

Untersuchung der
Entstehung heißer
Oberflächen durch
Reibvorgänge

F-05-0804

Projekt Nr. F-05-0804

Untersuchung der Entstehung heißer Oberflächen durch Reibvorgänge

Dirk Lorenz
Diplom-Physiker

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe
Bereich Prävention, Zentrallabor

Pavlo Chupin
Master of Science

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe
Bereich Prävention, Zentrallabor

Michael Seithel
Techniker

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe
Bereich Prävention, Zentrallabor

Mannheim, März 2015

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Einleitung	2
1.1 Allgemeines	2
1.2 Zielsetzung	2
2 Messmethode und Versuchsaufbau	4
2.1 Theoretische Grundlagen	4
2.2 Messmethode	4
2.3 Versuchsaufbau	5
2.3.1 Aneinander reibende Teile und Temperaturmessung	5
2.3.2 Antrieb, Drehmoment, Leistung und deren Erfassung	5
2.3.3 Anpresskraft und deren Messung	8
2.3.4 Mechanische Verformung	9
2.3.5 Energieverluste und deren Messung	9
2.3.6 Überblick über den gesamten Versuchsaufbau	11
3 Messungen	13
3.1 Inbetriebnahme der Anlage und erste Versuche	13
3.2 Versuchsreihe 1	13
3.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung	13
3.2.2 Versuchsergebnisse	14
3.2.3 Auswertung	21
3.2.3.1 Temperatur versus Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit	21
3.2.3.2 Abrieb versus Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit	23
3.2.3.3 Leistung versus Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit	25
3.2.3.4 Aufheizrate versus Abrieb pro Stunde	25

3.2.3.5	Betrachtung der Energiebilanz	27
3.2.3.5.1	Gesamtenergie	27
3.2.3.5.2	Temperaturerhöhung	28
3.2.3.5.3	Verlust durch Strahlung	28
3.2.3.5.4	Verlust durch Konvektion	29
3.2.3.5.5	Verlust durch Wärmeleitung	30
3.2.3.5.6	Verformungsarbeit	31
3.2.4	Diskussion	32
3.3	Versuchsreihe 2	33
3.3.1	Versuchsaufbau und -durchführung	33
3.3.2	Versuchsergebnisse	34
3.3.3	Auswertung	34
3.3.3.1	Temperatur versus Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit	34
3.3.3.2	Abrieb versus Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit	40
3.3.3.3	Leistung versus Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit	42
3.3.3.4	Aufheizrate versus Abrieb pro Stunde	42
3.3.3.5	Betrachtung der Energiebilanz	44
3.3.3.5.1	Gesamtenergie	44
3.3.3.5.2	Temperaturerhöhung	44
3.3.3.5.3	Verlust durch Strahlung	45
3.3.3.5.4	Verlust durch Konvektion	45
3.3.3.5.5	Verlust durch Wärmeleitung	45
3.3.3.5.6	Verformungsarbeit	46
3.3.4	Diskussion	46
4	Modellierung der Versuche	48
4.1	Ziel der Modellierung	48
4.2	Das Programm COMSOL	48
4.2.1	Comsol Multiphysics	48
4.2.2	Heat Transfer Module	49
4.2.3	CAD Import Module	49
4.3	Modellierung der Experimente	50
4.3.1	Modellierung mit der original CAD-Konstruktion	50
4.3.2	Modellierung mit einer simpleren CAD-Konstruktion	54
4.4	Extrapolation der Versuchsergebnisse	61
4.5	Einfluss der Wärmeverlustmechanismen	64

5	Vergleich mit Untersuchungen der PTB	68
5.1	Versuche der PTB	68
5.2	Vergleichende Modellierung der PTB- und FSA-Versuche	71
5.2.1	Vergleich bei gleicher Leistungsdichte	73
5.2.2	Vergleich bei gleicher Flächenpressung und Relativgeschwindigkeit und verschiedenen Reibungskoeffizienten	76
6	Diskussion der Ergebnisse und Ausblick	79
6.1	Diskussion der Ergebnisse	79
6.2	Ausblick	80
	Literaturverzeichnis	83
A	Konstruktionszeichnung	85

Liste der Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	m/s^2	Beschleunigung
A	m^2	Fläche allgemein
A_r	m^2	Größe einer Reibfläche
B	J	Bindungsenergie
c	$\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Wärmekapazität
E	J	Energie
E_V	J	Verformungsarbeit
E_W	J	Energie, die in die Temperaturerhöhung fließt
F_n	N	Normalkraft (Anpresskraft) bei der Reibung
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
k	$\text{W/K} \cdot \text{m}^2$	Wärmeübergangskoeffizient
k_r, k_s	$\text{W/K} \cdot \text{m}^2$	Wärmeübergangskoeffizient der rotierenden und starren Teile der Versuchsanordnung
\vec{M}	$\text{N} \cdot \text{m}$	Drehmoment
l	m	Länge oder Abstand
l_1	m	Abstand zwischen Gelenk und Mittelpunkt der Materialprobe
l_2	m	Abstand zwischen Gelenk und Gewichtsschwerpunkt
m	kg	Masse
m_{rA}	g	Masse der rotierenden Reibscheibe vor einem Versuch
m_{sA}	g	Masse der starren Reibscheibe vor einem Versuch
m_{rE}	g	Masse der rotierenden Reibscheibe nach einem Versuch
m_{sE}	g	Masse der starren Reibscheibe nach einem Versuch
Δm	g	abgeriebene Masse während eines Versuchs
P, \bar{P}	W	Leistung, mittlere Leistung
p_F	Pa, N/mm^2	Druck, Flächenpressung
q	W/mm^2	Leistungsdichte
r	m	Radius
t	s	Zeit
t_A	s	Zeitpunkt, an dem ein Reibvorgang beginnt
t_E	s	Zeitpunkt, an dem ein Reibvorgang endet
Δt	s	Dauer des Reibvorgangs
$T, \Delta T$	K	Temperatur, Temperaturdifferenz

$T_h(t)$	K	Oberflächentemperatur gegenüber der Basisplatte am Übergang zur wärmeisolierenden Spezialkeramik
$T_i(t)$	°C	Temperatur am i-ten Thermoelement zum Zeitpunkt t
$T_k(t)$	K	Oberflächentemperatur der Basisplatte am Übergang
T_{\max}	°C	Maximaltemperatur der Basisplatte bei einem Versuch
$T_{O,\max}$	°C	Maximaltemperatur, die an der frei liegenden Oberfläche der Reibscheiben bei einem Versuch erreicht wurde
ΔT_{\max}	°C	maximaler Temperaturanstieg der Basisplatte bei einem Versuch
$\Delta T_{O,\max}$	°C	maximaler Temperaturanstieg an der Oberfläche
T_U	°C	Umgebungstemperatur
v_r	m/s	Relativgeschwindigkeit zwischen zwei aneinander reibenden Objekten
v_{rel}	m/s	Luftgeschwindigkeit über einer Metalloberfläche
V_K	J	Wärmeverlust durch Konvektion
V_L	J	Wärmeverlust durch Leitung
V_S	J	Wärmeverlust durch Strahlung
$\mu, \bar{\mu}$	-	Reibungskoeffizient, mittlerer Reibungskoeffizient
ν	-	Drehzahl
ε	-	Emissionskoeffizient
λ	W/m · K	Wärmeleitfähigkeit
σ	W/m ² · K ⁴	Stefan-Boltzmann-Konstante, Standard-Abweichung
ρ	kg/m ³	Dichte
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit

Zusammenfassung

Eine Versuchsapparatur wird aufgebaut, mit welcher der Reibvorgang zweier zylindrischer Platten (Stahl 1.0038) aneinander im Detail untersucht wird. Der Leistungseintrag und der Materialabrieb werden gemessen. Die Temperatur wird vollständig an der Oberfläche und punktuell im Inneren der Scheiben erfasst.

Zwei Versuchsreihen mit nahezu identischen Randbedingungen werden durchgeführt, wobei die Stahlscheiben an ihren Stirnseiten mit den Anpresskräften $F_n = 250\text{ N}$, 500 N und 750 N aneinander gepresst werden. Die Relativgeschwindigkeit zwischen den Reibscheiben wird für jeden eingestellten Wert der Anpresskraft in Schritten von $0,5\text{ m/s}$ von $v_r = 0,5\text{ m/s}$ auf $1,5\text{ m/s}$ erhöht. Die Versuchsdauer beträgt meist 120 Minuten.

Bei beiden Versuchsreihen steigt die erreichte Maximaltemperatur mit der Anpresskraft bzw. Flächenpressung und der Relativgeschwindigkeit an ebenso wie die eingebrachte Leistung bzw. Leistungsdichte. Für den Masseabrieb kann keine eindeutige Abhängigkeit von der Anpresskraft und der Relativgeschwindigkeit abgeleitet werden. Die mittleren Reibungskoeffizienten liegen bei $\bar{\mu} = 0,324$ (Versuchsreihe 1) und $\bar{\mu} = 0,428$ (Versuchsreihe 2). Es besteht keine Abhängigkeit zwischen Reibungskoeffizient und Anpresskraft oder Relativgeschwindigkeit. Die Energiebilanzen der Versuche zeigen, dass die in den Vorgang hinein gesteckte Energie im Mittel zu $1/5$ in die Erwärmung, $1/30$ in den Masseabrieb, $1/5$ in die Wärmestrahlung, $1/3$ in den Verlust durch Konvektion und $1/4$ in den Verlust durch Wärmeleitung fließt. Dabei ist diese Aufteilung beim hier verwendeten Versuchsaufbau von der Versuchsdauer und vom erreichten Temperaturniveau abhängig.

Einige der durchgeführten Experimente werden mit dem Programm COMSOL Multiphysics modelliert und anschließend über das Modell auf höhere Anpresskräfte und Relativgeschwindigkeiten extrapoliert. Dadurch wird gezeigt, dass auch bei Relativgeschwindigkeiten unter $v_r = 1,0\text{ m/s}$ zündgefährliche heiße Oberflächen durch Reibvorgänge entstehen können.

Ein Vergleich mit Versuchen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt zeigt, dass die bei Reibvorgängen auftretenden zeitlichen Temperaturverläufe und Maximaltemperaturen ganz entscheidend von der speziellen Versuchssituation abhängen. Dies wird mit Hilfe von Modellrechnungen untermauert. Daraus wird die Schlussfolgerung gezogen, dass es aufgrund von Laboruntersuchungen prinzipiell schwer möglich ist, generelle Grenzen bei den Parametern Anpresskraft, Relativgeschwindigkeit, Flächenpressung und Leistungsdichte anzugeben, bei deren zahlenmäßiger Unterschreitung keine zündgefährlichen heißen Oberflächen auftreten können.

Es wird aufgezeigt, wie man zukünftig die Entstehung zündgefährlicher heißer Oberflächen durch Reibvorgänge besser abschätzen kann.

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Allgemeines

Bei ungewollten Reibvorgängen bei Maschinen in der Nahrungsmittelindustrie können heiße Oberflächen entstehen, die unter Umständen als Zündquelle bei Staubexplosionen wirksam werden. Diese Reibvorgänge können vielfältiger Natur sein, wie z. B. das Schleifen eines Riemens über eine blockierte Rolle, rotierende Teile jeglicher Art, die aufgrund einer Unwucht periodisch an einer Gehäusewand schleifen oder das permanente Schleifen einer Walze an einer verbeulten Gehäusewand etc.. Im Normungswerk wird davon ausgegangen, dass Reibvorgänge mit Relativgeschwindigkeiten unterhalb 1 m/s nicht zu gefährlichen heißen Oberflächen führen. Eine systematische Untersuchung dieses Phänomens fehlt jedoch bisher, so dass die im Normungswerk angegebene Zahl nicht belegbar ist.

1.2 Zielsetzung

Untersucht werden soll die Wärmeentwicklung, die Reibvorgänge bei defekten Maschinen in der Nahrungsmittelindustrie erzeugen. Für die Wärmeentwicklung sind folgende Parameter wichtig:

- Normalkraft F_n , mit der die reibenden Flächen gegeneinander gedrückt werden
- Relativgeschwindigkeit v_r zwischen den reibenden Flächen
- Materialkombination und Oberflächenbeschaffenheit an der Reibfläche (Reibungskoeffizient μ)
- Die Frequenz ν des Reibvorganges bei periodischer Reibung

Aus den genannten Größen ergibt sich die Leistung, die bei der Reibung umgesetzt wird. Die sich durch den Leistungseintrag abzüglich Verluste einstellende Temperatur hängt im Wesentlichen von den Größen

- Masse
- Wärmekapazität
- Wärmeleitfähigkeit
- Form und Oberflächenbeschaffenheit

der aneinander reibenden Objekte ab. Daraus ergeben sich die Ziele dieses Projektes:

1. Aufbau einer Versuchsanordnung, mit der die zeitliche Temperaturentwicklung zweier aneinander reibender Probekörper als Funktion der Körpermaterialien und der Parameter F_n , v_r , μ gemessen werden kann.
2. Modellierung der Messergebnisse und Extrapolation auf Parameter, die bei den Experimenten nicht abgearbeitet werden konnten.
3. Beantwortung der Frage, ob Reibvorgänge mit Relativgeschwindigkeiten unterhalb 1 m/s zu gefährlichen heißen Oberflächen führen können oder nicht.

Kapitel 2

Messmethode und Versuchsaufbau

2.1 Theoretische Grundlagen

Basis der Untersuchung ist der Energieerhaltungssatz bei Reibvorgängen (2.1).

$$\mu \cdot \int_0^{t_E} F_n \cdot v_r dt = c \cdot m \cdot \Delta T + E_V + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \int_0^{t_E} (T^4 - T_U^4) dt + V_K + V_L \quad (2.1)$$

In (2.1) sind: c = Wärmekapazität, m = Masse, σ = Stefan-Boltzmann-Konstante, A = abstrahlende Körperoberflächen mit der Temperatur T und T_U = Umgebungstemperatur. Die linke Seite der Gleichung stellt die Energie dar, die während der Dauer $t = 0$ bis t_E durch Reibung erzeugt wird. Der erste Term auf der rechten Seite ist der Teil dieser Energie, der die Temperaturerhöhung ΔT der aneinander reibenden Körper bewirkt. Der zweite Term steht für den Bruchteil der eingebrachten Energie, der in Verformungsarbeit (z. B. Masseabrieb beim Reibvorgang) übergeht. Die restlichen drei Terme beschreiben die drei Arten des Wärmeverlustes durch Strahlung, Konvektion und Leitung. Gleichung (2.1) ist der Energieerhaltungssatz bei Reibung mit linearer Bewegung. Handelt es sich um eine Drehbewegung, nimmt diese Gleichung die Form

$$\mu \cdot \int_0^{t_E} F_n \cdot r \cdot \omega_r dt = c \cdot m \cdot \Delta T + E_V + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \int_0^{t_E} (T^4 - T_U^4) dt + V_K + V_L \quad (2.2)$$

an mit r als mittlerem Radius und ω_r als relative Winkelgeschwindigkeit zwischen den aneinander reibenden Körpern.

2.2 Messmethode

Da die Abhängigkeit von ΔT von ω_r bzw. v_r und F_n von Interesse ist, müssen die genannten Größen messtechnisch erfasst werden. Wie viel Energie bei gegebener Relativgeschwindigkeit v_r und Anpresskraft F_n durch Reibung umgesetzt wird, hängt lediglich

vom Reibungskoeffizienten μ ab. Letzterer ist einer direkten Messung unzugänglich. Da c , m , σ und A bekannt sind, ermöglicht das Messen der restlichen Größen in (2.1) bzw. (2.2) die Bestimmung von μ als Funktion von Relativgeschwindigkeit, Anpresskraft und Material der Reibpartner.

2.3 Versuchsaufbau

2.3.1 Aneinander reibende Teile und Temperaturmessung

Damit sich die Größe der aneinander reibenden Flächen über die Versuchsdauer hinweg nicht durch Einschleifen verändert, wurden als aneinander reibende Körper zwei flache Zylinder gewählt, die an ihren Stirnflächen zusammengepresst werden (Abbildungen 2.1 und 2.2). Eine der beiden Scheiben wird in Rotation versetzt, so dass die beiden Stirnflächen aneinander reiben. Der Durchmesser der Scheiben beträgt 100 mm. Die beiden Reibscheiben sind mit Hilfe von speziellen Bolzen auf Platten gesteckt. Diese Platten mit zum Teil größerem Durchmesser dienen als Befestigungsbasis (Basisplatten) für die Reibscheiben. In der Basisplatte der starren Reibscheibe wird das räumliche Temperaturfeld in Abhängigkeit der Zeit vermessen, indem sechs Ni-Cr-Ni-Thermoelemente in verschiedenen Tiefen vom Zylinderrand aus in Richtung des Zentrums der Basisplatte integriert sind. Tabelle 2.1 gibt die genauen Positionen. Die von den Thermoelementen kommenden Signale werden in einem Datenlogger der Firma Ahlborn gespeichert (Abbildung 2.3).

Name der Temperaturmessstelle	T_0	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
Tiefe unter dem Basisplattenrand [mm]	60	50	40	30	20	0

Tabelle 2.1: Messorte für die Temperatur in der Basisplatte der starren Reibscheibe.

2.3.2 Antrieb, Drehmoment, Leistung und deren Erfassung

Die rotierende Reibscheibe wird über eine kugelgelagerte Welle von einem elektrischen Motor der Firma Siemens angetrieben. Der Motor verfügt über ein Getriebe mit einer Übersetzung von 2,45. Dadurch kann das gewünschte Drehmoment erzeugt werden. Der Motor wird mit einem Frequenzumwandler bzw. über eine spezielle Software der Firma Siemens gesteuert (Abbildung 2.4). Die Drehzahl und die Motorbetriebsdauer kann damit exakt vorgegeben werden. Auch die Programmierung von Bewegungsprofilen ist möglich. Vom Frequenzumwandler werden die Größen Drehzahl ν und Drehmoment $|\vec{M}|$ in Form von Proportionalspannungen direkt abgegriffen und in den Datenlogger eingelesen sowie mit Hilfe der zugehörigen Software auf einem Rechner-Bildschirm dargestellt. Aus diesen beiden Größen ν und $|\vec{M}|$ ergibt sich die in den Reibvorgang eingebrachte Leistung P aus

$$P = 2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot M = \omega \cdot M = \mu \cdot v_r \cdot F_n \quad (2.3)$$

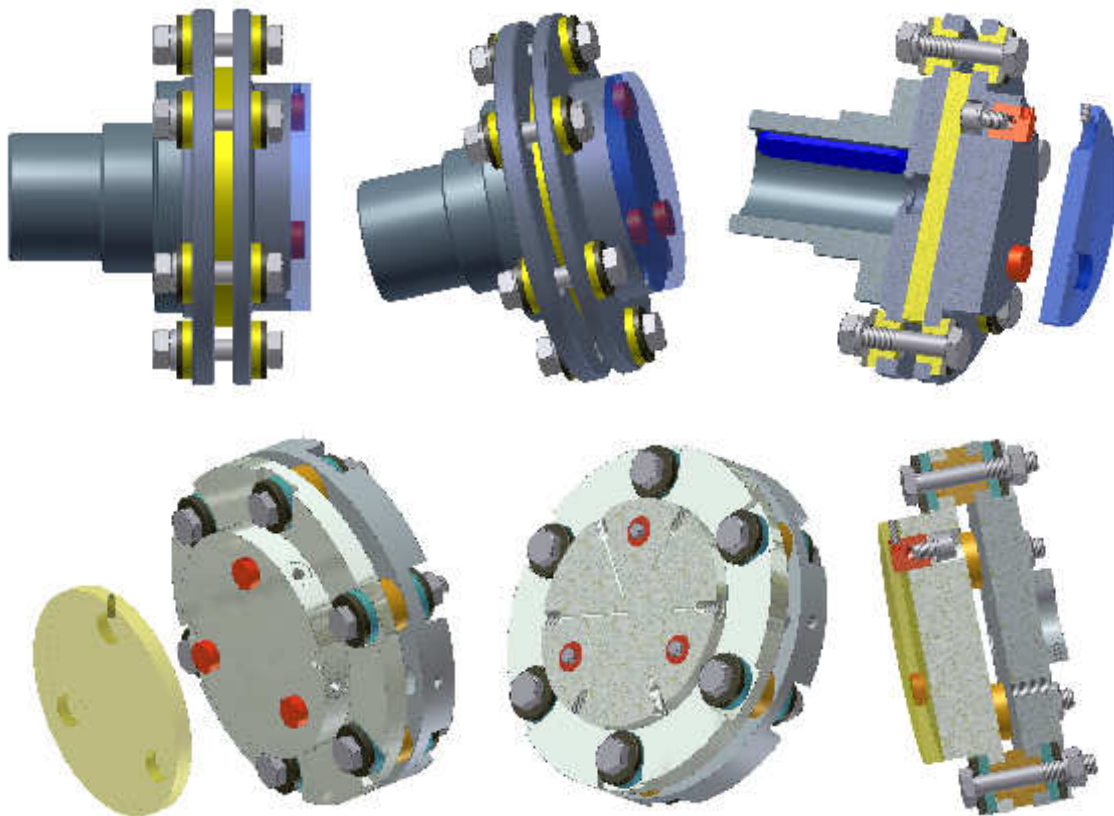


Abbildung 2.1: Obere Reihe: Basisplatte für die rotierende Reibscheibe (blau transparent). Gelb sind wärmeisolierende Teile aus Spezialkeramik dargestellt. Untere Reihe: Basisplatte für die starre Reibscheibe (gelb transparent). Im Schnitt (Mitte) sind die Positionen der Thermoelemente zu erkennen.

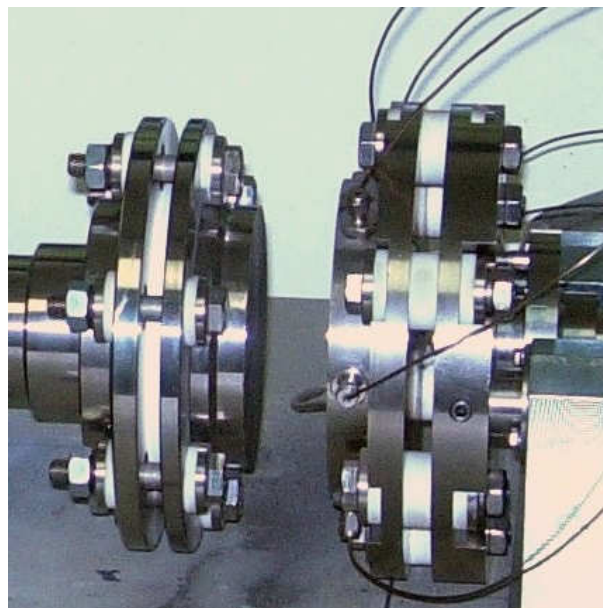


Abbildung 2.2: Basisplatten mit Reibscheiben und Thermo-Elementen.



Abbildung 2.3: Datenlogger der Firma Ahlborn. Auf 10 Kanälen werden die Messdaten bei jedem Versuch erfasst.

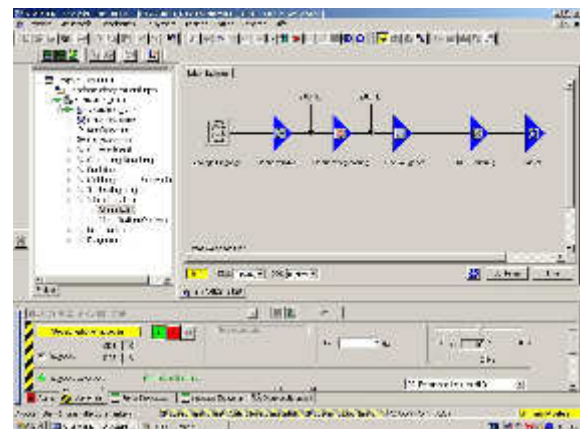


Abbildung 2.4: Getriebe-Motor der Firma Siemens und Antriebswelle (oben). Frequenzumwandler und Software zur Steuerung des Motors (unten).

2.3.3 Anpresskraft und deren Messung

Um die Anpresskraft zu erzeugen, werden die starre Reibscheibe, Basisplatte und deren Befestigung mit Hilfe zweier rollengelagerter Bolzen geführt und sind so in Richtung der Symmetrieachse in beide Richtungen verschiebbar. Die Anpresskraft selbst wird mit einer Öl-Hydraulik generiert. Über ein Drosselventil kann der Druck bzw. die Anpresskraft eingestellt werden. Ein spezieller Schaltkasten dient dem Starten und Beenden des Anpressvorganges (Abbildung 2.5).

Zur Messung der Anpresskraft wurde eine Kraftmessdose der Firma Kistler verwendet. Der in der Kraftmessdose eingebaute Piezo-Kristall liefert elektrische Ladungen wenn er einem Druck ausgesetzt wird. Druck und Ladungshöhe hängen linear zusammen. Diese Ladungen werden auf einen Ladungsverstärker (Abbildung 2.5) gegeben, welcher eine zu den Ladungen proportionale Spannung ausgibt. Letztgenannte wird mit dem Datenlogger erfasst und auf einem Rechner dargestellt und gespeichert.

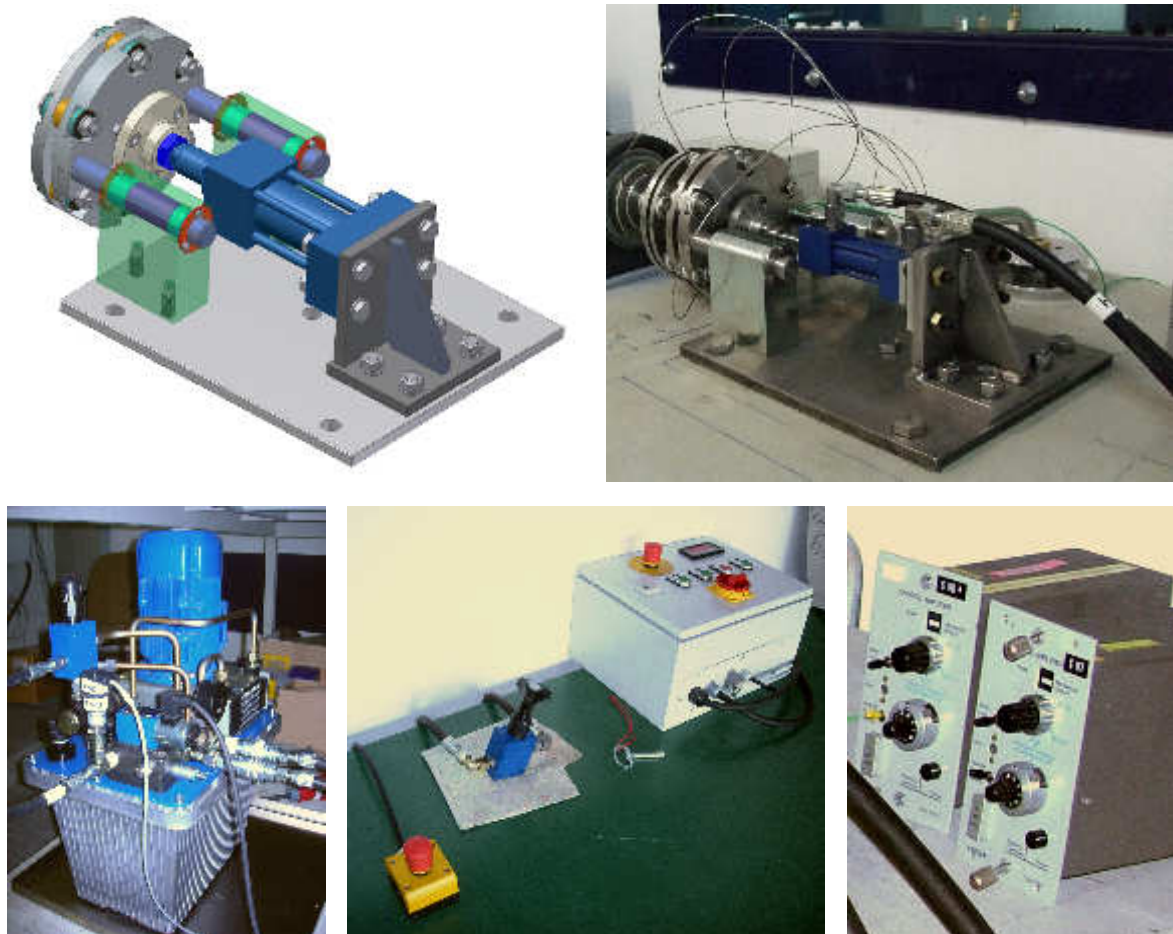


Abbildung 2.5: Starre Reibscheibe mit Basisplatte und Hydraulikzylinder (oben). Hydraulik-Pumpe und -Ölwanne (unten, links), Hydrauliksteuerung (unten, Mitte) sowie Ladungsverstärker der Firma Kistler zur Messung der Anpresskraft über eine Piezo-Kristall-Kraftmessdose (unten, rechts).

2.3.4 Mechanische Verformung

Um den Grad der mechanischen Verformung während der Reibversuche zu erfassen, werden die Massen der Reibscheiben vor und nach jedem Versuch mit einer elektronischen Waage bestimmt.

2.3.5 Energieverluste und deren Messung

Um den Wärmeabfluss von den Reibscheiben und Basisplatten in die restliche Anlage möglichst klein zu halten, sind diese durch spezielle Keramikteile von der restlichen Anlage getrennt (siehe gelbe Bauteile in Abbildung 2.1 bzw. weiße Bauteile in Abbildung 2.2).

Der Wärmeverlust durch Strahlung von der Anlage bzw. den Reibscheiben und Basisplatten geschieht gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz. Damit man diesen Verlust rechnerisch bestimmen kann, muss die Größe der Oberfläche A der strahlenden Teile, deren Oberflächentemperatur sowie deren Emissionskoeffizient ε bekannt sein. Die Größe der Oberfläche lässt sich leicht bestimmen mit Hilfe des Programmes Autodesk Inventor, mit dem die Anlage konstruiert wurde. Die Oberflächentemperatur wird mit Hilfe eines Mikrobolometers („Infrarot-Kamera“) der Firma FLIR gemessen (Abbildung 2.6). Für diese Messung muss der Emissionskoeffizient bekannt sein. Weil die Oberflächentemperatur von blankem Metall wegen der Kleinheit von ε mit Infrarot-Kameras nur sehr schwer gemessen werden kann, wurden die Reibscheiben und Basisplatten etc. mit mattem Ofenlack schwarz gefärbt. Mit Hilfe der zum Mikrobolometer gehörigen Software (Abbildung 2.7) und einer Oberflächentemperaturmessung mit einem Thermoelement konnte der Emissionskoeffizient für die matt-schwarze Oberfläche zu



Abbildung 2.6: Mikrobolometer SC655 der Firma FLIR.

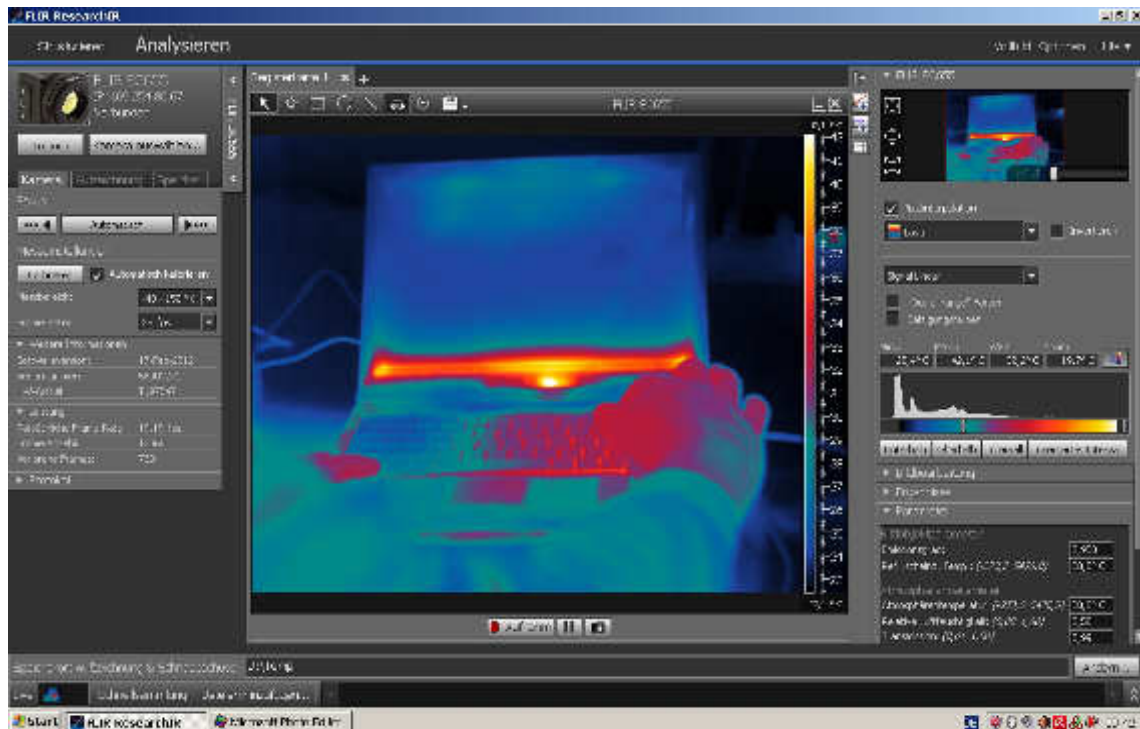


Abbildung 2.7: Software FLIR ResearchIR zur Steuerung des Mikrobolometers sowie zur Aufnahme, Speicherung und Auswertung von IR-Filmsequenzen und Bildern.

$$\varepsilon = 0,96 \quad (2.4)$$

bestimmt werden. Damit ist eine Messung der Oberflächentemperatur mit dem Mikrobolometer direkt möglich.

Der Wärmeverlust durch Konvektion wird durch

$$V_K = k \cdot A \cdot \int_0^{t_E} (T(t) - T_U) dt \quad (2.5)$$

beschrieben mit k als Wärmeübergangskoeffizient und T_U als Umgebungstemperatur. Der Wärmeübergangskoeffizient für Metall in Luft hängt stark vom Bewegungszustand der Luft in Relation zur Metalloberfläche ab. Für ruhende Luft gilt

$$k = 3,5 \dots 35 \quad (2.6)$$

Für bewegte Luft parallel zu einer Eisenwand gilt

$$\begin{aligned} k &= 5,8 + 4 \cdot v_{\text{rel}} & v_{\text{rel}} &\leq 5 \text{ m/s} \\ k &= 7,52 \cdot v_{\text{rel}}^{0,78} & v_{\text{rel}} &> 5 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (2.7)$$

mit v_{rel} als Relativgeschwindigkeit zwischen Luft und Metall [2].

Im Folgenden wird der Wärmeübergangskoeffizient mit Hilfe von (2.7) abgeschätzt.

2.3.6 Überblick über den gesamten Versuchsaufbau

Einen Überblick über den gesamten Versuchsaufbau geben die Abbildungen 2.8 und 2.9. Oben in Abbildung 2.8 ist der Motor, die Hydraulik, die Antriebswelle sowie die Reibscheiben samt Basisplatten und Thermoelementen zu sehen. Das untere Foto zeigt die Anlagensteuerung sowie die Messdatendarstellung und -speicherung.



Abbildung 2.8: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Entstehung heißer Oberflächen durch Reibvorgänge.

