt. Für die Berechnungen stehen dafür theoretisch 1827 Rechenknoten mit jeweils 24 Kernen (Intel Xeon E5-2680 v3 Haswell - 2.5 GHz) zu Verfügung. [34]

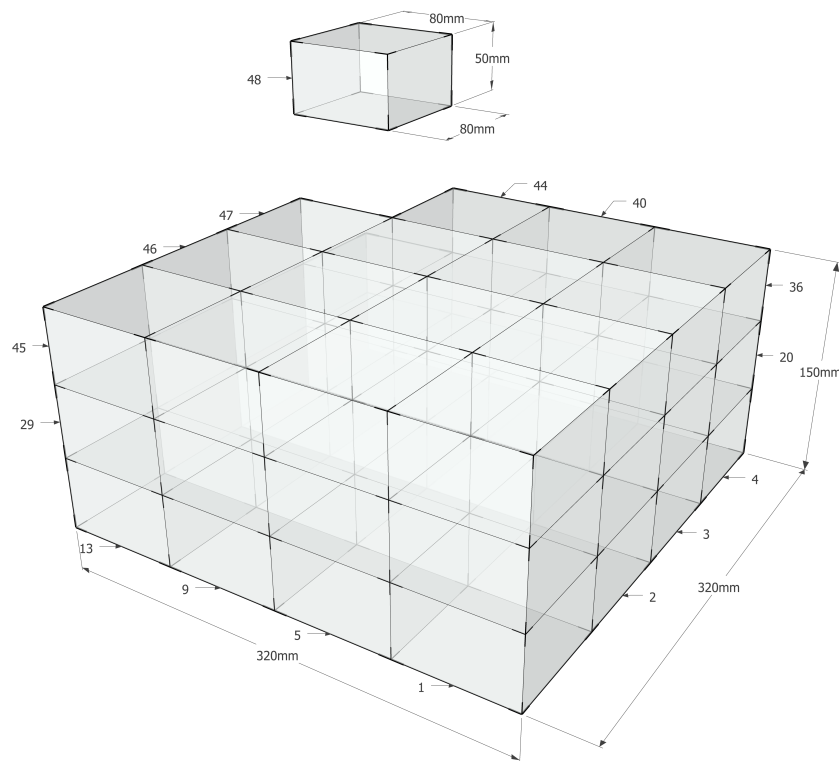


Abbildung 16: Berechnungsgitter zur Parallelisierung der Simulation

Damit die Berechnung der Validierungssimulationen parallel erfolgen kann, wird das Berechnungsgitter in kleinere Gebiete unterteilt. Unter Heranziehung der genannten Rechnerarchitektur entsteht die in Abbildung 16 gezeigte Gitterzusammensetzung.

Die 1 920 000 Zellen werden auf 48 gleichgroße Berechnungsgebiete aufgeteilt, sodass jedes Gitter 40 000 Zellen umfasst ($40 \times 40 \times 25$) und von einem MPI-Prozess berechnet wird. Die Gleichzeitige Verwendung von vier OpenMP-Threads zu jedem Prozess ermöglicht eine Hybridparallelisierung der Simulation. Somit werden acht Rechenknoten mit insgesamt 192 Prozessorkerne pro Simulation des Supercomputers belegt.

5. Auswertung und Vergleich der Temperaturen

In diesem Kapitel werden die Datenauswertung der Experimente und Simulationen behandelt. Aufgrund der Vielzahl an Daten wird für die Auswertung auf die höhere und frei verfügbare Programmiersprache Python zurückgegriffen. Diese erlaubt dank zahlreicher Bibliotheken wie Pandas, matplotlib und numpy eine einfache Erstellung von automatisierten Maschinenabläufen, sogenannte Python-Skripte [35].

Im ersten Teil dieses Abschnitts wird die Auswertung der Experimente diskutiert. Anschließend erfolgt die Auswertung der Simulationen, insbesondere im Hinblick auf die Erreichung des stationären Zustandes und die Auswertung der Temperaturen. Abschließend erfolgt der Vergleich der Experimente mit den Simulationen. Weiterhin werden die Auswirkungen von Temperaturgradienten an der Oberfläche des Versuchsaufbaus und die Neupositionierung der Thermoelemente diskutiert.

5.1 Auswertung der Experimente

Die Aufarbeitung der Experimentaldaten erfolgt für die Thermoelemente automatisiert über ein eigens dafür erstelltes Python-Skript. Die Daten werden aus der SD-Karte ausgelesen und in ein lesbares Dateiformat umgewandelt. Die daraus resultierende Komma-separierte-Datei (.csv) wird anschließend mit Python ausgewertet und visualisiert. Abbildung 17 zeigt beispielhaft am Versuch 4 die Temperaturen aller Thermoelemente über einen Zeitraum von 600 Sekunden. Die Werte unterhalb des Diagramms zeigen die Durchschnittstemperatur für jeden Messpunkt. Diese gemittelten Daten werden dem Vergleich mit den Simulationsdaten zugrunde gelegt.

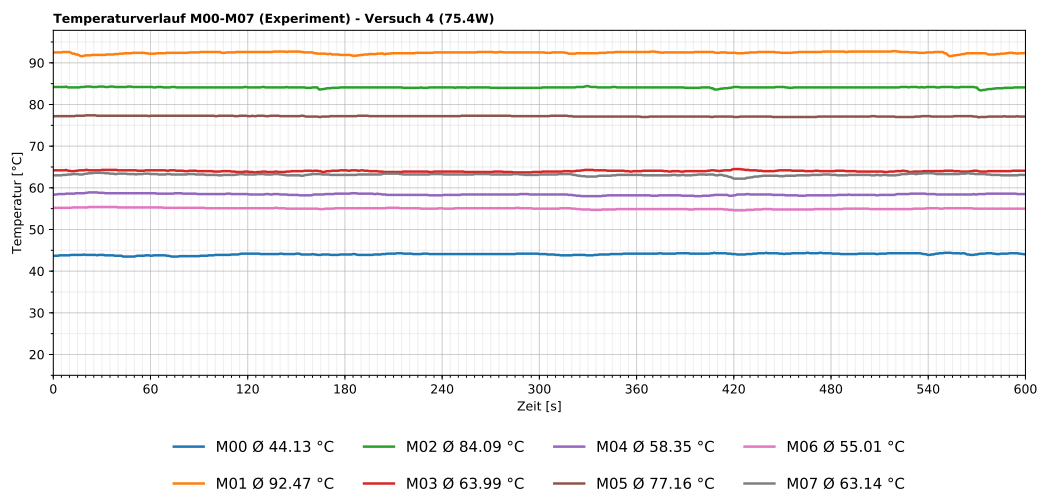


Abbildung 17: Temperaturverlauf Versuch 4

Die Daten der Infrarotpistole werden dem Messprotokoll entnommen und in einer Tabelle zusammengefasst. Da hier für jeden Messpunkt nur ein Temperaturwert vorliegt, ist eine weitere Aufarbeitung der Daten nicht vorgesehen.

Der letzte Schritt in der Datenauswertung der Experimente ist die Berechnung der Messunsicherheiten für die Thermoelemente und die Infrarotpistole (Kap. 3.2). Die Ergebnisse aller Experimente und die jeweiligen Messunsicherheiten sind im Anhang A zusammengefasst.

5.2 Auswertung der Simulationen

Dieser Abschnitt beschreibt die Aufarbeitung der Simulationsdaten. Dazu gehört die Ermittlung des stationären Zustandes und Möglichkeiten zu Visualisierung großer Datensätze. Am Beispiel von Versuch 4 wird die kritische Bedingung für den Zeitpunkt von konstanten Temperaturen definiert. Darauf aufbauend wird erklärt warum diese nicht für jede Heizstufe geeignet ist. Anschließend werden am Beispiel von Versuch 8 die Temperaturwerte visualisiert.

Stationärer Zustand

Ein wichtiger Punkt in der Auswertung der Simulationen ist die Ermittlung des stationären Zustandes, da dieser den Endpunkt einer Simulation angibt. Die Bedingung für die Erreichung des stationären Zustandes deckt sich mit der Bedingung aus den Experimenten (Kap. 3.3). Demnach gilt der Temperaturverlauf als konstant, wenn sich die Innentemperatur des Kupferblocks nach 10 Minuten um nicht mehr als 0.5 % erhöht hat. Die Auswertung der Datensätze erfolgt iterativ durch

$$0.5 > \frac{T_{i+600} - T_i}{T_i} \cdot 100. \quad (5.1)$$

Hierbei ist T_i der Temperaturwert bei Sekunde i ($= 600\text{ s}, 1200\text{ s}, 1800\text{ s}, \dots$) und T_{i+600} der Temperaturwert nach 10 Minuten, ausgehend vom Zeitpunkt i .

In den Experimenten erfolgt die Überprüfung des stationären Zustandes durch ein Thermoelement innerhalb des Kupferblocks. Für die Simulationen erfolgt die Überprüfung an jeder Messstelle. Damit wird sichergestellt, dass die Simulation erst dann beendet wird, wenn jeder Messpunkt einen konstanten Temperaturverlauf aufweist. Tabelle 11 zeigt den Zeitpunkt des stationären Zustandes für jeden Messpunkt des Versuches 4.

Messstellen Infrarotpistole					
Infrarot IR00	[s]	9000	Infrarot IR01	[s]	9000
Infrarot IR02	[s]	9000	Infrarot IR03	[s]	9900
Infrarot IR04	[s]	10800	Infrarot IR05	[s]	11700
Infrarot IR06	[s]	12600	Infrarot IR07	[s]	12600
Infrarot IR08	[s]	12600			
Messstellen Thermoelemente					
Messfühler M00	[s]	11700	Messfühler M01	[s]	4500
Messfühler M02	[s]	11700	Messfühler M03	[s]	11700
Messfühler M04	[s]	11700	Messfühler M05	[s]	11700
Messfühler M06	[s]	11700	Messfühler M07	[s]	11700

Tabelle 11: Zeitpunkt des stationären Zustandes - Versuch 4

Die visuelle Darstellung des stationären Zustandes ist in den Abbildungen 18 und 19 gegeben. Dazu werden die Temperaturwerte der einzelnen Messpunkte über den gesamten Messzeitraum dargestellt. Da es insbesondere bei der Messung an den Messpunkte IR00 bis IR08 zu großen Temperaturunterschieden zwischen den einzelnen Messpunkten kommt, werden diese in zwei Diagramme aufgeteilt (Abb. 19). Der obere Graph enthält die Messpunkte IR00, IR01, IR02, und IR03; die restlichen Werte werden im unteren Graphen dargestellt. Aufgrund der hohen Temperaturleitfähigkeit von Kupfer ist die Temperaturverteilung auf dem Kupferblock als homogen anzusehen [5] [6]. Die daraus resultierende Überlagerung der Temperaturverläufe ist ebenfalls in Abbildung 18 zu sehen.

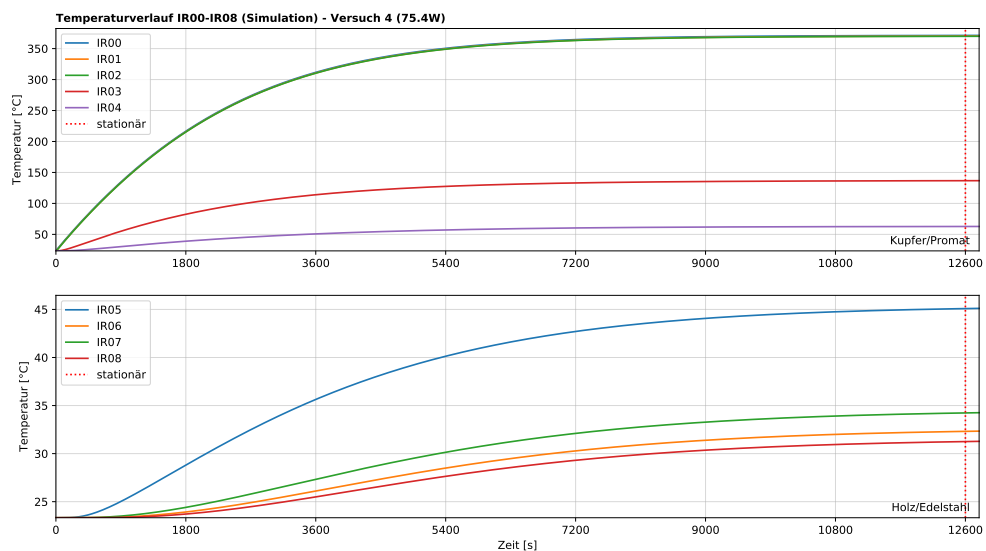


Abbildung 18: Temperaturverlauf der Messpunkte IR00-IR08

Abbildung 19 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturwerte für die Messstellen der Thermoelemente. Da es hier zu keinen großen Temperaturunterschieden untereinander kommt, wird auf eine Unterteilung des Graphen verzichtet.

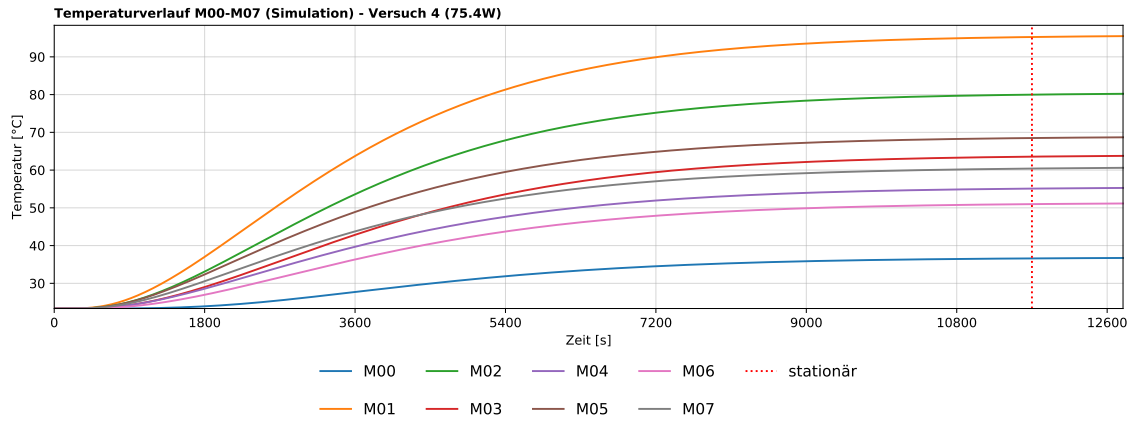


Abbildung 19: Temperaturverlauf der Messpunkte M00-M07 (75.4 W)

Obwohl die in 5.1 formulierte Bedingung als kritisches Kriterium für die Simulationsdauer aller Simulationen gilt, zeigt die Auswertung der Simulation mit kleinster Wärmeleistung, dass der Zeitpunkt des stationären Zustandes deutlich unterschätzt wird (Abb. 20).

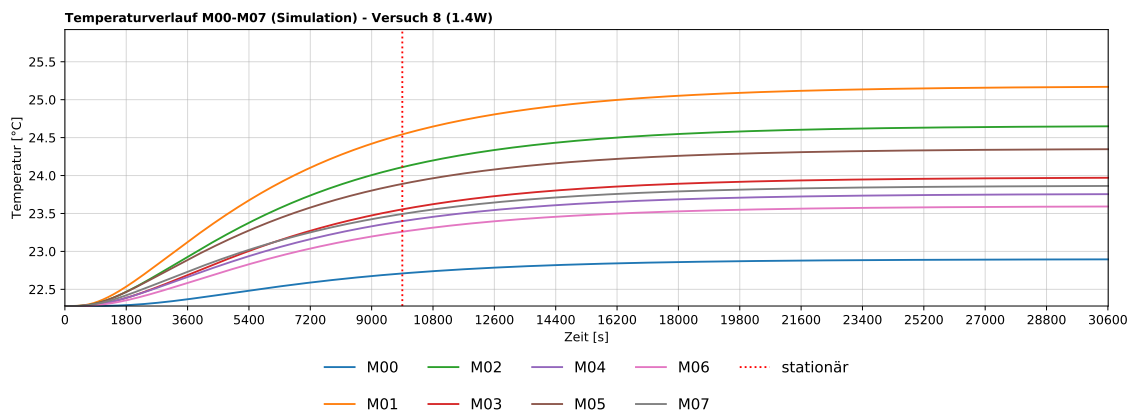


Abbildung 20: Temperaturverlauf der Messpunkte M00-M07 (1.4 W)

Dies resultiert aus der Tatsache, dass die Steigung des Temperaturverlaufs abhängig von der zugeführten Wärmeleistung ist und somit die Bedingung in 5.1 für jeden Leistungsfall angepasst werden muss.

Alternativ wird für den Versuch 8 die maximale Steigung des Temperaturverlaufs für jeden Zeitschritt i iterativ bestimmt und die kritische Bedingung (0.5 %) relativ an der ermittelten maximalen Steigung festgelegt. Anschließend wird der Datensatz erneut überprüft,

$$f(T)_{\text{krit}} = (T_{i+1} - T_i)_{\text{max}} \cdot 0.005, \quad (5.2)$$

$$f(T)_{\text{krit}} > (T_{i+1} - T_i), \quad (5.3)$$

und visualisiert (Abb. 21).

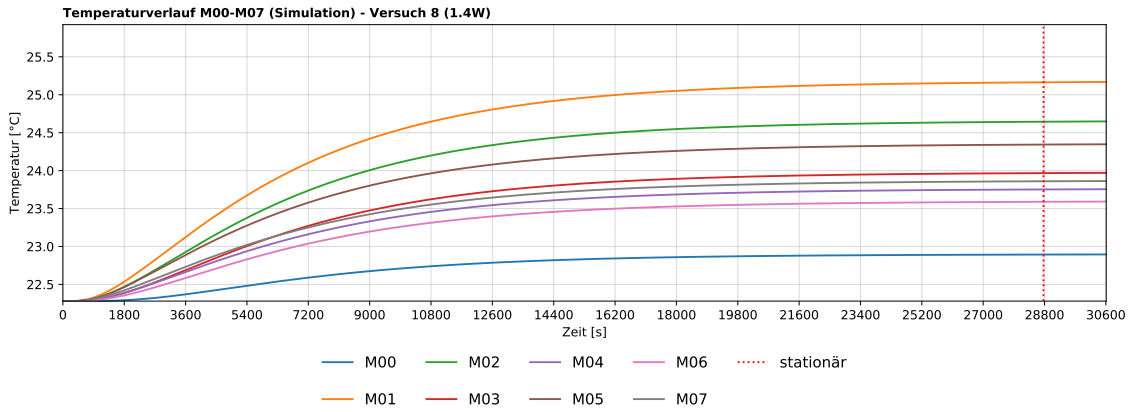


Abbildung 21: Versuch 8 - Anpassung der kritischen Bedingung

Temperaturauswertung

Die Temperaturausgabe der in der Simulation gesetzten Messpunkte (Kap. 4.2) erfolgt im Fire Dynamics Simulator durch Kommaseparierte-Dateien. Die einzelnen Werte sind dabei innerhalb eines Zeitschrittes (10 Sekunden) in einer Zeile durch Kommata getrennt. Insgesamt treten somit pro Simulation und Zeitschritt 23 340 Datenpunkte auf. Für die Simulation 8 mit 3 061 Zeitschritten sind somit in der Summe 71 443 740 Datenpunkte auszuwerten. Damit diese immense Summe an Messwerten ausgewertet werden kann, wird im Rahmen dieser Bachelorthesis ein Python-Skript erstellt, welches die Daten einliest und visualisiert ausgibt. Die grafische Umsetzung erfolgt auf Basis einer Wärmekarte. Dazu werden die einzelnen Temperaturwerte in einer Matrix aufgelistet und jedem Wert entsprechend seines Betrages eine Farbe zugeordnet. Abbildung 22 zeigt die Auswertung der Unterseite des Holztopfes (xy-Ebene). Die Koordinatenachsen der Wärmekarte entsprechen den Koordinaten der Simulation. Damit die Temperaturabstufungen der jeweiligen Messflächen deutlich sichtbar werden, besitzt jede Wärmekarte eine eigene Temperaturskalierung.

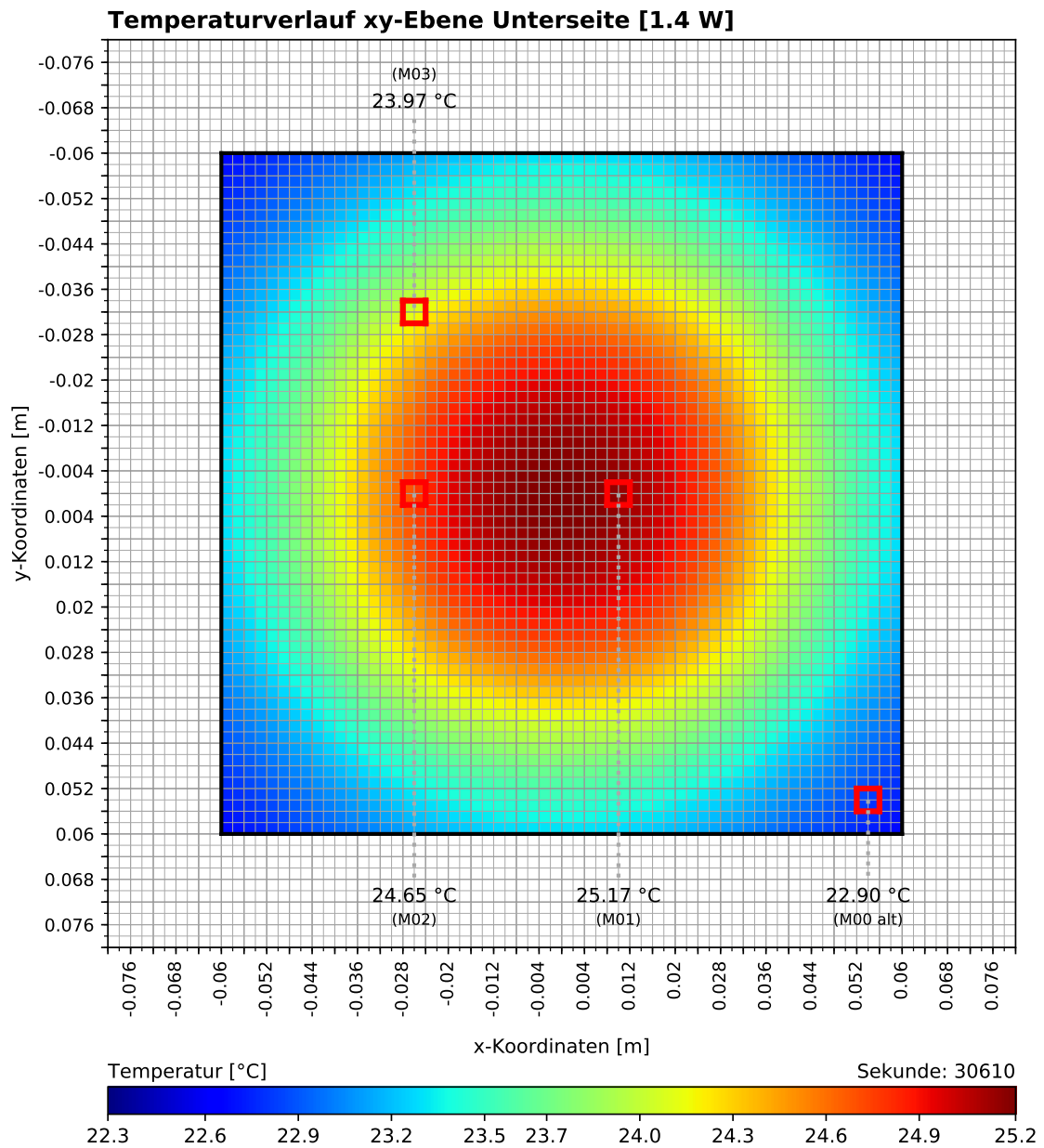


Abbildung 22: Versuch 8 - Wärmekarte der Unterseite

Die Positionierung der Messstellen innerhalb der Simulationen erfolgt auf Grundlage der Positionen im Experiment.

Weiterhin werden die Temperaturen der Simulationen über eine Fläche von $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ aufgenommen. Dies entspricht der gemittelten Temperatur von vier Zellen. Dadurch wird der nicht exakten Positionierung der Messstellen am Experiment entgegengewirkt. Eine mögliche Auswirkung von Positionsunterschieden wird in Kapitel 5.3 diskutiert. Als Referenztemperatur für den Vergleich zwischen Experiment und Simulation wird immer der letzte gemessene Temperaturwert eines Simulationsdurchlaufs verwendet. Die Ergebnisse aller Simulationen sind im Anhang B zusammengefasst.

5.3 Vergleich der Experimente und Simulationen

Die Überprüfung der Temperaturübereinstimmung erfolgt durch den direkten Vergleich zwischen den Messstellen des Experiments und denen der Simulation. Dazu werden in den folgenden Abbildungen die Temperaturen in einem Balkendiagramm wiedergeben und die direkten Zahlenwerte in einer nachfolgenden Tabelle aufgezählt. Diese geben die Temperaturunterschiede zwischen Simulation und Experiment als absoluten Wert ΔT_{abs} in Grad Celsius und als relativen Wert ΔT_{rel} in Prozent an. Als Referenzwert dienen die Simulationsdaten, da hier ein konvergentes Verhalten der Ergebnisse aller Simulationen zu erwarten ist. Positive ΔT Werte sind demnach überschätzte Experimentaldaten und negative ΔT Werte unterschreiten die Werte der Simulation. Die Werte in Klammern beziehen die Messunsicherheiten zum Positiven mit ein. Es wird also der Wert der Messunsicherheiten verwendet, welcher näher am Wert der Simulation liegt.

Die unterste Zeile jeder Tabelle gibt das arithmetische Mittel aller absoluten und relativen Temperaturwerte an. Hierbei ist zu erwähnen, dass nicht mehr zwischen negativen und positiven Werte unterschieden, sondern mit dem Betrag gerechnet wird. Somit wird sichergestellt, dass sich positive und negative Werte nicht ausgleichen und hierdurch das Ergebnis verfälschen.

Die Abbildungen teilen sich aufgrund des hohen Temperaturunterschieds zwischen den Messstellen in zwei Bereiche auf. Das linke Diagramm zeigt die Oberflächentemperaturen des Kupferblocks sowie die Messstelle IR03. Das rechte Diagramm gibt die restlichen Werte wieder. Der rote Fehlerbalken zeigt die in Kapitel 3.2 erwähnten Messunsicherheiten relativ zum Temperaturwert an.

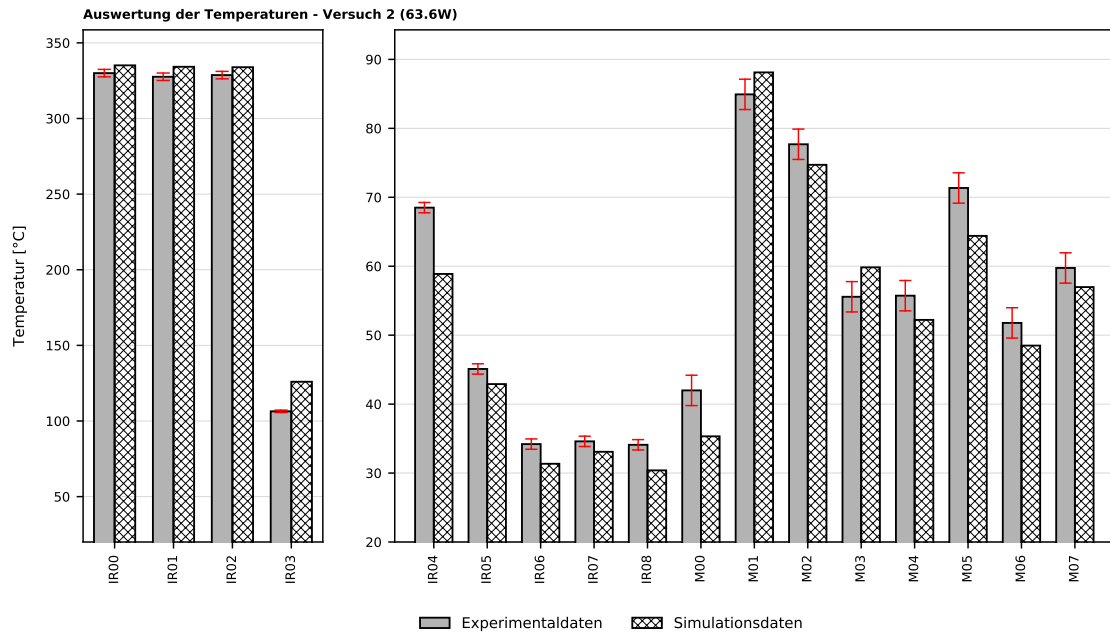


Abbildung 23: Versuch 2 - Vergleich der Temperaturen

Versuch 2 - 63.6 W					
Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation					
	ΔT_{abs} [°C]	ΔT_{rel} [%]		ΔT_{abs} [°C]	ΔT_{rel} [%]
IR00	-5.14 (2.66)	-1.53 (0.79)	IR01	-6.60 (4.14)	-1.97 (1.24)
IR02	-5.21 (2.75)	-1.56 (0.82)	IR03	-19.55 (18.76)	-15.52 (14.89)
IR04	9.62 (8.87)	16.34 (15.06)	IR05	2.19 (1.44)	5.11 (3.36)
IR06	2.85 (2.10)	9.10 (6.71)	IR07	1.51 (0.76)	4.58 (2.31)
IR08	3.71 (2.96)	12.21 (9.74)			
M00	6.66 (4.46)	18.86 (12.63)	M01	-3.19 (0.99)	-3.62 (1.12)
M02	2.98 (0.78)	3.99 (1.04)	M03	-4.27 (2.07)	-7.13 (3.46)
M04	3.51 (1.31)	6.73 (2.51)	M05	6.95 (4.75)	10.79 (7.37)
M06	3.29 (1.09)	6.79 (2.25)	M07	2.77 (0.57)	4.87 (1.01)
Ø	5.29 (3.56)	7.69 (5.08)			

Tabelle 12: Versuch 2 - Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation

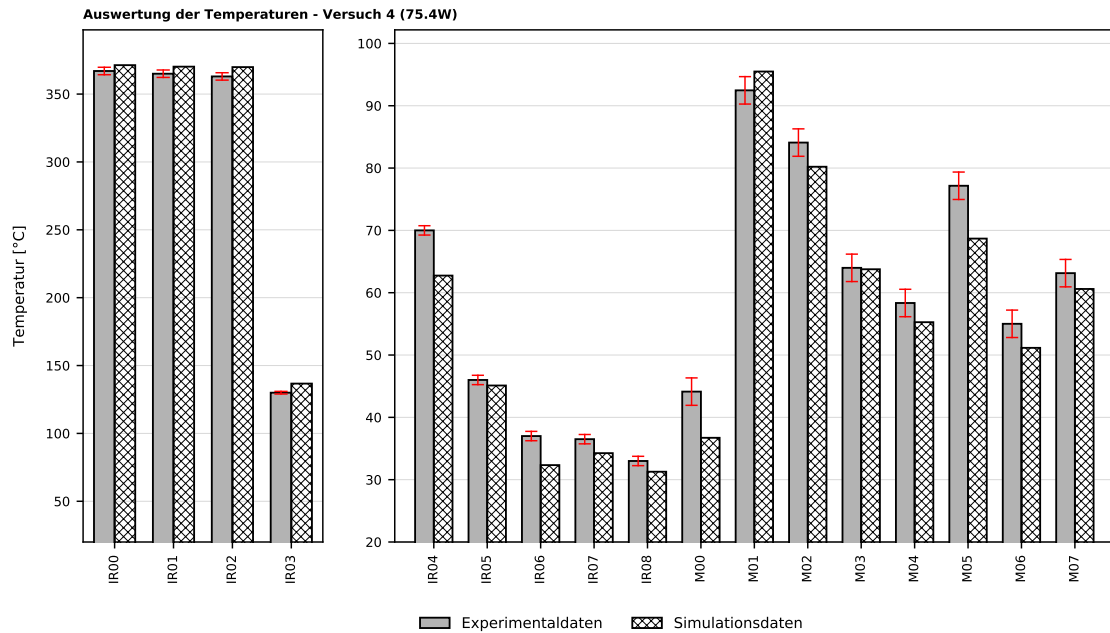


Abbildung 24: Versuch 4 - Vergleich der Temperaturen

Versuch 4 - 75.4 W					
Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation					
	ΔT_{abs} [°C]	ΔT_{rel} [%]		ΔT_{abs} [°C]	ΔT_{rel} [%]
IR00	-4.31 (1.55)	-1.16 (0.42)	IR01	-5.20 (2.46)	-1.40 (0.67)
IR02	-6.87 (4.15)	-1.86 (1.12)	IR03	-6.70 (5.73)	-4.90 (4.19)
IR04	7.25 (6.50)	11.56 (10.36)	IR05	0.89 (0.14)	1.97 (0.31)
IR06	4.66 (3.91)	14.42 (12.10)	IR07	2.24 (1.49)	6.55 (4.36)
IR08	1.72 (0.97)	5.51 (3.11)			
M00	7.41 (5.21)	20.18 (14.19)	M01	-3.02 (0.82)	-3.16 (0.86)
M02	3.88 (1.68)	4.84 (2.09)	M03	0.23 (1.97)	0.36 (3.09)
M04	3.08 (0.88)	5.57 (1.59)	M05	8.48 (6.28)	12.34 (9.14)
M06	3.86 (1.66)	7.54 (3.24)	M07	2.54 (0.34)	4.19 (0.56)
Ø	4.26 (2.69)	6.32 (4.20)			

Tabelle 13: Versuch 4 - Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation