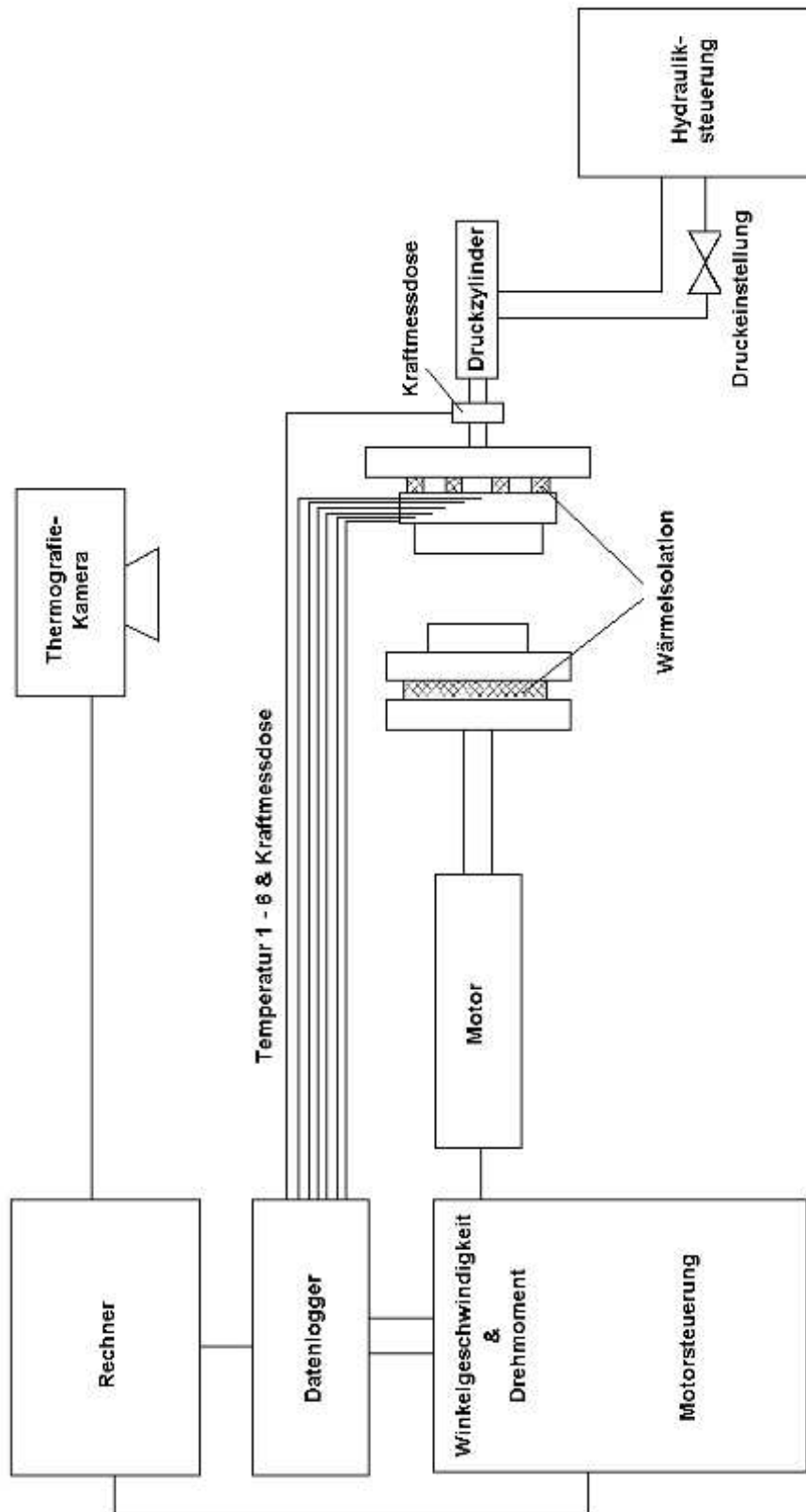


Abbildung 2.9: Versuchsaufbau schematisiert.

Kapitel 3

Messungen

3.1 Inbetriebnahme der Anlage und erste Versuche

Während der Jahre 2009 bis 2011 gab es immer wieder technische Probleme mit dem Versuchsaufbau, weshalb keine verwertbaren Messreihen in dieser Zeit generiert werden konnten. So war die Öl-Hydraulik lange Zeit nicht ausreichend exakt einstellbar und musste deshalb umkonzipiert werden. Später stellten sich Probleme mit den Führungsbolzen der starren Reibscheibe ein. Es kam zu Verkantungen, weshalb der Druck der Hydraulik nicht verlustfrei auf die Reibscheiben gegeben werden konnte. Auch hier mussten alternative Lösungen gefunden, d. h. andere Lagerungen eingebaut werden. Weiterhin traten simple Messfehler auf, weil Daten, die von der Steuersoftware des Motors kamen, falsch interpretiert wurden. Es war nicht möglich, auf die wahren Messwerte zurückzurechnen. Damit waren diese Versuche wertlos.

3.2 Versuchsreihe 1

Von April bis Juli 2012 wurde die erste Messkampagne durchgeführt, die brauchbare Ergebnisse lieferte. Im Folgenden wird diese Kampagne detailliert beschrieben.

3.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau wurde bereits in Abschnitt 2.3 erläutert. Durchgeführt wurden die Messungen wie folgt: Die Ränder der Reibscheiben aus Stahl St 37-2 (1.0038) wurden mit Ofenlack geschwärzt und gewogen. Die Werte für die Gewichte m_{rA} und m_{sA} wurden notiert. Anschließend wurden die Scheiben einseitig mit Wärmeleitpaste bestrichen und so an den Basisplatten montiert, dass eine gute Wärmeleitfähigkeit zwischen beiden gegeben war. Der Datenlogger und der Rechner wurden in Betrieb genommen, ebenso wie die Motorsteuerung, Hydraulik und der Ladungsverstärker für die Kraftmessdose. Letztere wurde zwischen den Reibscheiben eingespannt und mit dem Drosselventil der Hydraulik die gewünschte Anpresskraft eingestellt. Durch mehrmaliges Wiederholen dieser Kraftmessung wurde geprüft, ob die Einstellung des Ventils korrekt ist.

Danach wurden die Einstellungen an der Motorsteuerung vorgenommen, was im Wesentlichen die Eingabe der Steuerfrequenz bzw. der Drehzahl betraf. Anschließend wurde der Motor gestartet und die Leerlaufleistung wenige Minuten lang aufgezeichnet. In dieser Zeit wurde das Mikrobolometer in Betrieb genommen und die Aufnahme gestartet. Nach dem Notieren der Anfangstemperatur, wurde die Hydraulik gestartet, womit ein Einzelversuch begann. Gemessen wurde stets so lange, bis sich ein Gleichgewicht aus Wärmeerzeugung und -verlust einstellte, d. h. die Temperatur nicht mehr weiter anstieg. Zum Ende des Versuches wurde die Anpresskraft abgeschaltet und etwas später der Motor. Die Abkühlung der Reibscheiben und Basisplatten wurde noch einige Minuten länger aufgezeichnet. Nach Beendigung der Messung wurden die Reibscheiben demontiert und gewogen. Die Messwerte dieser Wägung m_{rE} und m_{sE} wurden notiert. Die ganze Kampagne umfasste die Versuche, die in Tabelle 3.1 aufgelistet sind.

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
F_n [N]	250	250	250	500	500	500	750	750	750
ν [Hz]	15,92	31,83	47,75	15,92	31,83	47,75	15,92	31,83	47,75
v_r [m/s]	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5

Tabelle 3.1: Versuche der ersten Messkampagne und dazugehörige Parameter.

3.2.2 Versuchsergebnisse

Die Umgebungsbedingungen und die wichtigsten Resultate der Messkampagne 1 sind in Tabelle 3.2 zusammenfassend dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse der Einzelmessungen zeigen die Abbildungen 3.1 bis 3.5.

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Datum	5.7.	18.7.	30.5.	3.5.	9.5.	31.5	5.6.	19.7.	16.7.
T_U [°C]	24	21	23	18	19	22	19	23	25
T_{\max} [°C]	46	47	82	65	97	73	96	117	139
ΔT_{\max} [°C]	22	26	61	47	78	51	76	94	114
m_{rA} [g]	483,0	482,9	521,7	521,3	-	521,8	521,7	482,8	482,5
m_{rE} [g]	480,8	475,6	505,3	519,7	519,3	518,4	518,2	480,5	479,8
m_{sA} [g]	708,8	707,1	756,4	768,8	-	760,8	791,6	708,0	705,6
m_{sE} [g]	706,1	698,4	733,9	767,2	758,0	754,3	757,5	705,3	701,3
Δm [g]	4,9	16,0	38,9	3,2	2,8*	9,9	7,6	5,0	7,0
t_A [h:min]	11:45	11:30	11:57	11:06	11:39	12:45	11:09	12:58	11:20
t_E [h:min]	13:42	13:16	13:25	13:00	14:42	13:18	14:30	15:00	13:58
Δt [h:min]	1:57	1:46	1:28	1:54	3:03	0:33	3:21	2:02	2:38

Tabelle 3.2: Umgebungsbedingungen und Ergebnisse der ersten Messkampagne. Der mit * markierte Wert wurde durch Wägung des aufgesammelten Stahlstaubes bestimmt.

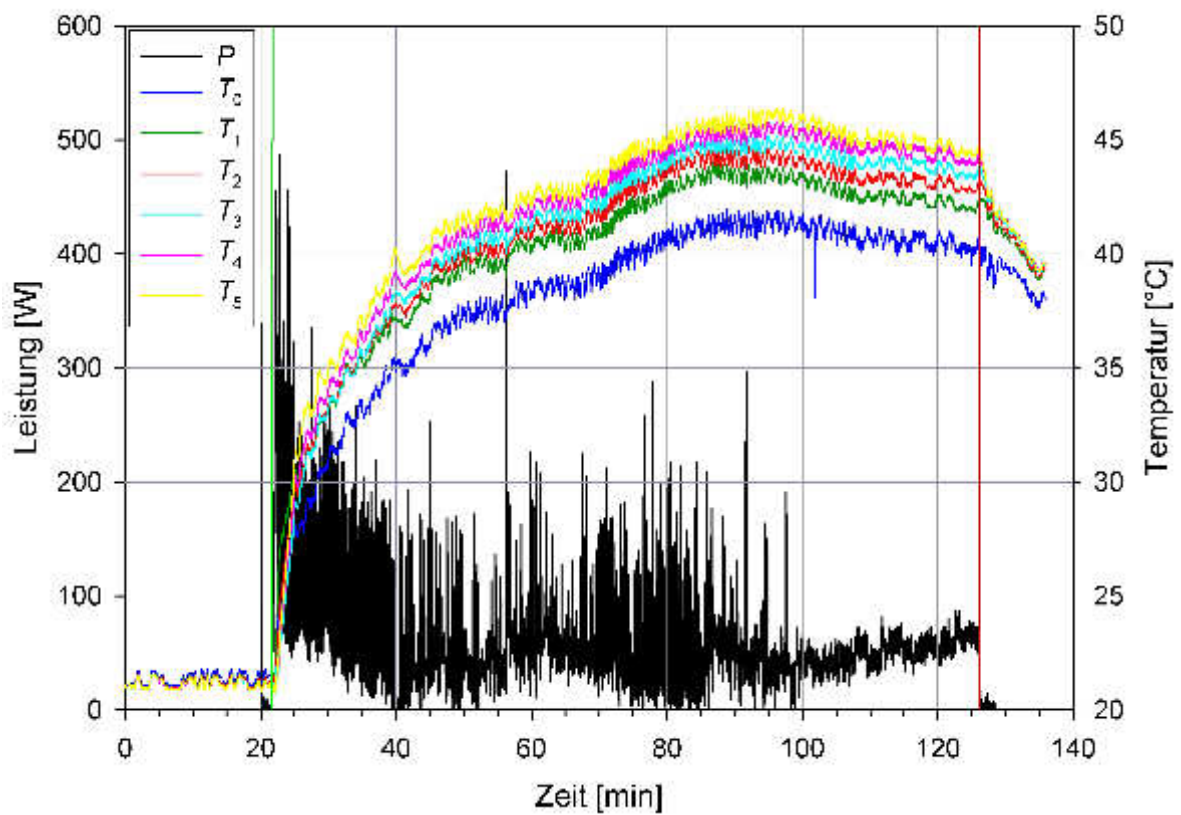
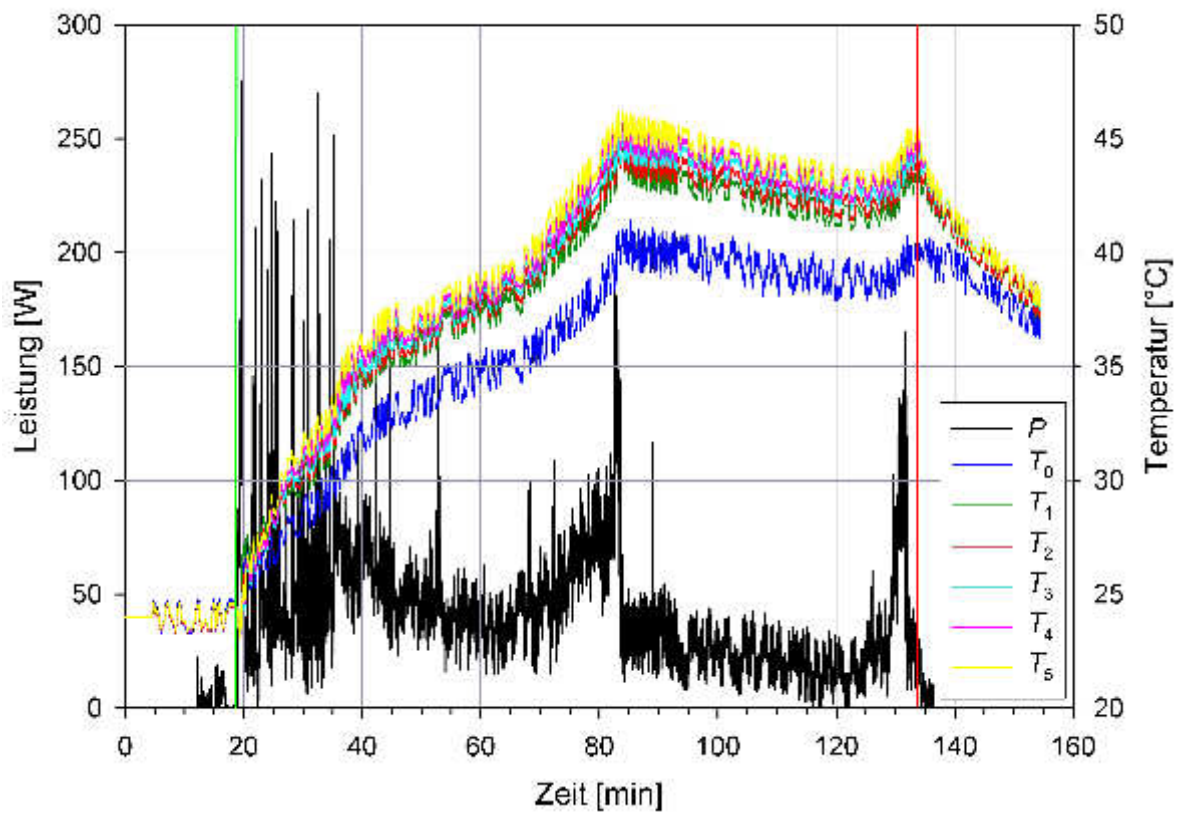


Abbildung 3.1: Ergebnisse der Versuche Nr. 1 und 2 der Messkampagne 1 mit $F_n = 250 \text{ N}$, $v_r = 0,5 \text{ m/s}$ (Nr. 1) und $F_n = 250 \text{ N}$, $v_r = 1,0 \text{ m/s}$ (Nr. 2). Die grüne und rote Senkrechte markieren den Anfang bzw. das Ende des Reibvorganges.

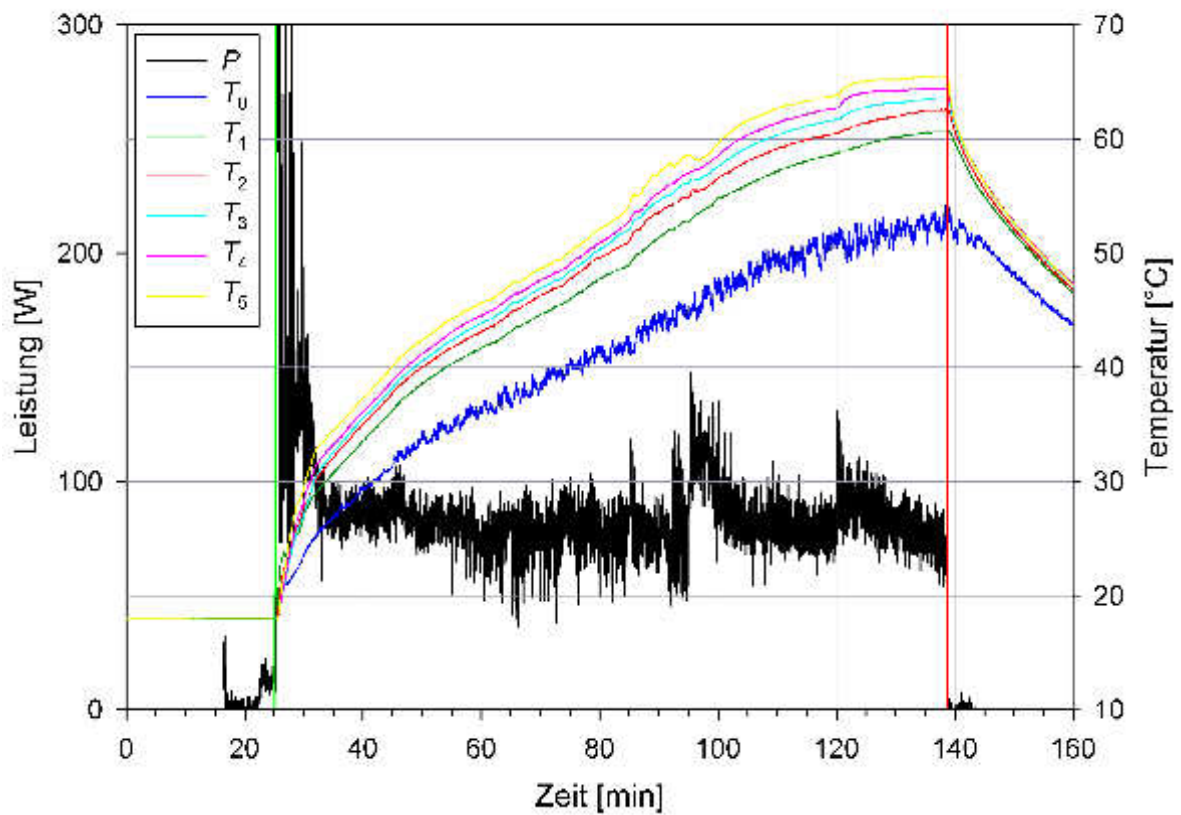
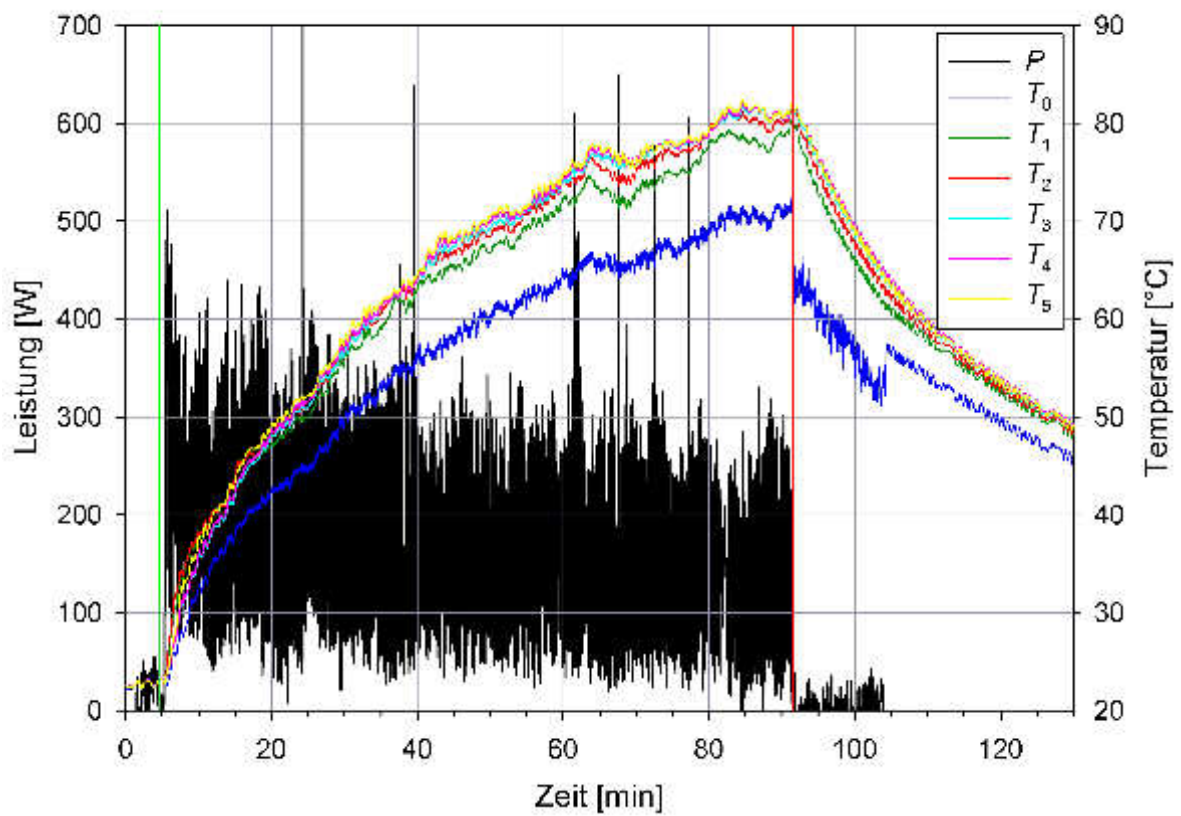


Abbildung 3.2: Ergebnisse der Versuche Nr. 3 und 4 der Messkampagne 1 mit $F_n = 250 \text{ N}$, $v_r = 1,5 \text{ m/s}$ (Nr. 3) und $F_n = 500 \text{ N}$, $v_r = 0,5 \text{ m/s}$ (Nr. 4). Die grüne und rote Senkrechte markieren den Anfang bzw. das Ende des Reibvorganges.

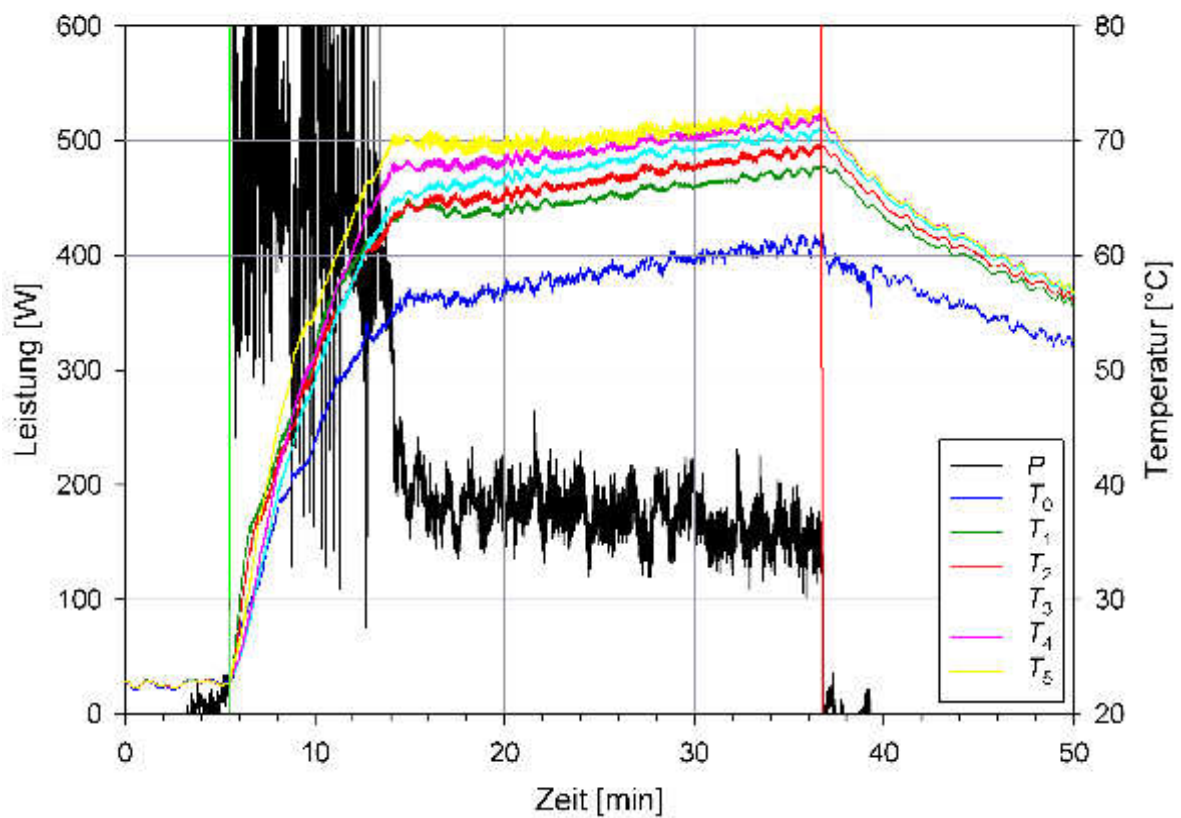
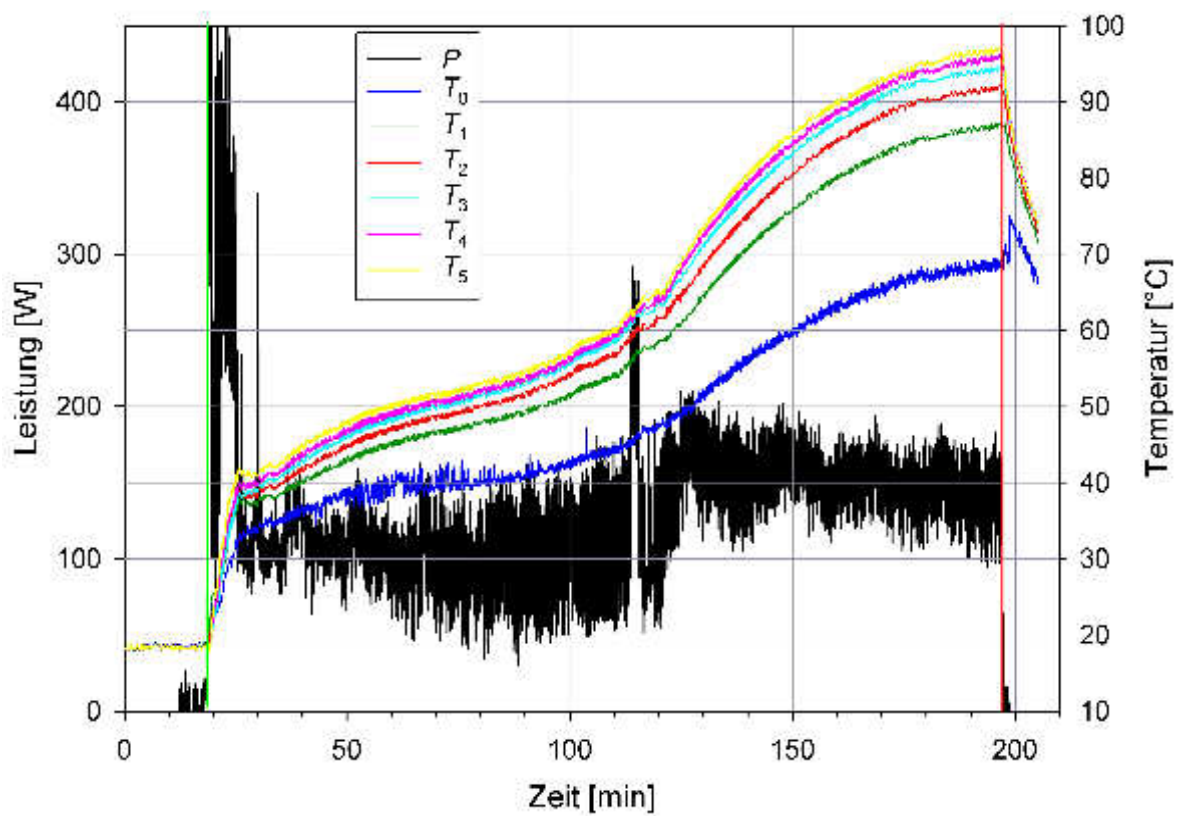


Abbildung 3.3: Ergebnisse der Versuche Nr. 5 und 6 der Messkampagne 1 mit $F_n = 500 \text{ N}$, $v_r = 1,0 \text{ m/s}$ (Nr. 5) und $F_n = 500 \text{ N}$, $v_r = 1,5 \text{ m/s}$ (Nr. 6). Die grüne und rote Senkrechte markieren den Anfang bzw. das Ende des Reibvorganges.

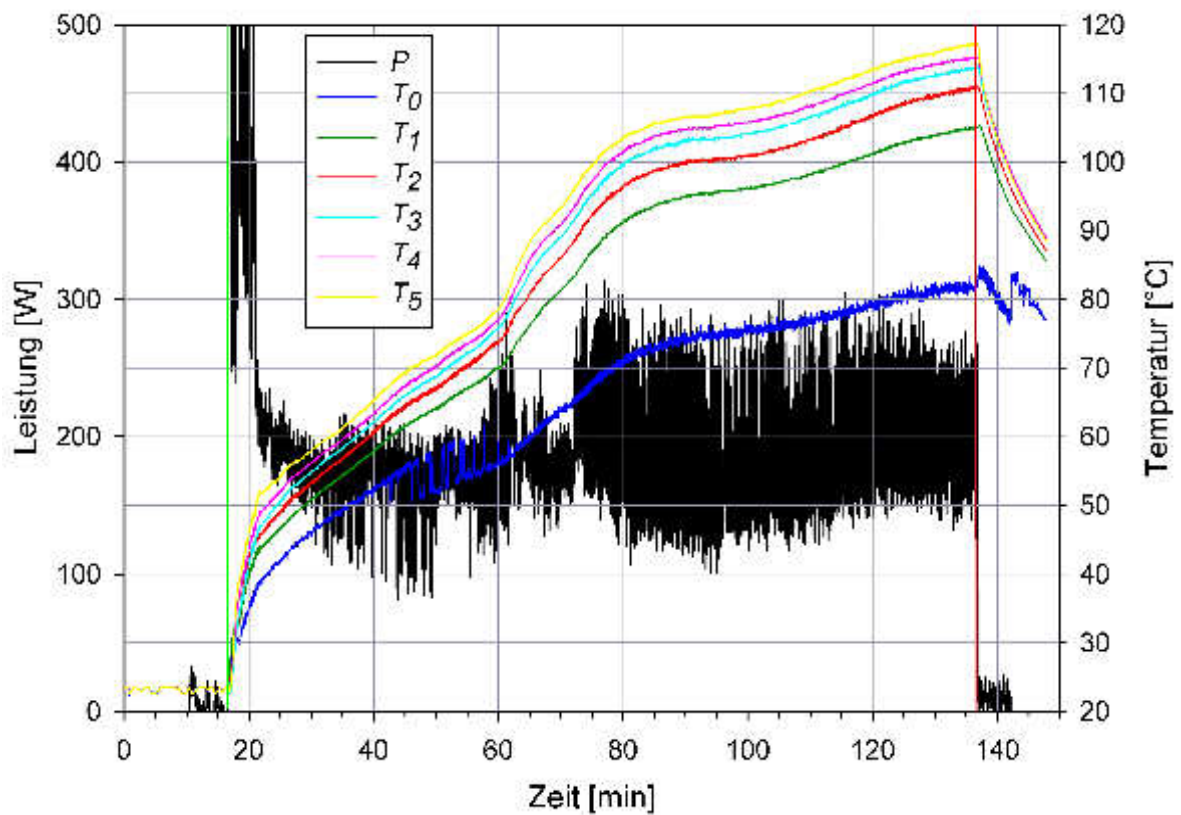
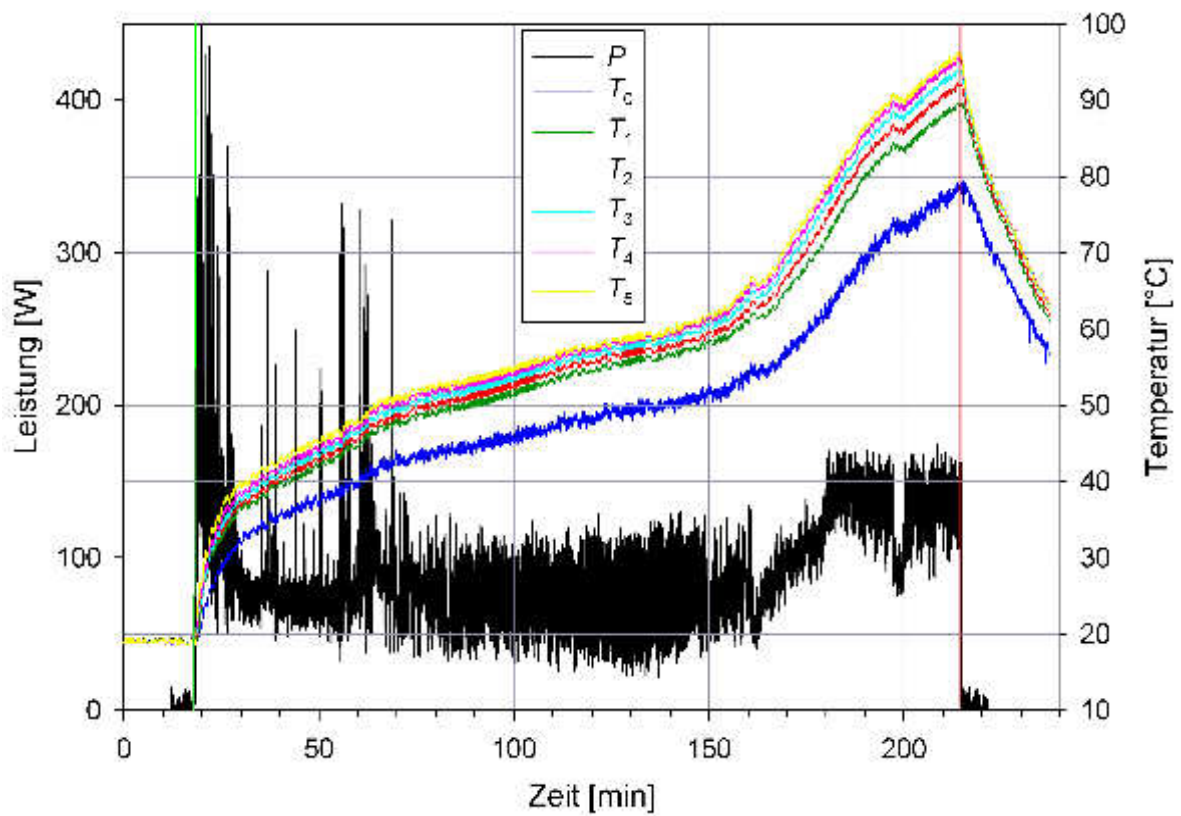


Abbildung 3.4: Ergebnisse der Versuche Nr. 7 und 8 der Messkampagne 1 mit $F_n = 750 \text{ N}$, $v_r = 0,5 \text{ m/s}$ (Nr. 7) und $F_n = 750 \text{ N}$, $v_r = 1,0 \text{ m/s}$ (Nr. 8). Die grüne und rote Senkrechte markieren den Anfang bzw. das Ende des Reibvorganges.