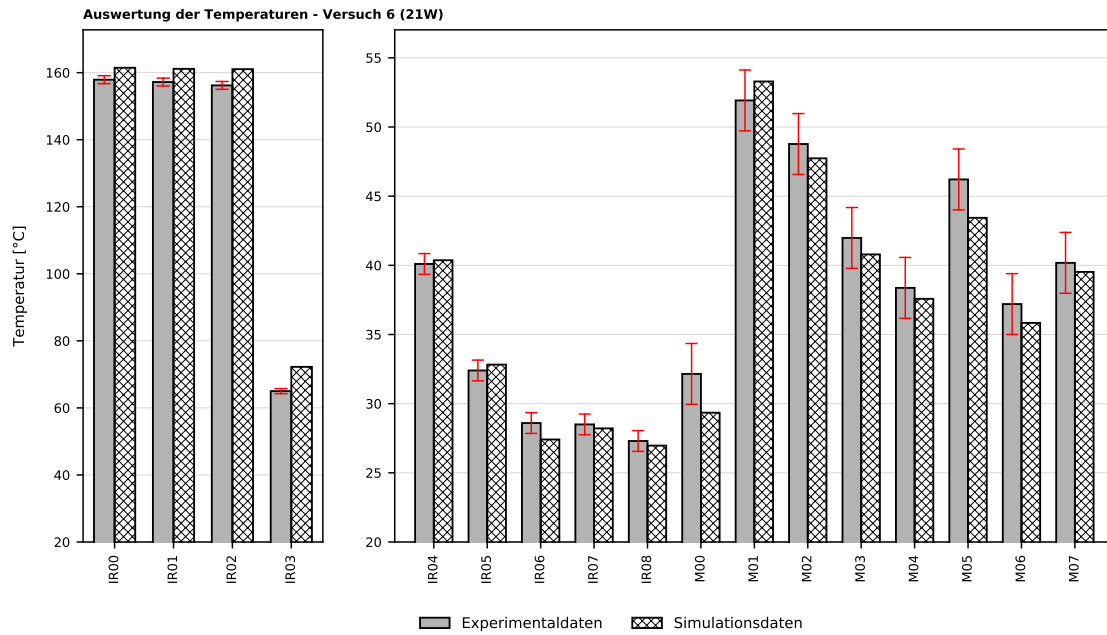


Abbildung 25: Versuch 6 - Vergleich der Temperaturen

Versuch 6 - 21 W					
Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation					
	ΔT_{abs} [°C]	ΔT_{rel} [%]		ΔT_{abs} [°C]	ΔT_{rel} [%]
IR00	-3.56 (2.38)	-2.21 (1.47)	IR01	-3.94 (2.76)	-2.45 (1.71)
IR02	-4.84 (3.67)	-3.01 (2.28)	IR03	-7.25 (6.50)	-10.03 (8.99)
IR04	-0.27 (0.48)	-0.66 (1.20)	IR05	-0.42 (0.33)	-1.29 (1.00)
IR06	1.19 (0.44)	4.34 (1.60)	IR07	0.29 (0.46)	1.02 (1.64)
IR08	0.33 (0.42)	1.23 (1.55)			
M00	2.80 (0.60)	9.55 (2.05)	M01	-1.37 (0.83)	-2.57 (1.56)
M02	1.04 (1.16)	2.17 (2.44)	M03	1.19 (1.01)	2.92 (2.47)
M04	0.79 (1.41)	2.11 (3.75)	M05	2.78 (0.58)	6.39 (1.32)
M06	1.36 (0.84)	3.80 (2.34)	M07	0.66 (1.54)	1.66 (3.91)
Ø	2.00 (1.49)	3.38 (2.43)			

Tabelle 14: Versuch 6 - Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation

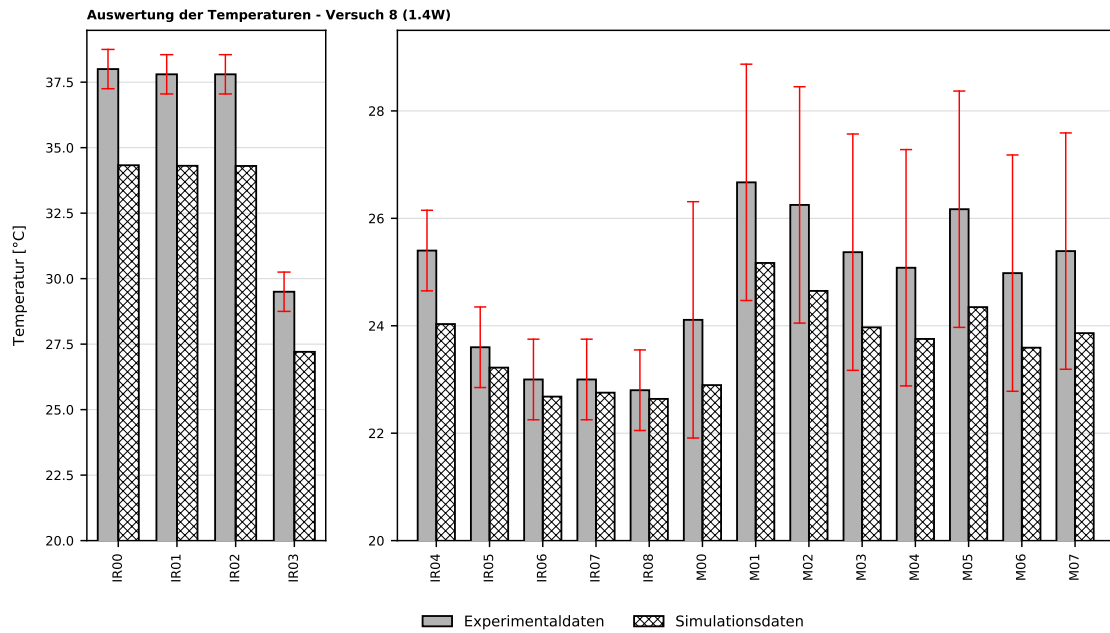


Abbildung 26: Versuch 8 - Vergleich der Temperaturen

Versuch 8 - 1.4 W					
Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation					
	ΔT_{abs} [°C]	ΔT_{rel} [%]		ΔT_{abs} [°C]	ΔT_{rel} [%]
IR00	3.67 (2.92)	10.69 (8.51)	IR01	3.49 (2.74)	10.18 (7.99)
IR02	3.50 (2.75)	10.20 (8.01)	IR03	2.29 (1.54)	8.43 (5.67)
IR04	1.37 (0.62)	5.69 (2.57)	IR05	0.38 (0.37)	1.63 (1.60)
IR06	0.32 (0.43)	1.41 (1.90)	IR07	0.25 (0.50)	1.08 (2.22)
IR08	0.16 (0.59)	0.71 (2.60)			
M00	1.21 (0.99)	5.31 (4.30)	M01	1.50 (0.70)	5.96 (2.78)
M02	1.60 (0.60)	6.50 (2.43)	M03	1.40 (0.80)	5.84 (3.34)
M04	1.33 (0.87)	5.58 (3.68)	M05	1.82 (0.38)	7.49 (1.55)
M06	1.39 (0.81)	5.88 (3.44)	M07	1.53 (0.67)	6.40 (2.82)
Ø	1.60 (1.08)	5.82 (3.85)			

Tabelle 15: Versuch 8 - Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation

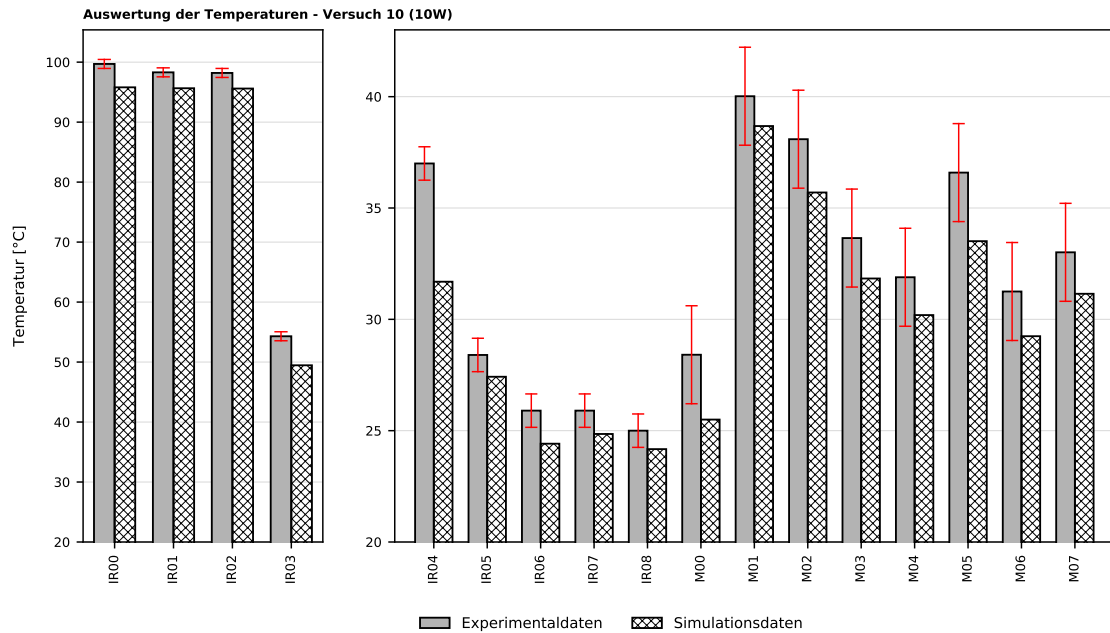


Abbildung 27: Versuch 10 - Vergleich der Temperaturen

Versuch 10 - 10 W					
Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation					
	ΔT_{abs} [°C]	ΔT_{rel} [%]		ΔT_{abs} [°C]	ΔT_{rel} [%]
IR00	3.90 (3.15)	4.07 (3.29)	IR01	2.65 (1.90)	2.77 (1.99)
IR02	2.60 (1.85)	2.72 (1.94)	IR03	4.84 (4.09)	9.78 (8.27)
IR04	5.31 (4.56)	16.76 (14.39)	IR05	0.98 (0.23)	3.57 (0.83)
IR06	1.49 (0.74)	6.08 (3.01)	IR07	1.05 (0.30)	4.22 (1.20)
IR08	0.83 (0.08)	3.43 (0.33)			
M00	2.91 (0.71)	11.42 (2.79)	M01	1.34 (0.86)	3.46 (2.23)
M02	2.39 (0.19)	6.70 (0.54)	M03	1.82 (0.38)	5.70 (1.21)
M04	1.70 (0.50)	5.63 (1.66)	M05	3.08 (0.88)	9.19 (2.62)
M06	2.01 (0.19)	6.87 (0.66)	M07	1.86 (0.34)	5.98 (1.08)
Ø	2.40 (1.23)	6.37 (2.83)			

Tabelle 16: Versuch 10 - Temperaturdifferenzen zwischen Experiment und Simulation

Insgesamt zeigen die Vergleichswerte aller Wärmeleistungen gute bis sehr gute Ergebnisse. Dies lässt sich insbesondere im arithmetischen Mittel jedes Vergleichs sehen, da es in keinem Fall zu einer Abweichung von mehr als 10 % kommt. Die Ergebnisse verbessern sich noch einmal deutlich, wenn die Messunsicherheiten der Messgeräte miteinbezogen werden. Da aber vorausgesetzt wird, dass sich die Messunsicherheiten immer zum Positiven auswirken, sind diese Werte nur rein theoretisch und sollten nicht in die Schlussbetrachtung mit einfließen.

Obwohl die durchschnittliche Betrachtung zufriedenstellende Ergebnisse liefert, zeigt eine genaue Betrachtung erhebliche Abweichungen mancher Messpunkte. Bei allen Vergleichen weisen die Messpunkte IR03 und IR04 große Abweichungen auf. Die Positionen der Messstellen befinden sich mittig und außen auf der Promatdämmung. Betrachtet man die sehr geringe Temperaturleitfähigkeit von Promat, ist von einem sehr hohen Temperaturgradienten auszugehen und demnach von großen Temperaturunterschieden in kleinen Bereichen. Abbildung 28 zeigt beispielhaft am Versuch 2 das Gradientenfeld für die Oberfläche der Simulationsgeometrie.

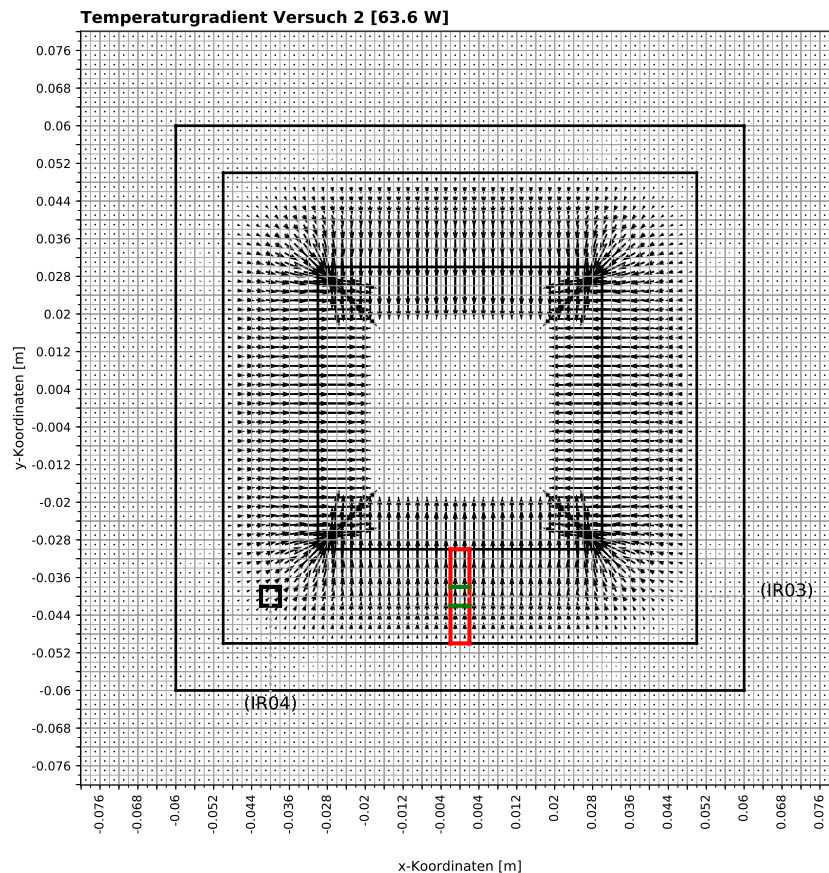


Abbildung 28: Versuch 2 - Gradientenfeld der Oberseite

Es ist deutlich zu erkennen, dass im Bereich der Promatdämmung die Steigung der Temperatur stark zunimmt. Der grüne Bereich stellt den Messpunkt IR03 dar. Damit die genauen Steigungen des Temperaturverlaufs in diesem Bereich betrachtet werden können, wird der rote Bereich in Abbildung 29 vergrößert dargestellt. Zur optimalen Darstellung der Steigungen wird die Koordinatenachse hierbei um 90° gegen den Uhrzeigersinn gedreht.

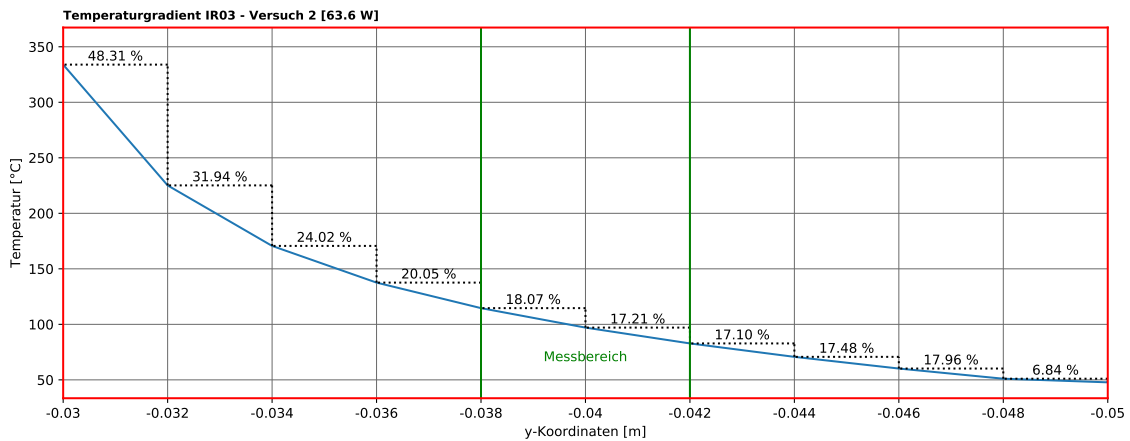


Abbildung 29: Versuch 2 - Gradientenfeld des Messpunktes IR03

Die Experimentalmessung mittels Infrarotpistole geschieht im optimalen Fall im Bereich von -0.04 m auf der y-Achse. Bedenkt man jedoch, dass die Messung aus der Hand erfolgt, kann die Position sich sehr leicht um wenige Millimeter verschieben. Eine Positionsabweichung von 2 mm zieht einen Temperaturanstieg von 20 % mit sich. Es ist also davon auszugehen, dass die hohen Abweichungen der Messpunkte IR03 und IR04 nicht auf eine fehlerhafte numerische Umsetzung der Wärmeleitung in FDS zurückzuführen ist, sondern auf eine ungenaue Messung mittels Infrarotpistole.