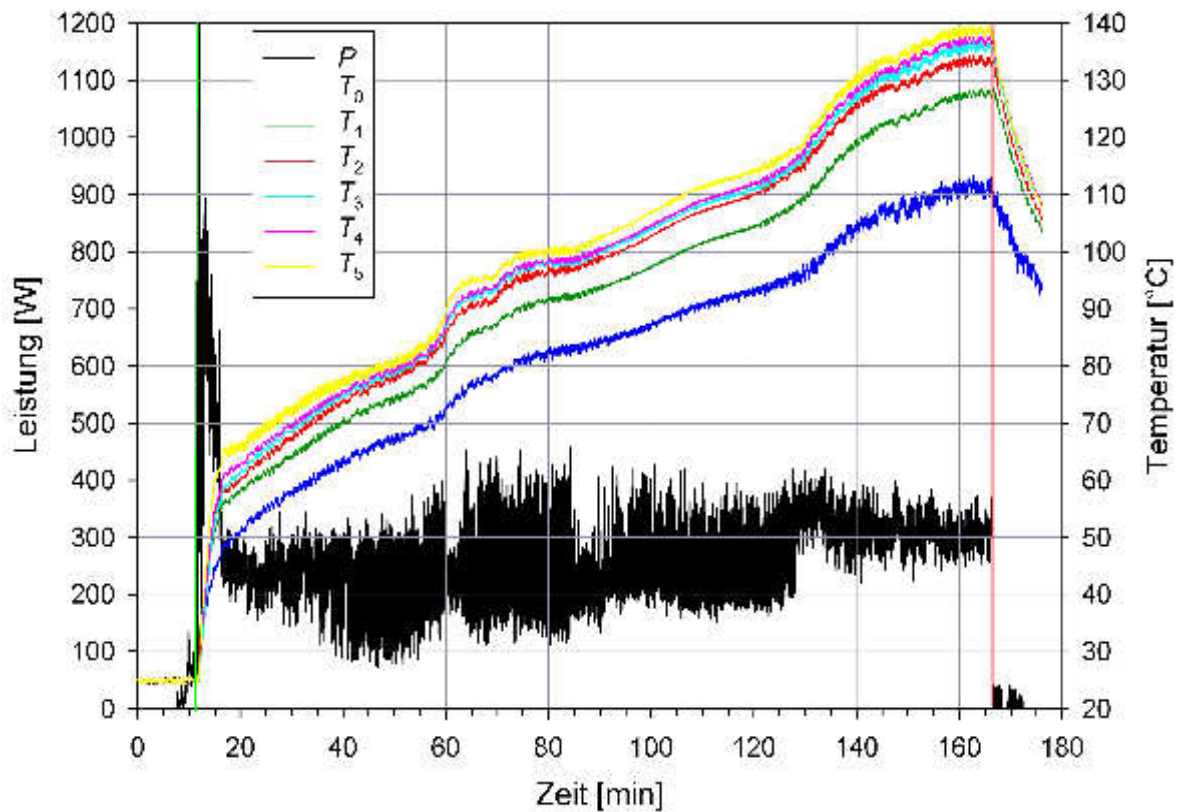


Abbildung 3.5: Ergebnisse der Versuche Nr. 9 der Messkampagne 1 mit $F_n = 750 \text{ N}$ und $v_r = 1,5 \text{ m/s}$. Die grüne und rote Senkrechte markieren den Anfang bzw. das Ende des Reibvorganges.

In Tabelle 3.2 sind die m die Massen der rotierenden und starren Reibscheibe vor und nach dem Versuch und Δm die insgesamt abgeriebene Masse während eines Versuchs. t_A und t_E sind der Start- und Endzeitpunkt eines Reibvorganges, weshalb $\Delta t = t_E - t_A$ die Dauer der Reibung ist. T_U und T_{\max} sind die Umgebungstemperatur zu Beginn eines Versuches und die maximale Basisplattentemperatur, die bei einem Versuch erreicht wurde. $\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_U$ ist der maximale Temperaturanstieg bei einem Versuch.

In Abbildung 3.7 sind die beiden Reibscheiben nach einem Versuch mit $F_n = 250 \text{ N}$ und $v_r = 1,5 \text{ m/s}$ gezeigt. Deutlich sind Schleifspuren auf den Reibflächen zu erkennen. Die Scheiben haben an den Reibflächen jeweils etwa $0,5 \text{ mm}$ an Scheibenstärke eingebüßt. Je nach Parameterkombination schwankte dieser Wert um wenige Zehntel Millimeter.

Die Aufnahmen mit dem Mikrobolometer sind durchweg gut gelungen. In Abbildung 3.6 ist eine Sequenz aus dem Video von Versuch Nr. 4 zu sehen. Die Bilder zeigen die Wärmeverteilung auf der Oberfläche der relevanten Anlagenteile zu Beginn, in der Mitte und gegen Ende der Reibungszeitspanne.

Zu Beginn der Versuche zeigte sich in der Regel ein schnelles Aufheizen verbunden mit einem deutlichen Einschleifvorgang, der meist mit der Emission von heißen Metallspänen verbunden war. Auf dem oberen Bild in Abbildung 3.6 sind die heißen Späne gut zu erkennen. In dieser Anfangsphase der Reibung wurde stets die höchste Leistung von den Reibscheiben aufgenommen. Im weiteren Verlauf der Einzelversuche sank meistens die aufgenommene Motorleistung.

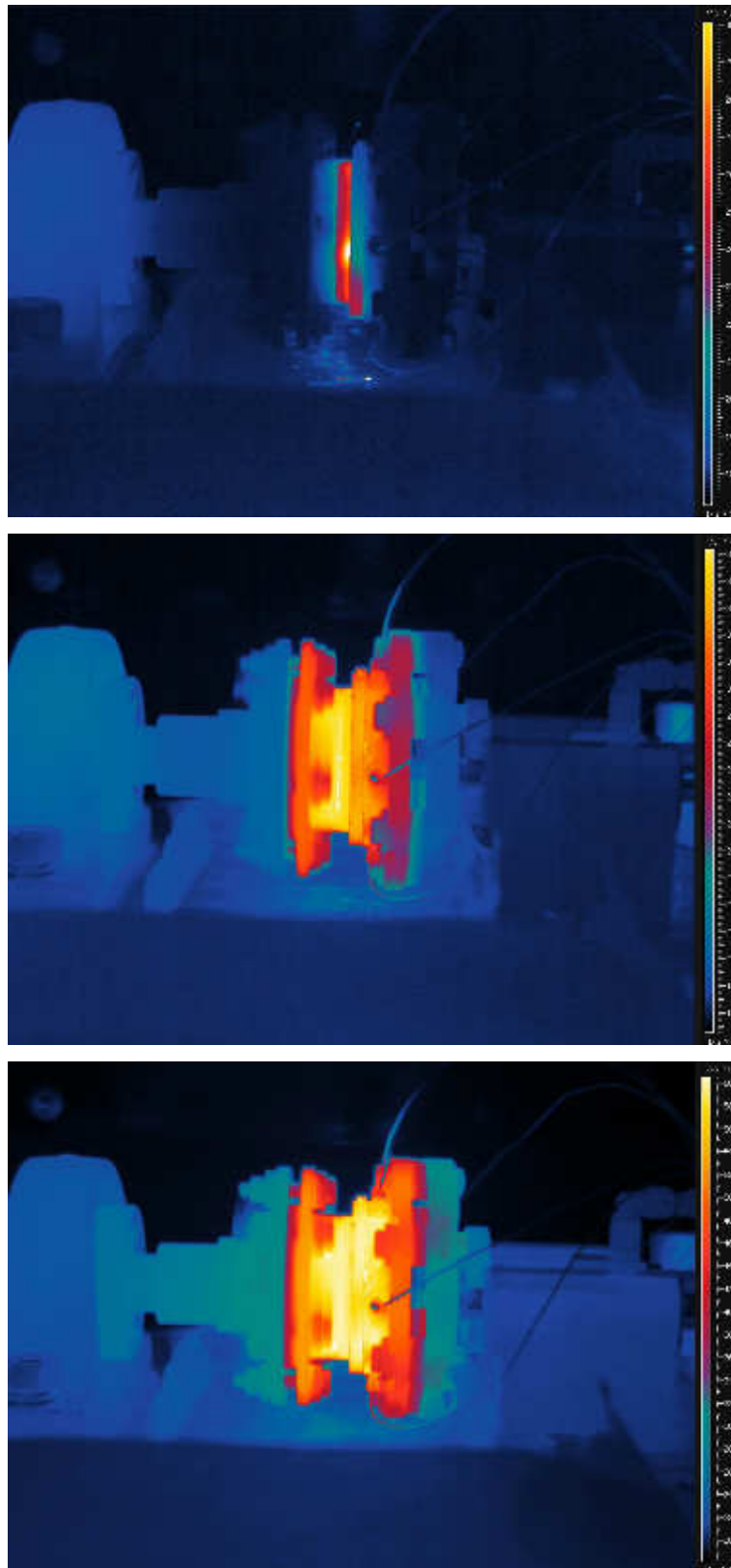


Abbildung 3.6: Thermografische Aufnahmen der Reibscheiben aufgenommen während Versuch Nr. 4, 15 s (oben), 44 min (Mitte) und 112 min (unten) nach Reibungsbeginn.

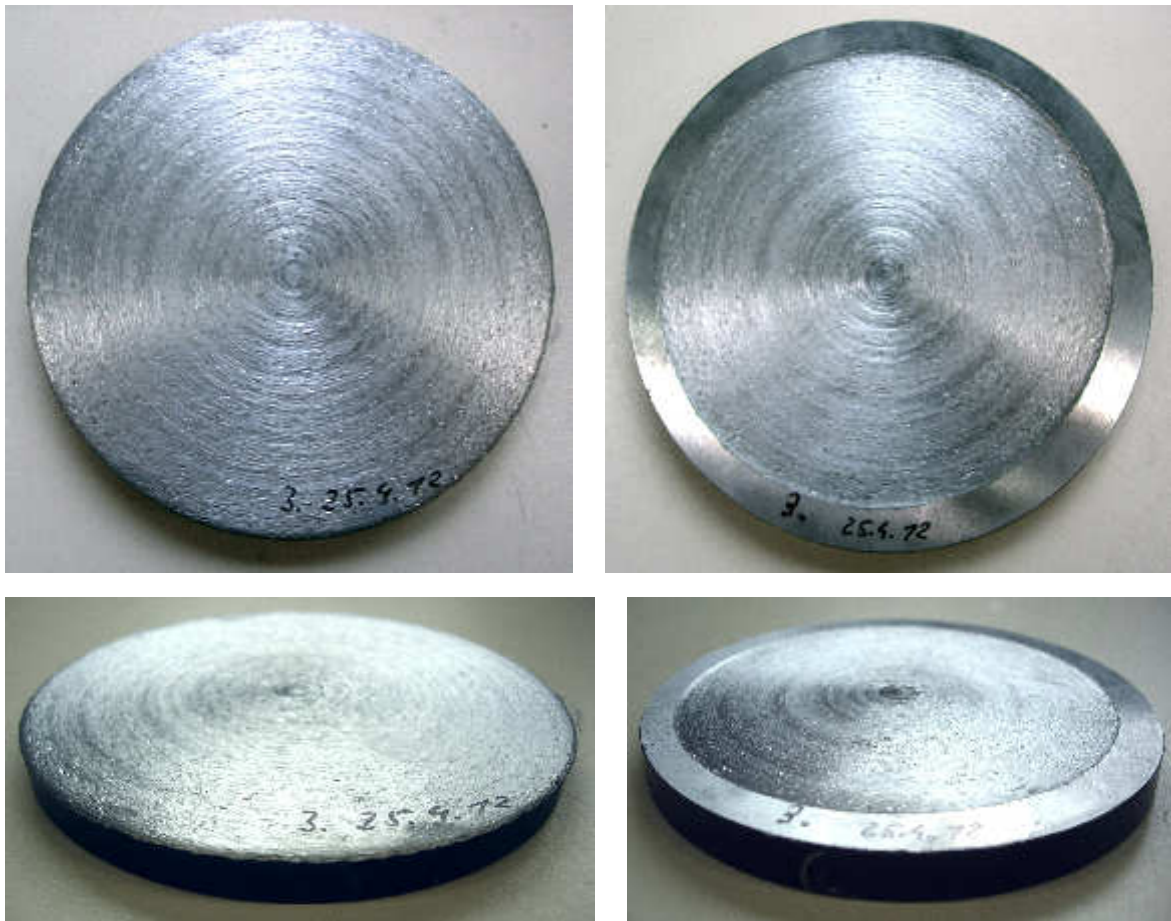


Abbildung 3.7: Reibscheiben nach einem Probe-Versuch (links rotierend, rechts starr).

3.2.3 Auswertung

Bei der Betrachtung der Abbildungen 3.1 bis 3.5 fällt zunächst auf, dass das Niveau der Leistung P (schwarze Kurve) mit der Steigung der Temperaturkurven korreliert. Steigt die Leistung an, erhöht sich auch die Steigung der Temperaturkurve und umgekehrt. Dieser Zusammenhang wurde erwartet.

Weiterhin ist zu sehen, dass die Temperatur mit zunehmender Tiefe unter dem Rand der starren Basisplatte ansteigt. Auf dem Rand dieser Basisplatte ist die Temperatur deutlich niedriger als innerhalb, was in erster Linie an den dort wirksamen Wärmeverlustmechanismen Strahlung und Konvektion liegt.

3.2.3.1 Temperatur versus Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit

In Abbildung 3.8 ist der bei jedem Versuch gemessene maximale Temperaturanstieg ΔT_{\max} als Funktion der Anpresskraft F_n und Relativgeschwindigkeit v_r dargestellt. Zusätzlich zu den Messpunkten ist eine zweidimensionale Fit-Funktion eingezeichnet.

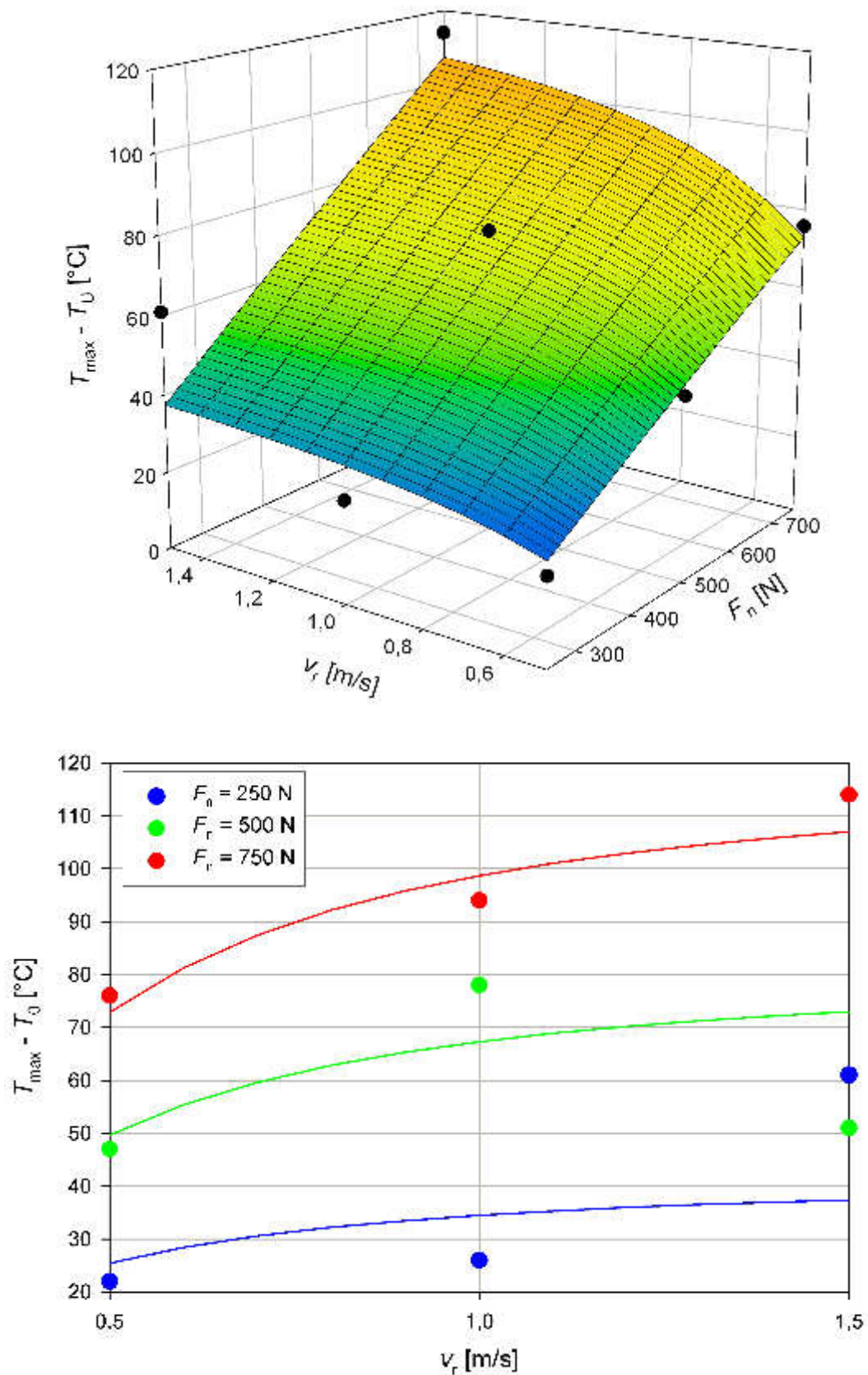


Abbildung 3.8: Maximaler Temperaturanstieg als Funktion von F_n und v_r . Oben ist der Zusammenhang mitsamt einem Fit als 3D-Grafik dargestellt, unten als 2D-Grafik.

Trotz der sehr starken Streuung der Punkte ist zu erkennen, dass der maximale Temperaturanstieg deutlich mit der Anpresskraft steigt. Weniger ausgeprägt ist der Anstieg mit der Relativgeschwindigkeit. Aufgrund der großen Streuung der Punkte ist an dieser Stelle aber keine mathematisch exakte und belastbare Aussage zu der Abhängigkeit $\Delta T_{\max}(F_n, v_r)$ möglich. Die Gleichung, welche die Fit-Funktion in Abbildung 3.8 beschreibt, ist sehr komplex und macht physikalisch keinen Sinn, weshalb hier auf eine Darstellung verzichtet wird.

Dividiert man ΔT_{\max} durch die Zeitspanne, die bis zum Erreichen der Maximaltemperatur der Basisplatte verstreicht, so erhält man eine Aufheizrate. Wird diese gegen die Anpresskraft und die Relativgeschwindigkeit aufgetragen, so ergibt sich das 3D-Diagramm aus Abbildung 3.9. Wie man dort sieht, streuen die Punkte stark und es ist seriös unmöglich, eine Gesetzmäßigkeit abzuleiten.

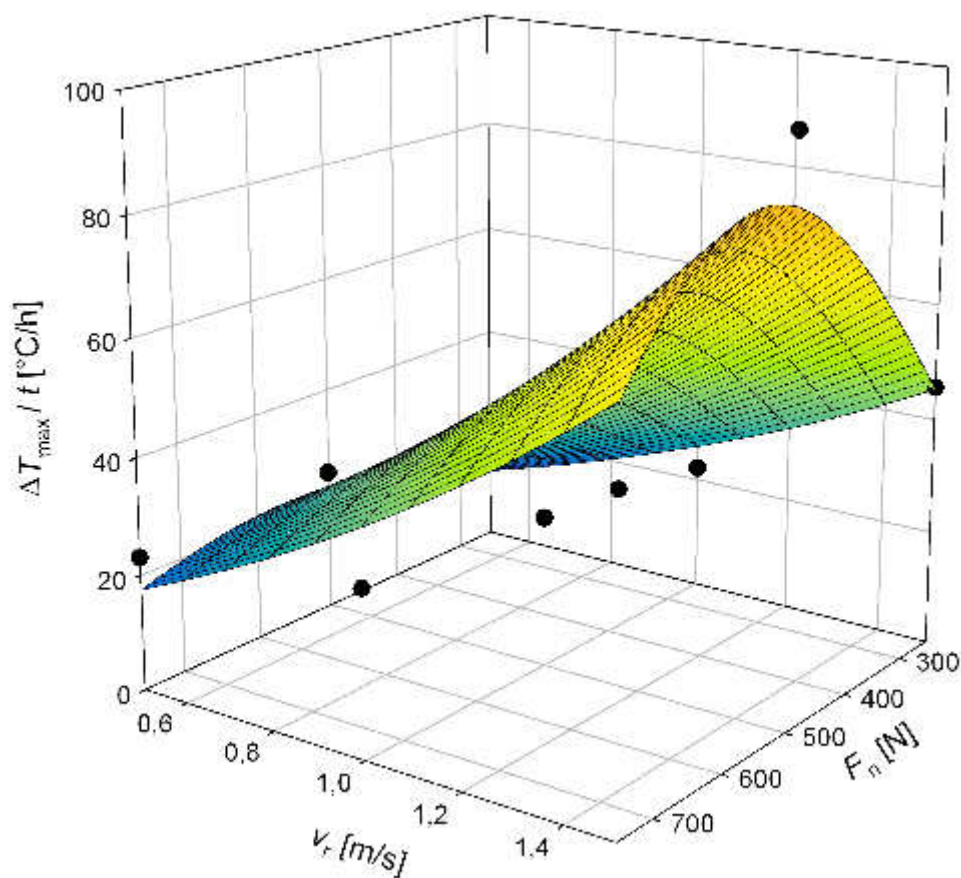


Abbildung 3.9: Maximaler Temperaturanstieg pro Stunde als Funktion von F_n und v_r .

3.2.3.2 Abrieb versus Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit

In Abbildung 3.10 ist die abgeriebene Masse pro Stunde $\Delta m/t$ pro Versuch als Funktion der Anpresskraft F_n und Relativgeschwindigkeit v_r dargestellt. Zusätzlich zu den Messpunkten ist eine Fit-Funktion eingezeichnet.

Die abgeriebene Masse pro Stunde steigt eindeutig mit der Relativgeschwindigkeit bei gegebener Anpresskraft. Der Zusammenhang ist deutlich nichtlinear.

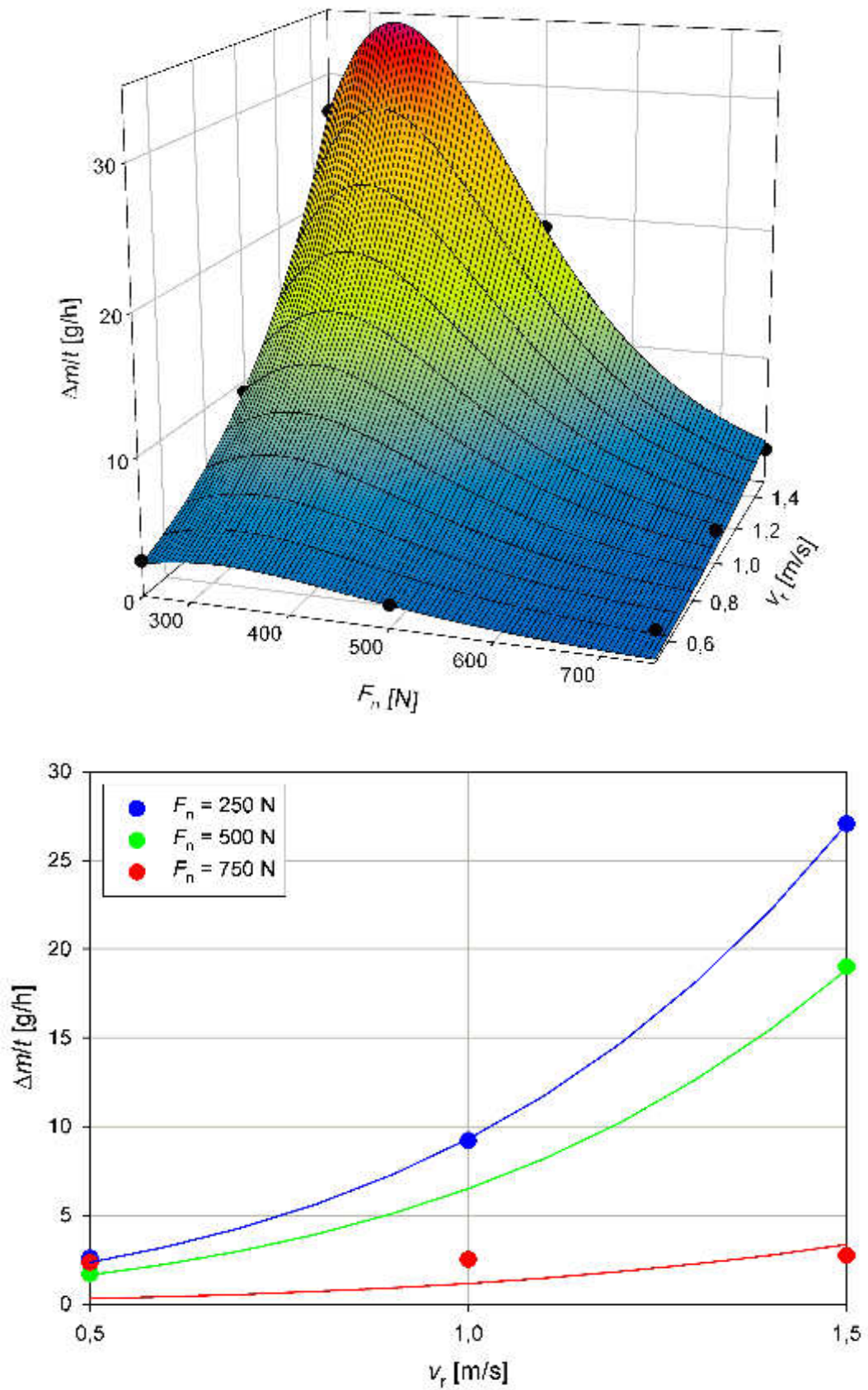


Abbildung 3.10: Abrieb pro Stunde als Funktion von F_n und v_r . Oben ist der Zusammenhang mitsamt einem Fit als 3D-Grafik dargestellt, unten als 2D-Grafik.

Betrachtet man nur die Messpunkte (nicht den Fit), so scheint es so zu sein, dass die abgeriebene Masse pro Stunde mit steigender Anpresskraft fällt. Weil aber $\Delta m/t = 0 \text{ g/h}$ gelten muss wenn $F_n = 0 \text{ N}$ ist bei beliebiger Relativgeschwindigkeit, muss es einen Zusammenhang wie die Fit-Funktion in Abbildung 3.10, oben geben. Deshalb muss es bei gegebener Relativgeschwindigkeit eine bestimmte Anpresskraft geben, bei der Masseabrieb am größten ist. Wie man aus Abbildung 3.10 entnehmen kann, liegt diese Anpresskraft bei rund 340 N.

3.2.3.3 Leistung versus Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit

Weil während der Versuche die zeitabhängige Leistung und damit der Reibungskoeffizient starken Schwankungen unterlagen, wurde aus den Messergebnissen der Versuche Nr. 1 bis 9 die mittleren Leistungen \bar{P} berechnet. Damit wiederum wurden gemäß (2.3) die mittleren Reibungskoeffizienten $\bar{\mu}$ bestimmt. In Tabelle 3.3 sind die Ergebnisse aufgelistet.

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
\bar{P} [W]	41,6	58,8	154,9	85,9	133,2	250,6	90,5	190,6	261,4
$\bar{\mu}$ [-]	0,3326	0,2352	0,413	0,3438	0,2663	0,3342	0,2414	0,2541	0,2324

Tabelle 3.3: Mittlere Leistung \bar{P} und mittlerer Reibungskoeffizient $\bar{\mu}$ bei den Versuchen Nr. 1 bis 9.

Wird die mittlere Leistung \bar{P} gegen die Anpresskraft und die Relativgeschwindigkeit aufgetragen, so sollte sich dabei wegen (2.3) ein linearer Zusammenhang ergeben. Abbildung 3.11 zeigt die entsprechende Grafik inklusive einem linearen Fit. Als Fit-Gleichung wurde (2.3) verwendet. Sowohl aus dem Fit als auch durch Mittelwertbildung über die $\bar{\mu}$ aus der Tabelle ergeben sich die Reibungskoeffizienten

$$\mu = 0,2694 \qquad \bar{\mu} = 0,2947 \pm 0,0597 (\pm 20,3\%) \qquad (3.1)$$

Diese recht große Standard-Abweichung spiegelt sich in einem Korrelationskoeffizienten von lediglich $R^2 = 0,85$ wider. Daraus muss gefolgert werden, dass sich mit der Versuchsapparatur keine gut reproduzierbaren Messdaten erzeugen lassen.

3.2.3.4 Aufheizrate versus Abrieb pro Stunde

Während der Versuche schien es so zu sein, dass bei stark steigender Temperatur auch besonders viel Metallstaub abgerieben wurde. Um zu sehen, ob dieser Eindruck richtig ist, wurde die Aufheizrate aus Abbildung 3.9 gegen den zeitlichen Masseabrieb aus Abbildung 3.10 gegeneinander – sortiert nach Anpresskraft – aufgetragen. In Abbildung 3.12 ist das Ergebnis zu sehen. Man erkennt, dass ein Zusammenhang zwischen zeitlichem Masseabrieb und Aufheizrate besteht, der aber stark von der Anpresskraft F_n abhängt. Je geringer die Anpresskraft ist, desto mehr steigt der zeitlicher Masseabrieb mit steigender Aufheizrate an und umgekehrt. Bei gegebener Anpresskraft scheint der

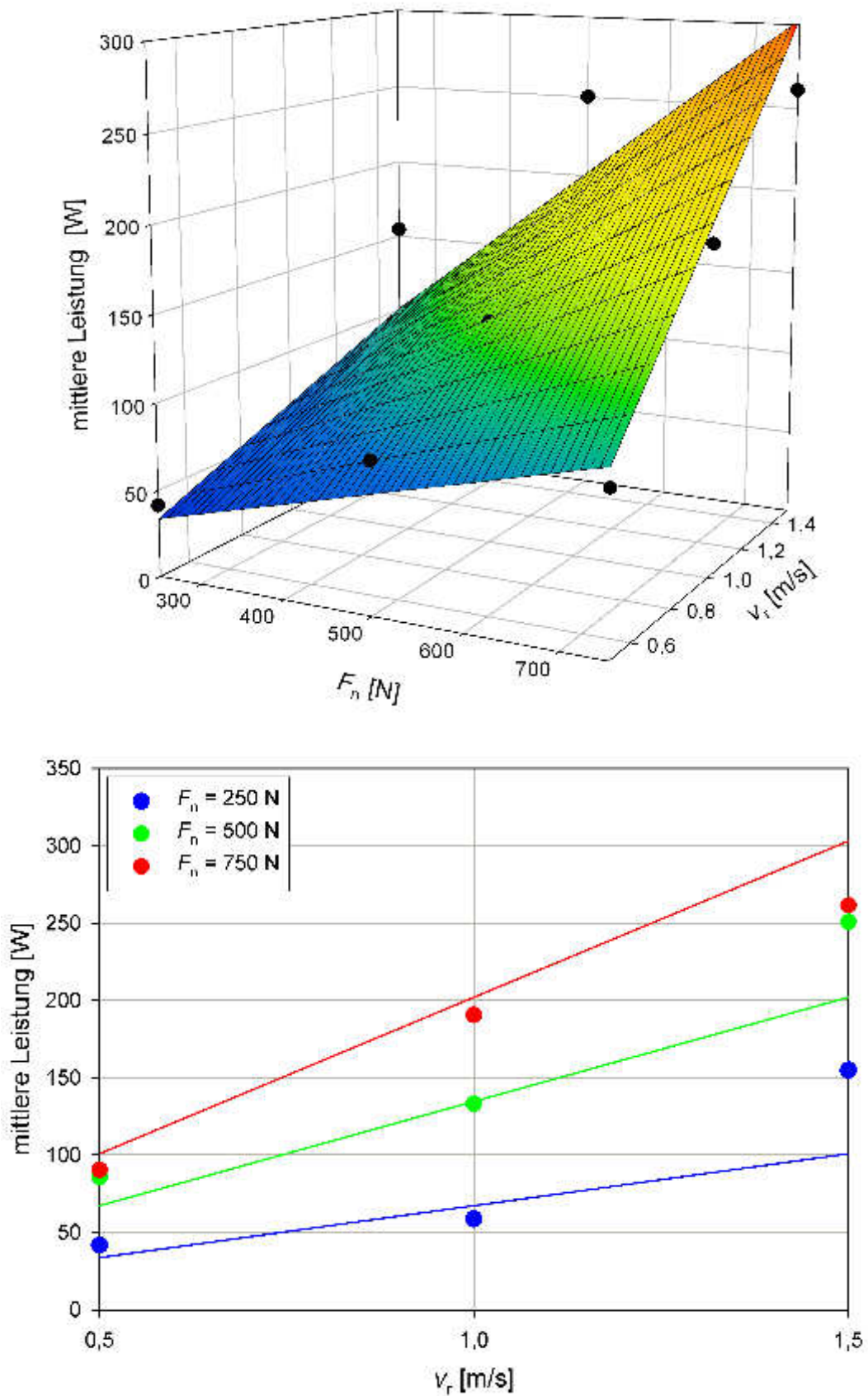


Abbildung 3.11: Mittlere Leistung als Funktion von F_n und v_r . Oben ist der Zusammenhang mitsamt einem Fit als 3D-Grafik dargestellt, unten als 2D-Grafik.

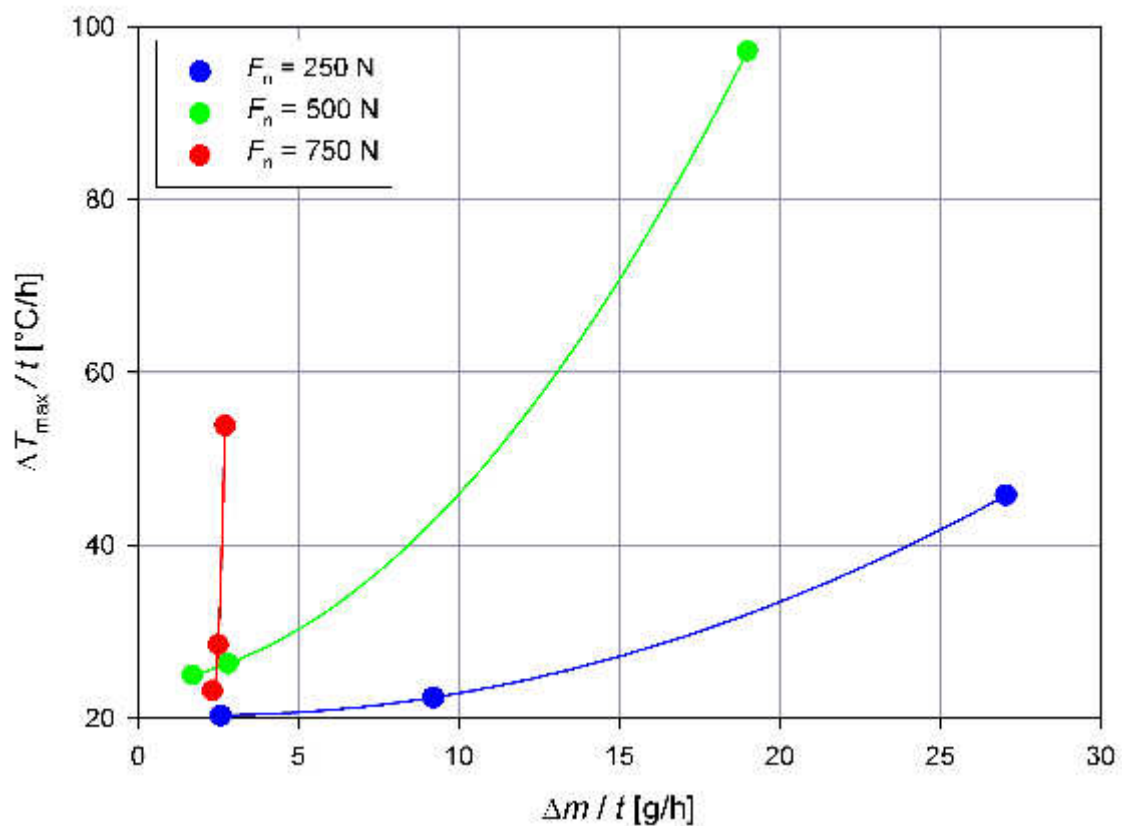


Abbildung 3.12: Aufheizrate als Funktion des zeitlichen Masseabriebs, separiert nach der Anpresskraft.

Zusammenhang zwischen Aufheizrate und zeitlichem Masseabrieb quadratischer Natur zu sein. Der Kurvenverlauf in den Abbildungen 3.10 und 3.12 macht deutlich, dass der Masseabrieb mit zunehmender Anpresskraft geringer wird. Vermutlich kann der abgeriebene Metallstaub durch den hohen Druck nicht seitlich entweichen und wird wieder in die Reibflächen eingearbeitet.