Eine weitere sehr hohe Abweichung ist an der Messstelle M00 vorzufinden. Die größten Abweichungen zwischen den Ergebnissen des Experiments und der Simulation zeigen sich im Versuch 4 mit 20 %. Betrachtet man die Balkendiagramme, ist zu erkennen, dass das Experiment deutlich höhere Werte aufweist. In Kapitel 3.2 wird erwähnt, dass die Angaben zur Positionierung der Thermoelemente nur ungefähre Werte darstellen. Es ist also davon auszugehen, dass die Positionierung des Thermoelementes nicht den Angaben der Planunterlagen entspricht.

Abbildung 30 zeigt deshalb die Auswirkung einer Veränderung der Messposition in der Simulation um 4 mm auf die Temperaturmessung am Punkt M00.

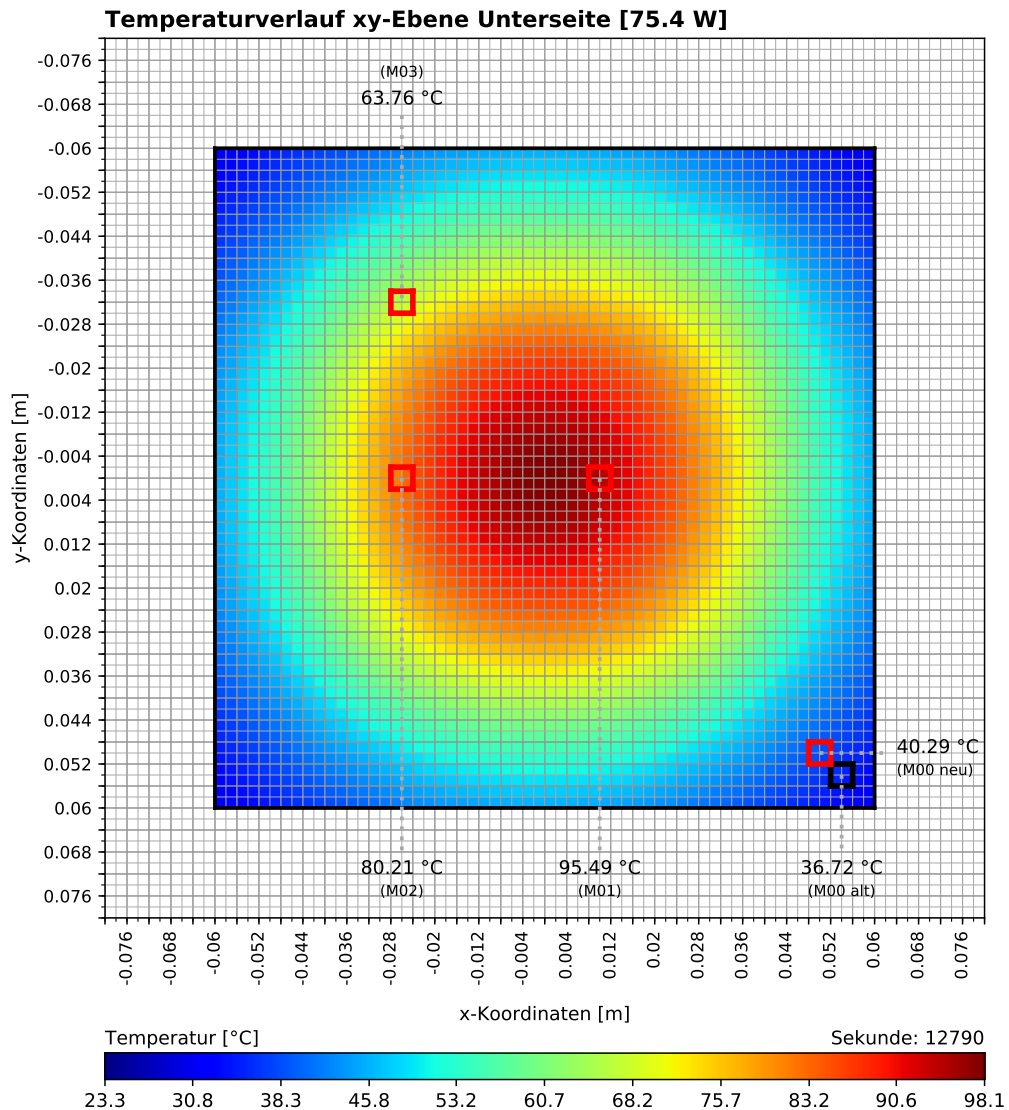


Abbildung 30: Versuch 4 - Neupositionierung M00

Durch die Neupositionierung der Messstelle M00 steigt die Temperatur innerhalb der Simulation um 3.57 °C . Damit fällt die Abweichung des Experiments gegenüber der Simulation in den Bereich von unter 10 % und ist somit als akzeptabel anzusehen.

Kapitel 4.2 beschreibt die mögliche Entstehung eines Wärmestaus innerhalb der Edelstahlplatte aufgrund der adiabaten Umrandung. Zur Überprüfung dieser Annahme werden die Temperaturen am Rand der Simulation ausgewertet. Erwartungsgemäß kommt es bei der größten Heizstufe zu den höchsten Temperaturen am Rand. Diese betragen für den Versuch 4 mit 75.4 W im Schnitt 3.4 °C und sind aus diesem Grund als vernachlässigbar anzusehen. Im Rahmen der Simulationen kommt es demnach zu keinem sich negativ auswirkenden Wärmestau innerhalb der Edelstahlplatte.

6. Fazit und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Validierung des Berechnungsmodells für die dreidimensionale Wärmeleitung (HT3D) innerhalb des Fire Dynamics Simulators auf Basis von Experimentaldaten. Zentrales Element der durchgeführten Experimente ist ein Kupferblock, welcher durch eine innenliegende Heizspirale erwärmt wird. Der Kupferblock ist mit einer Dämmschicht aus Promat umgeben und in einen Holztopf eingelassen. Dieser wiederum ist zur Positionierung in die Versuchsanlage in einer Edelstahlplatte eingelassen. Der Aufbau ermöglicht die Überprüfung der Wärmediffusion durch verschiedene Materialien. Die Temperatureaufnahme erfolgte über acht am Holztopf angebrachte Thermoelemente. Zudem wurde eine Temperaturmessung mittels Infrarotpistole an der Oberseite durchgeführt. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass der Versuchsaufbau bereits vorhanden war [5][6][7] und lediglich die Thermoelemente zusätzlich an den Holztopf angebracht wurden.

Zeitgleich mit der Durchführung der Experimente erfolgte die Erstellung der Simulation mittels FDS in der zum Zeitpunkt dieser Thesis aktuellen Version 6.6.0. Die Positionen zur Temperaturbestimmung innerhalb der Simulation orientieren sich an den Messstellen der Experimente um einen späteren Vergleich der Temperaturwerte zu ermöglichen. Zur Sicherstellung einer flexiblen Auswertung werden nicht einzelne Messpunkten an der Simulationsgeometrie angebracht, sondern an den in dieser Arbeit entwickelten Messflächen. Aufgrund der daraus resultierenden sehr hohen Datenmenge erfolgte die Auswertung der Simulationsdaten mittels einem eigens dafür erstellten Python-Skript.

Ein Vergleich der Temperaturwerte zwischen Experiment und Simulation zeigt eine gute Übereinstimmung. Die mittlere Abweichung der Temperaturwerte pro Leistungsstufe beträgt nicht mehr als 10 %. Es fällt jedoch auf, dass die Messstellen *IR03* und *IR04* deutlich über der durchschnittlichen Temperaturabweichung liegen. Eine Betrachtung der Gradienten an dieser Position zeigt, dass eine geringe Abweichung der Messposition bereits einen hohen absoluten Temperaturunterschied bewirkt. Berücksichtigt man, dass die genannten Positionen Handmessungen der Infrarotpistole darstellen, ist davon auszugehen, dass die Abweichungen aufgrund von Positionsunterschieden zwischen Simulation und Experiment zustande kommen. Das gleiche Phänomen ist auch am Messpunkt *M00* der Thermoelemente zu erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine genaue Positionierung der Thermoelemente aufgrund des vorhandenen Versuchsaufbaus nicht möglich war. Zur Überprüfung dieser Annahme erfolgte eine Neupositionierung der Temperatureaufnahme an der genannten Messstelle in der Simulation. Ein anschließender Vergleich zwischen den Messposition zeigt eine deutliche Annäherung des Simulationswertes (*M00*) an die Temperaturen der Experimente.

Bei der Durchführung weiterer Experimente zur Validierung des HT3D-Modells ist besonders auf die Positionierung der Messstellen zu achten. Ihre genaue Position sollte bekannt sein und Handmessungen durch Messungen mit dem Stativ ersetzt werden. Weiterhin ist ein Temperaturvergleich über die Zeit zu empfehlen. Die Temperaturwerte sollten nicht nur zum Zeitpunkt des stationären Zustandes miteinander verglichen werden, sondern über den gesamten betrachteten Zeitraum.

Abschließend bleibt zu sagen, dass die in dieser Bachelorthesis durchgeführte Validierung den dokumentierten Beweis erbringt, dass das mathematische Modell zur Berechnung der dreidimensionalen Wärmeleitung in FDS (HT3D) die physikalischen Eigenschaften der Wärmediffusion korrekt nachstellt.

Literaturverzeichnis

- [1] Kevin McGrattan, Simon Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, Marcos Vannella, Craig Weinschenk, und Kristopher Overholt. *Fire Dynamics Simulator 6.6.0 User's Guide*. National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, November 2017.
(Zitiert auf den Seiten VIII, 4, 12, 13, 20, 21, 22 und 32)
- [2] A. Alvarez, B. Meacham, N. Dembsey, und J. Thomas. Twenty years of performance-based fire protection design: Challenges faced and look ahead. *Journal of Fire Protection Engineering*, 23:249–276, November 2013.
(Zitiert auf Seite 1)
- [3] Dietmar Hosser. *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*. vfdb, 3. Auflage, November 2013.
(Zitiert auf Seite 1)
- [4] Louis Gritzoa, Paul Sensenyb, Yibing Xinb, und Russell Thoma. A position paper on verification and validation of numerical fire models. *Fire Safety Journal*, 2005.
(Zitiert auf Seite 1)
- [5] Andreas Meunders. *A study on buoyancy-driven flows: Using particle image velocimetry for validating the Fire Dynamics Simulator*, 31 *Schriften des Forschungszentrums Jülich*. Bergische Universität Wuppertal, Forschungszentrum Jülich, 2016.
(Zitiert auf den Seiten 2, 14, 28, 36 und 49)
- [6] Leonie Rommeswinkel. Design einer Versuchsanlage zur Untersuchung der Turbulenz von auftriebsgetriebenen Strömungen. Masterthesis, Bergische Universität Wuppertal, 2017.
(Zitiert auf den Seiten 2, 14, 36 und 49)
- [7] Anna Tscherniewski. Experimente zur Validierung des Fire Dynamics Simulator (FDS) - Untersuchung der Thermo- und Fluidodynamik an einer kleinskaligen Einraumgeometrie. Masterthesis, Bergische Universität Wuppertal, Oktober 2017.
(Zitiert auf den Seiten 2, 14 und 49)
- [8] Ian Chivers und Jane Sleightholme. *Introduction to Programming with Fortran*. Springer, 3. Auflage, 2015. ISBN: 978-3-319-17700-7.
(Zitiert auf Seite 4)

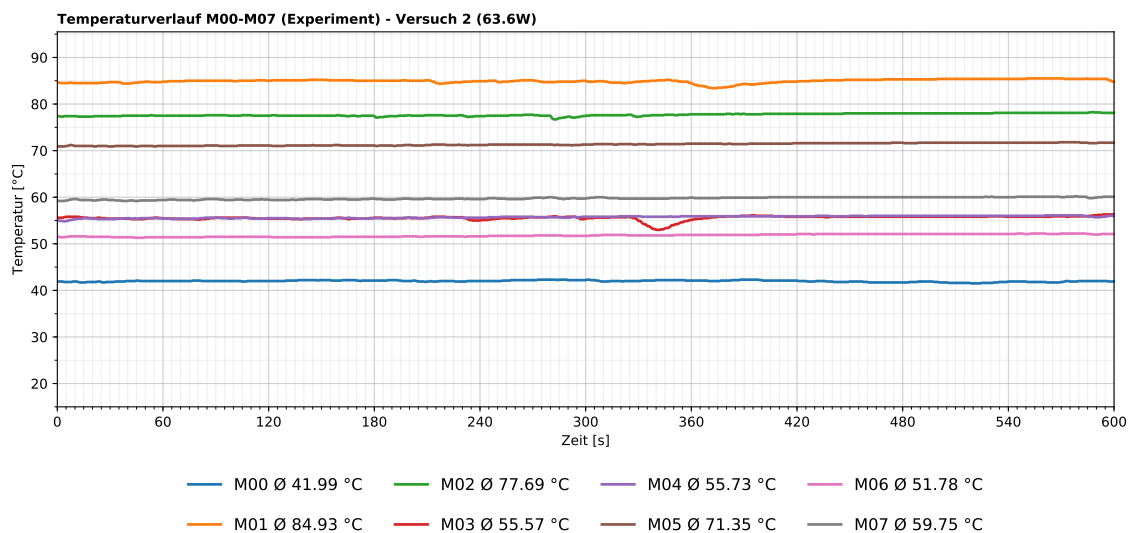
- [9] Randy McDermot. FDS Release Notes [online]. URL: <https://github.com/firemodels/fds/wiki/FDS-Release-Notes> [Januar 2018].
(Zitiert auf Seite 4)
- [10] Jason Floyd. Evolution of the Fire Dynamics Simulator. *SFPE - Fire Protection Engineering*, 2017.
(Zitiert auf Seite 4)
- [11] Daniel Haarhoff und Lukas Arnold. Performance Analysis and Shared Memory Parallelisation of FDS. *Jülich Supercomputing Center (JSC)*, 2014.
(Zitiert auf den Seiten 4 und 32)
- [12] Kevin McGrattan, Simon Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, Marcos Vannella, Craig Weinschenk, und Kristopher Overholt. *Fire Dynamics Simulator 6.6.0 Technical Reference Guide*, Volume 3: Validation. National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, November 2017.
(Zitiert auf Seite 5)
- [13] *ASTM E1355-12, Standard Guide for Evaluating the Predictive Capabilities of Deterministic Fire Models*. American Society for Testing and Materials, 2012.
(Zitiert auf Seite 5)
- [14] Ernst Doering, Herbert Schedwill, und Martin Dehli. *Grundlagen der technischen Thermodynamik*. Springer Vieweg, 7. Auflage, 2012. ISBN: 978-3-8348-1026-7.
(Zitiert auf Seite 5)
- [15] Wolfgang Polifke und Jan Kopitz. *Wärmeübertragung - Grundlagen, analytische und numerische Methoden*. Pearson Studium, 2. Auflage, 2009. ISBN: 978-3-827-37349-6.
(Zitiert auf Seite 6)
- [16] H. S. Carslaw und J. C. Jaeger. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford - Clarendon Press, 2. Auflage, 1959.
(Zitiert auf Seite 7)
- [17] Hans Dieter Baehr und Karl Stephan. *Wärme- und Stoffübertragung*. Springer Vieweg, 8. Auflage, 2013. ISBN: 978-3-642-36557-7.
(Zitiert auf Seite 7)
- [18] Joe Hoffman. *Numerical Methods for Engineers and Scientist*. Marcel Denker, Inc., 2. Auflage, 1992. ISBN: 0-8247-0443-6.
(Zitiert auf Seite 7)

- [19] Kevin McGrattan, Simon Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, Marcos Vannella, Craig Weinschenk, und Kristopher Overholt. *Fire Dynamics Simulator 6.6.0 Technical Reference Guide*, Volume 1: Mathematical Model. National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, November 2017. (Zitiert auf den Seiten 8, 10, 12, 20 und 22)
- [20] Suhas Patankar. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill Book Company, 1. Auflage, 1980. ISBN: 0-07-048740-5. (Zitiert auf den Seiten 8, 9 und 10)
- [21] Michael Schäfer. *Computational Engineering – Introduction to Numerical Methods*. Springer, 1. Auflage, 2006. ISBN: 978-3-540-30685-6. (Zitiert auf Seite 10)
- [22] Wolfgang Hackbusch. *The Concept of Stability in Numerical Mathematics*. Springer Series in Computational Mathematics 45. Springer, 1. Auflage, 2014. ISBN: 978-3-642-39385-3. (Zitiert auf Seite 12)
- [23] G. W. Stewart. *Introduction to Matrix Computations*. Computer Science and Applied Mathematics. Academix Press, 1973. (Zitiert auf Seite 12)
- [24] Mark Davis. Finite Difference Methods. *Department of Mathematics, Imperial College London*, 2010. (Zitiert auf Seite 12)
- [25] Alexander Belt, Lukas Arnold, Leonie Rommeswinkel, und Anna Tscherniewski. *Temperature and Velocity Field Measurements for a Pure Buoyancy Driven Plume in a Enclosure*. Februar 2017. (Zitiert auf Seite 14)
- [26] Testo SE Co. KGaA. *Testo 860-T1 Instruction Manual*, 2. Auflage, April 2003. (Zitiert auf Seite 17)
- [27] OMEGA Engineering . *Cement-On Thermocouples - Data Sheet*, 2016. (Zitiert auf Seite 17)
- [28] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (RES), Electric Power Research Institute (EPRI). *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications*, Volume 7: Fire Dynamics Simulator