3.2.3.5 Betrachtung der Energiebilanz

Mit Hilfe der Messdaten wird hier versucht, die Größen in (2.1) bzw. (2.2) mit Zahlen zu füllen.

3.2.3.5.1 Gesamtenergie

Die bei einem Versuch insgesamt in den Reibungsprozess gesteckte Energie E ergibt sich aus der zeitlichen Integration über die Leistungskurve. Die Integration wurde mit einer selbst entwickelten Software durchgeführt. In Zeile 2 der Tabelle 3.5 sind die so berechneten Energien gezeigt.

3.2.3.5.2 Temperaturerhöhung

Der Energieanteil E_W , der am Ende des Reibungsprozesses eines Versuches für die erhöhte Temperatur der Reibscheiben und Basisplatten sorgt, ist

$$E_W = c \cdot \sum_{i=0}^6 m_i \cdot (T_i - T_U) \quad (3.2)$$

mit $c = 470 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$. Die T_i sind die Temperaturen, die am Ende des Reibungsprozesses in geschiedenen Tiefen der Reibscheiben und Basisplatten gemessen wurden. Abbildung 3.13 zeigt einen Querschnitt durch die Reibscheiben und Basisplatten sowie die Zerlegung derselben in Zylinder bzw. Hohlzylinder mit den Massen m_i . Die Temperaturen T_0 und T_6 wurden mit dem Mikrobolometer bestimmt, sind also die Randtemperaturen der Reibscheiben und Basisplatten. In Zeile 3 der Tabelle 3.5 sind die E_W der Einzelversuche aufgelistet.

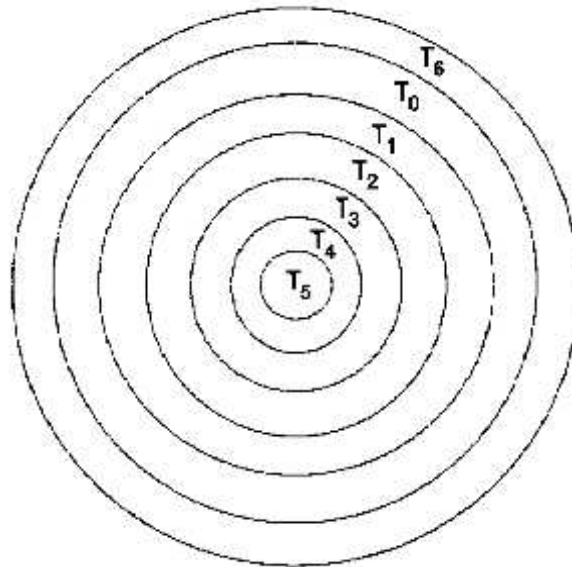


Abbildung 3.13: Skizze eines Querschnittes durch Reibscheibe und Basisplatte. Die Zerlegung in Zylinder und Hohlzylinder ist eingezeichnet.

3.2.3.5.3 Verlust durch Strahlung

Der Energieverlust durch Strahlung V_S ergibt sich aus dem Zeitintegral über das Stefan-Boltzmann-Gesetz zu

$$V_S = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \int_0^{t_E} (T^4(t) - T_U^4) dt \quad (3.3)$$

wobei der Emissionskoeffizient zu $\varepsilon = 0,96$ gemessen und die Größe der Oberfläche der heißen Teile (Reibscheiben und Basisplatten) mit Hilfe des für die Konstrukti-

on verwendeten CAD-Programms zu $A = 0,09608 \text{ m}^2$ bestimmt wurden. Die Stefan-Boltzmann-Konstante beträgt $\sigma = 5,67037 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. Integriert werden muss über den zeitlichen Temperaturverlauf an der Oberfläche während der Reibphase eines Versuches. Hierzu werden die Oberflächentemperaturen verwendet, die mit dem Mikrobolometer gemessen wurden. Ein Messpunkt wurde mit der Analyse-Software direkt auf die Basisplatte mit den Thermoelementen gesetzt und damit ein zeitlicher Temperaturverlauf an diesem Ort erzeugt (Abbildung 3.14). Mit Hilfe einer selbst programmierten Software wurde die Integration und Berechnung des Energieverlustes durch Strahlung gemäß (3.3) berechnet. In Zeile 5 der Tabelle 3.5 sind diese Werte aufgelistet.

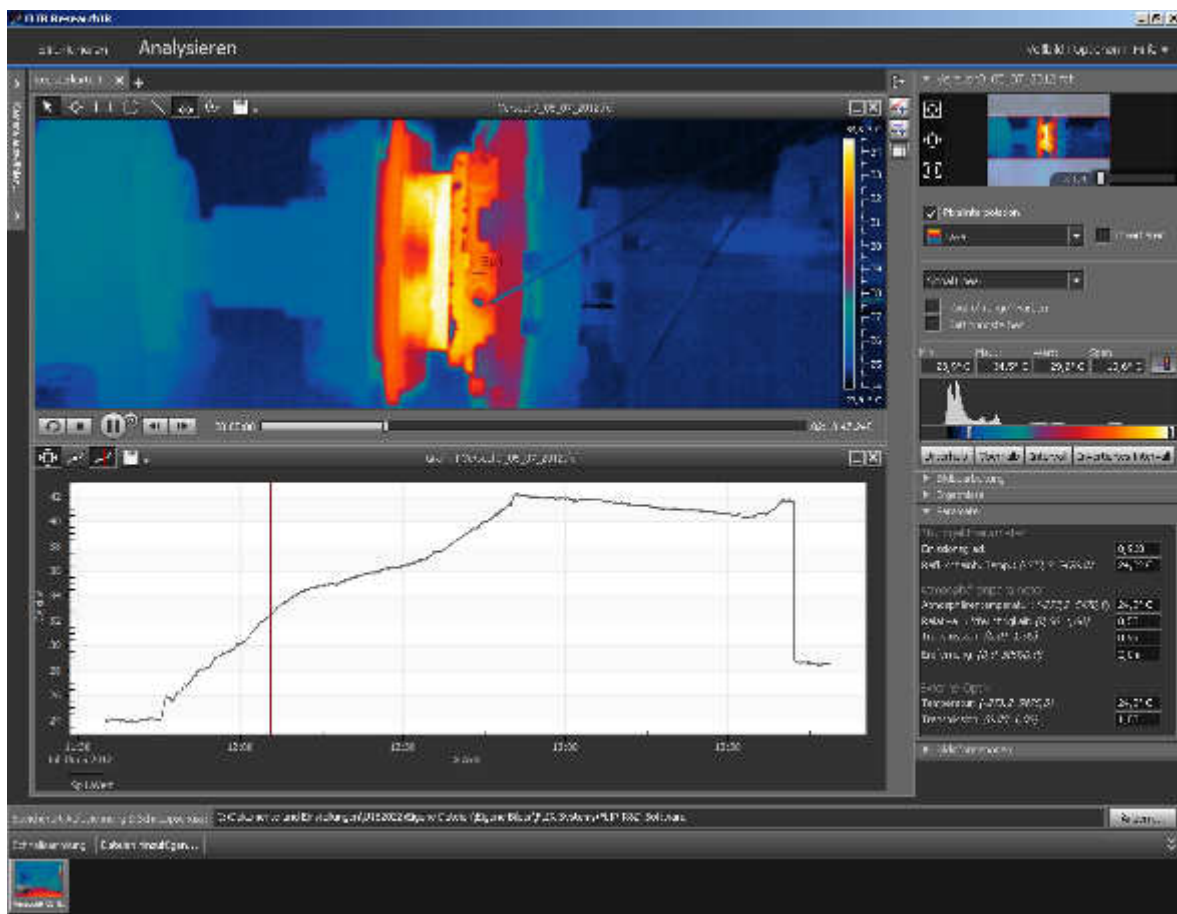


Abbildung 3.14: Erzeugung von zeitlichen Oberflächentemperaturkurven mit Hilfe der Analyse-Software des Mikrobolometers.

3.2.3.5.4 Verlust durch Konvektion

Der Energieverlust durch Konvektion V_K wird mit Formel (2.5) berechnet, wobei hier das Problem besteht, einen genauen Wärmeübergangskoeffizienten k zu bestimmen. (2.6) und (2.7) lassen einigen Spielraum für einen genauen Zahlenwert von k . Dies vor allem deswegen, weil die Luftgeschwindigkeit v_{rel} über der Oberfläche der Reibscheiben und Basisplatten nicht genau bekannt ist.

Für die rotierende Reibscheibe und Basisplatte lässt sich k_r vergleichsweise genau mit Hilfe von (2.6) berechnen, da die Geschwindigkeit an den Rändern der Scheibe und Platte ausgerechnet werden kann. Für die drei eingestellten Geschwindigkeiten v_r ergeben sich für k_r die Werte in Tabelle 3.4, wobei bei deren Berechnung über die Radien der rotierenden Reibscheibe und Basisplatte gemittelt wurde. Dieser Mittelwert beträgt $\bar{r} = 0,066$ m. Die Oberfläche der rotierenden Reibscheibe und Basisplatte beträgt $A = 0,03739$ m². Mit den $T(t)$ der Reibphasen der Einzelversuche folgen mit (2.5) die Konvektionsverluste an den rotierenden Teilen.

v_r [m/s]	0,5	1,0	1,5
v_{rel} [m/s]	1,32	2,64	3,96
k_r [W/m ² ·K]	11,08	16,36	21,64
k_s [W/m ² ·K]	8,44	11,08	13,72

Tabelle 3.4: Wärmeübergangskoeffizienten der rotierenden und starren Reibscheibe und Basisplatte in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Reibscheiben.

Die Relativgeschwindigkeiten v_{rel} zwischen Luft und Rändern der starren Reibscheibe und Basisplatte sind nicht bekannt. Sie wurden hier halb so groß wie die Relativgeschwindigkeiten der rotierenden Teile angenommen. Eingesetzt in (2.6) ergeben sich die Wärmeübergangskoeffizienten k_s für die starre Reibscheibe und Basisplatte. Diese Koeffizienten finden sich in Zeile 4 der Tabelle 3.4. Mit den $T(t)$ der Reibphasen der Einzelversuche folgen mit (2.5) die Konvektionsverluste an der starren Reibscheibe und Basisplatte. Die Summe aus beiden Konvektionsverlusten ist der gesuchte Energieverlust durch Konvektion V_K , welche in Zeile 6 der Tabelle 3.5 aufgelistet sind.

3.2.3.5.5 Verlust durch Wärmeleitung

Sowohl durch die starre als auch durch die rotierende Basisplatte fließt Wärme über die Spezialkeramik in kühlere Anlagenteile ab. Zwar behindert die niedrige Wärmeleitfähigkeit der Keramik diesen Wärmeabfluss deutlich, sie kann diesen jedoch nicht gänzlich verhindern. Der Energieverlust durch Wärmeleitung V_L ergibt sich aus der zeitlichen Integration über das Fourie'sche Gesetz

$$V_L = \frac{\lambda \cdot A}{l} \cdot \int_0^{t_E} (T_h(t) - T_k(t)) dt \quad (3.4)$$

mit λ als Wärmeleitfähigkeit der isolierenden Spezialkeramik, A als Kontaktflächen zwischen Stahl und Spezialkeramik, l als Stärke der Spezialkeramik und $T_h(t)$ sowie $T_k(t)$ als die zeitabhängigen Oberflächentemperaturen der Metallplatten links und rechts neben der Spezialkeramik. Abbildung 3.15 verdeutlicht, wo die letztgenannten Temperaturen gemessen wurden. Die zeitlichen Temperaturverläufe $T_h(t)$ und $T_k(t)$

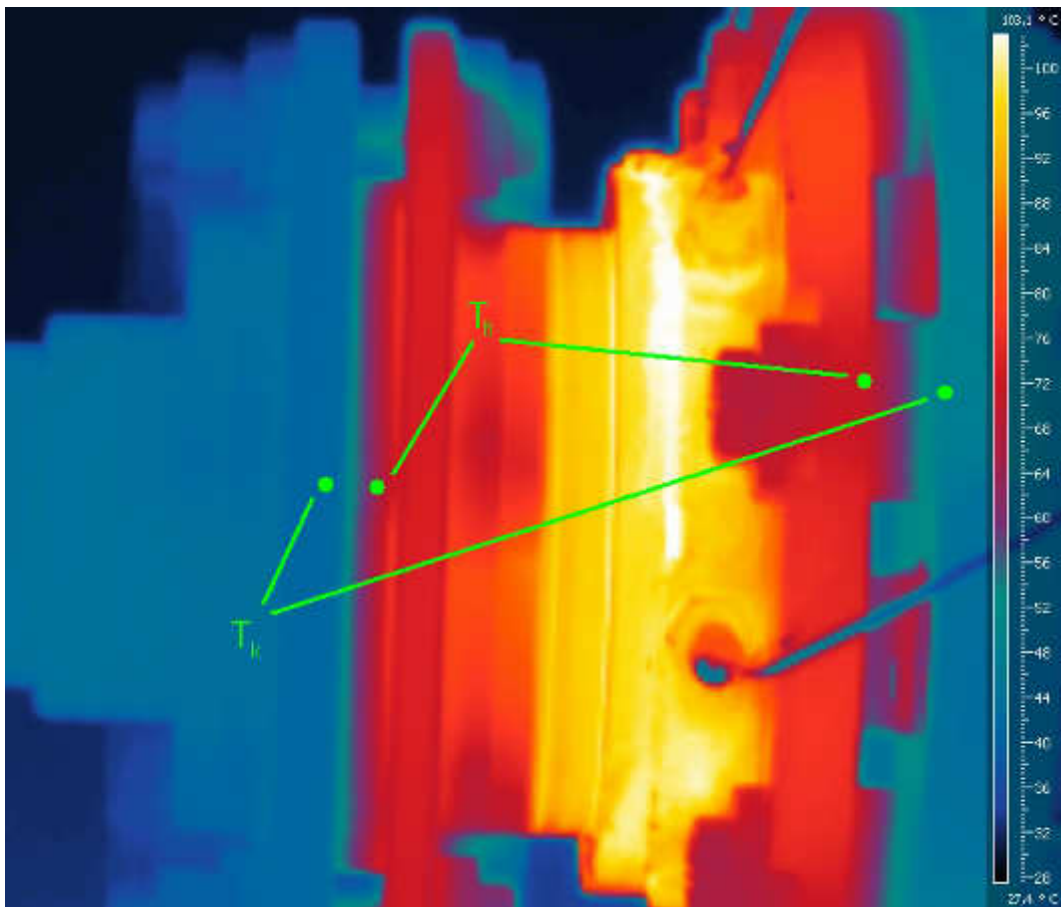


Abbildung 3.15: Messorte für $T_k(t)$ und $T_h(t)$.

wurden erneut mit Hilfe der Mikrobolometer-Daten bestimmt und zwar mit der Methode, die in Abschnitt 3.2.3.5.3 beschrieben ist. In Zeile 7 der Tabelle 3.5 sind die V_L der Einzelversuche aufgelistet.

3.2.3.5.6 Verformungsarbeit

Die Verformungsarbeit bzw. die Arbeit, die in den Abrieb des Materials gesteckt wurde, lässt sich nur sehr schwer abschätzen. Unklar ist, ob und wie viel des abgeriebenen Stahlstaubes wieder in die Reibflächen eingearbeitet wurde. Ebenso ist unbekannt, wie fein das Material letztendlich zermahlen wurde. Aus diesem Grund wird hier eine sehr einfache Abschätzung durchgeführt, um wenigstens die Größenordnung der Verformungsarbeit zu bekommen.

In Wikipedia findet man die Gitterenergie des Eisens mit 4,29 eV pro Atom. Mit der Umrechnung in Joule und der Avogadro-Zahl errechnet sich damit eine Bindungsenergie pro Mol von $B = 413,9 \text{ kJ/mol}$. Wenn man davon ausgeht, dass der abgeriebene Stahlstaub buchstäblich atomisiert wurde und wenn man Eisen anstelle von Stahl betrachtet, dann kann man mit Hilfe der abgeriebenen Masse und der Bindungsenergie die Energie ausrechnen, die beim Abrieb des Stahlstaubes verbraucht wurde. Es gilt

$$E_V = \frac{\Delta m \cdot B}{M} \quad (3.5)$$

mit $M = 55,847 \text{ g}$ als Molmasse von Eisen. Nun kann man sicher nicht davon ausgehen, dass der Stahlabrieb eine Zerkleinerung bis auf atomare Ebene bedeutet. Die Verformungsenergie dürfte deshalb geringer sein als $413,9 \text{ kJ/mol}$. Betrachtet man die in den Abschnitten 3.2.3.5.1 bis 3.2.3.5.5 ermittelten Energiewerte bzw. die Werte aus Tabelle 3.5, so ist ein Wert von etwa 100 kJ/mol Abriebarbeit plausibel. Damit folgt für die Verformungsarbeit

$$E_V = \frac{\Delta m \cdot 100 \text{ kJ}}{55,847 \text{ g}} \quad (3.6)$$

Damit ergeben sich die Werte, die in Zeile 4 der Tabelle 3.5 gezeigt sind. Weil die Verformungs- oder Abriebarbeit am schwersten zu bestimmen ist, wurde diese Abschätzung zum Schluss der Auswertung durchgeführt.

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E [kJ]	292,4	376,7	823,0	585,4	1.462,5	483,2	1.091,9	1.395,3	2.476,7
E_W [kJ]	43,9	63,1	158,9	105,6	204,0	132,9	205,9	244,4	300,5
E_V [kJ]	8,8	28,6	69,7	5,7	5,0	17,7	13,6	9,0	12,5
V_S [kJ]	58,1	60,9	121,6	113,8	293,8	44,6	269,3	297,6	475,8
V_K [kJ]	89,2	132,5	298,6	171,0	557,5	111,1	381,9	507,4	976,7
V_L [kJ]	75,3	83,9	157,6	172,0	351,5	56,2	366,5	315,4	435,2
ΔE [kJ]	17,1	7,6	2,7	17,3	50,7	120,7	-145,3	21,5	276,0
ΔE [%]	5,8	2,0	0,3	3,0	3,5	25,0	-13,3	1,5	11,1

Tabelle 3.5: Energieanteile der Energiebilanzen der einzelnen Reibungsversuche. In den letzten beiden Zeile der Tabelle ist die Differenz zwischen der verbrauchten und aufgewendeten Energie angegeben.

3.2.4 Diskussion

Trotz der teilweise ungenauen Berechnungsmethoden für die einzelnen Terme der Energiegleichung (2.2) stimmt die Gleichung für 2/3 der durchgeführten Versuche recht gut. Für das verbleibende 1/3 gilt diese Aussage leider nicht. Mit relativen Fehlern zwischen 11 % und 25 % sind diese Versuche bzw. deren Ergebnisse nicht zufriedenstellend. Im Zuge der Versuchsauswertung wurde intensiv nach möglichen Fehlerquellen für die schlechten Ergebnisse gesucht, jedoch ergebnislos. Deutlich wird jedoch trotz dieses Mangels, dass im Mittel nur etwa 21 % der aufgebrauchten Energie in Erwärmung und Verformung fließen. Der Rest geht als Verlust verloren. Der Grad dieser Aufteilung hängt von der Dauer des Reibvorganges ab. Der Reibungskoeffizient konnte mit ca. 20 % Fehler nicht sehr genau bestimmt werden. Er zeigt keine Abhängigkeit von Anpresskraft F_n und Relativgeschwindigkeit v_r .

3.3 Versuchsreihe 2

Von Juli bis November 2013 wurde eine zweite Messkampagne durchgeführt. Bei dieser ging es darum, die Messergebnisse der Versuchsreihe 1 zu reproduzieren bzw. die bei Versuchsreihe 1 aufgetretenen Ausreißer zu vermeiden oder ihre Ursachen zu ergründen.

3.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Der wesentliche Versuchsaufbau wurde bereits in Abschnitt 2.3 erläutert. Gegenüber Versuchsreihe 1 wurde die Versuchsapparatur jedoch leicht verändert: Die starre Basisplatte und Reibscheibe wurden auf einem Kugelgelenk gelagert (siehe Abbildung 3.16). Der Sinn dieser Konstruktion ist, dass die Reibscheiben (Reibflächen) stets planparallel ausgerichtet sind. Eventuell auftretende kleine Winkel zwischen den Reibflächen sollten durch das Kugelgelenk beim Zusammenpressen der Reibscheiben eliminiert werden.

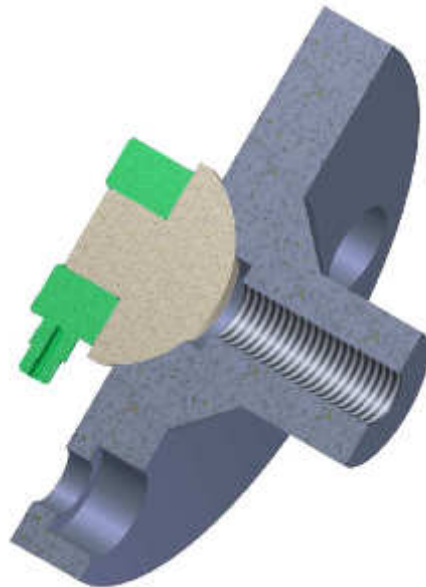


Abbildung 3.16: Schnitt durch die starre Basisscheibe und durch das eingebaute Kugelgelenk (CAD-Grafik)

Durchgeführt wurden die einzelnen Versuche genau so, wie es in Abschnitt 3.2.1 beschrieben ist. Der einzige Unterschied zur Versuchsreihe 1 war, dass die Reibzeit auf zwei Stunden festgelegt wurde. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 3.6 aufgelistet.

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
F_n [N]	250	250	250	500	500	500	750	750
ν [Hz]	15,92	31,83	47,75	15,92	31,83	47,75	15,92	31,83
v_r [m/s]	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0

Tabelle 3.6: Versuche der zweiten Messkampagne und dazugehörige Parameter.

3.3.2 Versuchsergebnisse

Die Umgebungsbedingungen und die wichtigsten Resultate der Messkampagne 2 sind in Tabelle 3.7 zusammenfassend dargestellt. Die Symbole haben die gleiche Bedeutung wie diejenigen in der Tabelle 3.2. Die detaillierten Ergebnisse der Einzelmessungen zeigen die Abbildungen 3.17 bis 3.20.

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Datum	23.7.	1.8.	12.9.	17.9.	24.9.	1.10	8.10.	5.11.
T_U [°C]	27	25	18	17	19	18	20	13
T_{\max} [°C]	50	120	134	63	48	184	66	133
ΔT_{\max} [°C]	23	95	116	46	29	166	46	120
m_{rA} [g]	523,9	523,7	523,9	523,5	521,8	523,7	523,4	524,3
m_{rE} [g]	517,9	522,6	523,5	516,9	519,2	523,1	768,5	767,3
m_{sA} [g]	766,5	766,7	767,4	766,9	742,9	515,3	766,7	756,9
m_{sE} [g]	760,4	764,8	766,9	758,6	738,7	520,4	767,2	761,4
Δm [g]	12,1	3,0	0,9	14,9	6,8	1,8	18,2	9,7
t_A [h:min]	11:26	10:47	12:06	10:46	12:45	11:54	11:34	10:45
t_E [h:min]	13:29	12:48	14:08	12:48	14:44	13:55	14:00	12:45
Δt [h:min]	2:03	2:01	2:02	2:02	1:59	2:01	2:06	2:00

Tabelle 3.7: Umgebungsbedingungen und Ergebnisse der zweiten Messkampagne.

Weil die Qualität der Versuchsergebnisse schon während der Abarbeitung der zweiten Messkampagne angezweifelt wurde, wurde auf die Durchführung eines neunten Versuchs verzichtet. Bei Versuch Nummer vier hat die Speicherung der Daten vom Mikrobolometer nicht funktioniert, weshalb für diesen Versuch keine Infrarot-Aufnahmen vorliegen.

3.3.3 Auswertung

Die Auswertung der Versuche der zweiten Messkampagne wurde nach dem selben Schema durchgeführt wie bei der ersten Versuchsreihe (Abschnitt 3.2.3).

3.3.3.1 Temperatur versus Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit

In Abbildung 3.21 ist der bei jedem Versuch gemessene maximale Temperaturanstieg ΔT_{\max} als Funktion der Anpresskraft F_n und Relativgeschwindigkeit v_r dargestellt. Zusätzlich zu den Messpunkten ist eine Fit-Funktion eingezeichnet. Wie bei Versuchsreihe 1 streuen die Messpunkte deutlich. Dies gilt insbesondere für den Messwert von Versuch Nr. 5, der als Ausreißer betrachtet wird. Erneut wächst der maximale Temperaturanstieg mit der Anpresskraft und mit der Relativgeschwindigkeit. Jedoch wächst ΔT_{\max} bei Versuchsreihe 2 stärker mit der Relativgeschwindigkeit als mit der Anpress-

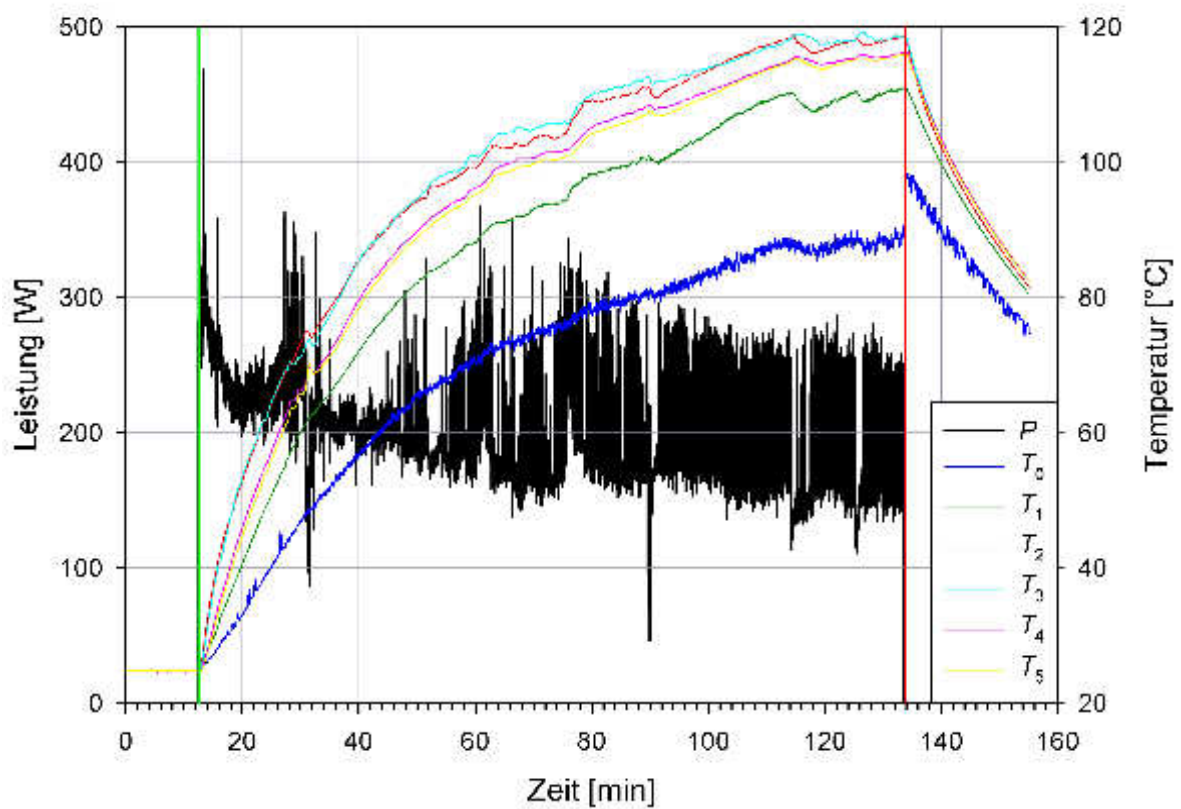
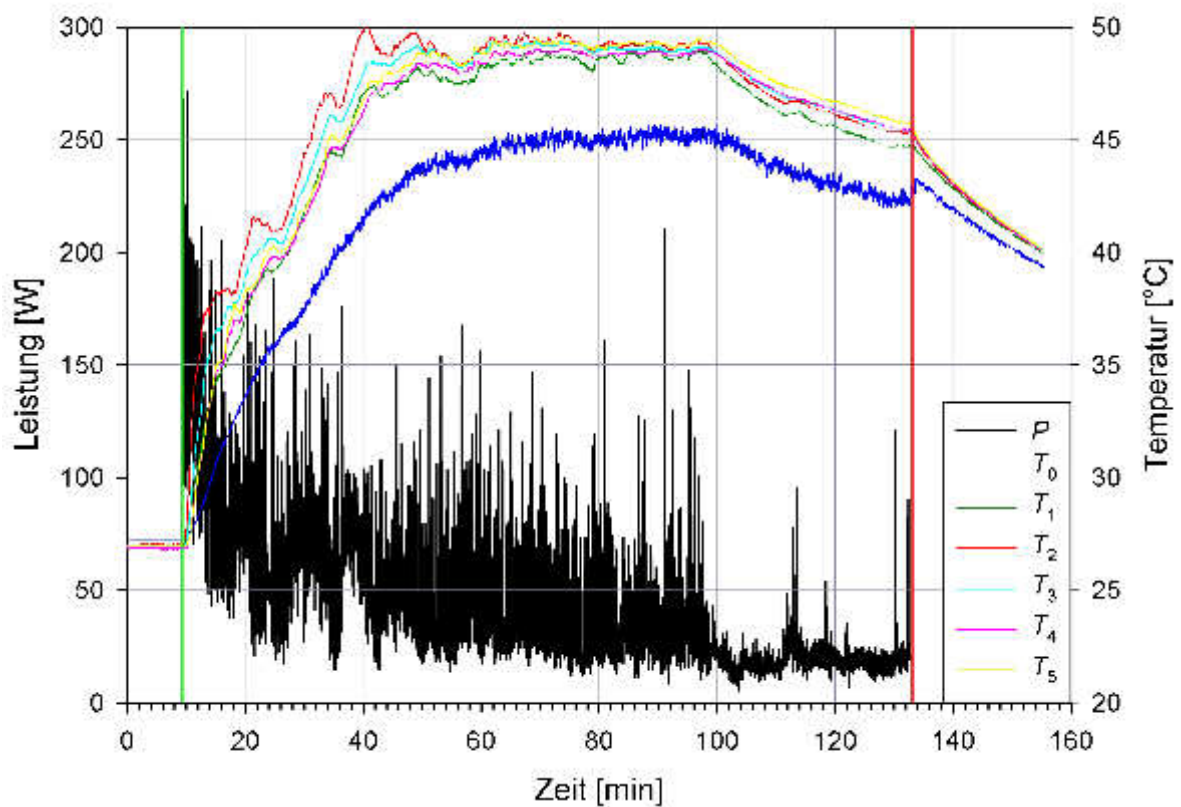


Abbildung 3.17: Ergebnisse der Versuche Nr. 1 und 2 der Messkampagne 2 mit $F_n = 250 \text{ N}$, $v_r = 0,5 \text{ m/s}$ (Nr. 1) und $F_n = 250 \text{ N}$, $v_r = 1,0 \text{ m/s}$ (Nr. 2). Die grüne und rote Senkrechte markieren den Anfang bzw. das Ende des Reibvorganges.

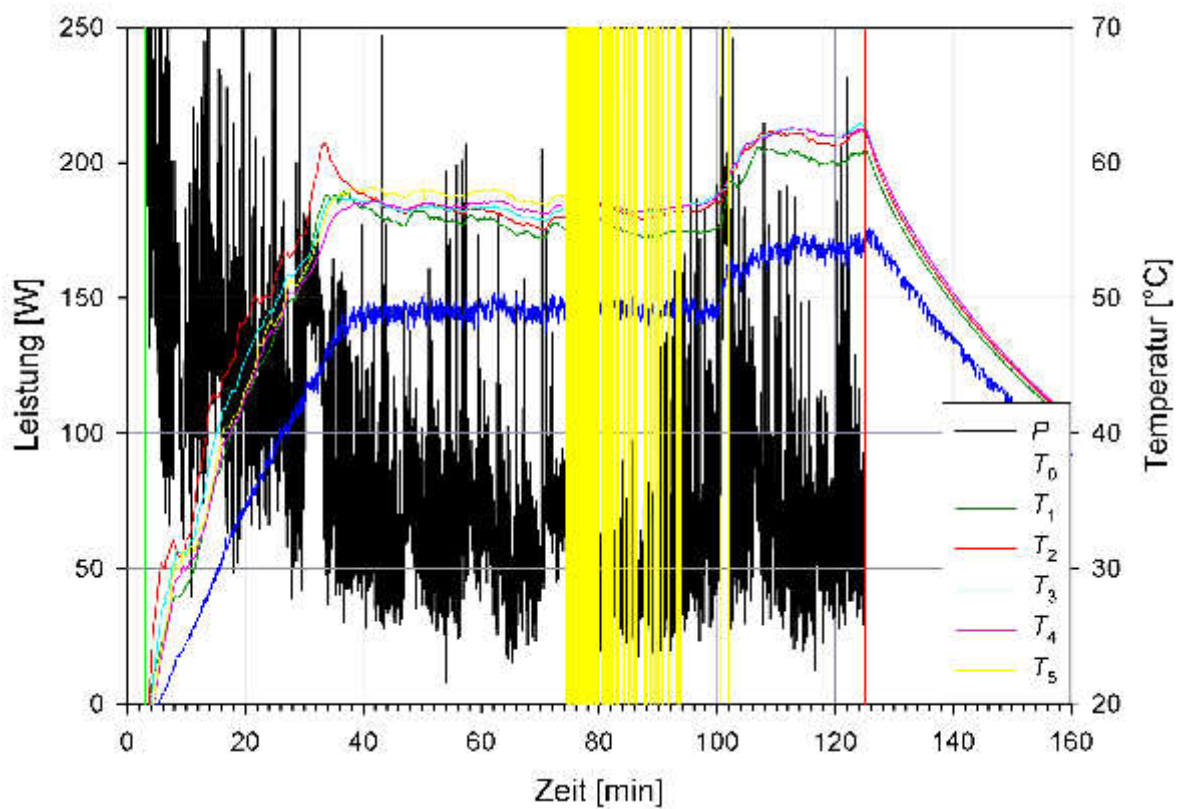
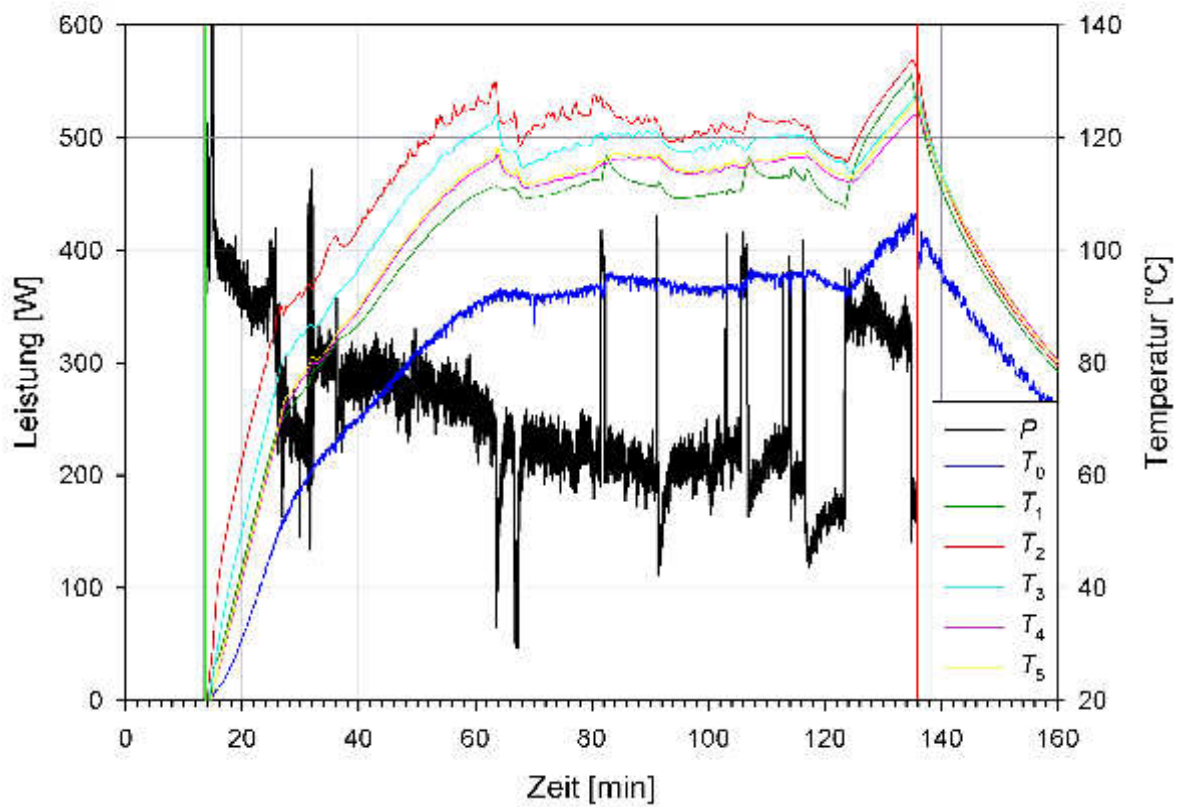


Abbildung 3.18: Ergebnisse der Versuche Nr. 3 und 4 der Messkampagne 2 mit $F_n = 250 \text{ N}$, $v_r = 1,5 \text{ m/s}$ (Nr. 3) und $F_n = 500 \text{ N}$, $v_r = 0,5 \text{ m/s}$ (Nr. 4). Die grüne und rote Senkrechte markieren den Anfang bzw. das Ende des Reibvorganges.