- (FDS) *NUREG-1824, EPRI 1011999*. Mai 2007.
(Zitiert auf den Seiten 20 und 23)
- [29] Peter Mohr, Barry Taylor, und David Newell. *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010*, 84. American Physical Society, November 2012.
(Zitiert auf Seite 22)
- [30] S. Turns und D. Kraige. *Properties Tables Booklet for Thermal Fluids Engineering*. Cambridge University Press, 1. Auflage, November 2007. ISBN: 978-0-511-53975-6.
(Zitiert auf den Seiten 22 und 23)
- [31] Intel® Core™ i5-4308U Processor [online]. URL: https://ark.intel.com/products/83507/Intel-Core-i5-4308U-Processor-3M-Cache-up-to-3_30-GHz [Dezember 2017].
(Zitiert auf Seite 24)
- [32] Randall McDermott, Glenn Forney, Kevin McGrattan, und William Mell. Complex Geometry, Embedded Meshes, and Quality Assessment. *European Conference on Computational Fluid Dynamics*, Juni 2010.
(Zitiert auf Seite 28)
- [33] Marcos Vanella, Randall McDermott, Glenn Forney, und Kevin McGrattan. *Fire Dynamics Simulator: Advances in simulation capability for complex geometry*. November 2016.
(Zitiert auf Seite 28)
- [34] Kondylis Krause. *JURECA - Hardware and Best Practices*. HPS group @ JSC, Juni 2016.
(Zitiert auf Seite 32)
- [35] Mark Lutz und David Ascher. *Learning Python*. O'Reilly an Associates, Inc, März 1999.
(Zitiert auf Seite 34)

A. Messdaten Experiment

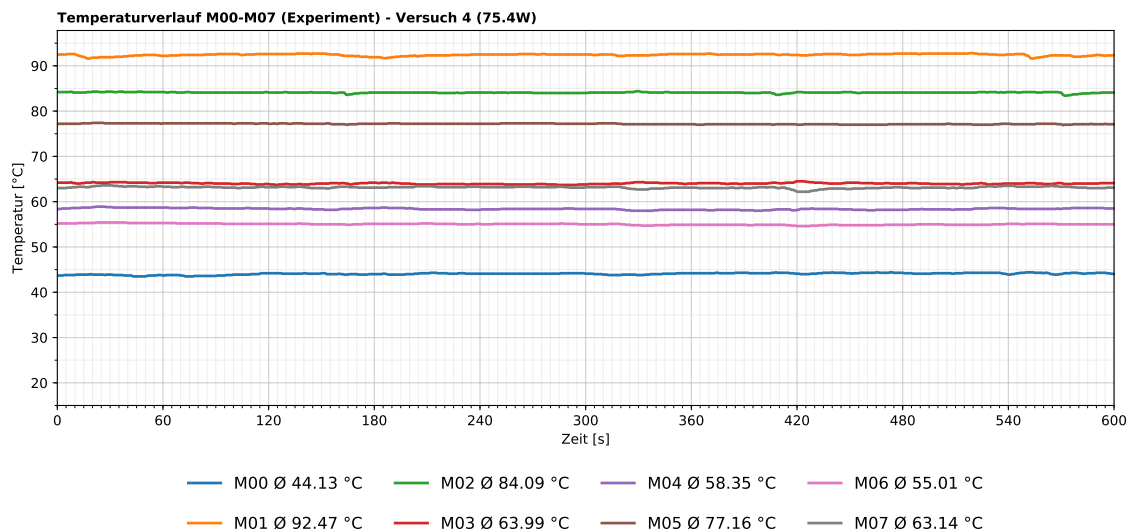
Validierung HT3D Modul					
Versuch 2 - 63.6 W					
30. November 2017 - 16.04 Uhr					
Spannung	[V]	120	Stromstärke	[A]	0.53
t_{start}	[hh:mm]	16:04	t_{ende}	[hh:mm]	16:14
T_{start}	[°C]	359	T_{ende}	[°C]	360
t_{start} = Beginn Messung T_{start} = Temperatur im Kupferblock bei t_{start}			t_{Ende} = Ende Messung T_{ende} = Temperatur im Kupferblock bei t_{ende}		
Temperatur Infrarotmessungen					
Infrarot IR00	[°C]	330.0	Infrarot IR01	[°C]	327.6
Infrarot IR02	[°C]	328.7	Infrarot IR03	[°C]	106.4
Infrarot IR04	[°C]	68.5	Infrarot IR05	[°C]	45.1
Infrarot IR06	[°C]	34.2	Infrarot IR07	[°C]	34.6
Infrarot IR08	[°C]	34.1			
Temperatur Messfühler					
Messfühler M00	[°C]	Ø 41.99	Messfühler M01	[°C]	Ø 84.93
Messfühler M02	[°C]	Ø 77.69	Messfühler M03	[°C]	Ø 55.57
Messfühler M04	[°C]	Ø 55.73	Messfühler M05	[°C]	Ø 71.35
Messfühler M06	[°C]	Ø 51.78	Messfühler M07	[°C]	Ø 59.75
Umgebungstemp.	[°C]	Ø 23.08	Messdauer	[s]	600



Validierung HT3D Modul	
Messunsicherheiten Versuch 2 - 63.6 W	
Infrarotpistole (IR)	Thermoelement (M)
$\pm 0.75 \text{ \%}$ oder $\pm 0.75 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.75 \text{ \%}$ oder $\pm 2.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Der größerer beider Werte gilt!	

	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$		$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
IR01	330.00	± 2.48	M01	41.99	± 2.20
IR02	327.60	± 2.46	M02	84.93	± 2.20
IR03	328.70	± 2.47	M03	77.69	± 2.20
IR04	106.40	± 0.80	M04	55.57	± 2.20
IR05	68.50	± 0.75	M05	55.73	± 2.20
IR06	45.10	± 0.75	M06	71.35	± 2.20
IR07	34.20	± 0.75	M07	51.78	± 2.20
IR08	34.60	± 0.75			
IR09	34.10	± 0.75			

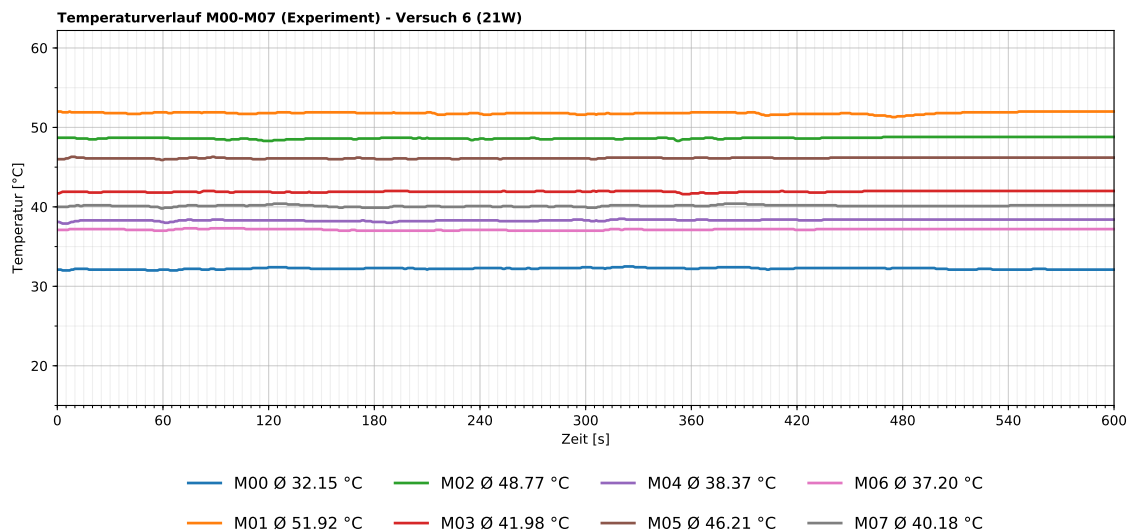
Validierung HT3D Modul					
Versuch 4 - 75.4 W					
04. Dezember 2017 - 16.50 Uhr					
Spannung	[V]	130	Stromstärke	[A]	0.58
t_{start}	[hh:mm]	16:50	t_{ende}	[hh:mm]	17:02
T_{start}	[°C]	397	T_{ende}	[°C]	397
t_{start} = Beginn Messung		t_{Ende} = Ende Messung			
T_{start} = Temperatur im Kupferblock bei t_{start}		T_{ende} = Temperatur im Kupferblock bei t_{ende}			
Temperatur Infrarotmessungen					
Infrarot IR00	[°C]	367.0	Infrarot IR01	[°C]	365.0
Infrarot IR02	[°C]	363.0	Infrarot IR03	[°C]	130.0
Infrarot IR04	[°C]	70.0	Infrarot IR05	[°C]	46.0
Infrarot IR06	[°C]	37.0	Infrarot IR07	[°C]	36.5
Infrarot IR08	[°C]	33.0			
Temperatur Messfühler					
Messfühler M00	[°C]	Ø 44.13	Messfühler M01	[°C]	Ø 92.47
Messfühler M02	[°C]	Ø 84.09	Messfühler M03	[°C]	Ø 63.99
Messfühler M04	[°C]	Ø 58.35	Messfühler M05	[°C]	Ø 77.16
Messfühler M06	[°C]	Ø 55.01	Messfühler M07	[°C]	Ø 63.14
Umgebungstemp.	[°C]	Ø 23.33	Messdauer	[s]	600



Validierung HT3D Modul	
Messunsicherheiten Versuch 4 - 75.4 W	
Infrarotpistole (IR)	Thermoelement (M)
$\pm 0.75 \text{ \%}$ oder $\pm 0.75 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.75 \text{ \%}$ oder $\pm 2.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Der größerer beider Werte gilt!	

	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$		$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
IR01	367.00	± 2.75	M01	44.13	± 2.20
IR02	365.00	± 2.74	M02	92.47	± 2.20
IR03	363.00	± 2.72	M03	84.09	± 2.20
IR04	130.00	± 0.97	M04	63.99	± 2.20
IR05	70.00	± 0.75	M05	58.35	± 2.20
IR06	46.00	± 0.75	M06	77.16	± 2.20
IR07	37.00	± 0.75	M07	55.01	± 2.20
IR08	36.50	± 0.75			
IR09	33.00	± 0.75			

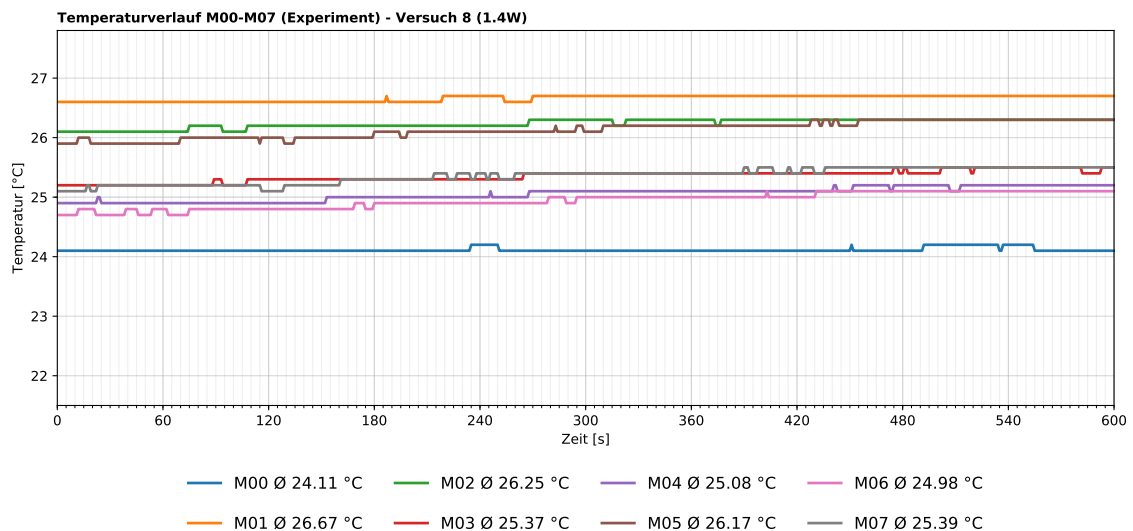
Validierung HT3D Modul					
Versuch 6 - 21 W					
05. Dezember 2017 - 13.36 Uhr					
Spannung	[V]	70	Stromstärke	[A]	0.3
t_{start}	[hh:mm]	13:36	t_{ende}	[hh:mm]	13:53
T_{start}	[°C]	173	T_{ende}	[°C]	173
t_{start} = Beginn Messung		t_{Ende} = Ende Messung			
T_{start} = Temperatur im Kupferblock bei t_{start}		T_{ende} = Temperatur im Kupferblock bei t_{ende}			
Temperatur Infrarotmessungen					
Infrarot IR00	[°C]	157.9	Infrarot IR01	[°C]	157.2
Infrarot IR02	[°C]	156.2	Infrarot IR03	[°C]	65.0
Infrarot IR04	[°C]	40.1	Infrarot IR05	[°C]	32.4
Infrarot IR06	[°C]	28.6	Infrarot IR07	[°C]	28.5
Infrarot IR08	[°C]	27.3			
Temperatur Messfühler					
Messfühler M00	[°C]	Ø 32.15	Messfühler M01	[°C]	Ø 51.92
Messfühler M02	[°C]	Ø 48.77	Messfühler M03	[°C]	Ø 41.98
Messfühler M04	[°C]	Ø 38.37	Messfühler M05	[°C]	Ø 46.21
Messfühler M06	[°C]	Ø 37.20	Messfühler M07	[°C]	Ø 40.18
Umgebungstemp.	[°C]	Ø 23.43	Messdauer	[s]	600



Validierung HT3D Modul	
Messunsicherheiten Versuch 6 - 21 W	
Infrarotpistole (IR)	Thermoelement (M)
$\pm 0.75 \text{ \%}$ oder $\pm 0.75 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.75 \text{ \%}$ oder $\pm 2.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Der größerer beider Werte gilt!	

	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$		$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
IR01	157.90	± 1.18	M01	32.15	± 2.20
IR02	157.20	± 1.18	M02	51.92	± 2.20
IR03	156.20	± 1.17	M03	48.77	± 2.20
IR04	65.00	± 0.75	M04	41.98	± 2.20
IR05	40.10	± 0.75	M05	38.37	± 2.20
IR06	32.40	± 0.75	M06	46.21	± 2.20
IR07	28.60	± 0.75	M07	37.20	± 2.20
IR08	28.50	± 0.75			
IR09	27.30	± 0.75			

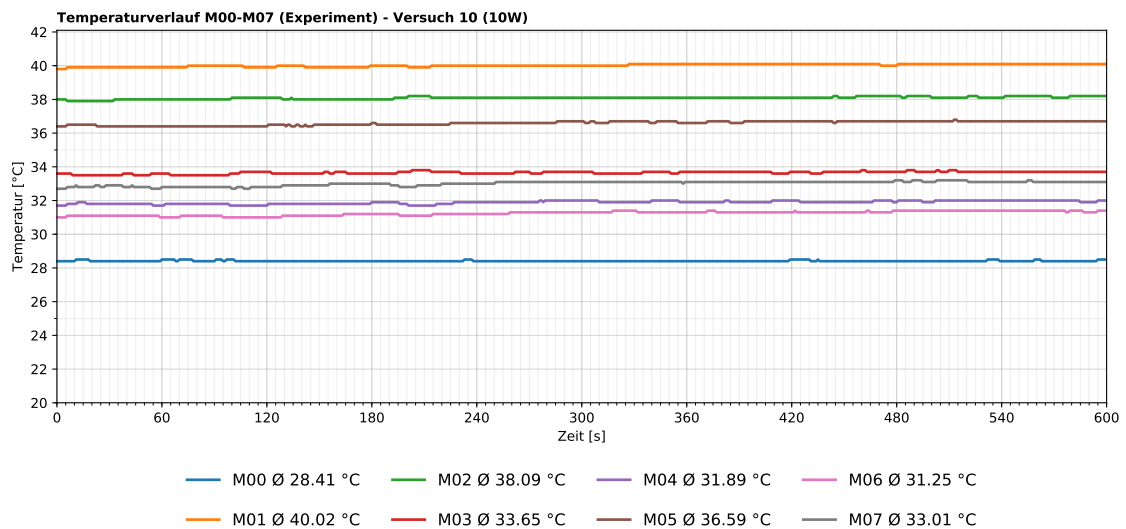
Validierung HT3D Modul					
Versuch 8 - 1.4 W					
06. Dezember 2017 - 10.03 Uhr					
Spannung	[V]	20	Stromstärke	[A]	0.07
t_{start}	[hh:mm]	10:03	t_{ende}	[hh:mm]	10:15
T_{start}	[°C]	43	T_{ende}	[°C]	43
t_{start} = Beginn Messung		t_{Ende} = Ende Messung			
T_{start} = Temperatur im Kupferblock bei t_{start}		T_{ende} = Temperatur im Kupferblock bei t_{ende}			
Temperatur Infrarotmessungen					
Infrarot IR00	[°C]	38.0	Infrarot IR01	[°C]	37.8
Infrarot IR02	[°C]	37.8	Infrarot IR03	[°C]	29.5
Infrarot IR04	[°C]	25.4	Infrarot IR05	[°C]	23.6
Infrarot IR06	[°C]	23.0	Infrarot IR07	[°C]	23.0
Infrarot IR08	[°C]	22.8			
Temperatur Messfühler					
Messfühler M00	[°C]	Ø 24.11	Messfühler M01	[°C]	Ø 26.67
Messfühler M02	[°C]	Ø 26.25	Messfühler M03	[°C]	Ø 25.37
Messfühler M04	[°C]	Ø 25.08	Messfühler M05	[°C]	Ø 26.17
Messfühler M06	[°C]	Ø 24.98	Messfühler M07	[°C]	Ø 25.39
Umgebungstemp.	[°C]	Ø 22.28	Messdauer	[s]	600



Validierung HT3D Modul	
Messunsicherheiten Versuch 8 - 1.4 W	
Infrarotpistole (IR)	Thermoelement (M)
$\pm 0.75 \text{ \%}$ oder $\pm 0.75 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.75 \text{ \%}$ oder $\pm 2.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Der größerer beider Werte gilt!	