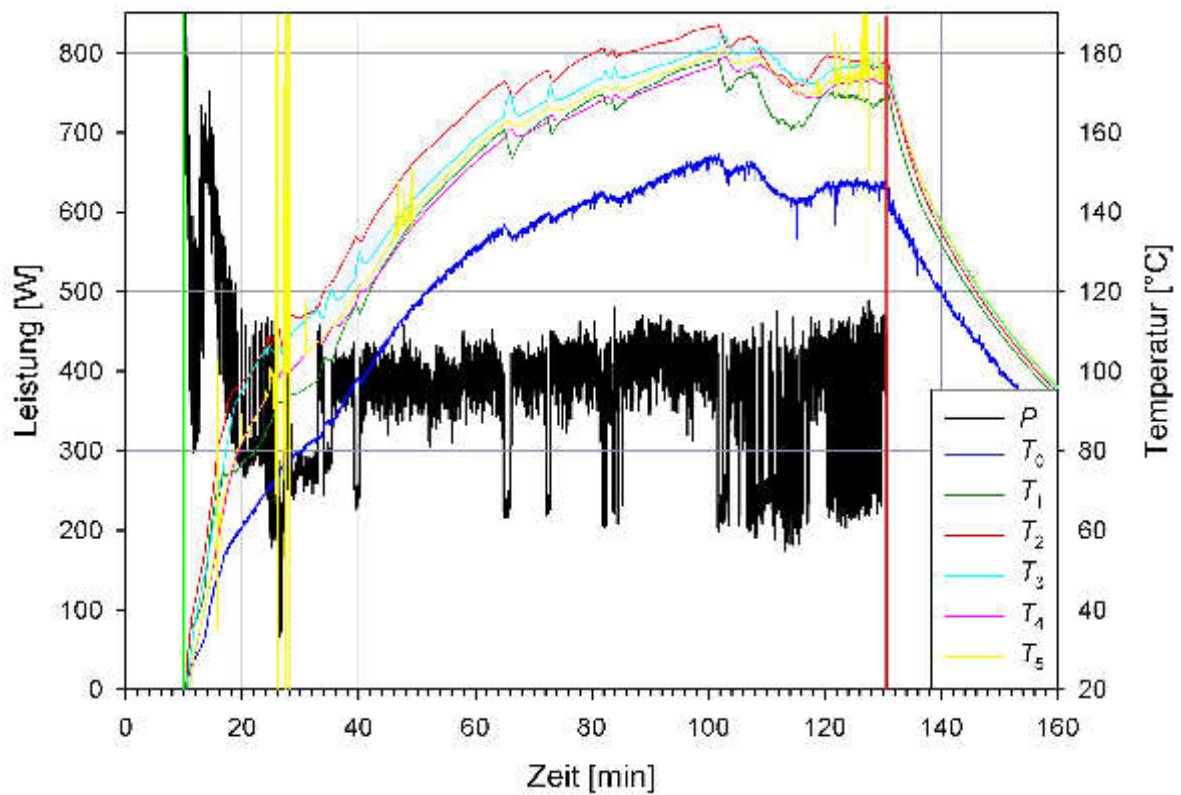
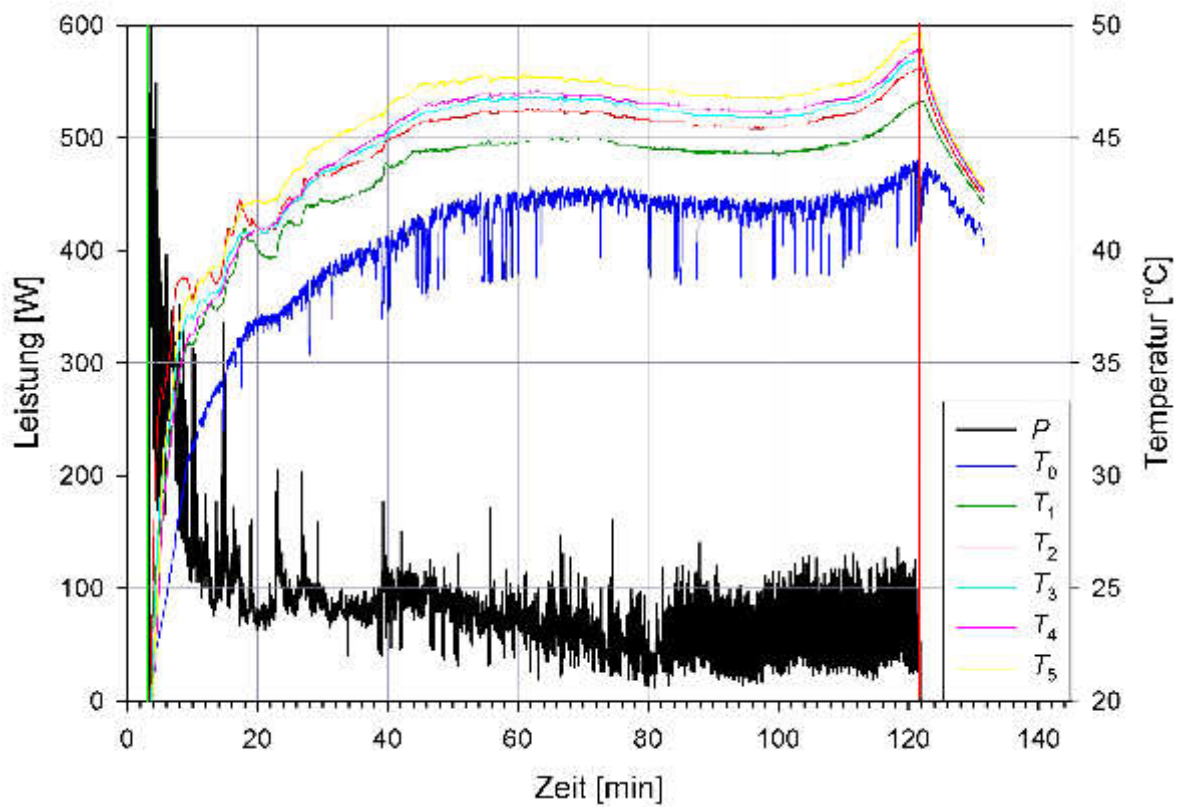


Abbildung 3.19: Ergebnisse der Versuche Nr. 5 und 6 der Messkampagne 2 mit $F_n = 500 \text{ N}$, $v_r = 1,0 \text{ m/s}$ (Nr. 5) und $F_n = 500 \text{ N}$, $v_r = 1,5 \text{ m/s}$ (Nr. 6). Die grüne und rote Senkrechte markieren den Anfang bzw. das Ende des Reibvorganges.

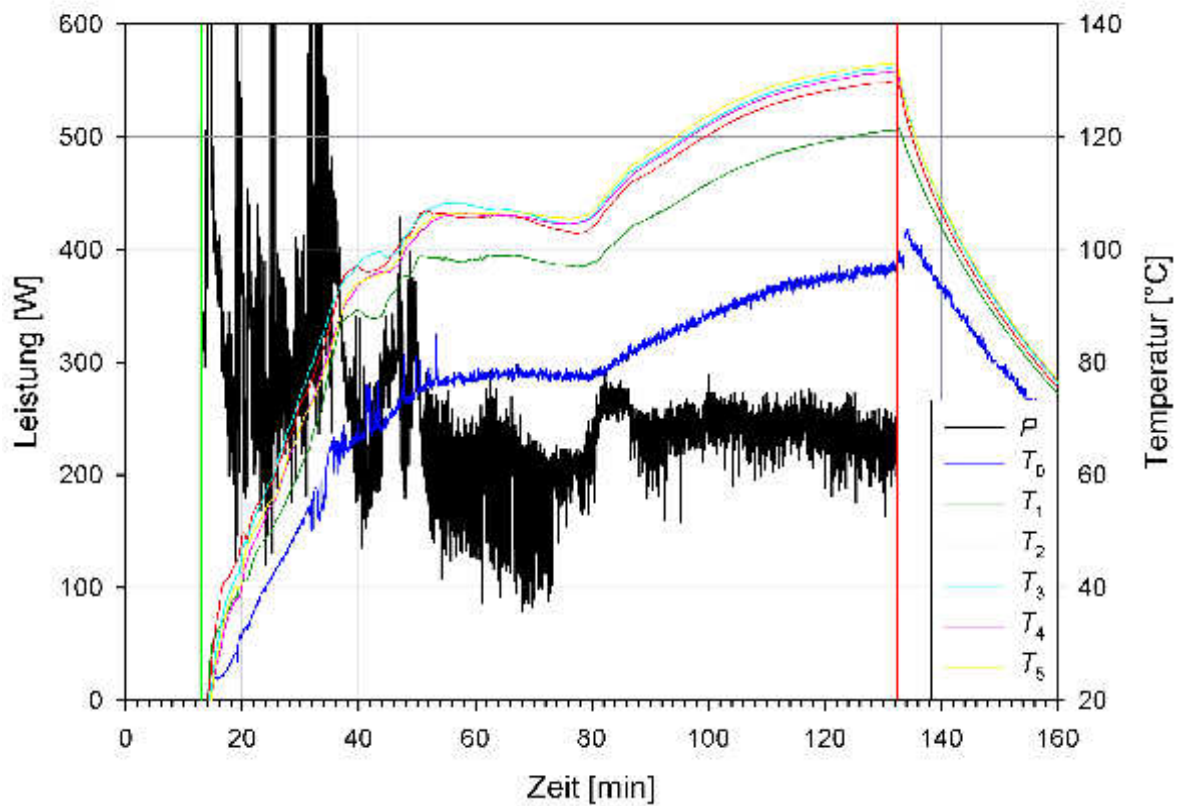
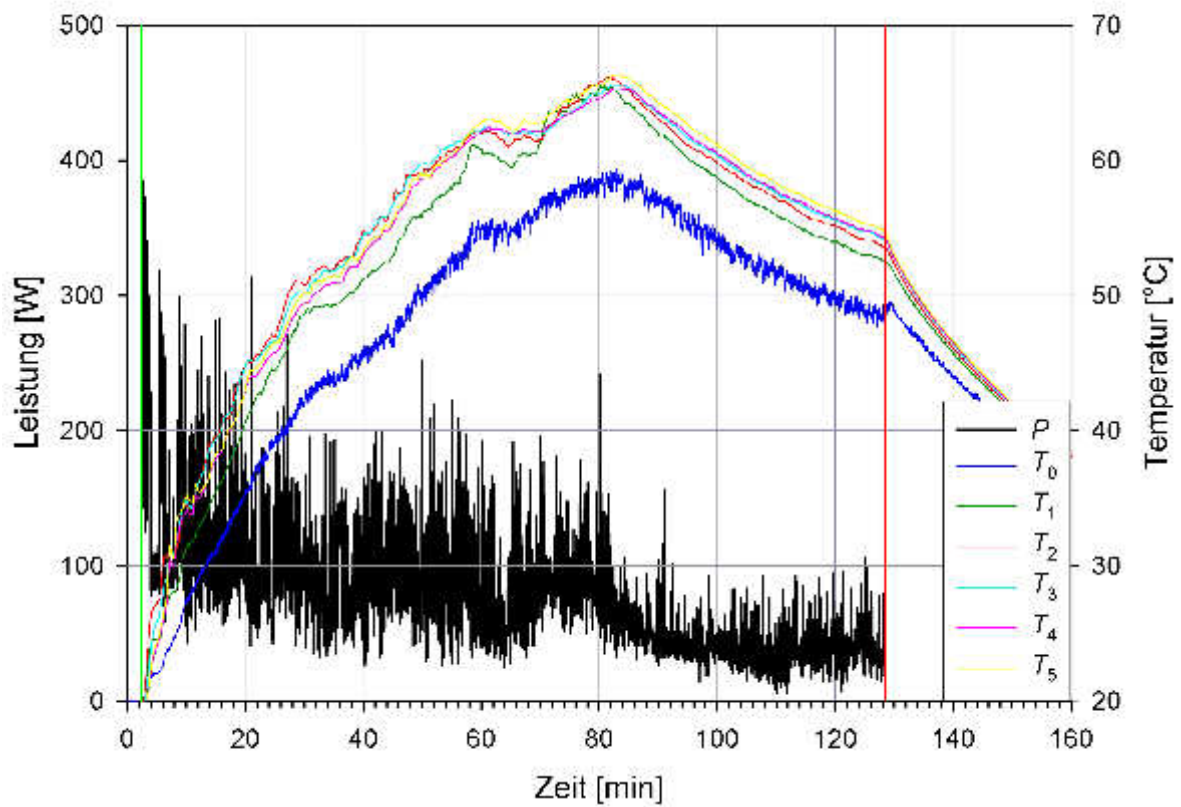


Abbildung 3.20: Ergebnisse der Versuche Nr. 7 und 8 der Messkampagne 2 mit $F_n = 750 \text{ N}$, $v_r = 0,5 \text{ m/s}$ (Nr. 7) und $F_n = 750 \text{ N}$, $v_r = 1,0 \text{ m/s}$ (Nr. 8). Die grüne und rote Senkrechte markieren den Anfang bzw. das Ende des Reibvorganges.

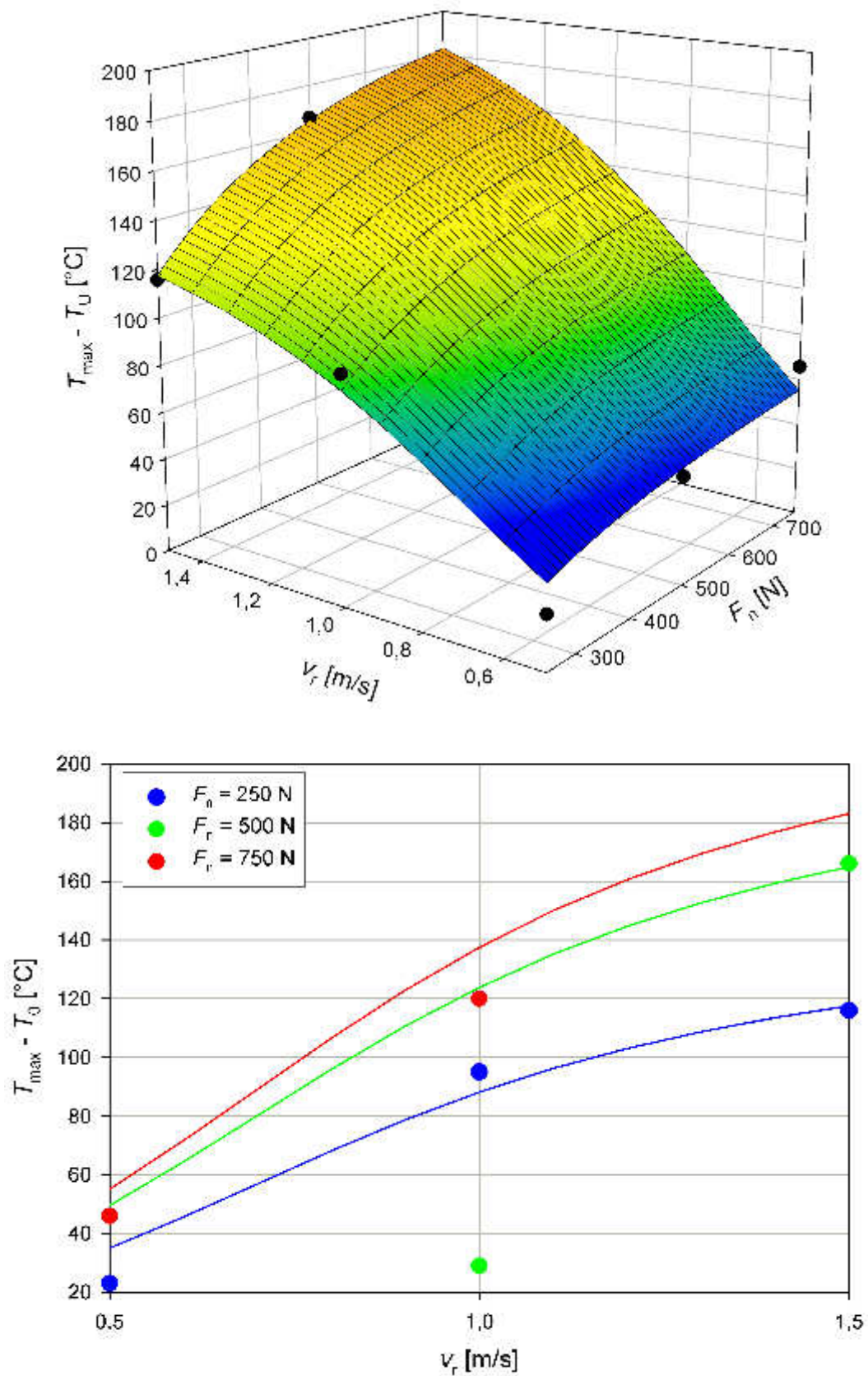


Abbildung 3.21: Maximaler Temperaturanstieg als Funktion von F_n und v_r . Oben ist der Zusammenhang mitsamt einem Fit als 3D-Grafik dargestellt, unten als 2D-Grafik.

kraft. Dies ist deutlich in der zweidimensionalen Darstellung unten in Abbildung 3.21 zu erkennen. Diesbezüglich unterscheidet sich das Ergebnis vom Resultat aus Versuchsreihe 1. Trägt man die Aufheizrate gegen die Relativgeschwindigkeit und die Anpresskraft auf, so erhält man das 3D-Diagramm in Abbildung 3.22. Wegen der konstanten Versuchsdauer bei Messkampagne 2 ergibt sich im Prinzip der gleiche funktionelle Zusammenhang wie für $\Delta T_{\max}(F_n, v_r)$ aus Abbildung 3.21. Die Aufheizrate steigt mit F_n und v_r , wobei die Abhängigkeit von v_r größer ist als die von F_n .

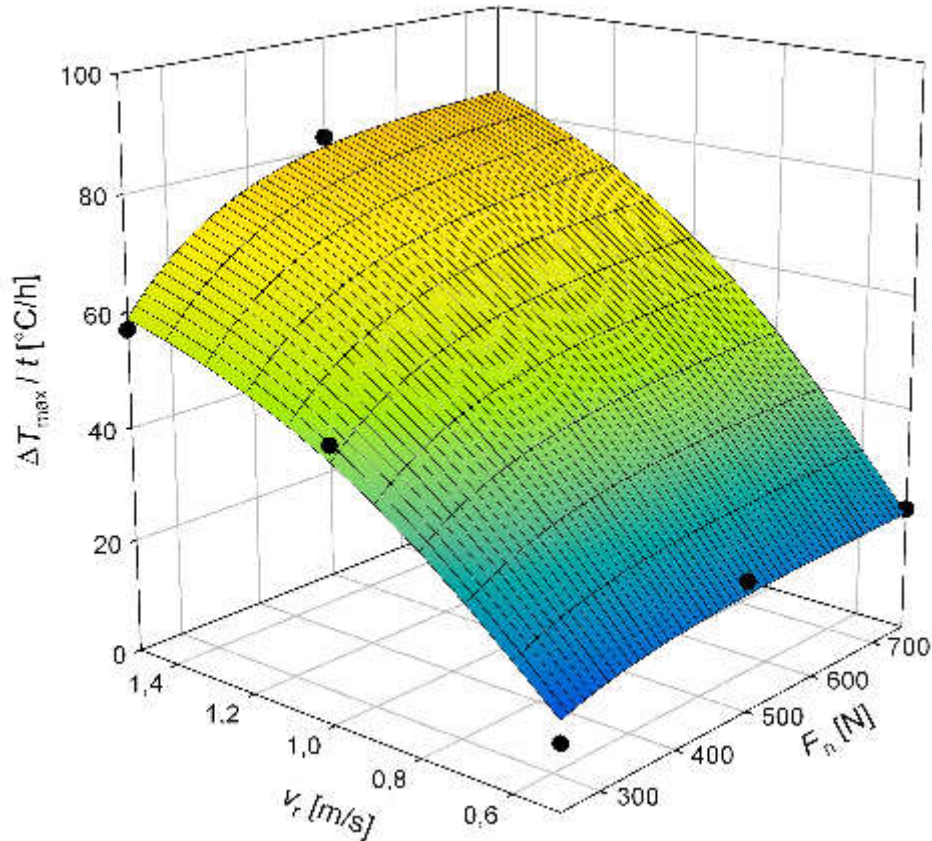


Abbildung 3.22: Maximaler Temperaturanstieg pro Stunde als Funktion von F_n und v_r .

3.3.3.2 Abrieb versus Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit

In Abbildung 3.23 ist die abgeriebene Masse pro Stunde $\Delta m/t$ pro Versuch als Funktion der Anpresskraft F_n und Relativgeschwindigkeit v_r dargestellt. Zusätzlich zu den Messpunkten ist eine Fit-Funktion eingezeichnet.

Die Abhängigkeit der abgeriebenen Masse von der Anpresskraft und der Relativgeschwindigkeit bei der Versuchsreihe 2 unterscheidet sich deutlich von derjenigen der Versuchsreihe 1. Steigt bei Letzterer der zeitliche Abrieb mit der Relativgeschwindigkeit, so fällt dieser deutlich mit der Relativgeschwindigkeit bei Versuchsreihe 2. Bei der Abhängigkeit von $\Delta m/t$ von der Anpresskraft zeigt sich das Gegenteil. Das wird besonders deutlich beim Betrachten des unteren Diagramms in Abbildung 3.23. Dieses

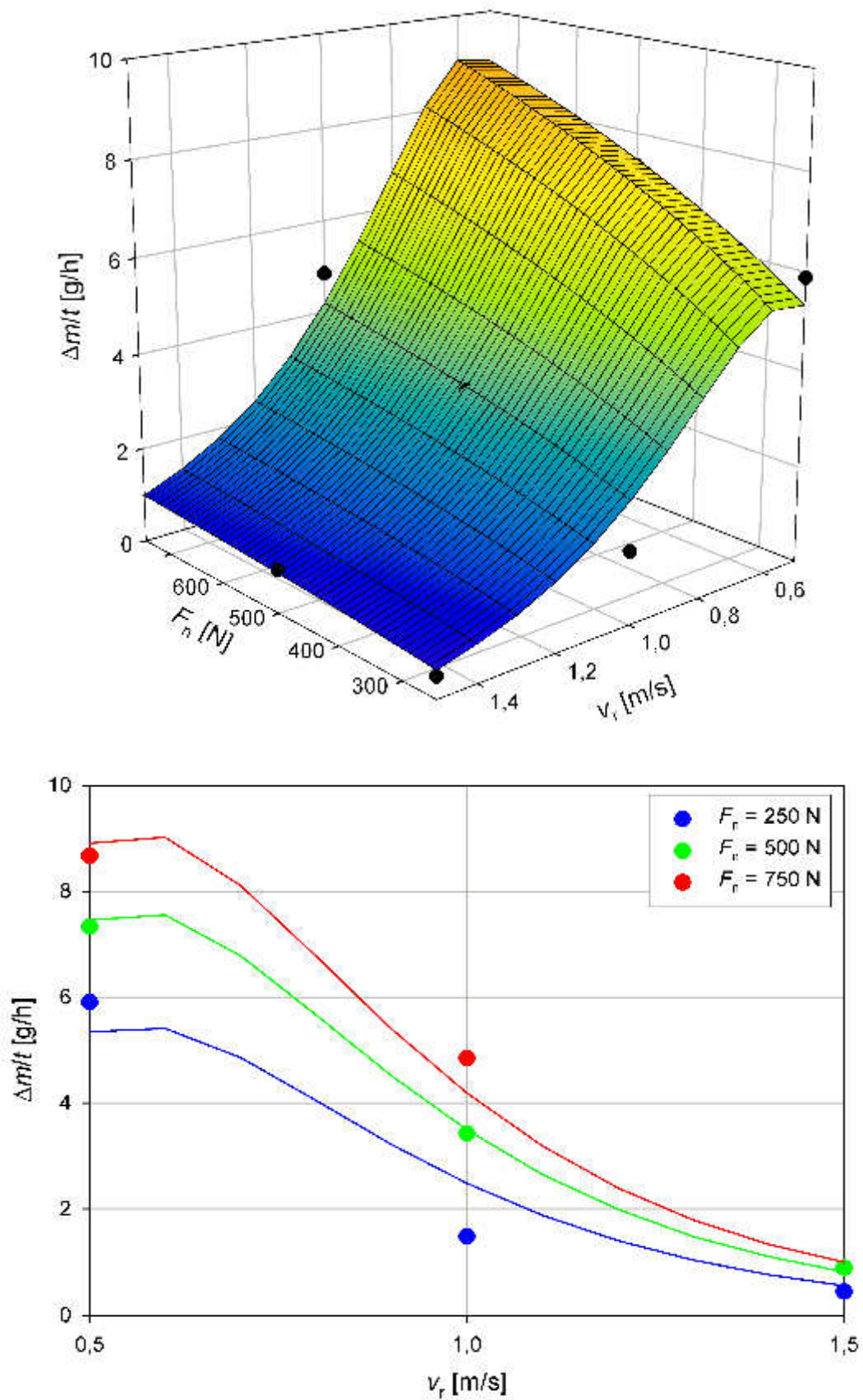


Abbildung 3.23: Abrieb pro Stunde als Funktion von F_n und v_r . Oben ist der Zusammenhang mitsamt einem Fit als 3D-Grafik dargestellt, unten als 2D-Grafik.

Ergebnis widerspricht demjenigen aus der Versuchsreihe 1 komplett. Die konstruktive Veränderung an der Versuchsapparatur hat also im Hinblick auf die abgeriebene Masse gravierende Auswirkungen. Die Resultate der ersten Messkampagne konnten nicht reproduziert werden.

3.3.3.3 Leistung versus Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit

Weil während der Versuche die zeitabhängige Leistung und damit der Reibungskoeffizient starken Schwankungen unterliegt, wurde aus den Messergebnissen der Versuche Nr. 1 bis 8 die mittleren Leistungen \bar{P} berechnet. Damit wiederum wurden gemäß (2.3) die mittleren Reibungskoeffizienten $\bar{\mu}$ bestimmt. In Tabelle 3.8 sind die Ergebnisse aufgelistet.

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
\bar{P} [W]	44,5	202,8	258,9	86,5	84,4	373,4	79,2	255,2
$\bar{\mu}$ [-]	0,3560	0,8112	0,6904	0,346	0,1688	0,4979	0,2112	0,3403

Tabelle 3.8: Mittlere Leistung \bar{P} und mittlerer Reibungskoeffizient $\bar{\mu}$ bei den Versuchen Nr. 1 bis 8.

Wird die mittlere Leistung \bar{P} gegen die Anpresskraft und die Relativgeschwindigkeit aufgetragen, so sollte sich dabei wegen (2.3) ein linearer Zusammenhang ergeben. Abbildung 3.24 zeigt die entsprechende Grafik inklusive einem linearen Fit. Als Fit-Gleichung wurde (2.3) verwendet. Sowohl aus dem Fit als auch durch Mittelwertbildung über die $\bar{\mu}$ aus der Tabelle ergeben sich die Reibungskoeffizienten

$$\mu = 0,4371 \qquad \bar{\mu} = 0,4277 \pm 0,1984 (\pm 46,4\%) \qquad (3.7)$$

An der sehr großen Streuung beim ermittelten Reibungskoeffizienten ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der Versuchsreihe 2 nicht zufriedenstellend sind. Diese recht große Standard-Abweichung spiegelt sich in einem Korrelationskoeffizienten von lediglich $R^2 = 0,77$ wider. Vergleicht man darüber hinaus das hier ermittelte μ bzw. $\bar{\mu}$, mit dem aus der Versuchsreihe 1, so stellt man fest, dass es eine Abweichung von rund 50% zwischen beiden Resultaten gibt. Daraus muss gefolgert werden, dass sich mit der Versuchsapparatur keine gut reproduzierbaren Messdaten erzeugen lassen.

3.3.3.4 Aufheizrate versus Abrieb pro Stunde

Auch bei der Auswertung der Versuchsreihe 2 wurde die Aufheizrate (Abbildung 3.22) gegen den zeitlichen Masseabrieb (Abbildung 3.23) – sortiert nach Anpresskraft – aufgetragen. In Abbildung 3.25 ist das Ergebnis zu sehen. Dieses Ergebnis präsentiert sich völlig anders als das entsprechende Resultat aus der ersten Messkampagne. Wächst die Aufheizrate quadratisch mit der Materialabriebrate bei der Versuchsreihe 1, so fällt diese bei der 2. Versuchsreihe mit der Abriebrate und zwar sowohl linear als auch quadratisch. Erneut gab es keine reproduzierbaren Ergebnisse. Allgemeingültige und belastbare physikalische Aussagen sind aufgrund dieser Messdaten nicht möglich.

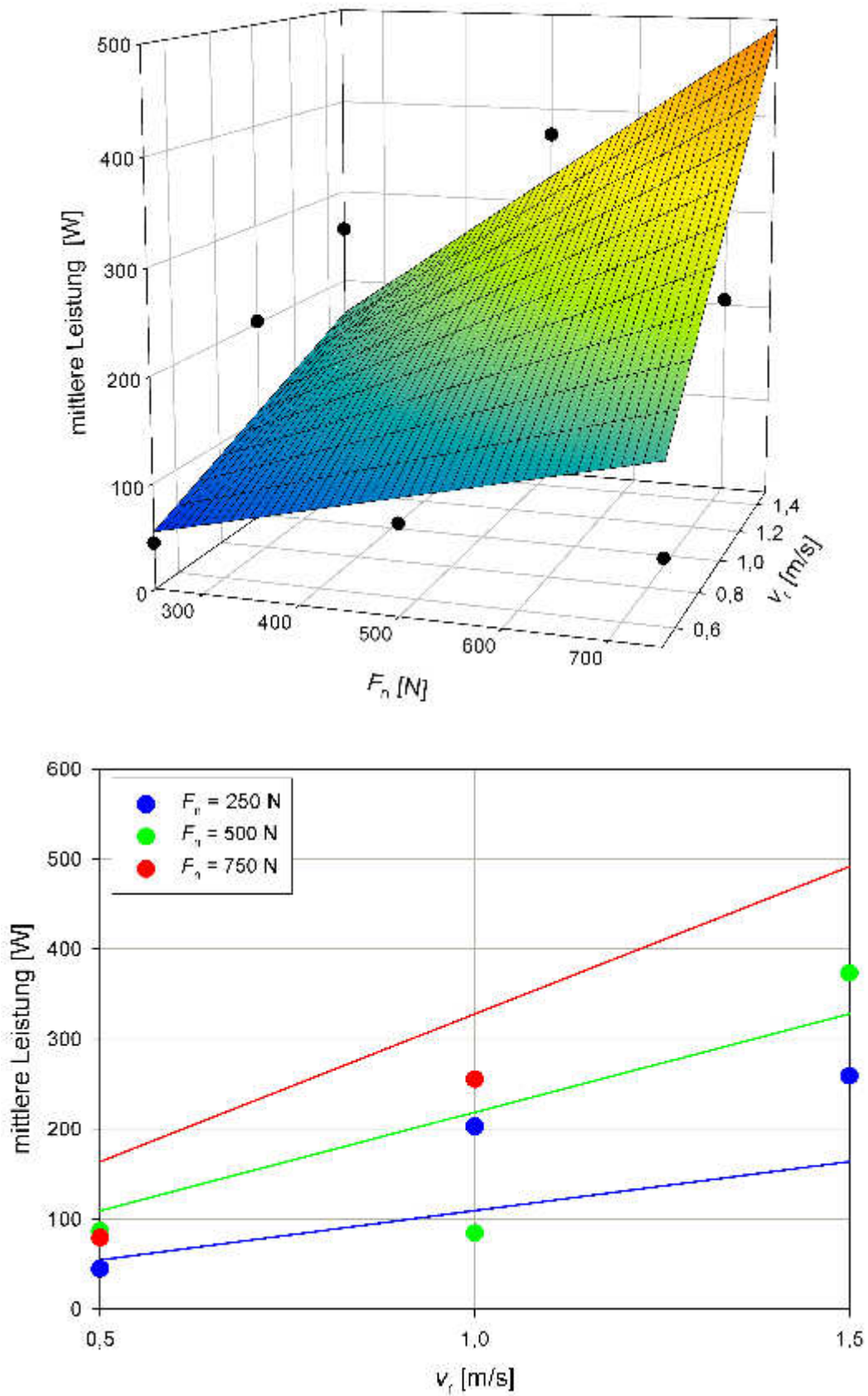


Abbildung 3.24: Mittlere Leistung als Funktion von F_n und v_r . Oben ist der Zusammenhang mitsamt einem Fit als 3D-Grafik dargestellt, unten als 2D-Grafik.

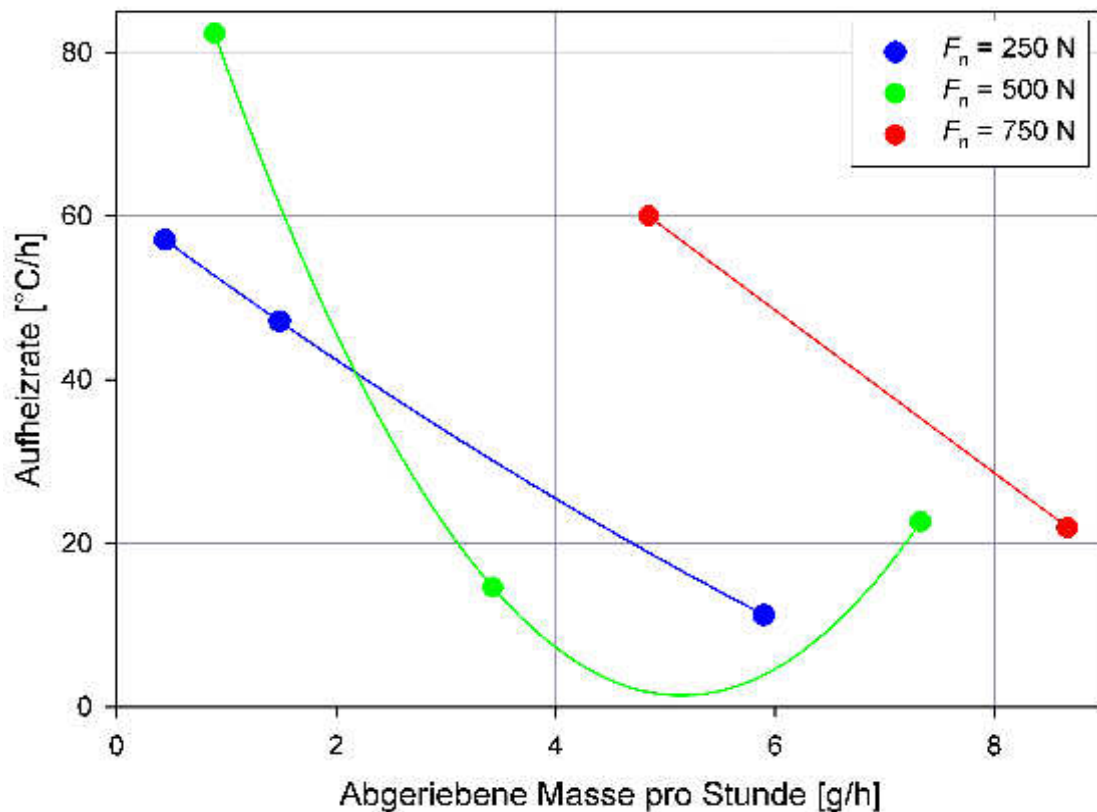


Abbildung 3.25: Aufheizrate als Funktion des zeitlichen Masseabriebs, separiert nach der Anpresskraft.