	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$		$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
IR01	38.00	± 0.75	M01	24.11	± 2.20
IR02	37.80	± 0.75	M02	26.67	± 2.20
IR03	37.80	± 0.75	M03	26.25	± 2.20
IR04	29.50	± 0.75	M04	25.37	± 2.20
IR05	25.40	± 0.75	M05	25.08	± 2.20
IR06	23.60	± 0.75	M06	26.17	± 2.20
IR07	23.00	± 0.75	M07	24.98	± 2.20
IR08	23.00	± 0.75			
IR09	22.80	± 0.75			

Validierung HT3D Modul				
Versuch 10 - 10 W				
07. Dezember 2017 - 09.59 Uhr				
Spannung [V]	50	Stromstärke [A]	0.2	
t_{start} [hh:mm]	09.59	t_{ende} [hh:mm]	10:09	
T_{start} [°C]	110	T_{ende} [°C]	110	
t_{start} = Beginn Messung		t_{Ende} = Ende Messung		
T_{start} = Temperatur im Kupferblock bei t_{start}		T_{ende} = Temperatur im Kupferblock bei t_{ende}		
Temperatur Infrarotmessungen				
Infrarot IR00 [°C]	99.7	Infrarot IR01 [°C]	98.3	
Infrarot IR02 [°C]	98.2	Infrarot IR03 [°C]	54.3	
Infrarot IR04 [°C]	37.0	Infrarot IR05 [°C]	28.4	
Infrarot IR06 [°C]	25.9	Infrarot IR07 [°C]	25.9	
Infrarot IR08 [°C]	25.0			
Temperatur Messfühler				
Messfühler M00 [°C]	Ø 28.41	Messfühler M01 [°C]	Ø 40.02	
Messfühler M02 [°C]	Ø 38.09	Messfühler M03 [°C]	Ø 33.65	
Messfühler M04 [°C]	Ø 31.89	Messfühler M05 [°C]	Ø 36.59	
Messfühler M06 [°C]	Ø 31.25	Messfühler M07 [°C]	Ø 33.01	
Umgebungstemp. [°C]	Ø 22.17	Messdauer [s]	600	



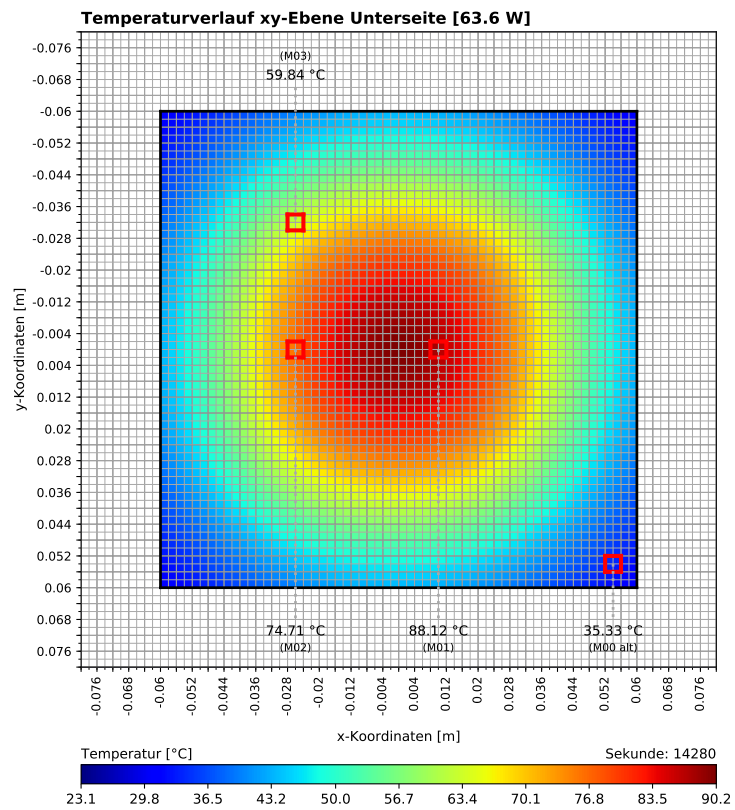
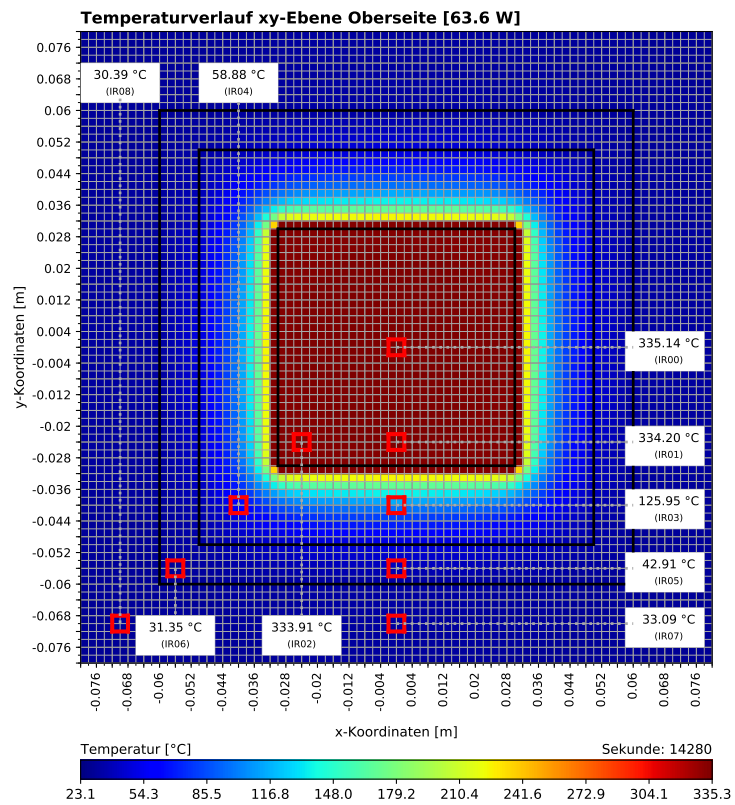
Validierung HT3D Modul	
Messunsicherheiten Versuch 10 - 10 W	
Infrarotpistole (IR)	Thermoelement (M)
$\pm 0.75 \text{ \%}$ oder $\pm 0.75 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.75 \text{ \%}$ oder $\pm 2.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Der größerer beider Werte gilt!	

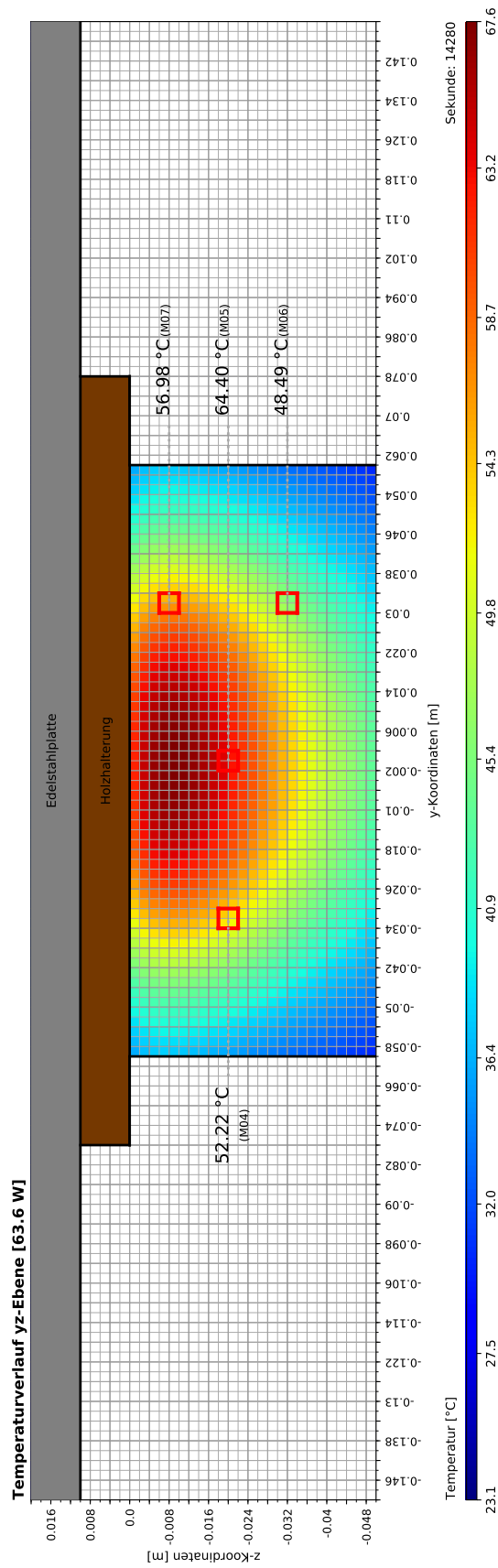
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$		$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
IR01	99.70	± 0.75	M01	28.41	± 2.20
IR02	98.30	± 0.75	M02	40.02	± 2.20
IR03	98.20	± 0.75	M03	38.09	± 2.20
IR04	54.30	± 0.75	M04	33.65	± 2.20
IR05	37.00	± 0.75	M05	31.89	± 2.20
IR06	28.40	± 0.75	M06	36.59	± 2.20
IR07	25.90	± 0.75	M07	31.25	± 2.20
IR08	25.90	± 0.75			
IR09	25.00	± 0.75			

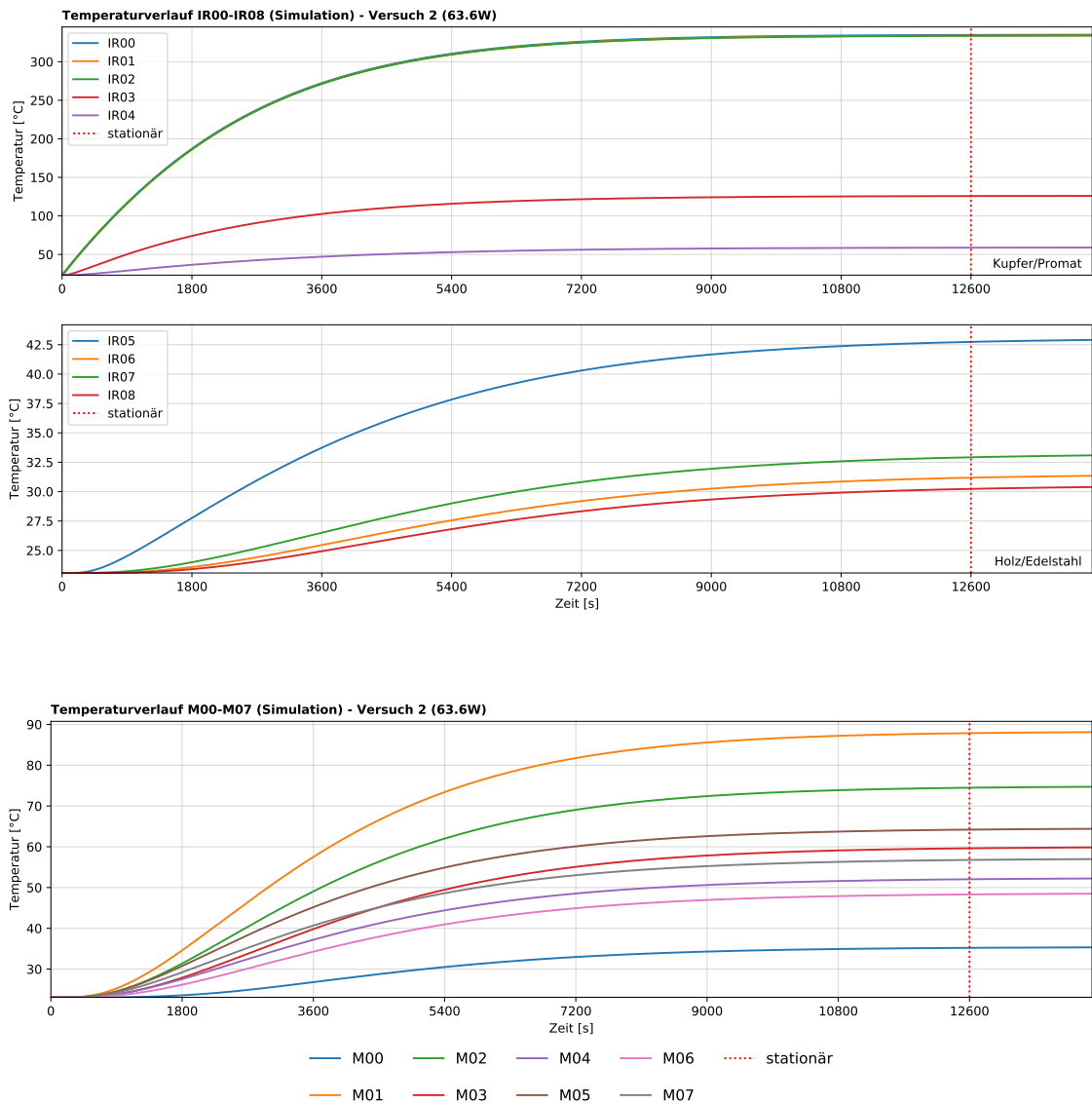
B. Messdaten Simulation

Validierung HT3D Modul					
Simulation Versuch 2 - 63.6 W					
Simulationszeit	[V]	120	Rechenzeit	[h]	0.53
Zellengröße δx	[mm]	2	Zellenanzahl	[-]	1 920 000
Temperaturen IR00-IR08					
Infrarot IR00	[°C]	335.14	Infrarot IR01	[°C]	334.20
Infrarot IR01	[°C]	333.91	Infrarot IR02	[°C]	125.95
Infrarot IR03	[°C]	58.88	Infrarot IR04	[°C]	42.91
Infrarot IR05	[°C]	31.35	Infrarot IR06	[°C]	33.09
Infrarot IR07	[°C]	30.39			
Temperaturen M00-M07					
Messfühler M00	[°C]	35.33	Messfühler M01	[°C]	88.12
Messfühler M02	[°C]	74.71	Messfühler M03	[°C]	59.84
Messfühler M04	[°C]	52.22	Messfühler M05	[°C]	64.40
Messfühler M06	[°C]	48.49	Messfühler M07	[°C]	56.98
Umgebungstemp.	[°C]	23.08			

Zeitpunkt konstanter Temperaturen				
Infrarot IR00	[s]	9900	Infrarot IR01	[s]
				9900
Infrarot IR02	[s]	9900	Infrarot IR03	[s]
				10800
Infrarot IR04	[s]	11700	Infrarot IR05	[s]
				12600
Infrarot IR06	[s]	12600	Infrarot IR07	[s]
				12600
Infrarot IR08	[s]	12600		
Messfühler M00	[s]	11700	Messfühler M01	[s]
				4500
Messfühler M02	[s]	12600	Messfühler M03	[s]
				12600
Messfühler M04	[s]	12600	Messfühler M05	[s]
				11700
Messfühler M06	[s]	12600	Messfühler M07	[s]
				12600