3.3.3.5 Betrachtung der Energiebilanz

Wie bei der Auswertung der Messdaten aus Versuchsreihe 1 wurden auch für die Versuchsreihe 2 die Energiebilanzen für die Einzelversuche aufgestellt.

3.3.3.5.1 Gesamtenergie

Die bei einem Versuch insgesamt in den Reibungsprozess gesteckte Energie E ergibt sich aus der Integration über die Leistungskurve. Die Integration wurde mit einer selbst entwickelten Software durchgeführt. In Zeile 2 der Tabelle 3.9 sind die so berechneten Energien gezeigt. Wie erwartet steigt die zugeführte Energie mit Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit (bis auf den Ausreißer Versuch Nr. 5).

3.3.3.5.2 Temperaturerhöhung

In Zeile 3 der Tabelle 3.9 ist der Energieanteil aufgelistet, der für die Temperatur der Reibscheiben und Basisplatten zum Zeitpunkt des Reibungsendes sorgt. Berechnet wurde dieser Energieanteil wieder mit Formel (3.2). Bis auf den zu-

vor genannten Ausreißer steigt auch dieser Energieanteil mit Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit.

3.3.3.5.3 Verlust durch Strahlung

Der Energieverlust durch Strahlung V_S für die Versuche der zweiten Messkampagne wurde mit Hilfe der Gleichung (3.3) bestimmt. Der dazu benötigte zeitliche Temperaturverlauf an der Oberfläche der Reibscheiben stammt aus den Aufnahmen des Mikrobolometers. Die erstellte Auswerte-Software lieferte als Energieverlust durch Strahlung die Zahlen in Zeile 5 der Tabelle 3.9.

3.3.3.5.4 Verlust durch Konvektion

Der Energieverlust durch Konvektion V_K wird wieder mit Formel (2.5) berechnet. Dazu werden die Zahlen aus Tabelle 3.4 verwendet. Dies ist zulässig weil die eingestellte Relativgeschwindigkeit bei den Einzelversuchen der Versuchsreihen 1 und 2 identisch gewählt wurden. Alle weiteren Annahmen zur Berechnung des Energieverlustes durch Konvektion wurden entsprechend der Betrachtung aus Abschnitt 3.2.3.5.4 gemacht. Die Konvektionsverluste sind in Zeile 6 der Tabelle 3.9 aufgelistet.

3.3.3.5.5 Verlust durch Wärmeleitung

Auch der Energieverlust durch Wärmeleitung in benachbarte Teile des experimentellen Aufbaus wurde analog zu Versuchsreihe 1 bestimmt. Es gelten Formel (3.4) und die in Abschnitt 3.2.3.5.5 gemachten weiteren Angaben. In Zeile 7 der Tabelle 3.9 sind die V_L der Einzelversuche aufgelistet.

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
E [kJ]	328,8	1.474,6	1.901,6	634,0	597,1	2.703,0	599,1	1.829,3
E_W [kJ]	51,9	259,0	312,8	129,4	80,7	443,7	93,4	325,1
E_V [kJ]	21,7	5,4	1,6	26,7	12,2	3,2	32,6	17,4
V_S [kJ]	79,0	345,7	475,5	140,0*	88,4	813,8	121,8	394,6
V_K [kJ]	116,3	563,8	969,1	195,0*	191,6	1.365,5	181,9	672,3
V_L [kJ]	116,2	432,9	518,4	200,0*	124,2	726,7	229,6	480,8
ΔE [kJ]	-56,3	-132,2	-375,8	-57,1*	100,0	-649,9	-60,3	-60,9
ΔE [%]	-17,1	9,0	-19,8	9,0*	16,7	-24,0	-10,0	-3,3

Tabelle 3.9: Energieanteile der Energiebilanzen der einzelnen Reibungsversuche. In den letzten beiden Zeile der Tabelle ist die Differenz zwischen der verbrauchten und aufgewendeten Energie angegeben. Die mit * gekennzeichneten Werte sind Schätzungen (für diesen Versuch fehlen die Aufnahmen des Mikrobolometers).

3.3.3.5.6 Verformungsarbeit

Zur Abschätzung der Verformungsarbeit wurde erneut Gleichung (3.6) herangezogen und die in Abschnitt 3.2.3.5.6 durchgeführten Überlegungen sowie die in Tabelle 3.7 angegebenen abgeriebenen Massen Δm . Damit ergaben sich die in Zeile 4 der Tabelle 3.9 gezeigten Energiewerte.

3.3.4 Diskussion

Die Resultate der Versuchsreihe 2 streuen noch mehr als die Ergebnisse der Versuchsreihe 1. Das Ziel, mit der Versuchsreihe 2 aussagekräftigere bzw. reproduzierbarere Ergebnisse zu generieren, wurde klar verfehlt. Teilweise (Abriebrate versus Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit) widersprechen sich die Resultate der beiden Messkampagnen sogar. Die Energiebilanzen der Einzelversuche sind nur zum Teil (50%) zufriedenstellend. Der Reibungskoeffizient wurde durch die Versuchsreihe 2 deutlich größer bestimmt als bei Versuchsreihe 1 und mit einer erheblich höheren Unsicherheit von gut 46%.

Trägt man den relativen Anteil der in die Erwärmung geflossene Energie aller 17 Einzelversuche gegen die aufgebrauchte Gesamtenergie auf, so erhält man das Diagramm aus Abbildung 3.26, oben. Man erkennt im Bild, dass der Energieanteil, welcher zur Erwärmung führt, mit der Gesamtenergie sinkt. Er ist in der Regel kleiner als 20% der Gesamtenergie. Dafür gibt es zwei Gründe: Zum einen steigt der Wärmeverlust stark überproportional mit dem erreichten Temperaturniveau an. Zum anderen bedeutet eine höhere Gesamtenergie bei Versuchsreihe 1 oft auch längere Reibdauer. Bei langer Reibdauer steigt gegen Versuchsende die Temperatur kaum noch, jedoch ist die Wärmeverlustrate vergleichsweise hoch. Trägt man den relativen Anteil der in die Erwärmung geflossene Energie gegen die Reibdauer auf, so ergibt sich das Diagramm in Abbildung 3.26, unten. Deutlich ist zu erkennen, wie der Energieanteil, welcher zur Erwärmung führt, mit der Reibdauer fällt.

Das Fazit, welches aus den experimentellen Untersuchungen gezogen werden kann, lautet wie folgt:

1. Der experimentelle Aufbau liefert keine zufrieden stellenden Messwerte.
2. Der aus den Versuchen abgeleitete Reibungskoeffizient liegt zwischen $\mu = 0,24 < 0,63$ für die beiden Stahl-Reibscheiben.
3. Die durch den Reibvorgang aufgebrauchte Gesamtenergie steigt mit der Anpresskraft und der Relativgeschwindigkeit.
4. Die erreichte Maximaltemperatur steigt mit der Anpresskraft und der Relativgeschwindigkeit.
5. Der in die Erwärmung fließende relative Energieanteil beträgt etwa 20% und weniger. Dieser relative Anteil fällt – bei ansonsten konstanten Bedingungen – mit zunehmender Gesamtenergie (Temperatur) und Reibdauer und umgekehrt.

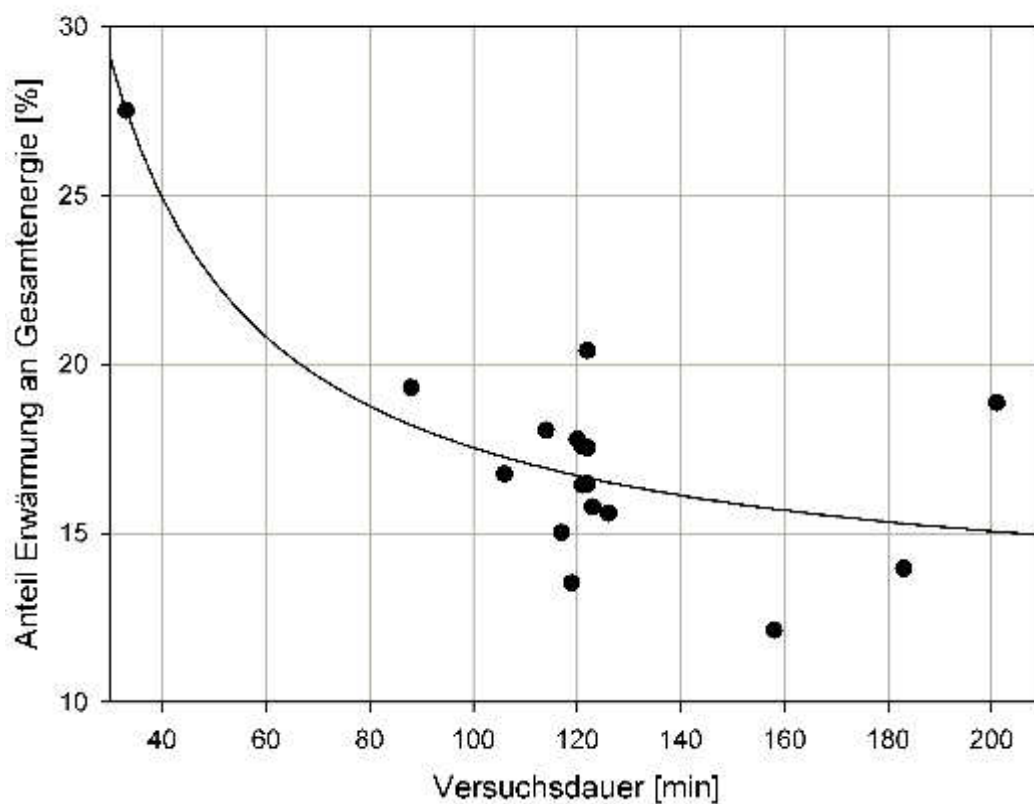
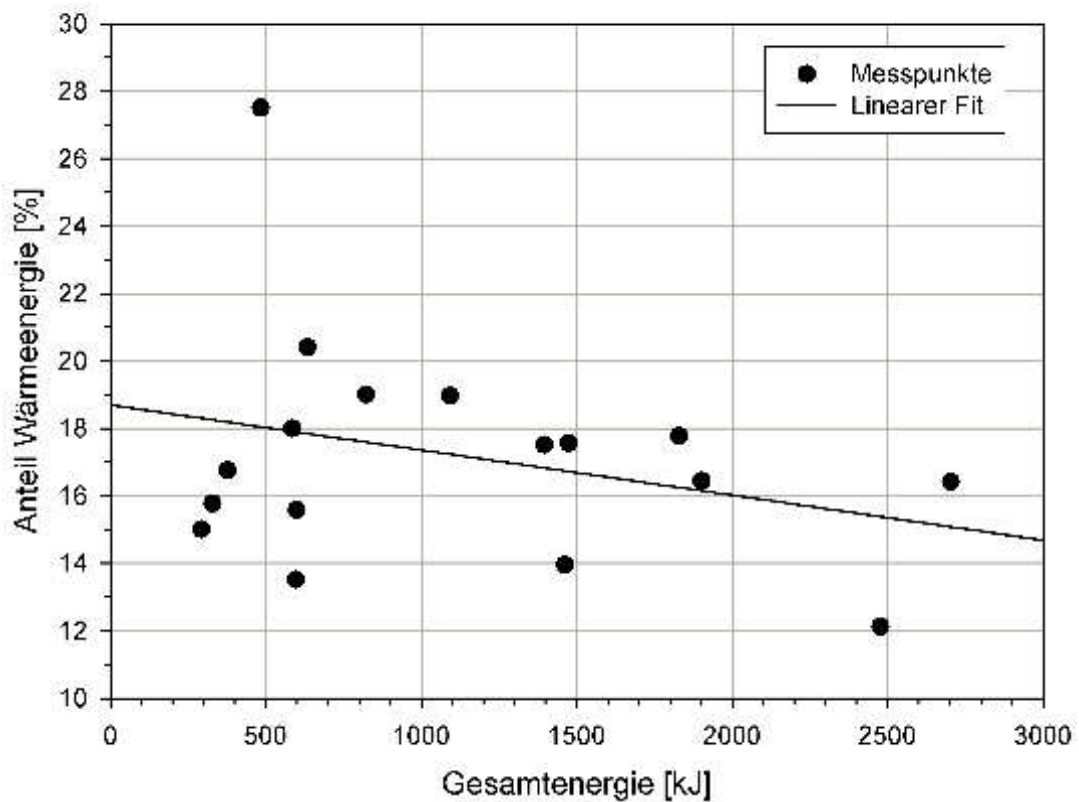


Abbildung 3.26: Relativer Anteil der Energie E_W , welcher für die Erwärmung der Reib- und Basisplatten verantwortlich ist versus der aufgebrachtten Gesamtenergie E (oben) und versus der Reibdauer (unten).

Kapitel 4

Modellierung der Versuche

4.1 Ziel der Modellierung

Die Modellierung eines physikalischen Vorganges mit Hilfe eines Rechners gestattet in der Regel ein tieferes Verständnis der Physik, die dem Vorgang zugrunde liegt. Auf diese Art und Weise können zuweilen Erklärungen für ungewöhnliche Beobachtungen gefunden werden, die sich allein aufgrund von Messergebnissen nicht erklären lassen. Auch im Rahmen dieses Projektes ist dies ein erklärtes Ziel der Experimentmodellierung.

Wichtiger als der vorgenannte Punkt ist die Möglichkeit der Extrapolation des physikalischen Vorganges auf neue Situationen. Können die Versuchsergebnisse im Modell korrekt wiedergegeben werden, bedeutet dies, dass der physikalische Vorgang richtig modelliert wurde. Mit diesem Wissen lassen sich andere Gegebenheiten (z. B. eine von Reibvorgängen betroffene Stelle an einer Maschine) modellieren und damit sicherheitsrelevante Vorhersagen treffen.

Als Modellierungswerkzeug wurde das Programm COMSOL ausgewählt bzw. angeschafft. Im Folgenden wird diese Software beschrieben.

4.2 Das Programm COMSOL

Mit COMSOL kann jeder Vorgang in der Natur modelliert werden, der sich mit Hilfe von Differentialgleichungen beschreiben lässt. COMSOL zerlegt dabei das betrachtete Objekt in viele kleine Untervolumina (finite Elemente) und löst für jeden Zeitpunkt und jedes Untervolumen die relevanten Gleichungen. Das Programm COMSOL ist aktuell das Werkzeug der Wahl wenn es um Simulationen mit Hilfe von finiten Elementen geht. Die Zahl der Anwender verbreitete sich in den letzten Jahren rasant.

4.2.1 Comsol Multiphysics

COMSOL Multiphysics umfasst die COMSOL Desktop Benutzeroberfläche (GUI) und eine Reihe von Interfaces mit den dazugehörigen Modellierungswerkzeugen (Phy-

sikinterfaces) zur Modellierung üblicher Anwendungen. Ein Softwarepaket aus Zusatzprodukten erweitert diese multiphysikalische Simulationsplattform um Modellierungsmöglichkeiten für spezielle Anwendungsgebiete sowie um Schnittstellen zu Fremd-Software und deren Funktionen. COMSOL Multiphysics ist erforderlich, um diese Zusatzprodukte ausführen zu können. Die physikspezifischen Module erweitern die Basis-Physikinterfaces von COMSOL Multiphysics und stellen weitere Physikinterfaces für elektrische, mechanische, strömungsmechanische und chemische Anwendungen bereit. Beliebig viele Module können nahtlos kombiniert werden, um anspruchsvolle multiphysikalische Aufgabenstellungen zu lösen. Die Mehrzweck-Zusatzprodukte ermöglichen Optimierung und Partikelverfolgung und bieten Zugriff auf eine umfangreiche Materialbibliothek. COMSOL lässt sich über die Schnittstellen-Zusatzprodukte nahtlos in Fremd-Software, wie z. B. branchenübliche CAD-Software, integrieren.

4.2.2 Heat Transfer Module

Um das spezielle Problem der Entstehung von heißen Oberflächen durch Reibvorgänge modellieren zu können, ist das Zusatzprodukt „Heat Transfer Module“ erforderlich, weshalb dieses ebenfalls angeschafft wurde. Das Heat Transfer Module bietet Hilfestellung bei der Untersuchung der Auswirkungen von Erwärmungs- und Kühlvorgängen in Geräten, Bauteilen oder Prozessen. Das Modul enthält geeignete Simulations-Tools, mit denen die Mechanismen des Wärmetransports (Leitung, Konvektion, Strahlung) untersucht werden können. Diese Tools werden häufig auch zusammen mit anderen physikalischen Bereichen wie Strukturmechanik, Strömungsmechanik, Elektromagnetismus und chemische Reaktionen verwendet. Vor diesem Hintergrund fungiert das Heat Transfer Module als Plattform für alle denkbaren Industriezweige und Anwendungen, bei denen die Erzeugung, der Verbrauch oder der Transport von Wärme oder Energie im Mittelpunkt des untersuchten Prozesses steht oder zumindest wesentlichen Anteil daran hat. Das Heat Transfer Module ist mit einer internen Materialdatenbank ausgestattet, die die Materialeigenschaften diverser gängiger Fluide und Gase sowie eine Vielzahl von thermodynamischen Daten enthält, die für eine genaue Analyse erforderlich sind. Angegeben sind u. a. Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Dichte. Die Material Library ist ebenfalls eine Quelle für Materialeigenschaften. Sie enthält die Daten oder algebraischen Beziehungen von mehr als 2.500 Feststoffen. Viele dieser Eigenschaften (z. B. E-Modul und elektrische Leitfähigkeit) sind temperaturabhängig. Das Heat Transfer Module unterstützt außerdem den Import von thermodynamischen und anderen Materialdaten aus Excel und MATLAB. Über den Schnittstellenstandard CAPE-OPEN lassen sich zudem Verbindungen zu externen thermodynamischen Datenbanken herstellen.

4.2.3 CAD Import Module

Der experimentelle Aufbau für das Projekt wurde mit dem CAD-Programm Autodesk Inventor erstellt. Um die Geometrie des Aufbaus für die Simulation leicht in COMSOL Multiphysics einbinden zu können, wurde das Zusatzprodukt „CAD Import Module“ gekauft. Das CAD Import Module unterstützt den Import diverser Dateiformate. Dazu

zählen u. a. Parasolid- und ACIS-Formate sowie Standardformate wie STEP und IGES. Diese Dateiformate werden von nahezu allen CAD-Programmpaketen unterstützt. Dateien lassen sich problemlos in COMSOL Multiphysics importieren, wenn sie in einem dieser Formate gespeichert werden. Darüber hinaus bietet das CAD Import Module die Möglichkeit, native Dateiformate verschiedener CAD-Systeme zu importieren. Dazu zählen Inventor, PTC Creo Parametric und SolidWorks. Mit dem optional verfügbaren Dateimport für CATIA V5 (File Import) kann auch das native Dateiformat für dieses Systems importiert werden. Nach Installation des CAD Import Module werden alle CAD-Dateien automatisch in eine Parasolid-Geometrie konvertiert. Dabei kommt die Parasolid-Geometrie-Engine zum Einsatz, die im Lieferumfang des Moduls enthalten ist. Diese Geometrien können anschließend mit diversen Tools von COMSOL Multiphysics sowie auch im CAD Import Module bearbeitet werden. Dabei können bewusste Änderungen der Geometrie vorgenommen werden. Es ist möglich, die Geometrie zu reparieren oder Elemente zu entfernen. Mit Comsol Multiphysics können auch Phänomene im Umfeld dieses importierten Objekt modelliert werden, z. B. die Luftströmung. Ein, die CAD-Konstruktion umfassendes, Volumen kann direkt in COMSOL Multiphysics erzeugt werden. Nach Abschluss der Änderungen werden die Geometrien vom CAD Import Module dann an das Parasolid- oder ACIS-Dateiformat exportiert und diese Dateien können daraufhin bei Bedarf in andere Tools importiert werden.

4.3 Modellierung der Experimente

4.3.1 Modellierung mit der original CAD-Konstruktion

Nachdem im ersten Arbeitsschritt die Festlegung der Art des Problems erfolgte (dreidimensional, Wärmetransport in Feststoffen, zeitabhängig), wurde mit Hilfe des CAD Import Module die Autodesk Inventor Konstruktion, die auch für die Anfertigung des experimentellen Aufbaus verwendet wurde, in Comsol Multiphysics importiert. Abbildung 4.1 zeigt das Programmfenster mit der importieren CAD-Datei.

Im nächsten Arbeitsschritt wurden sogenannte „Point Probes“ gesetzt. Das sind Punkte in der Geometrie, für die später die Temperatur-Zeit-Abhängigkeit über den Simulationszeitraum ausgegeben werden. Die Point Probes wurden ortsidentisch zu den Thermoelementen im Experiment gesetzt. Auf diese Art und Weise kann direkt der berechnete und gemessene zeitliche Temperaturverlauf miteinander verglichen werden.

Material	λ [W/m·K]	ρ [kg/m ³]	c [J/kg·K]
Kalziumsilikat	0,44	1.400	1.000
Macor	1,46	2.520	750
Stahl 4305	15,0	7.900	500
Stahl 1.0038	44,5	7.850	475

Tabelle 4.1: Physikalische Eigenschaften der Reibungswärmeapparaturmaterialien.

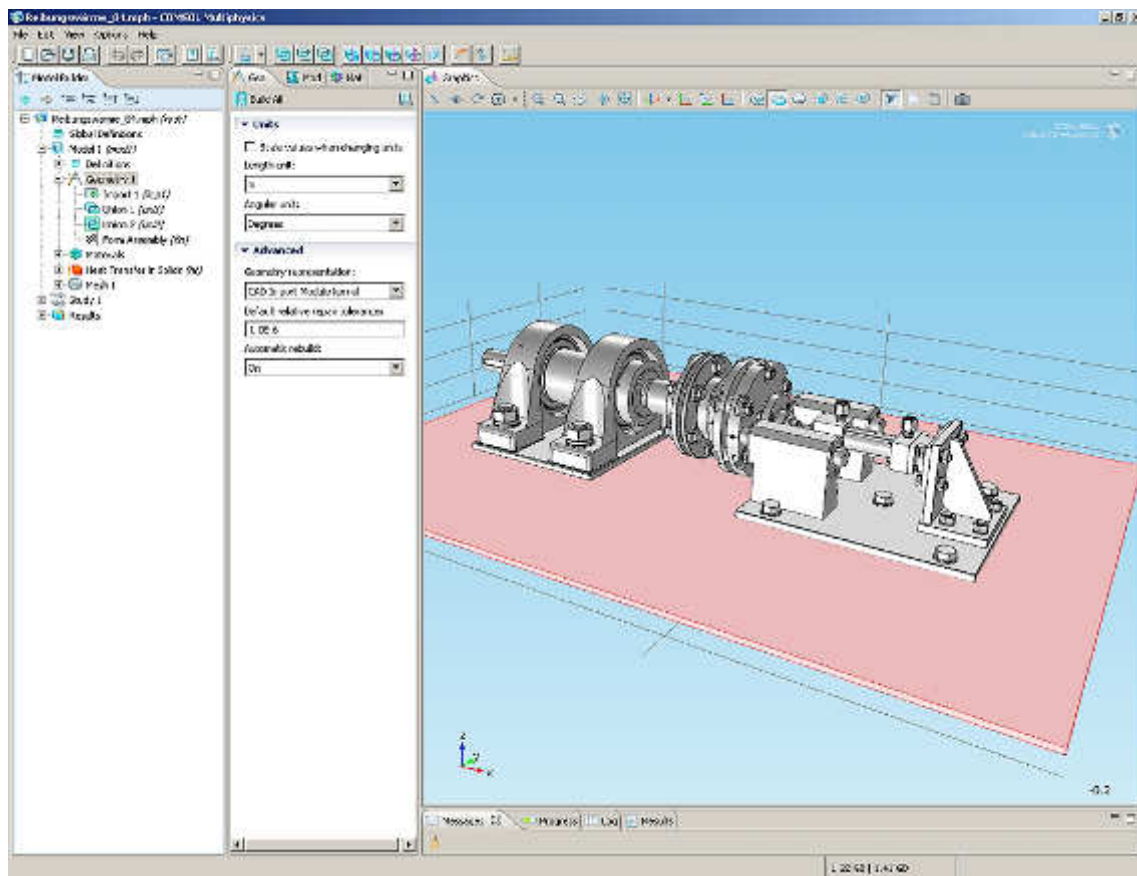


Abbildung 4.1: Importierte Geometrie des Versuchsaufbaus in den Model-Builder von COMSOL Multiphysics.

Anschließend mussten der Geometrie die Materialien zugeordnet werden, aus denen sie gefertigt ist. Im Wesentlichen besteht der betrachtete Teil der Apparatur aus den Materialien in Tabelle 4.1.

Der nachfolgende Arbeitsschritt beinhaltete, Wärmeentstehung und -verluste für das Modell festzulegen. Das bedeutete zunächst, dass die Wärmequelle im Modell definiert wird. Bei Versuch Nr. 1 in der Versuchsreihe 1 wurde eine mittlere zugeführte Leistung von $\bar{P} = 41,6 \text{ W}$ gemessen (Tabelle 3.3). Im Heat Transfer Module wurde nun eine Fläche definiert, die diese Wärmeleistung emittiert. Sinnvollerweise wurde diese Fläche mit der Reibfläche der Apparatur identifiziert. Da die Eingabe als Leistungsdichte q , also in der Einheit W/m^2 erfolgen musste, wurde das gegebene \bar{P} auf diese Einheit umgerechnet:

$$Q = \frac{\bar{P}}{\pi \cdot r^2} = \frac{41,6}{\pi \cdot 0,05^2} = 5.296,7 \text{ W/m}^2 \quad (4.1)$$

Mit r ist hier der Radius der rotierenden Reibscheibe gemeint. Nachdem die Wärmequelle definiert wurde, mussten die Wärmeverlustmechanismen modelliert werden. Das Heat Transfer Module bietet verschiedene Möglichkeiten an, Konvektions- und Strahlungsverlust zu berücksichtigen. Zunächst wurden die einfachste Methode ausgewählt.

Es wurde eine Wärmeabstrahlung in die Umgebung für die gesamte Oberfläche der Apparatur festgelegt mit einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,96$. Für die schwarz gespritzten Anlagenteile trifft dieser Wert exakt zu, für die restlichen nicht. Da Letztgenannte aber nicht sehr warm wurden, spielt der Verlust durch Wärmestrahlung dort eine untergeordnete Rolle.

Der Wärmeverlust durch Konvektion wurde gemäß (2.5) und der Angabe eine Wärmeübergangskoeffizienten von $k = 11,08 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$ (siehe Tabelle 3.4) modelliert, wobei die gesamte frei liegende Oberfläche der Apparatur nach diesem Gesetz Wärme verlieren sollte. Das Heat Transfer Module bietet alternativ die Möglichkeit an, die Geometrie mit einer Lufthülle zu umgeben und dann natürliche Konvektion zu berechnen. Dies ist aber mit einem erheblichen höherem Rechenaufwand verbunden, weshalb dies zunächst verworfen wurde.

Der Wärmeverlust durch Wärmeleitung muss nicht explizit modelliert werden. Wenn COMSOL die Materialeigenschaften bekannt sind, wird der Wärmetransport durch das Material automatisch berechnet.

Im nächsten Arbeitsschritt muss die Geometrie in finite Elemente zerlegt werden. Diese Aufgabe kann über den Menüpunkt „Mesh“ gelöst werden. Man kann ein freies Tetraeder-Netz auswählen in verschiedenen Feinheiten. An dieser Stelle stieß die Modellierung mit der originalen CAD-Konstruktion an ihre Grenzen. Dadurch, dass die

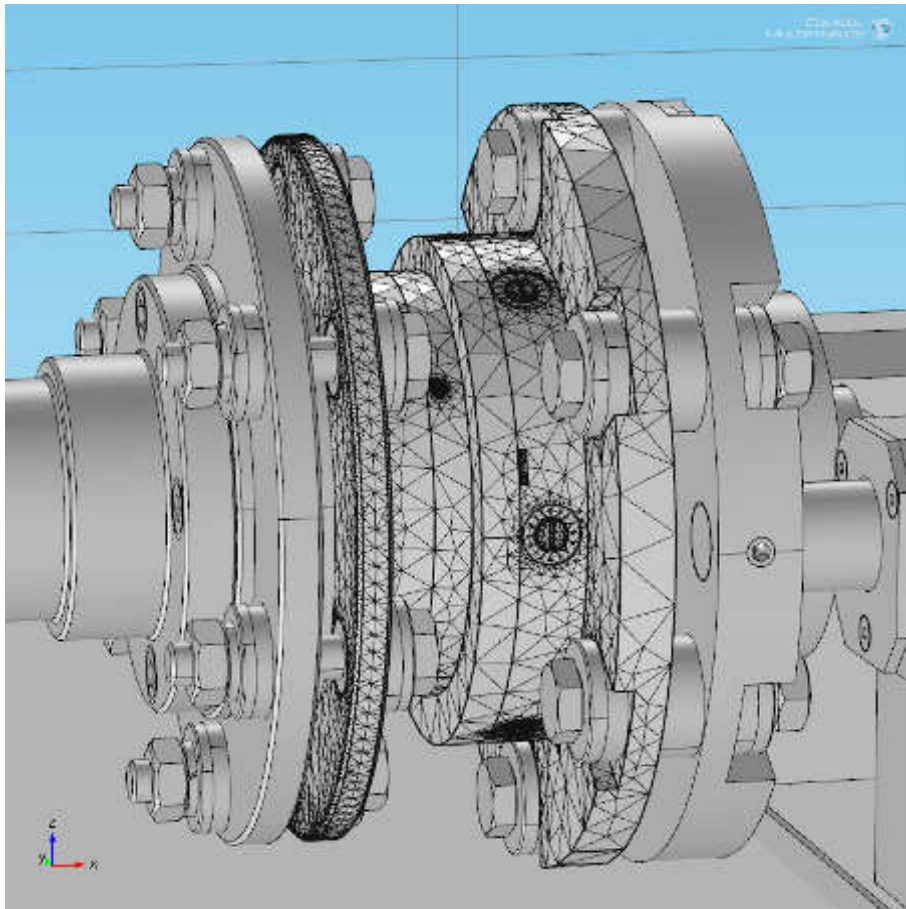


Abbildung 4.2: Zerlegung der Reibscheiben und Basisplatten in finite Elemente.

Geometrie sehr viele Details enthält, wurde ein Netz von unzähligen Tetraedern erzeugt, was die Rechenkapazität des Computers überforderte. Aus diesem Grund wurde die Simulation zunächst nur auf die beiden Reibscheiben und Basisplatten beschränkt. Die Wärmeleitung durch die Keramiken wurde also zunächst vernachlässigt. Die Zerlegung der Reibscheiben und Basisplatten in Tetraeder zeigt Abbildung 4.2.

Nach Start der Berechnung lag nach ca. 45 Minuten das Ergebnis der Simulation vor. Es wurde der Zeitraum von 0s bis 7.020s simuliert, wobei das Programm nach jeweils 10 Sekunden des simulierten Vorgangs ein grafisches Ergebnis ausgab. Das letzte dieser grafischen Ergebnisse, also die Temperaturverteilung auf den Oberflächen der Reibscheiben und Basisplatten nach 7.020s, zeigt Abbildung 4.3.

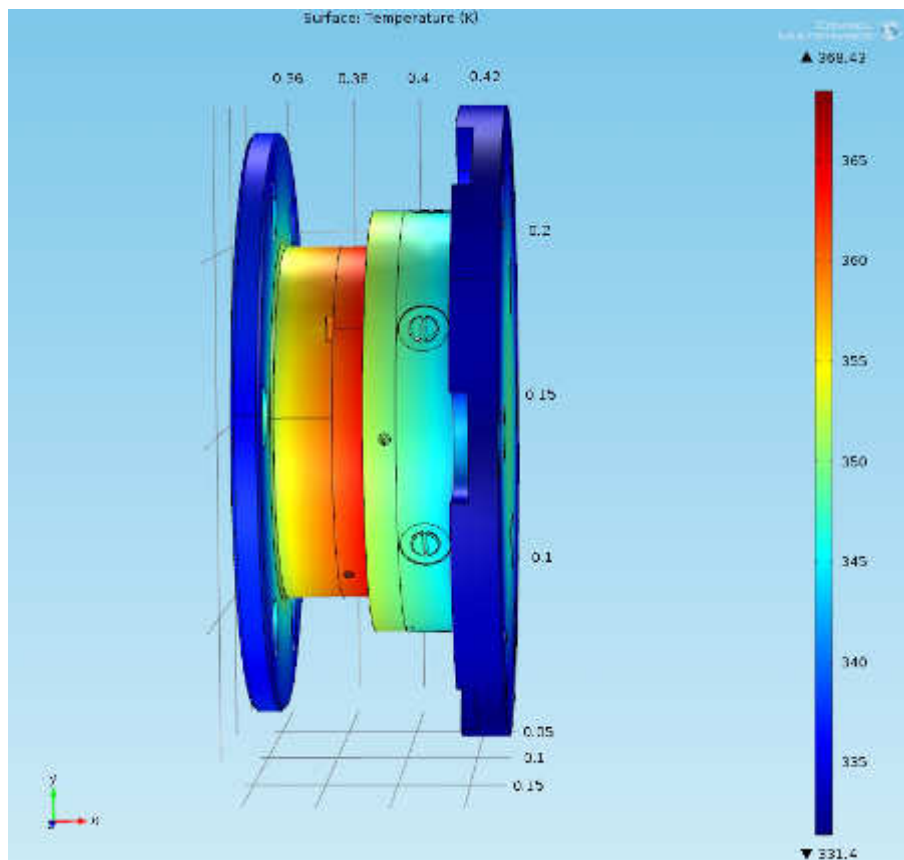


Abbildung 4.3: Berechnete Oberflächentemperaturverteilung auf Reibscheiben und Basisplatten nach 7.020s bei Versuch Nr. 1 der Versuchsreihe 1.

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die berechnete maximale Temperatur (ca. 92 °C) zum Zeitpunkt $t = 7.020$ s, also nach knapp 2 Stunden Reibdauer, weit über derjenigen liegt, welche im Experiment ermittelt wurde (46 °C, Tabelle 3.2, Abbildung 3.1, oben). Schaut man in Tabelle 3.5 den Wert für den Wärmeverlust durch Wärmeleitung $V_L = 75,3$ kJ an und vergleicht diesen mit den anderen Energieanteilen aus Versuch Nr. 1 dann wird schnell klar, warum das Ergebnis der Simulation zu hoch ausgefallen ist: Der Verlust durch Wärmeleitung über die Keramiken beträgt rund 1/4 der gesamten zugeführten Wärme. Da dieser bei der Simulation nicht berücksichtigt wurde, musste die berechnete maximale Temperatur zu groß werden. Daraus folgte, dass der Verlust

durch Wärmeleitung nicht vernachlässigt werden kann. Es musste also eine Möglichkeit geschaffen werden, die Geometrie des Versuchsaufbaus zu vereinfachen.