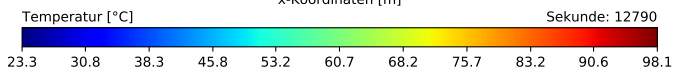
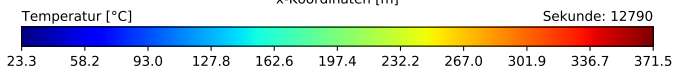


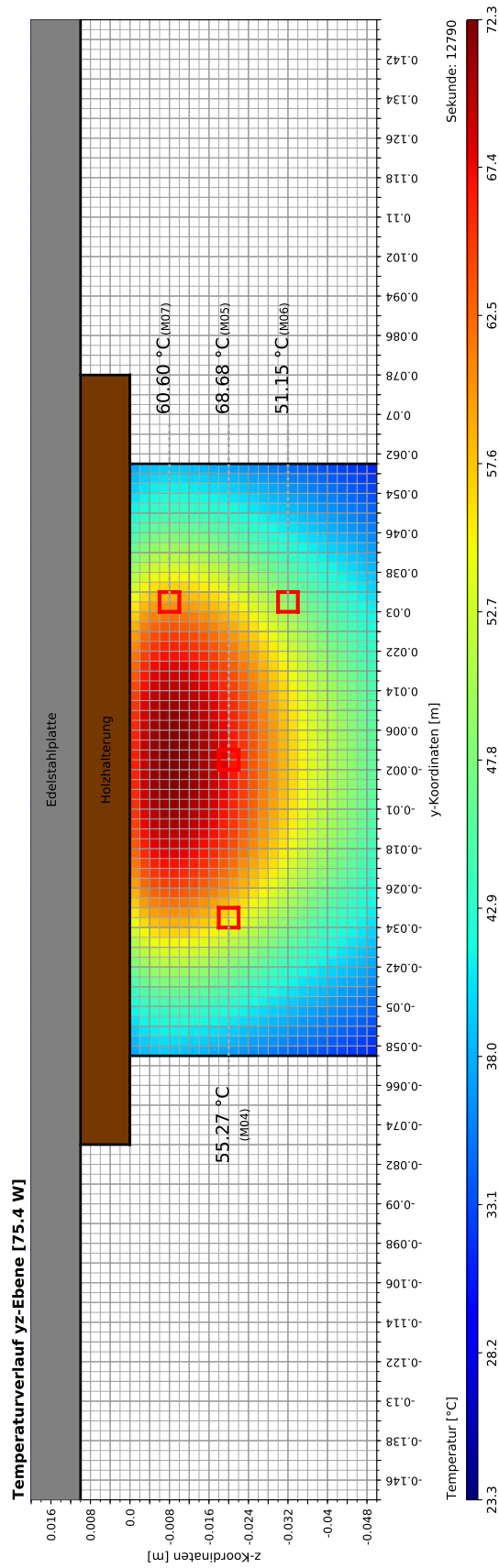


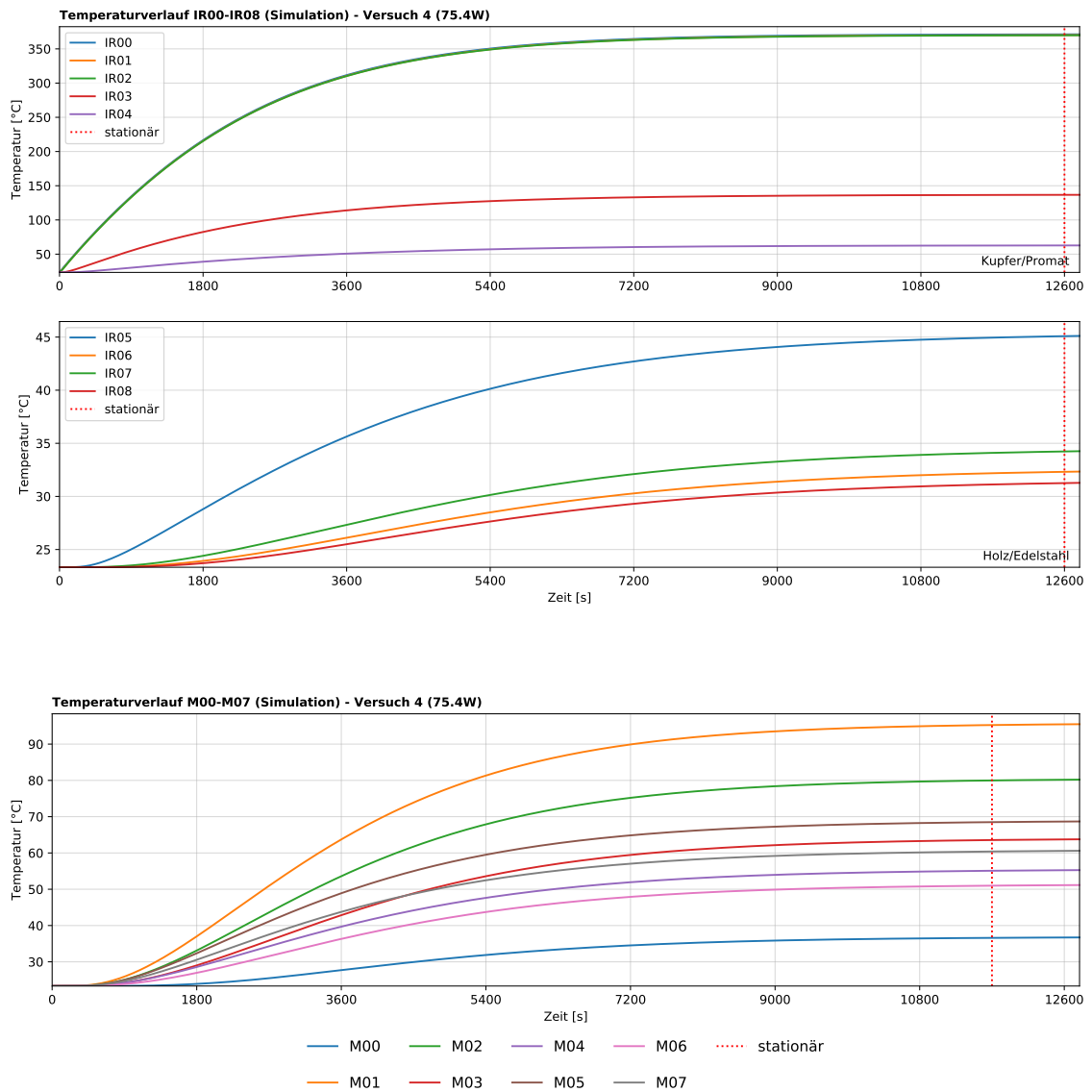


Validierung HT3D Modul				
Simulation Versuch 4 - 75.4 W				
Simulationszeit	[V]	120	Rechenzeit	[h]
				0.53
Zellengröße δx	[mm]	2	Zellenanzahl	[-]
				1 920 000
Temperaturen IR00-IR08				
Infrarot IR00	[°C]	371.31	Infrarot IR01	[°C]
				370.20
Infrarot IR01	[°C]	369.87	Infrarot IR02	[°C]
				136.70
Infrarot IR03	[°C]	62.75	Infrarot IR04	[°C]
				45.11
Infrarot IR05	[°C]	32.34	Infrarot IR06	[°C]
				34.26
Infrarot IR07	[°C]	31.28		
Temperaturen M00-M07				
Messfühler M00	[°C]	36.72	Messfühler M01	[°C]
				95.49
Messfühler M02	[°C]	80.21	Messfühler M03	[°C]
				63.76
Messfühler M04	[°C]	55.27	Messfühler M05	[°C]
				68.68
Messfühler M06	[°C]	51.15	Messfühler M07	[°C]
				60.60
Umgebungstemp.	[°C]	23.33		

Zeitpunkt konstanter Temperaturen				
Infrarot IR00	[s]	9000	Infrarot IR01	[s]
				9000
Infrarot IR02	[s]	9000	Infrarot IR03	[s]
				9900
Infrarot IR04	[s]	10800	Infrarot IR05	[s]
				11700
Infrarot IR06	[s]	12600	Infrarot IR07	[s]
				12600
Infrarot IR08	[s]	12600		
Messfühler M00	[s]	11700	Messfühler M01	[s]
				4500
Messfühler M02	[s]	11700	Messfühler M03	[s]
				11700
Messfühler M04	[s]	11700	Messfühler M05	[s]
				11700
Messfühler M06	[s]	11700	Messfühler M07	[s]
				11700

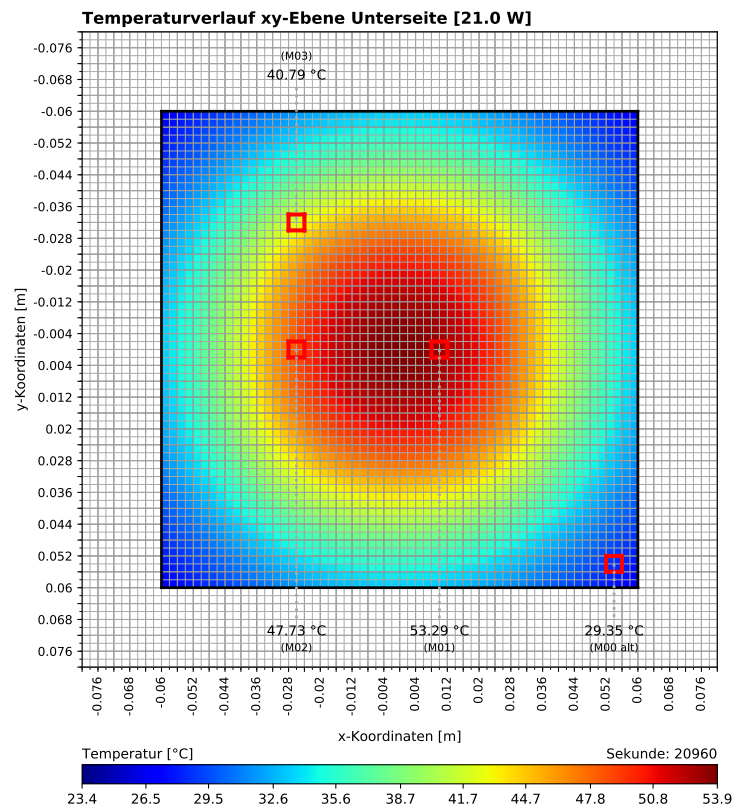
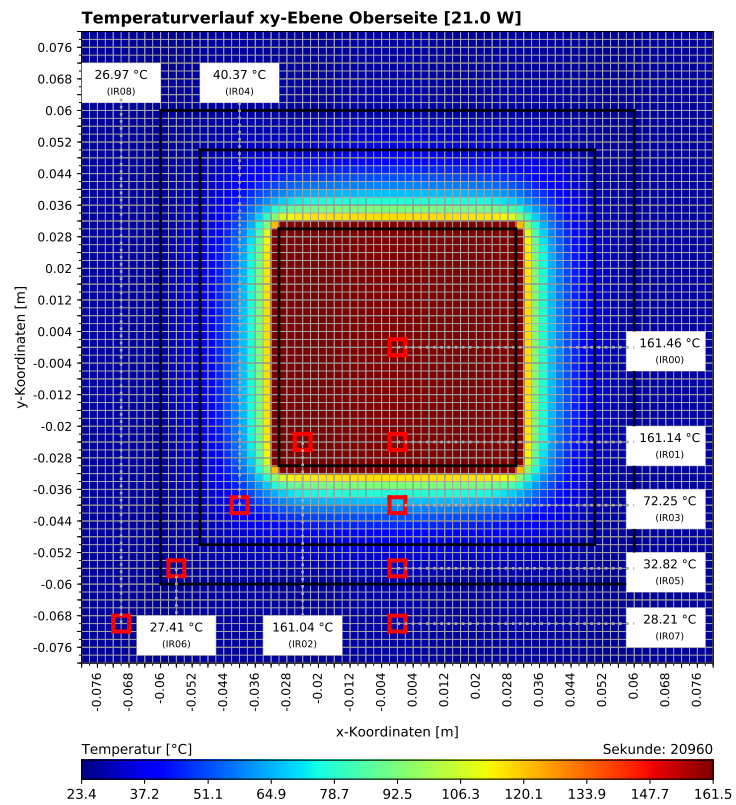