4.3.2 Modellierung mit einer simpleren CAD-Konstruktion

COMSOL Multiphysics und das CAD Import Module bieten einige Tools an, um importierte CAD-Geometrien zu vereinfachen. Mit diesen Tools wurde lange Zeit versucht, die original CAD-Konstruktion aus Abbildung 4.1 zu vereinfachen. Kleine Ecken, Kanten, Schrauben und Aussparungen sollten entfernt und gefüllt sowie viele Grenzflächen ignoriert werden. Leider funktionierte dies nur bedingt, weshalb keine deutliche Verringerung der Tetraederanzahl bei der Zerlegung in finite Elemente erreicht werden konnte. Auch diverse Rückfragen bei Deutschen COMSOL-Niederlassung in Göttingen brachten keine Abhilfe.

Es blieb also nichts anderes übrig, als die CAD-Konstruktion stark zu vereinfachen [4]. Sämtliche Details wie Schrauben, Bohrungen, kleine Kanten etc. wurden entfernt. Teile, die für den Wärmetransport und -strahlung sowie die Konvektion wichtig sind, wurden beibehalten und teilweise zu größeren Einheiten zusammengefügt. Die Kugellager und die Antriebswelle sowie die Hydraulik und die zugehörigen Teile wurden durch je einen Stahlzylinder ersetzt. In Abbildung 4.4, links ist die vereinfachte Geometrie zu sehen.

Der Geometrie wurden wieder die Materialien aus Tabelle 4.1 zugeordnet. Die Wärmequelle und die Verlustmechanismen wurden ebenso modelliert wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben. Für die simplere Geometrie konnte COMSOL ein Zerlegung in Tetraeder finden (Abbildung 4.4, rechts).

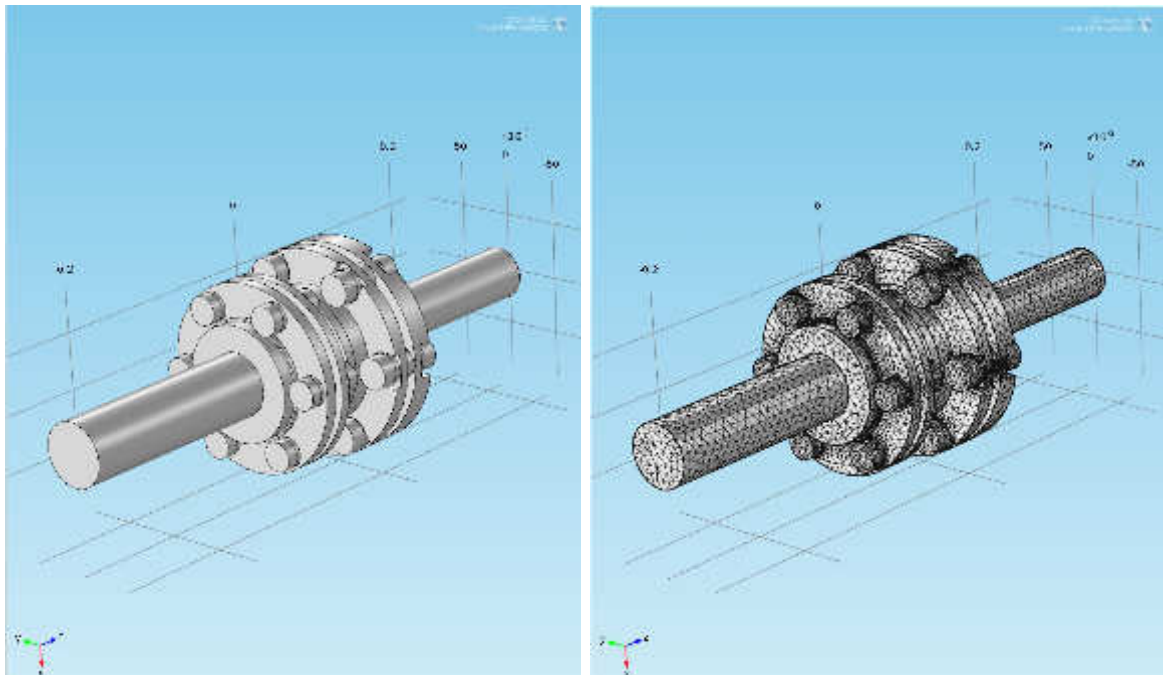


Abbildung 4.4: Vereinfachte CAD-Konstruktion des experimentellen Aufbaus (links) sowie die in finite Elemente zerlegte Geometrie (rechts).

Wieder wurde die gesamte Reibdauer bei Versuch Nr. 1 der Versuchsreihe 1 simuliert, also 7.020 s. Die Ergebnissausgabe erfolgte in 10 s-Intervallen. Aufgrund der immer noch sehr zahlreichen finiten Elemente dauerte eine Berechnung eine knappe Stunde.

In Abbildung 4.5 sind die berechneten und gemessenen zeitlichen Temperaturverläufe vergleichend dargestellt. Man erkennt, dass eine gute Übereinstimmung erzielt werden konnte. Da es beim Experiment zu einer erheblichen Schwankung in der eingetragenen Leistung kam (siehe Abbildung 3.1, oben), steigen auch die Temperaturkurven nicht so gleichmäßig an wie in der Modellrechnung. Beim Versuch war die eingetragene Leistung zunächst sehr hoch, was mit einem vergleichsweise großen Reibungskoeffizienten zu Beginn erklärt werden kann („Einschleifen“). Für diesen Zeitbereich liegen die gemessenen Temperaturen über den berechneten. Nach wenigen Minuten war der Einschleifvorgang beendet und die eingetragene Leistung sank, wobei die Schwankungen geringer wurden. Für diese Periode stimmen gemessene und berechnete Temperaturen sehr gut überein. In der ca. letzten Stunde des Versuchs sank die eingetragene Leistung unter den Wert für die mittlere Leistung ab, weshalb die gemessenen Temperaturen etwas unter den berechneten liegen.

Die Messstelle T_0 an der Oberfläche der pressenden Basisplatte zeigt zu niedrige Temperaturen an weil das Thermoelement einer deutlichen Luftbewegung ausgesetzt war.

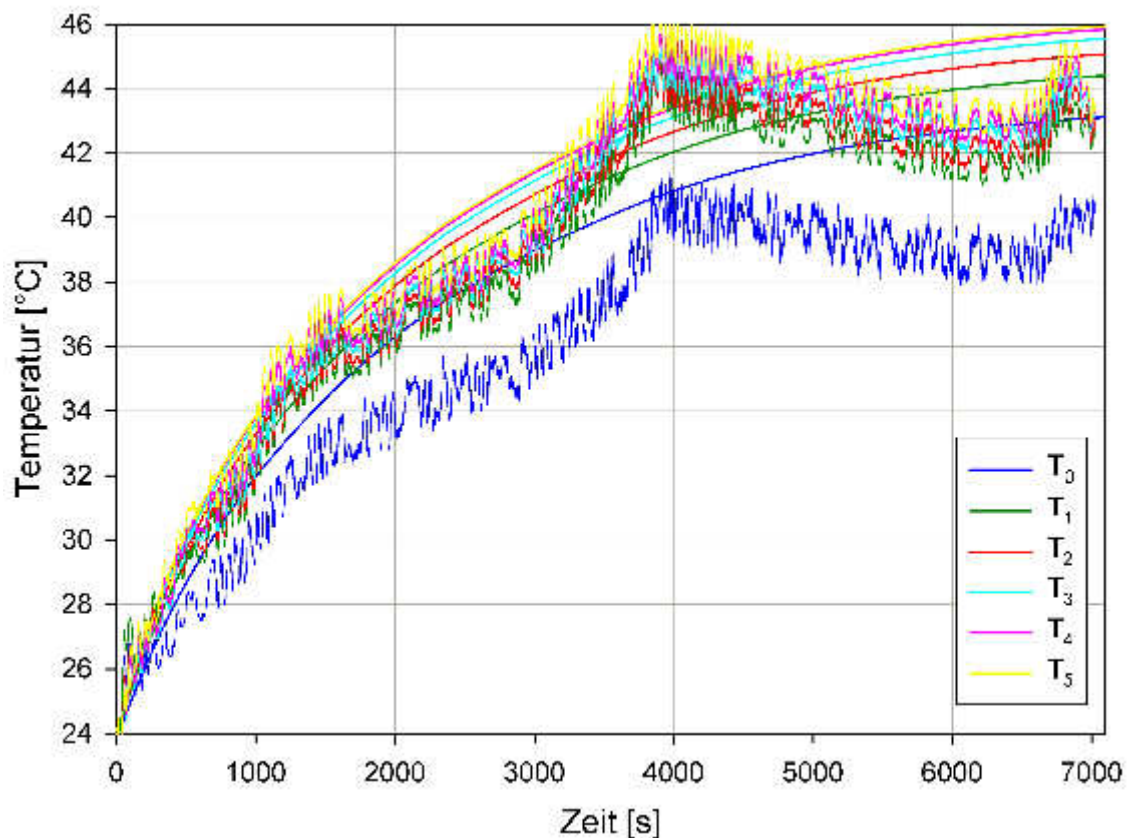


Abbildung 4.5: Berechnete und gemessene zeitliche Temperaturverläufe bei Versuch Nr. 1 der Versuchsreihe 1.

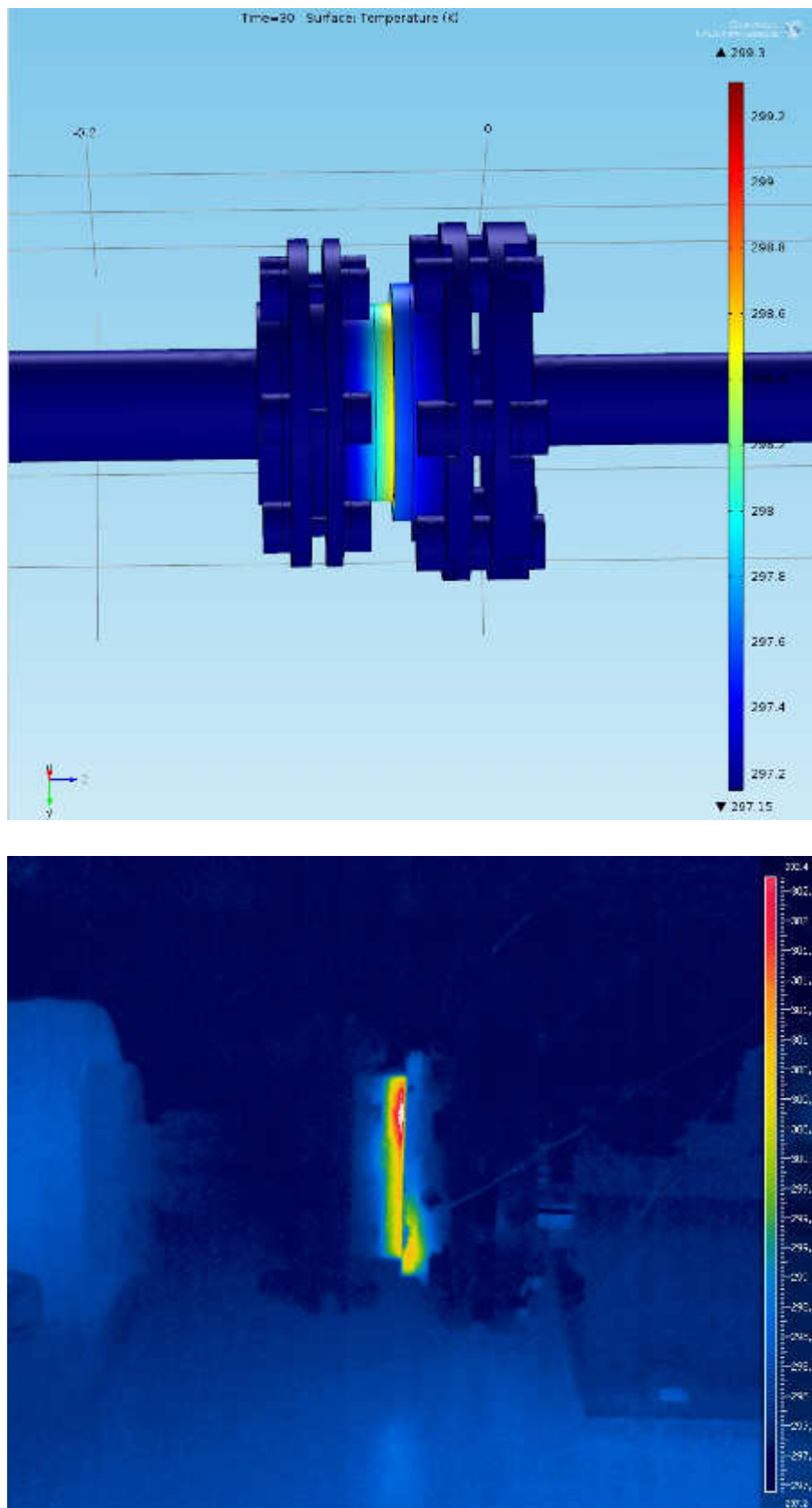


Abbildung 4.6: Vergleich zwischen Modellrechnung und Infrarotaufnahme nach 30 s Reibdauer (Versuch Nr. 1, Versuchsreihe 1).

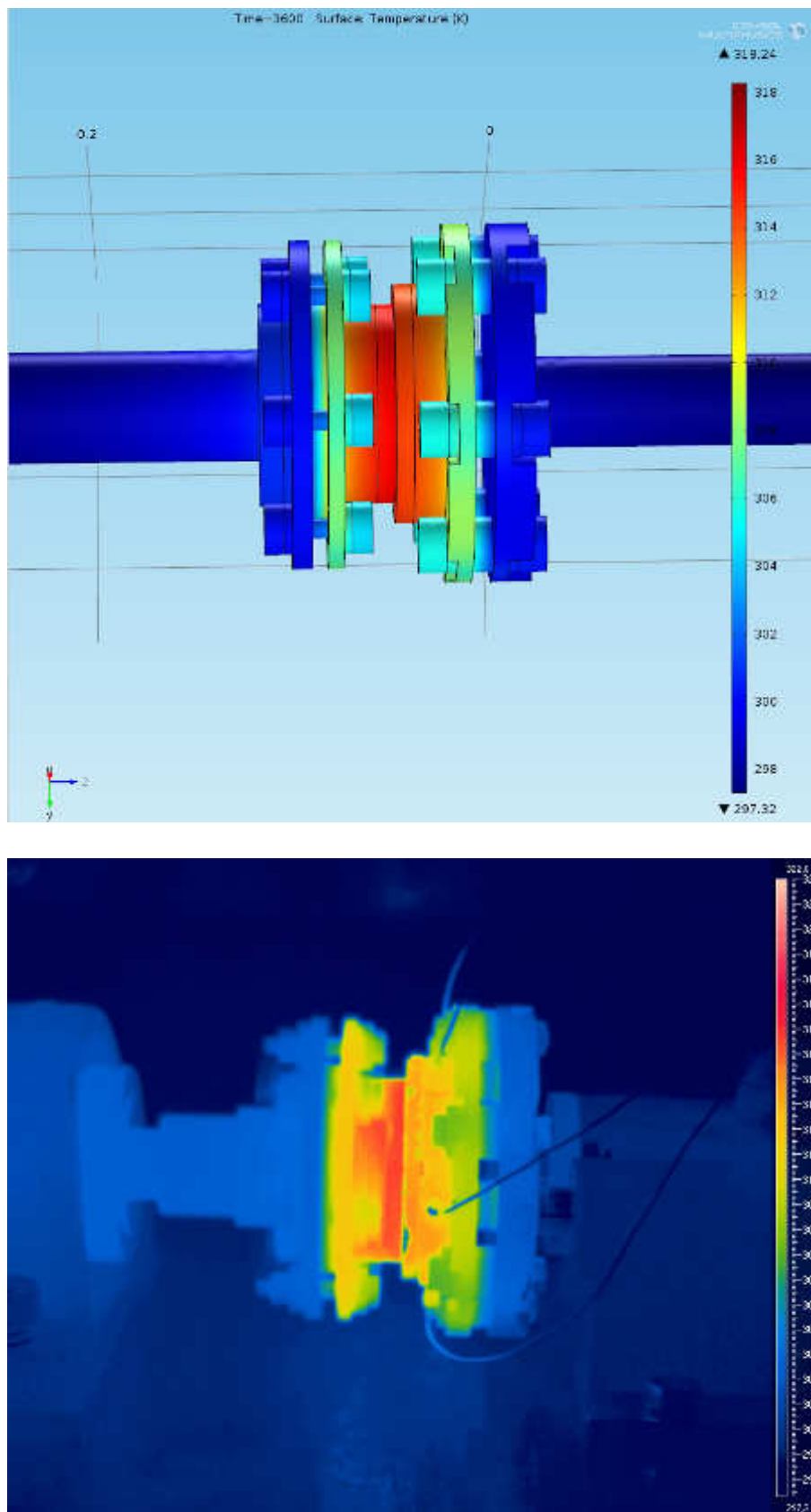


Abbildung 4.7: Vergleich zwischen Modellrechnung und Infrarotaufnahme nach 3.600 s Reibdauer (Versuch Nr. 1, Versuchsreihe 1).

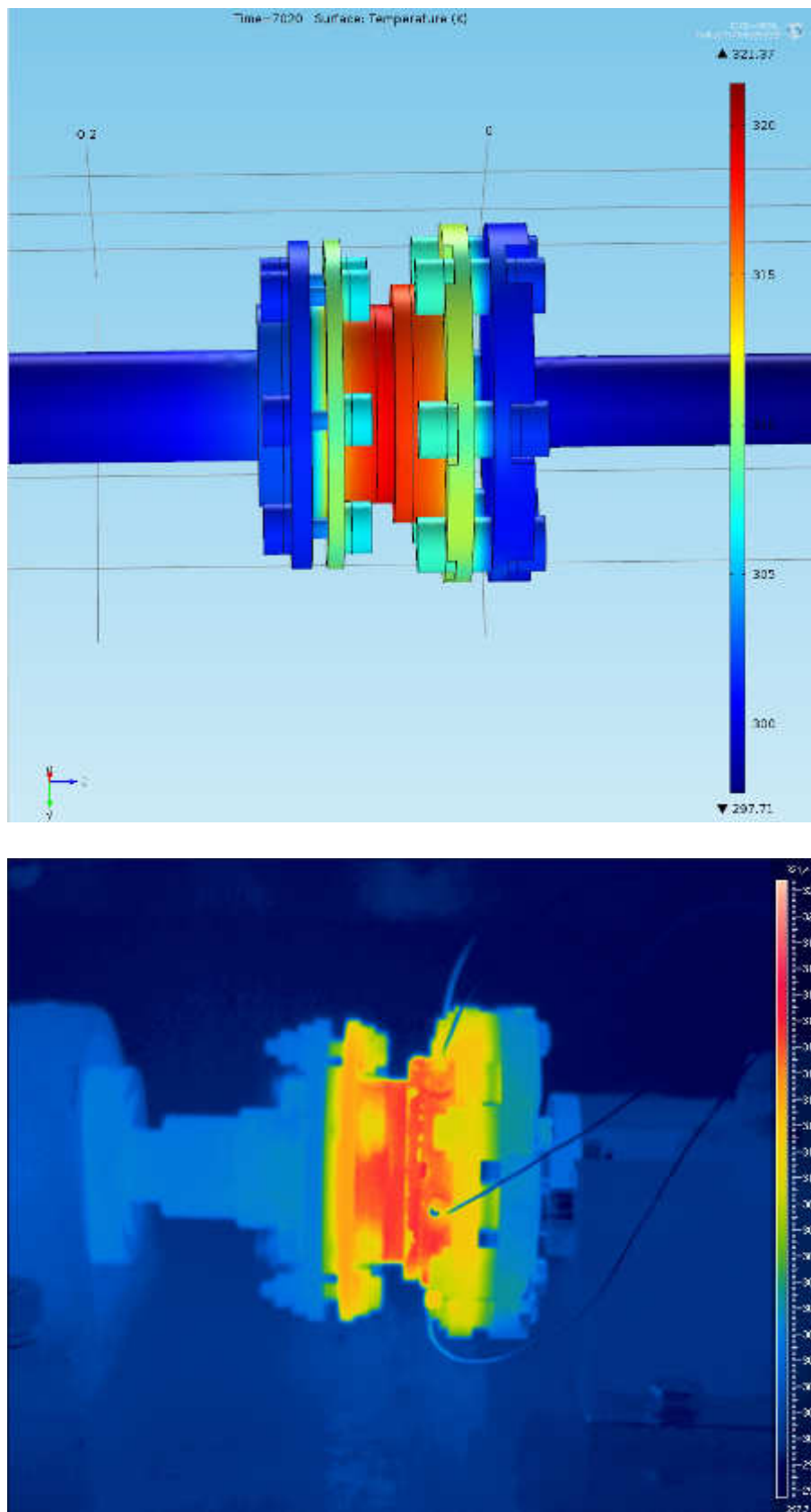


Abbildung 4.8: Vergleich zwischen Modellrechnung und Infrarotaufnahme nach 7.020 s Reibdauer (Versuch Nr. 1, Versuchsreihe 1).

Diese entstand durch die rotierende Reibscheibe und Basisplatte. Dass dem so war erkennt man z.B. in den Abbildungen 3.2 und 3.3 oben: Jeweils nach Abschalten des Motors macht der Temperaturverlauf T_0 einen Sprung von ca. 5°C nach oben.

In den Abbildungen 4.6 bis 4.8 sind die berechneten und gemessenen Oberflächentemperaturverteilungen zu drei verschiedenen Zeitpunkten (30 s, 3.600 s, 7.020 s) vergleichend dargestellt. Man erkennt die gute Übereinstimmung zwischen Modell und Wirklichkeit. Abweichungen in der Farbkodierung der Temperatur bei Modell und Wirklichkeit sind farbpalettenbedingt. Der Grund für die leichten Differenzen zu Beginn und am Ende der Reibdauer wurde bereits im Zusammenhang mit Abbildung 4.5 diskutiert.

Um zu sehen, ob andere Versuchsergebnisse ebenso gut wiedergegeben werden wie der Versuch Nr. 1 der Versuchsreihe 1, wurden die Versuche Nr. 2, 3 und 4 der Versuchsreihe 1 ebenfalls simuliert. Diese Versuche wurden ausgewählt, weil bei diesen der Energieeintrag vergleichsweise gleichmäßig geschah. Dies erkennt man an den relativ gleichförmigen (schwarzen) Leistungskurven in den Abbildungen 3.1 und 3.2.

Die berechneten und gemessenen Temperaturkurven der genannten Versuche sind in den Abbildungen 4.9 und 4.10 aufgetragen. Es ist gut zu erkennen, dass die Versuchsergebnisse mit dem COMSOL-Modell gut wiedergegeben werden können. Über- und Unterschinger der gemessenen zeitlichen Temperaturverläufe über oder unter die berechneten Temperaturverläufe sind durch die entsprechenden Schwankungen im Leistungseintrag zu erklären (vergleiche Abbildungen 3.1 und 3.2).

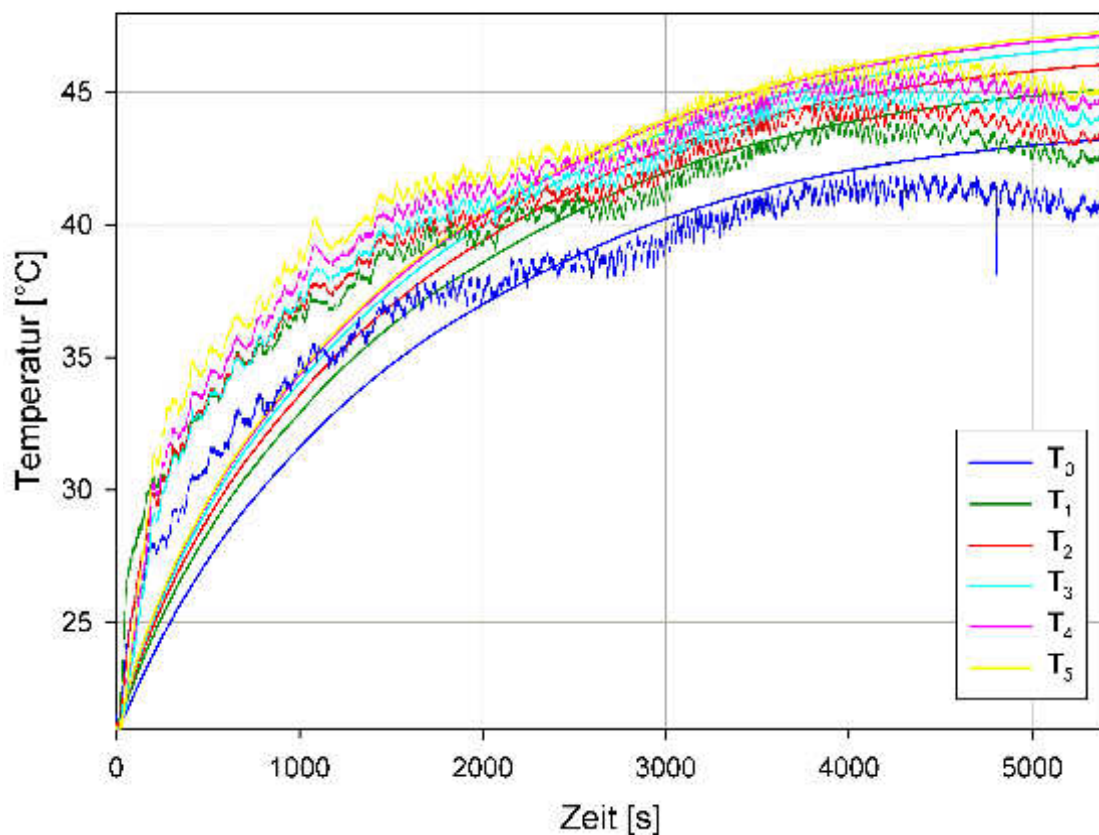


Abbildung 4.9: Berechnete und gemessene zeitliche Temperaturverläufe bei Versuch Nr. 2 der Versuchsreihe 1.

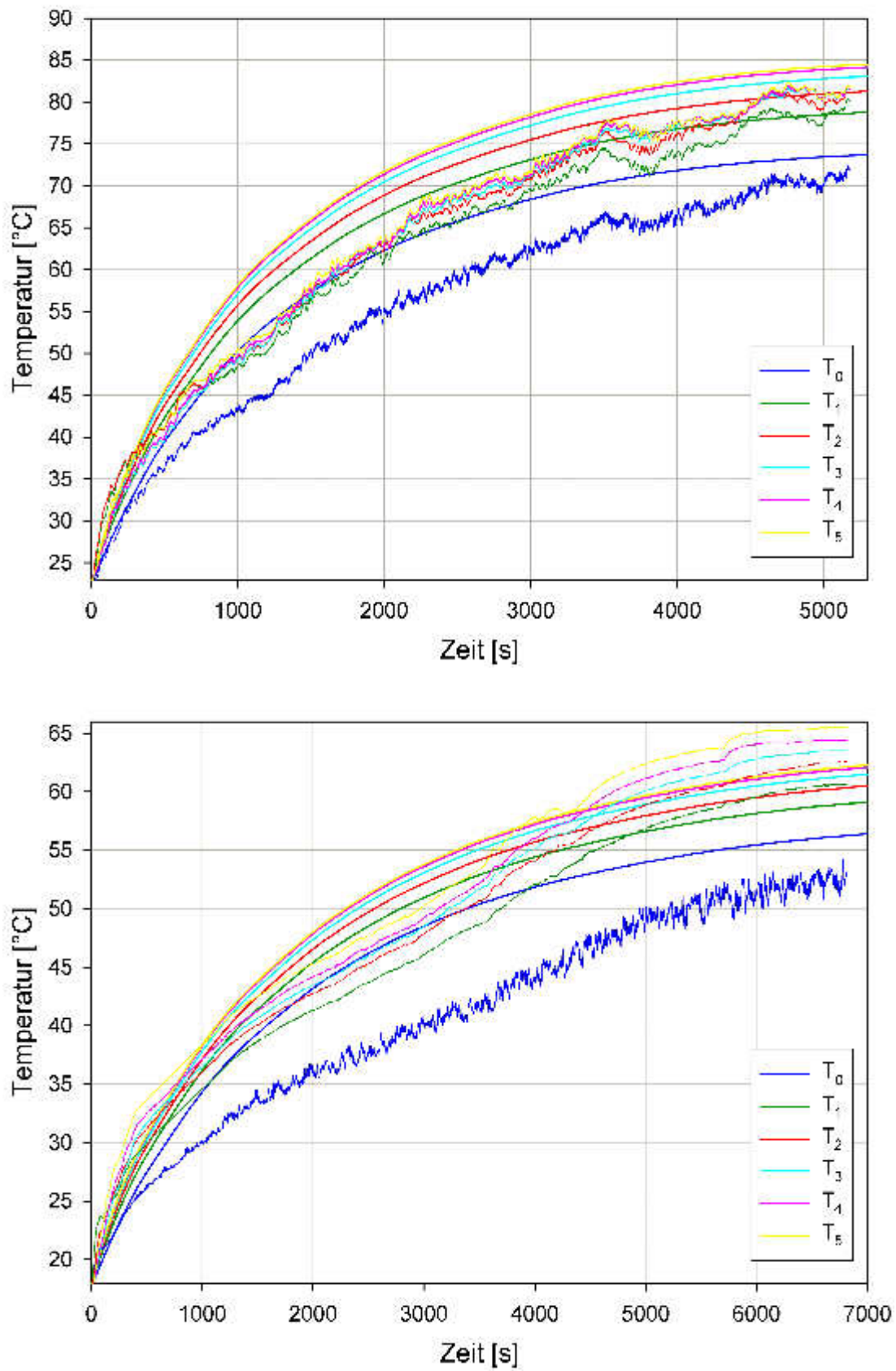


Abbildung 4.10: Berechnete und gemessene zeitliche Temperaturverläufe bei den Versuchen Nr. 3 (oben) und 4 (unten) der Versuchsreihe 1.

4.4 Extrapolation der Versuchsergebnisse

Unter der Annahme, dass der Reibungskoeffizient in nicht zu großen Temperaturbereichen einigermaßen konstant ist, können mit Hilfe des COMSOL-Modells die Versuchsreihen auf höhere Druck- und Relativgeschwindigkeitswerte extrapoliert werden. Weil die Ergebnisse der Versuchsreihe 1 erheblich geringere Schwankungen als die der Versuchsreihe 2 zeigen, wurde hier die Versuchsreihe 1 extrapoliert. Mit Hilfe von Gleichung (2.3) und dem Reibungskoeffizienten aus (3.1) wurden mittlere Leistungen für verschiedene Kombinationen von F_n und v_r berechnet und in das Heat Transfer Module von COMSOL eingesetzt. Der Wärmeübergangskoeffizient für den Wärmeverlust durch Konvektion wurde gemäß (2.7) bestimmt und im Heat Transfer Module verwendet. Als Umgebungstemperatur wurden $T_U = 20^\circ\text{C}$ angenommen und als Dauer des Reibvorgangs $\Delta t = 7.200\text{ s}$ (2 Stunden).

In der Tabelle 4.2 sind F_n , v_r , die mittlere Leistung \bar{P} sowie die maximal erreichte Temperatur an der Messstelle T_5 zusammengestellt. $T_{O,\max}$ ist die Maximaltemperatur, die an der Oberfläche der Reibscheiben bei einem Versuch erreicht wurde. Weiterhin ist die sogenannte Flächenpressung p_A und die Leistungsdichte q aufgelistet. In Abbildung 4.11 sind diese Ergebnisse grafisch dargestellt und dabei noch weiter extrapoliert worden. Der Korrelationskoeffizient der Fit-Funktion in Abbildung 4.11 beträgt $R^2 = 0,9999$. Der Fit ist damit nahezu perfekt.

F_n [N]	p_A [N/mm ²]	v_r [m/s]	\bar{P} [W]	q [W/mm ²]	T_{\max} [°C]	$T_{O,\max}$ [°C]
1.000	0,127	0,5	134,7	0,0172	88,7	88,0
1.000	0,127	1,0	269,4	0,0343	137,8	135,8
1.000	0,127	1,5	404,1	0,0515	176,5	172,9
1.500	0,191	0,5	202,1	0,0257	121,2	119,8
1.500	0,191	1,0	404,1	0,0515	191,1	187,9
1.500	0,191	1,5	606,2	0,0772	246,1	240,8
2.000	0,255	0,5	269,4	0,0343	152,0	150,1
2.000	0,255	1,0	538,8	0,0686	240,9	236,1
2.000	0,255	1,5	808,2	0,1029	310,1	303,0
2.500	0,318	0,5	336,8	0,0429	181,7	179,4
2.500	0,318	1,0	673,5	0,0858	287,2	281,8
2.500	0,318	1,5	1.010,3	0,1286	369,4	359,7
3.000	0,382	0,5	404,1	0,0515	209,7	206,7
3.000	0,382	1,0	808,2	0,1029	330,6	323,3
3.000	0,382	1,5	1.212,3	0,1545	424,4	412,2
5.000	0,637	0,5	673,5	0,0858	310,1	304,1
5.000	0,637	1,0	1.347,0	0,1715	481,3	467,3
5.000	0,637	1,5	2.020,5	0,2573	613,0	588,2

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Extrapolation der Versuchsreihe 1.

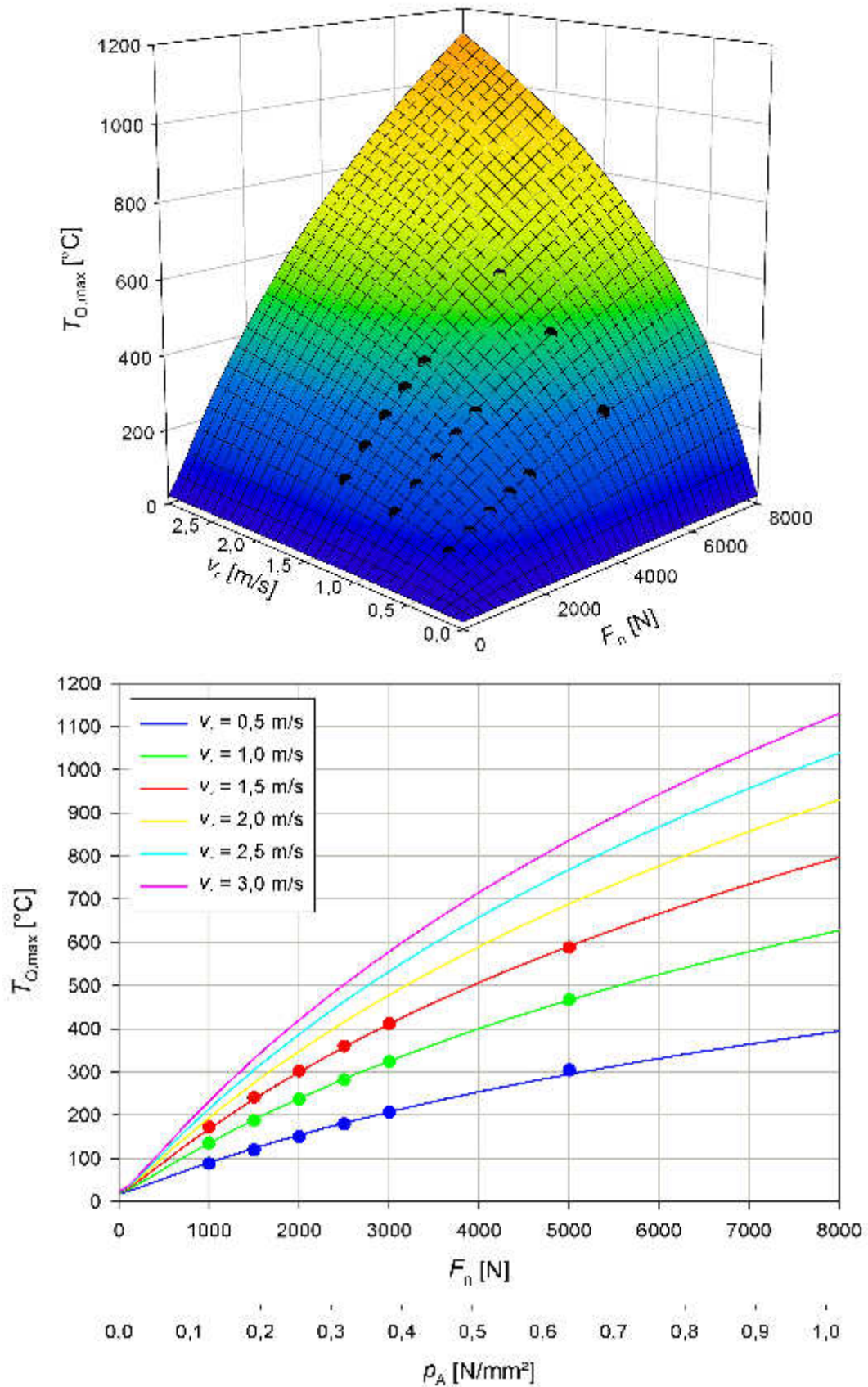


Abbildung 4.11: Maximale Oberflächentemperatur nach 2 Stunden Reibdauer in Abhängigkeit von Relativgeschwindigkeit und Anpresskraft bzw. Flächenpressung inklusive Fit-Funktion in 3D (oben) und 2D (unten).