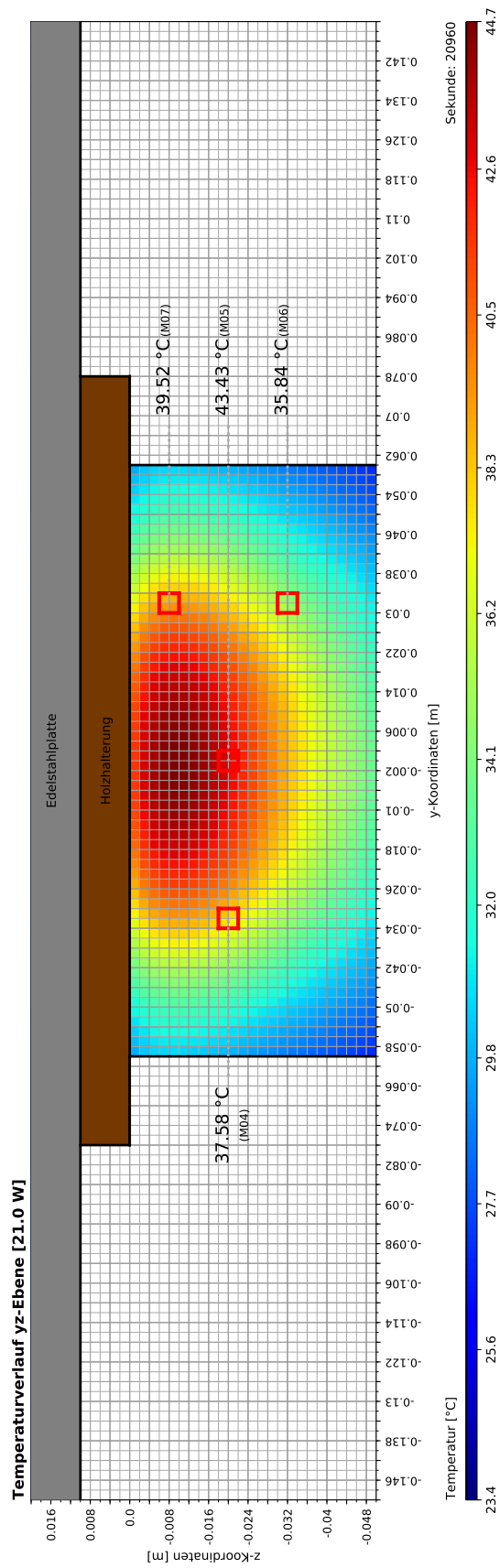


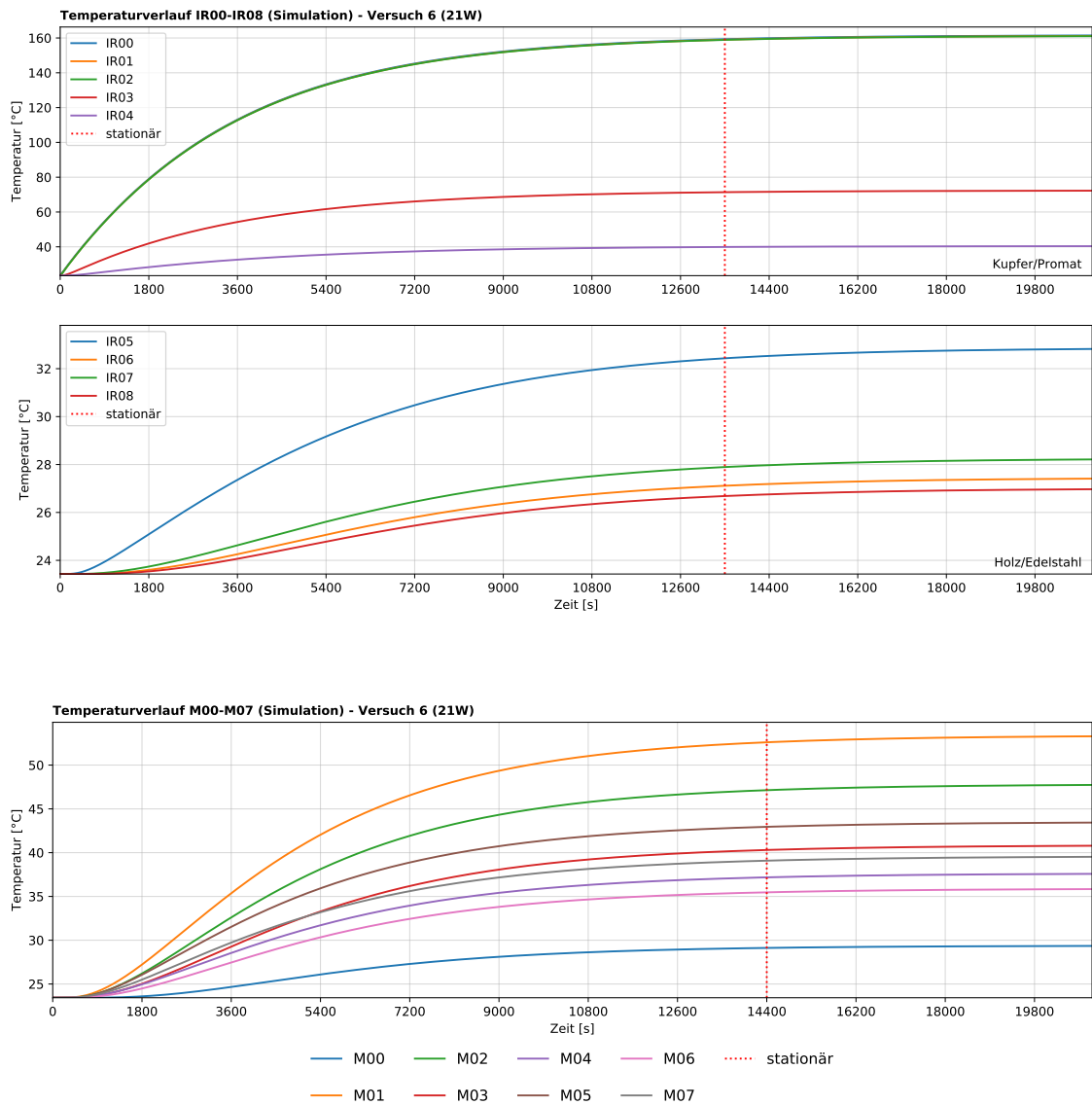


Validierung HT3D Modul					
Simulation Versuch 6 - 21 W					
Simulationszeit	[V]	120	Rechenzeit	[h]	0.53
Zellengröße δx	[mm]	2	Zellenanzahl	[-]	1 920 000
Temperaturen IR00-IR08					
Infrarot IR00	[°C]	161.46	Infrarot IR01	[°C]	161.14
Infrarot IR01	[°C]	161.04	Infrarot IR02	[°C]	72.25
Infrarot IR03	[°C]	40.37	Infrarot IR04	[°C]	32.82
Infrarot IR05	[°C]	27.41	Infrarot IR06	[°C]	28.21
Infrarot IR07	[°C]	26.97			
Temperaturen M00-M07					
Messfühler M00	[°C]	29.35	Messfühler M01	[°C]	53.29
Messfühler M02	[°C]	47.73	Messfühler M03	[°C]	40.79
Messfühler M04	[°C]	37.58	Messfühler M05	[°C]	43.43
Messfühler M06	[°C]	35.84	Messfühler M07	[°C]	39.52
Umgebungstemp.	[°C]	23.43			

Zeitpunkt konstanter Temperaturen					
Infrarot IR00	[s]	13500	Infrarot IR01	[s]	13500
Infrarot IR02	[s]	13500	Infrarot IR03	[s]	13500
Infrarot IR04	[s]	12600	Infrarot IR05	[s]	13500
Infrarot IR06	[s]	12600	Infrarot IR07	[s]	12600
Infrarot IR08	[s]	12600			
Messfühler M00	[s]	12600	Messfühler M01	[s]	4500
Messfühler M02	[s]	14400	Messfühler M03	[s]	14400
Messfühler M04	[s]	13500	Messfühler M05	[s]	14400
Messfühler M06	[s]	13500	Messfühler M07	[s]	14400

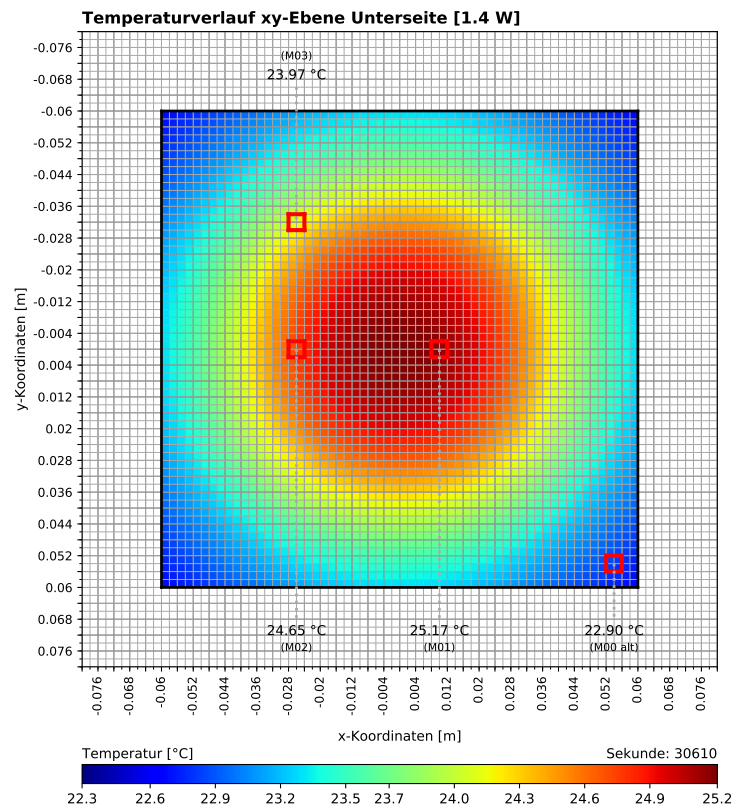
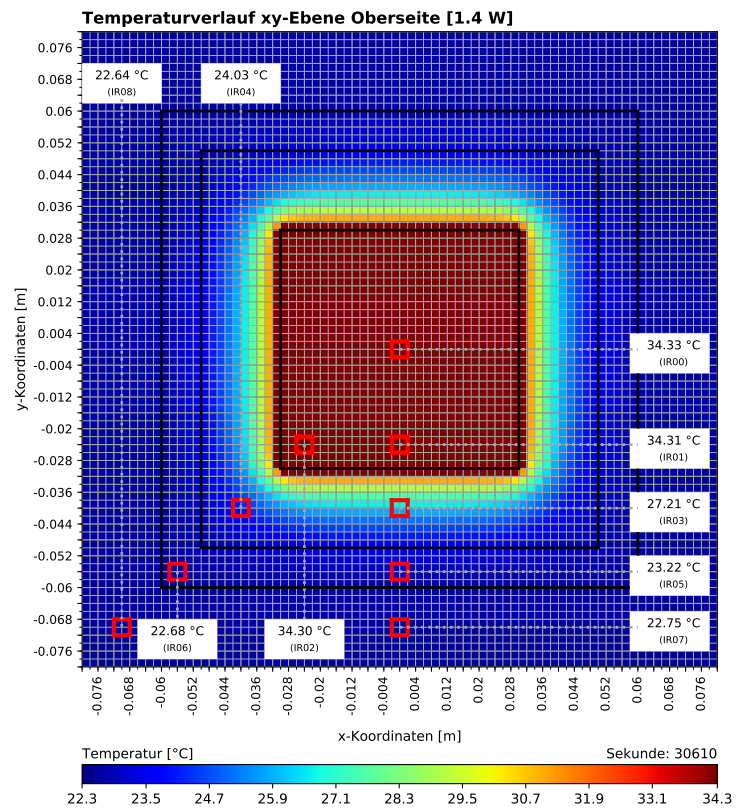


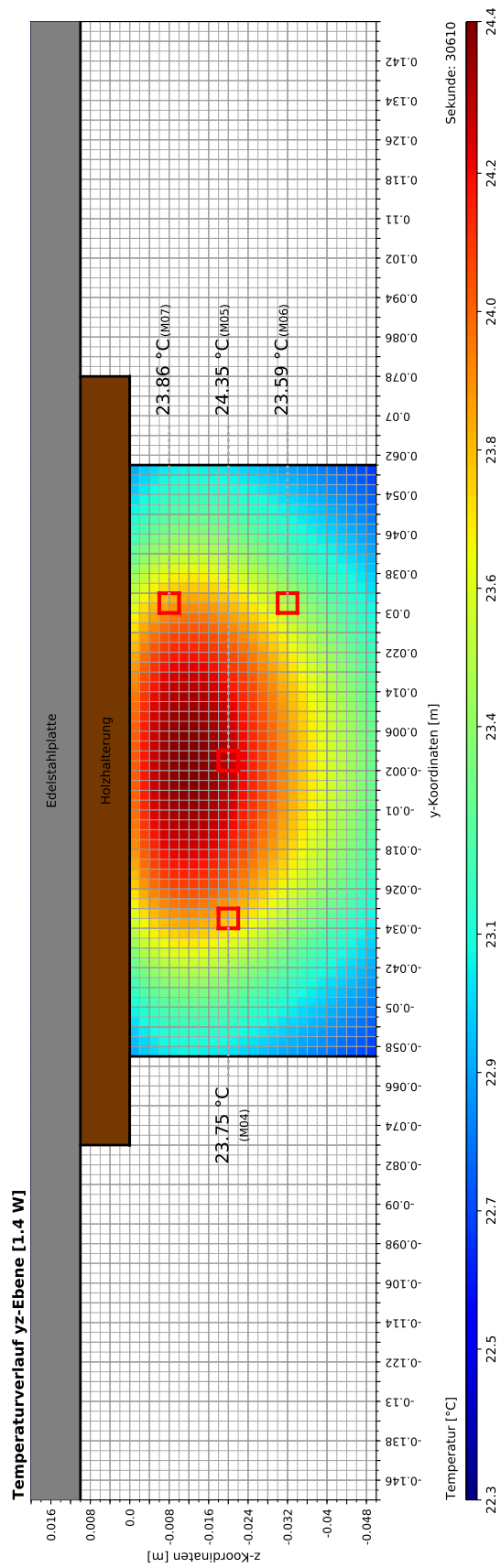


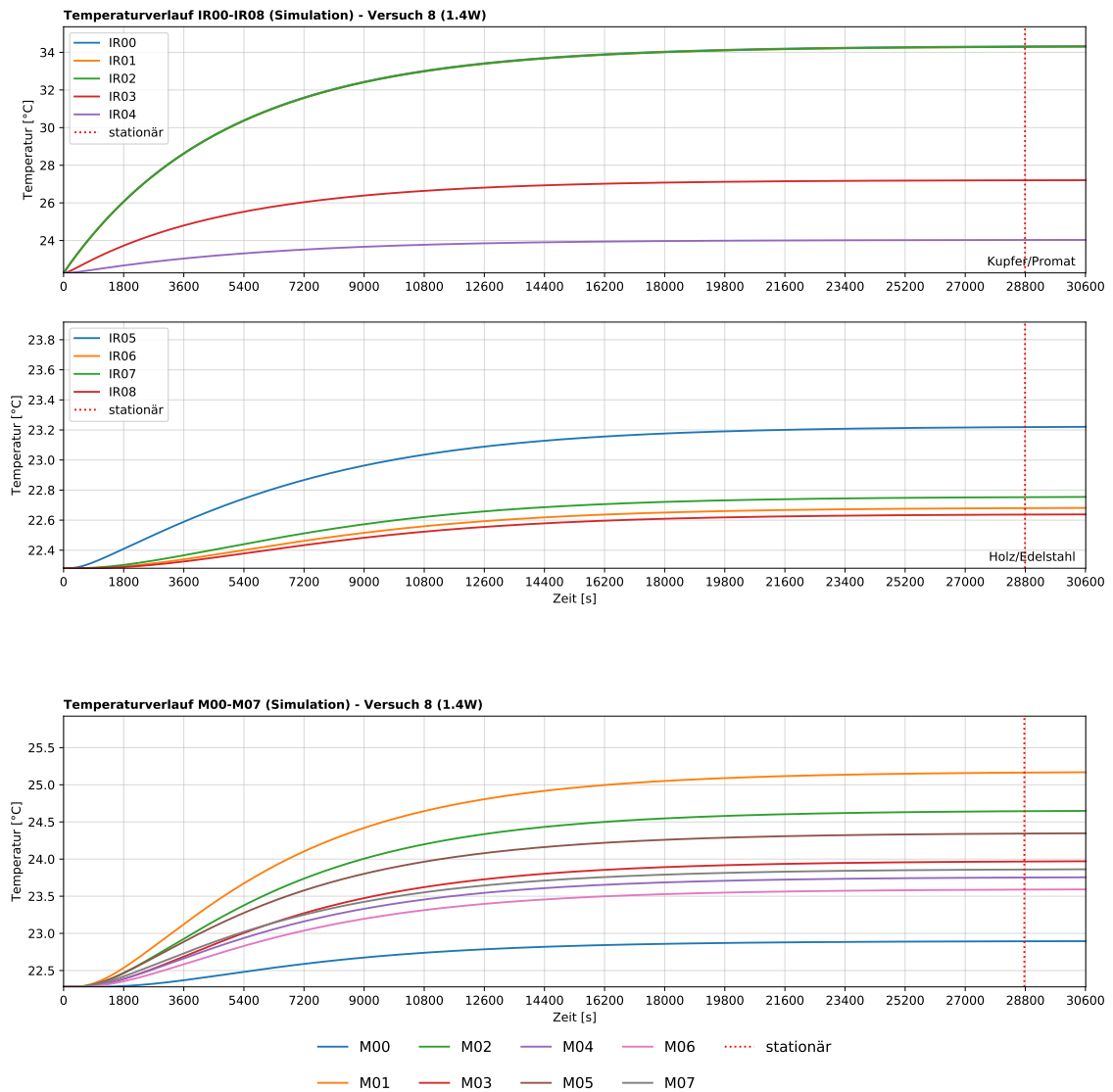


Validierung HT3D Modul					
Simulation Versuch 8 - 1.4 W					
Simulationszeit	[V]	120	Rechenzeit	[h]	0.53
Zellengröße δx	[mm]	2	Zellenanzahl	[-]	1 920 000
Temperaturen IR00-IR08					
Infrarot IR00	[°C]	34.33	Infrarot IR01	[°C]	34.31
Infrarot IR01	[°C]	34.30	Infrarot IR02	[°C]	27.21
Infrarot IR03	[°C]	24.03	Infrarot IR04	[°C]	23.22
Infrarot IR05	[°C]	22.68	Infrarot IR06	[°C]	22.75
Infrarot IR07	[°C]	22.64			
Temperaturen M00-M07					
Messfühler M00	[°C]	22.90	Messfühler M01	[°C]	25.17
Messfühler M02	[°C]	24.65	Messfühler M03	[°C]	23.97
Messfühler M04	[°C]	23.75	Messfühler M05	[°C]	24.35
Messfühler M06	[°C]	23.59	Messfühler M07	[°C]	23.86
Umgebungstemp.	[°C]	22.28			

Zeitpunkt konstanter Temperaturen					
Infrarot IR00	[s]	25390	Infrarot IR01	[s]	25850
Infrarot IR02	[s]	25890	Infrarot IR03	[s]	26990
Infrarot IR04	[s]	28790	Infrarot IR05	[s]	0
Infrarot IR06	[s]	0	Infrarot IR07	[s]	0
Infrarot IR08	[s]	0			
Messfühler M00	[s]	0	Messfühler M01	[s]	0
Messfühler M02	[s]	0	Messfühler M03	[s]	0
Messfühler M04	[s]	25020	Messfühler M05	[s]	18020
Messfühler M06	[s]	25020	Messfühler M07	[s]	28770







Validierung HT3D Modul					
Simulation Versuch 10 - 10 W					
Simulationszeit	[V]	120	Rechenzeit	[h]	0.53
Zellengröße δx	[mm]	2	Zellenanzahl	[-]	1 920 000
Temperaturen IR00-IR08					
Infrarot IR00	[°C]	95.80	Infrarot IR01	[°C]	95.65
Infrarot IR01	[°C]	95.60	Infrarot IR02	[°C]	49.46
Infrarot IR03	[°C]	31.69	Infrarot IR04	[°C]	27.42
Infrarot IR05	[°C]	24.41	Infrarot IR06	[°C]	24.85
Infrarot IR07	[°C]	24.17			
Temperaturen M00-M07					
Messfühler M00	[°C]	25.50	Messfühler M01	[°C]	38.68
Messfühler M02	[°C]	35.70	Messfühler M03	[°C]	31.83
Messfühler M04	[°C]	30.19	Messfühler M05	[°C]	33.51
Messfühler M06	[°C]	29.24	Messfühler M07	[°C]	31.15
Umgebungstemp.	[°C]	22.17			

Zeitpunkt konstanter Temperaturen					
Infrarot IR00	[s]	15300	Infrarot IR01	[s]	15300
Infrarot IR02	[s]	15300	Infrarot IR03	[s]	14400
Infrarot IR04	[s]	12600	Infrarot IR05	[s]	12600
Infrarot IR06	[s]	10800	Infrarot IR07	[s]	10800
Infrarot IR08	[s]	10800			
Messfühler M00	[s]	11700	Messfühler M01	[s]	4500
Messfühler M02	[s]	15300	Messfühler M03	[s]	14400
Messfühler M04	[s]	13500	Messfühler M05	[s]	14400
Messfühler M06	[s]	13500	Messfühler M07	[s]	13500