Wie man Tabelle 4.2 und Abbildung 4.11 entnehmen kann, entstehen am experimentellen Aufbau kritische Oberflächentemperaturen wenn die Anpresskraft größer oder gleich 3.000 N ($\geq p_A = 0,382\text{ N/mm}^2$) ist und die Relativgeschwindigkeit größer oder gleich 1 m/s . Je mehr die Anpresskraft über dem Wert von 3.000 N liegt, desto geringer muss die Relativgeschwindigkeit sein, um mit dem Versuchsaufbau zündgefährliche Oberflächentemperaturen zu generieren. Bei einer Anpresskraft von ca. 8.000 N bzw. einer Flächenpressung von 1 N/mm^2 reicht demnach eine Relativgeschwindigkeit von rund $0,5\text{ m/s}$ aus, um die Oberflächentemperatur auf 400 °C hochzutreiben, also in den zündgefährlichen Bereich.

Mit Hilfe von COMSOL können auch maximale Oberflächentemperaturen für den verwendeten Versuchsaufbau angegeben werden wenn andere Materialpaarungen als Stahl auf Stahl verwendet werden. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis des Reibungskoeffizienten. In [5] und [6] finden sich Reibungskoeffizienten für einige häufige Materialpaarungen (Tabelle 4.3).

Stahl-Stahl	Stahl-Graugus	Stahl-Bronze	Stahl-Al	Stahl-Teflon
0,15 - 0,3	0,18 - 0,2	0,18 - 0,2	0,19	0,04
Graugus-Graugus	Bronze-Bronze	Bronze-Graugus	Al-Kunstst.	Al-Al
0,2 - 0,3	0,18	0,28	0,3	1,05

Tabelle 4.3: Reibungskoeffizienten für häufige Materialpaarungen.

Als Beispiel wurden in COMSOL die beiden Reibscheiben aus Stahl durch Reibscheiben aus Aluminium ersetzt und die Versuchsreihe 1 im Modell durchgerechnet. Dabei wurden für den Wärmeverlust durch Konvektion und Strahlung die zuvor verwendeten Koeffizienten benutzt. Als Reibungskoeffizient wurde $\mu = 1,05$ für Al-Al aus Tabelle 4.3 angenommen. Die Ergebnisse der Modellrechnungen sind in Tabelle 4.4 aufgelistet, wobei zum Vergleich die maximal erreichten Oberflächentemperaturen für die Materialpaarung Stahl-Stahl – ebenfalls modelliert – vermerkt sind.

Beim Betrachten der Temperaturwerte in Tabelle 4.4 fällt sofort auf, dass die erreichten maximalen Oberflächentemperaturen bei der Materialpaarung Aluminium-Aluminium 2,5 bis 3 mal so hoch sind wie diejenigen für die Materialpaarung Stahl-Stahl. Bei der Reibung zweier Aluminiumscheiben aneinander, realisiert mit der Versuchsaapparatur, wäre man schon bei einer Anpresskraft von lediglich 750 N in den Bereich zündgefährlicher Oberflächentemperaturen gekommen. Dieses Beispiel zeigt, wie stark die Erwärmung durch Reibungsvorgänge von den beteiligten Materialien bzw. von den zugehörigen Reibungskoeffizienten abhängt.

F_n [N]	250	250	250	500	500	500	750	750	750
v_r [m/s]	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
$T_{O,max,A-A}$ [°C]	84,9	129,8	164,5	143,9	224,8	286,4	197,6	306,9	389,3
$T_{O,max,S-S}$ [°C]	37,5	50,2	60,2	54,7	79,5	99,5	71,4	108,2	137,0

Tabelle 4.4: Maximale Oberflächentemperaturen am Versuchsaufbau bei einer modellierten Versuchsreihe 1 mit den Materialpaarungen Al-Al (A-A) und Stahl-Stahl (S-S).

4.5 Einfluss der Wärmeverlustmechanismen

Im vorherigen Abschnitt konnte beispielhaft gezeigt werden, wie stark die Erwärmung bei Reibvorgängen von der Materialpaarung bzw. dem zugehörigen Reibungskoeffizienten abhängig ist. Wie stark die Wärmeverlustmechanismen Strahlung und Konvektion die maximal erreichte Oberflächentemperatur beeinflussen, wird in diesem Paragraphen am Beispiel von Versuchsreihe 1 untersucht.

Ein Blick auf die Tabelle 3.5 macht deutlich, dass der Anteil an Wärme, der durch Konvektion und Strahlung verloren geht, erheblich ist.

Der Wärmeverlust durch Konvektion gehorcht Gleichung (2.7), d. h. er ist proportional zum Wärmeübergangskoeffizienten k und zur Differenz zwischen Oberflächentemperatur des Gegenstandes und der Temperatur des umgebenden Mediums, hier also der Luft. Weil k über (2.7) mit der Relativgeschwindigkeit v_{rel} zwischen warmen Gegenstand und der umgebenden Luft verknüpft ist, sollte der Wärmeverlust durch Konvektion überproportional mit v_{rel} bei gegebener eingetragener Leistung wachsen.

Der Wärmeverlust durch Strahlung folgt dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (3.3). Hier sind die Oberflächentemperatur und der Emissionskoeffizient ε die bestimmenden Größen. Weil die Temperatur mit der 4. Potenz in die Gleichung eingeht, spielt die Wärmestrahlung in der Regel¹ bei höheren Temperaturen die dominierende Rolle bei den Wärmeverlustmechanismen. Der Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0 \dots 1$ hängt von der Farbe und Oberflächenbeschaffenheit des warmen Körpers ab und mehr oder weniger stark auch von dessen Temperatur.

Um den Einfluss der einzelnen Größen auf die maximale Oberflächentemperatur der Versuchsanordnung bildlich und exemplarisch aufzuzeigen, wurde erneut mit COMSOL gerechnet, wobei die Leistung P , der Wärmeübergangskoeffizient k und der Emissionskoeffizient ε systematisch variiert wurden. Als Reibdauer wurden wieder 2 Stunden festgesetzt. In den Abbildungen 4.12 und 4.13 sind die Resultate dieser Modellrechnungen zu sehen. Bei den drei 3D-Grafiken handelt es sich um ein und dieselben Funktionsflächen. Lediglich die Perspektive wurde verändert, um die Form der Flächen besser zu veranschaulichen.

Beim Betrachten der Abbildungen fällt zunächst auf, dass der Einfluss der Konvektion und Strahlung so groß ist, dass er gut und gerne mehr als 100% Unterschied in der erreichten maximalen Oberflächentemperatur ausmachen kann. Betrachtet man beispielsweise die gelbe Fläche, so zeigt sich ein Temperaturunterschied zwischen den Zuständen mit minimalem und maximalem Wärmeverlust von $\Delta T_0 = 584^\circ\text{C}$. Bezogen auf den Temperaturwert mit maximalem Wärmeverlust sind das rund 141%! Weiterhin ist zu erkennen, dass der Einfluss der Verlustmechanismen umso größer wird, je mehr die Körpertemperatur über der Umgebungstemperatur liegt. Dies gilt insbesondere für den Mechanismus der Wärmestrahlung.

Diese Betrachtung zeigt deutlich, dass die Wärmeverluste einen erheblichen Einfluss auf die erreichbare maximale Oberflächentemperatur von aneinander reibenden Körpern haben. Sie dürfen deshalb keinesfalls vernachlässigt werden! Da hier insbesondere heiße Oberflächen von Interesse sind, die als Zündquelle in einem Staub/Luft- oder Gas/Luft-

¹Wenn die Körperoberfläche keinen außergewöhnlich niedrigen Emissionskoeffizienten ε besitzt.

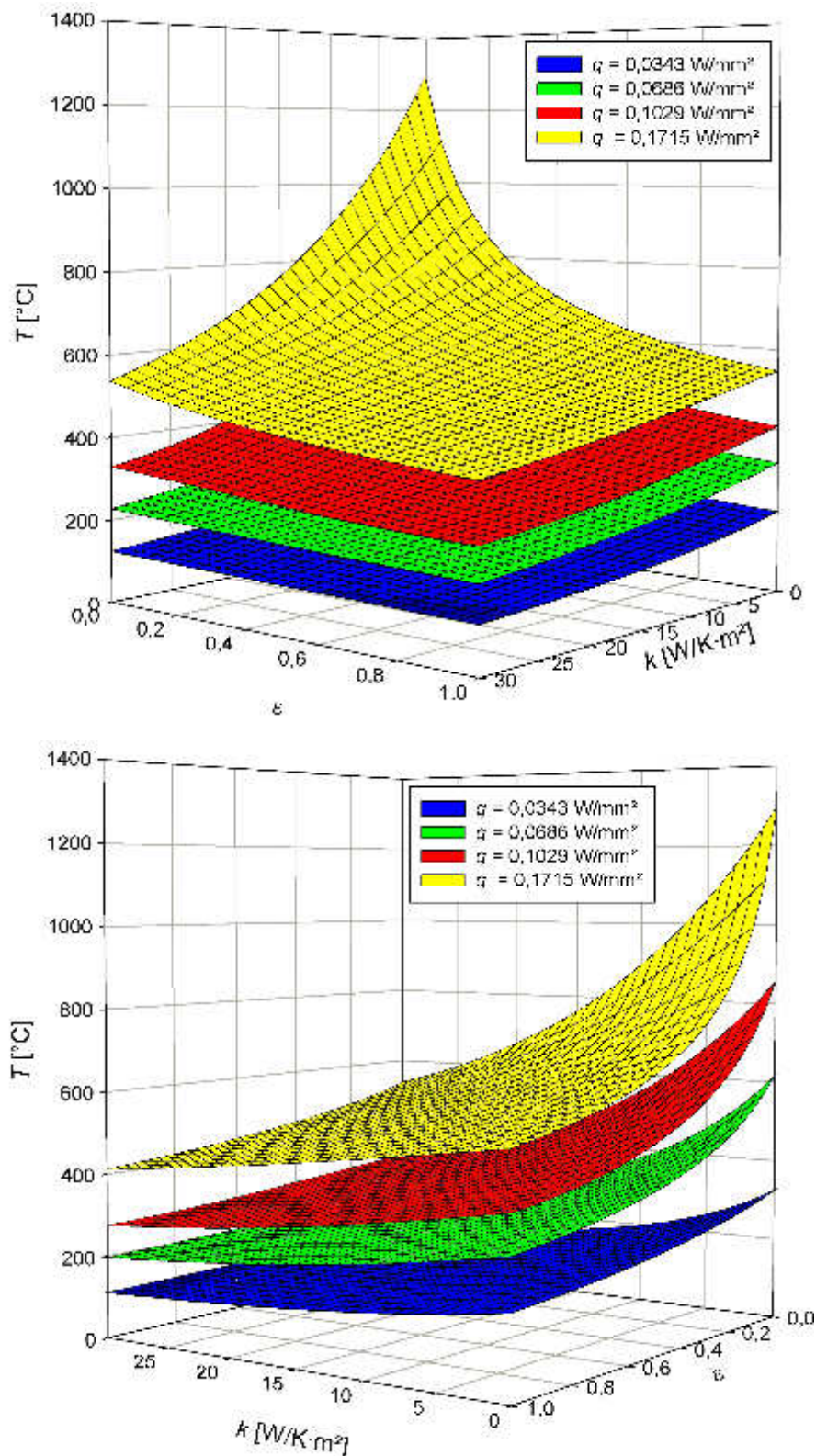


Abbildung 4.12: Maximal erreichte Oberflächentemperatur an den Reibscheiben der Versuchsanordnung als Funktion der Leistung P bzw. Leistungsdichte q , des Wärmeübergangskoeffizienten k und des Emissionskoeffizienten ε .

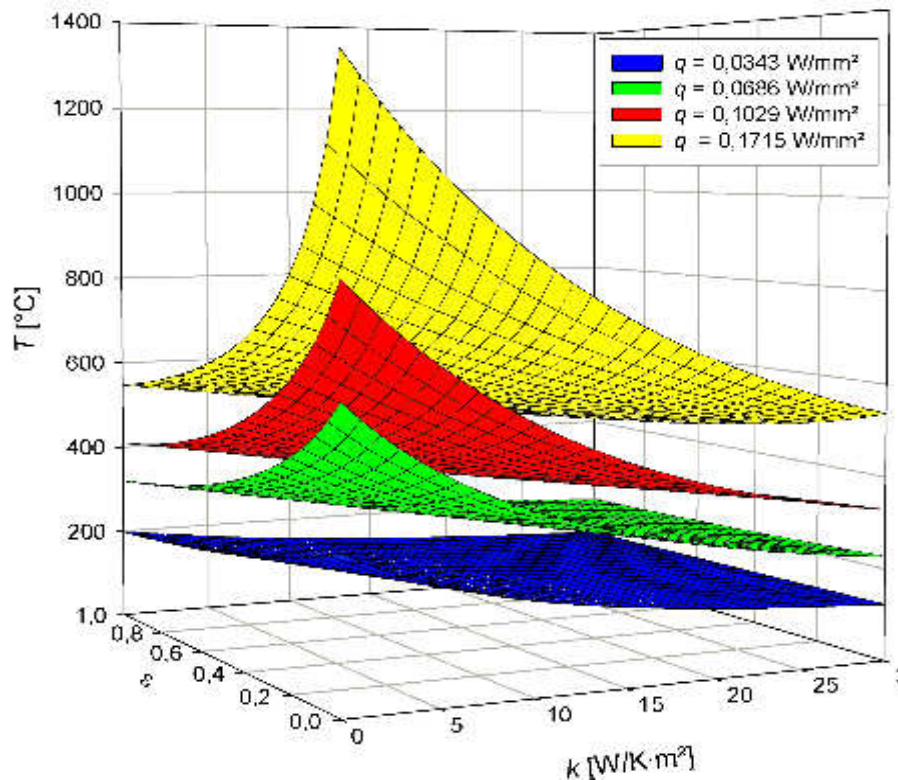


Abbildung 4.13: Maximal erreichte Oberflächentemperatur an den Reibscheiben der Versuchsapparatur als Funktion der Leistung P bzw. Leistungsdichte q , des Wärmeübergangskoeffizienten k und des Emissionskoeffizienten ε .

Gemisch wirksam werden können, spielen die Wärmeverlustmechanismen eine wichtige Rolle. Bei einer Analyse zur Explosionsgefahr durch reibungsbedingte heiße Oberflächen in Brennstoff/Luft-Gemischen reicht folglich die Angabe von Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit nicht aus, um Explosionsgefahren sicher auszuschließen. Vielmehr müssen auch Betrachtungen zum Exmissionskoeffizienten und der Wärmeübergangskoeffizienten gemacht werden. Weiterhin muss ins Kalkül gezogen werden, wie stark der Wärmeverlust durch Ableitung in umliegendes Material ist.

Ein weiteres Beispiel für die Tatsache, dass die Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung nicht vernachlässigt werden dürfen, sind Berechnungen, bei denen die Extrapolationen aus Abbildung 4.11 noch einmal für einen Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,15$ gerechnet wurden. Dieser Emissionskoeffizient gilt für blanken Stahl. Bei den Versuchen waren die Reibscheiben und Basisplatten schwarz gespritzt, was zu einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,96$ und einem großen Wärmeverlust durch Strahlung führte. Die berechneten Temperaturen wären also erreicht worden, wären die Reibscheiben und Basisplatten nicht schwarz gespritzt worden. Die Ergebnisse der Rechnungen finden sich in Abbildung 4.14.

In Abbildung 4.14 sind die gestrichelten Linien die maximalen Oberflächentemperaturen an den Reibscheiben als Funktion von der Anpresskraft und der Relativgeschwindigkeit bei einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,15$, also für eine blanken Stahloberfläche. Die durchgezogenen Linien beschreiben die maximale Oberflächentemperatur an den Reibscheiben bei $\varepsilon = 0,96$, also bei schwarz gespritzter Oberfläche. Bei

den durchgeführten Versuchen wurde die Anpresskraft nicht größer als $F_n = 750$ N. Im Diagramm befindet sich dieser Zustand im linken, unteren Kästchen. In diesem Bereich wird nur ein geringer Unterschied in den maximalen Oberflächentemperaturen durch verschiedene Emissionskoeffizienten hervorgerufen. Anders sieht die Sache aus wenn die Anpresskraft und damit die maximale Oberflächentemperatur steigt. In der Grafik ist deutlich zu erkennen, wie stark die maximalen Oberflächentemperaturen mit steigender Anpresskraft, nur aufgrund eines unterschiedlichen Emissionskoeffizienten, auseinander laufen. Unterschiede von 100°C und mehr sind schnell erreicht. Auch dieses Beispiel macht deutlich, dass es bei der Untersuchung der Entstehung heißer Oberflächen durch Reibvorgänge nicht ausreicht, nur Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit zu betrachten.

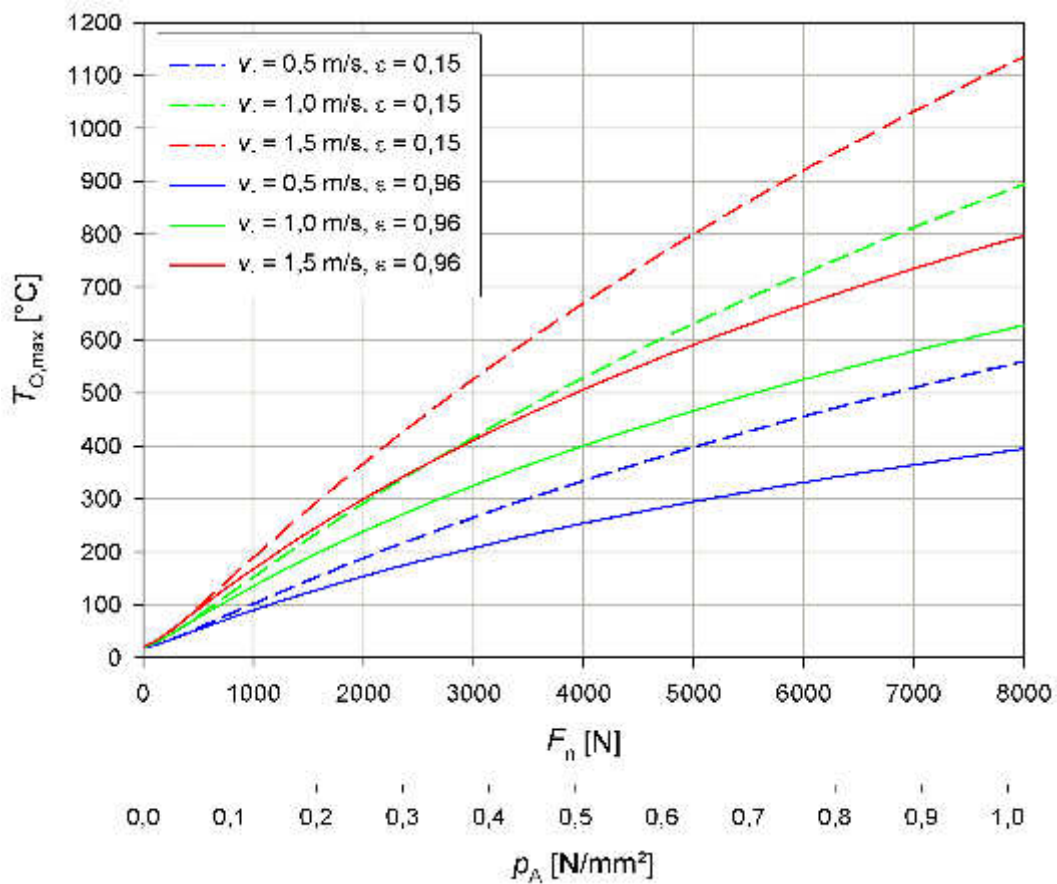


Abbildung 4.14: Maximale Oberflächentemperatur über der Anpresskraft (Flächenpressung) als Funktion von Relativgeschwindigkeit und Emissionskoeffizient. Die Konvektion wurde genau so berücksichtigt wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben bzw. in Abbildung 4.11 dargestellt.

Kapitel 5

Vergleich mit Untersuchungen der PTB

Ab dem Jahr 2010 werden an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Untersuchungen durchgeführt, deren Gegenstand ebenfalls die Entstehung heißer Oberflächen durch Reibvorgänge ist. Dabei wird ein besonderes Augenmerk darauf gelegt, ob und unter welchen Voraussetzungen diese heißen Oberflächen tatsächlich Explosionen zünden und inwieweit dabei auch mechanisch erzeugte Funken eine Rolle spielen. Die dafür verwendete Apparatur („Reibfunkenapparatur“) besteht aus einer Kammer, in die ein Brennstoff/Luft-Gemisch eingefüllt wird. In der Kammer rotiert eine drehzahlgesteuerte Stahlscheibe, auf deren Rand pneumatisch eine Stirnseite eines Stahlzylinders von 8 mm Durchmesser gepresst wird (Abbildung 5.1, unten). Mit einer Wärmebild- und Hochgeschwindigkeitskamera sowie Thermoelementen werden Messdaten wie Temperatur und Funkenbildung erfasst (Abbildung 5.1, oben). Variiert wurden bisher die Relativgeschwindigkeit, die Anpresskraft, die Materialpaarung und das Brennstoff/Luft-Gemisch [9].

In diesem Kapitel werden zunächst die Parameter und Ergebnisse der Versuche von FSA und PTB verglichen. Anschließend wird mit Hilfe von COMSOL-Modellierungen untersucht, welche maximalen Oberflächentemperaturen bei den beiden verschiedenen Versuchsapparaturen erreicht werden wenn die eingestellten Parameter Flächenpressung und Relativgeschwindigkeit bzw. Leistungsdichte gleich sind.

5.1 Versuche der PTB

Im Jahr 2014 wurde eine Versuchreihe mit Temperaturmessung am Reibstift durchgeführt, deren Ergebnisse hier zu Vergleichszwecken herangezogen werden können. Die Reibscheibe bestand stets aus dem Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4541. Variiert wurden dabei das Material des Reibstiftes sowie die Anpresskraft und die Relativgeschwindigkeit. Die Temperaturmessstellen am Stift befanden sich an der Kontaktfläche zwischen Stift und Reibscheibe (zentral im Stift) sowie auf der Außenwand des Stiftes in 3 mm, 6 mm und 9 mm Höhe über der Kontaktfläche zwischen Reibscheibe und Stift [9].



Abbildung 5.1: Gesamtbild der Reibfunkenapparatur der PTB (oben) und Foto der Reibscheibe mit Reibstift im Inneren der Kammer zur Aufnahme des Brennstoff/Luft-Gemisches (unten) [8].

In Tabelle 5.1 sind die Parameter für zwei Versuchsreihen mit den Stiftmaterialien 1.0038 und 1.4541 zusammengestellt.

Nr.	Material	F_n [N]	p_A [N/mm ²]	v_r [m/s]
936	1.4541	50,3	1,0	2,0
918	1.4541	50,3	1,0	10,0
921	1.4541	100,5	2,0	5,0
776	1.4541	251,3	5,0	2,0
793	1.4541	502,7	10,0	1,0
789	1.0038	50,3	1,0	2,0
915	1.0038	50,3	1,0	10,0
942	1.0038	100,5	2,0	5,0
777	1.0038	251,3	5,0	2,0
795	1.0038	502,7	10,0	1,0

Tabelle 5.1: Parameter der betrachteten Versuchsreihen der PTB [9].

Nr.	\bar{P} [W]	q [W/mm ²]	μ	T_{\max} [°C]	$T_{O,\max}$ [°C]
936	113,7	2,26	1,13	455	455
918	355,0	7,06	0,71 - 1,36	955	853
921	587,9	11,70	1,17	890	852
776	430,8	8,57	0,86	910	910
793	582,3	11,58	1,16	1.025	880
789	135,8	2,70	1,35	255	-
915	689,1	13,71	1,37	605	570
942	497,6	9,90	0,99	705	593
777	392,0	7,80	0,78	680	750
795	643,5	12,80	1,28	320	570

Tabelle 5.2: Messergebnisse der betrachteten Versuchsreihen der PTB [9]. Der maximale Temperaturanstieg an der Reibzylinderoberfläche $\Delta T_{O,\max}$ ergibt sich ungefähr, indem man 25 °C von den Werten in der rechten Spalte abzieht.

Vergleicht man die Daten aus den Tabellen 5.1 und 5.2 mit denen aus den Abschnitten 3.1 und 3.2, so fällt zunächst auf, dass bei den Versuchen der PTB mit erheblich höheren Flächenpressungen und Energiedichten gearbeitet wurde als bei den Experimenten der FSA. Als unmittelbare Folge daraus stiegen die Temperaturen bei den PTB-Versuchen deutlich schneller an und erreichten ein viel höheres Niveau als bei den FSA-Versuchen. Auch der Abrieb war in Relation zur Größe des Reibstiftes enorm.

Weiterhin fällt auf, dass die ermittelten Reibungskoeffizienten bei den PTB-Versuchen zwei- bis dreimal so groß sind wie bei den Untersuchungen der FSA. Die überaus interessante Frage, ob dies den anderen Materialpaarungen, der anderen Apparatur

oder den höheren Flächenpressungen bzw. Energiedichten geschuldet ist, kann hier leider nicht beantwortet werden und muss weiteren experimentellen Untersuchungen vorbehalten bleiben.

5.2 Vergleichende Modellierung der PTB- und FSA-Versuche

Um die Versuchsreihen der FSA und PTB mit Hilfe von COMSOL-Modellrechnungen vergleichen zu können, muss zunächst geprüft werden, ob sich die Experimente der PTB mit COMSOL Multiphysics ausreichend gut modellieren lassen. Dass dies für die Versuche der FSA funktioniert, wurde bereits in Kapitel 4 gezeigt.

Weil die FSA einige physikspezifischen Module von COMSOL zum Thema Mechanik nicht besitzt, kann die Rotation der Reibscheibe und die Abnutzung des Reibstiftes nicht modelliert werden. Dennoch ist eine Modellierung der PTB-Versuche mit den vorhandenen Mitteln möglich, wenn der durch die Rotation der Reibscheibe verursachte zusätzliche Wärmeabfluss durch eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit der Scheibe ersetzt wird und wenn Versuche modelliert werden, bei denen die Abnutzung des Reibstiftes relativ gering war. Letztgenanntes ist bei den Versuchen der Fall, die mit geringer Anpresskraft und Relativgeschwindigkeit durchgeführt wurden. Deshalb eignen sich die Versuche Nr. 936 und 789 am besten für eine Modellierung (siehe Tabelle 5.1).

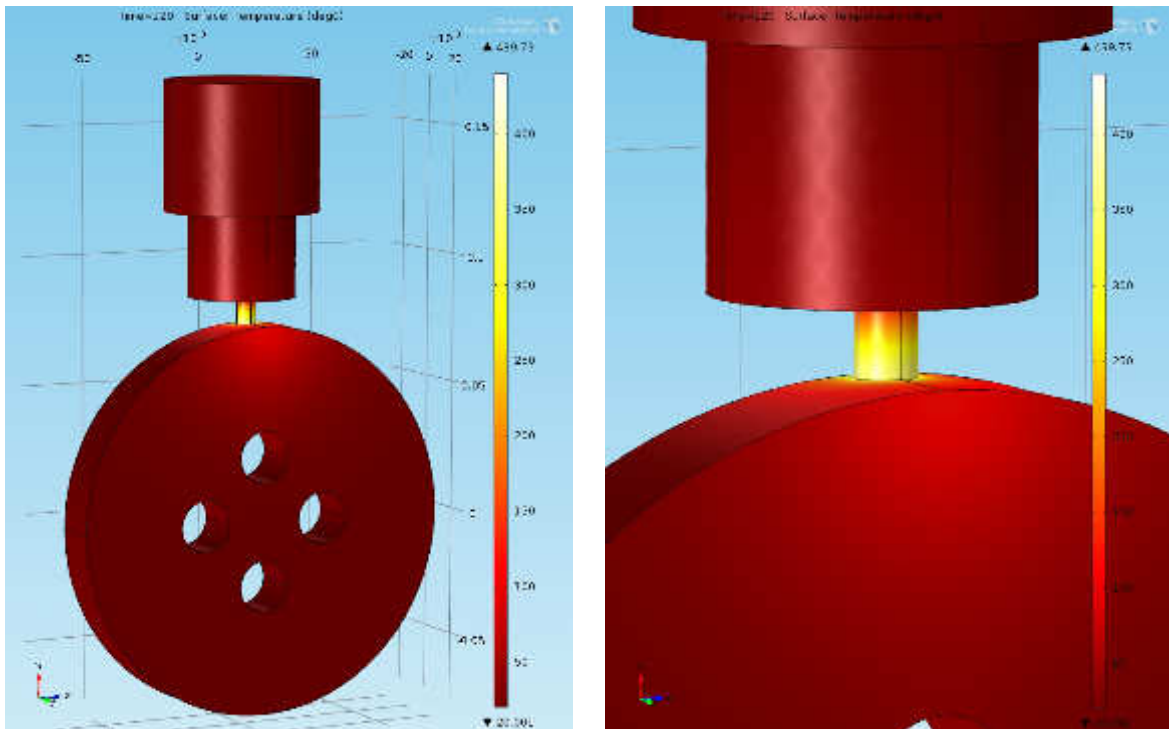


Abbildung 5.2: Ergebnis der COMSOL-Simulation von Versuch Nr. 936 aus den Tabellen 5.1 und 5.2. Gezeigt ist die Temperaturverteilung in °C auf der Oberfläche der wesentlichen Teile der Versuchsanordnung der PTB zum Zeitpunkt $t = 120$ s.

Zunächst wurde der Versuch Nr. 936 aus den Tabellen 5.1 und 5.2 mit COMSOL simuliert. Es wurden alle Versuchsparameter aus den Tabellen übernommen. Die Temperaturmesspunkte wurden im Modell an die gleichen Stellen gesetzt, wie sie auch im Experiment realisiert wurden. Zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten k wurde wieder Formel (2.7) herangezogen und die Relativgeschwindigkeit $v_r = 2,0$ m/s eingesetzt. Der Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,15$ für Stahl 1.4541 wurde verwendet [9]. Die COMSOL-Materialdatenbank liefert für den Wärmeleitkoeffizienten von Stahl 1.4541 den Wert $\lambda = 15$ W/m·K. Der verstärkte Wärmeabfluss, der durch die Rotation der Reibscheibe (zusätzliche Kühlung) erzeugt wird, wurde durch eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Reibscheibenmaterials um 5 W/m·K auf $\lambda = 20$ W/m·K simuliert. Die Umgebungs- und Anfangstemperatur wurde auf 20°C gesetzt. Das Ergebnis dieser Simulationsrechnungen ist in den Abbildungen 5.2 und 5.3 zu sehen.

Wie man Abbildung 5.3 entnimmt, stimmen die berechneten und beobachteten Temperaturverläufe gemessen an der Einfachheit des Modells gut überein. Dass die beobachteten Temperaturen die berechneten an den Messstellen T_3 , T_6 und T_9 nach ca. 50 s übersteigen, liegt am Abrieb bzw. der stetigen Verkürzung des Reibstiftes. Die Temperaturmesspunkte rücken dadurch allmählich näher an die Wärmequelle heran, was den Temperaturanstieg verstärkt. Der Temperaturanstieg ist im Experiment zu Beginn flacher als im Modell. Das liegt zum Teil darin begründet, dass der Energieeintrag beim Versuch zu Beginn etwas schwächer war als im zeitlichen Mittel.

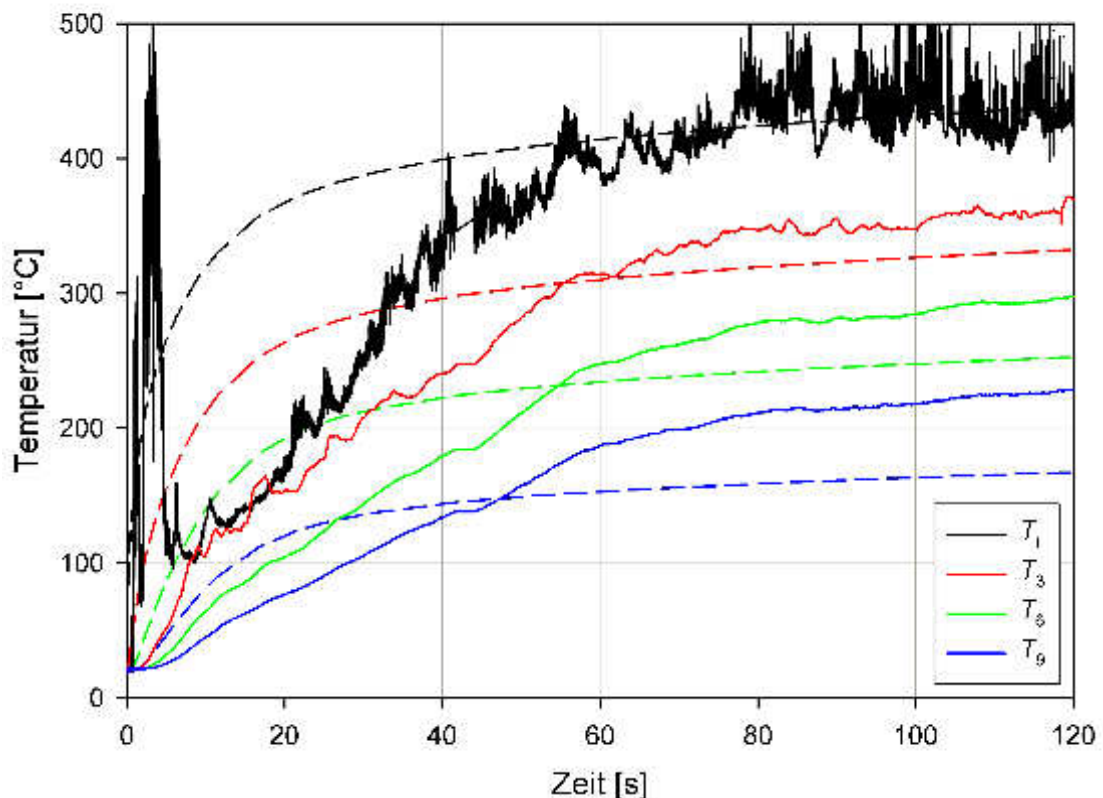


Abbildung 5.3: Beobachtete (durchgezogen) und berechnete (gestrichelt) Temperaturverläufe bei Versuch Nr. 936 an den definierten Messstellen. Es bedeuten: T_i = Messstelle zentral im Reibstift an der Reibfläche, T_3 , T_6 , T_9 = Messstellen 3 mm, 6 mm, 9 mm über der Reibfläche.

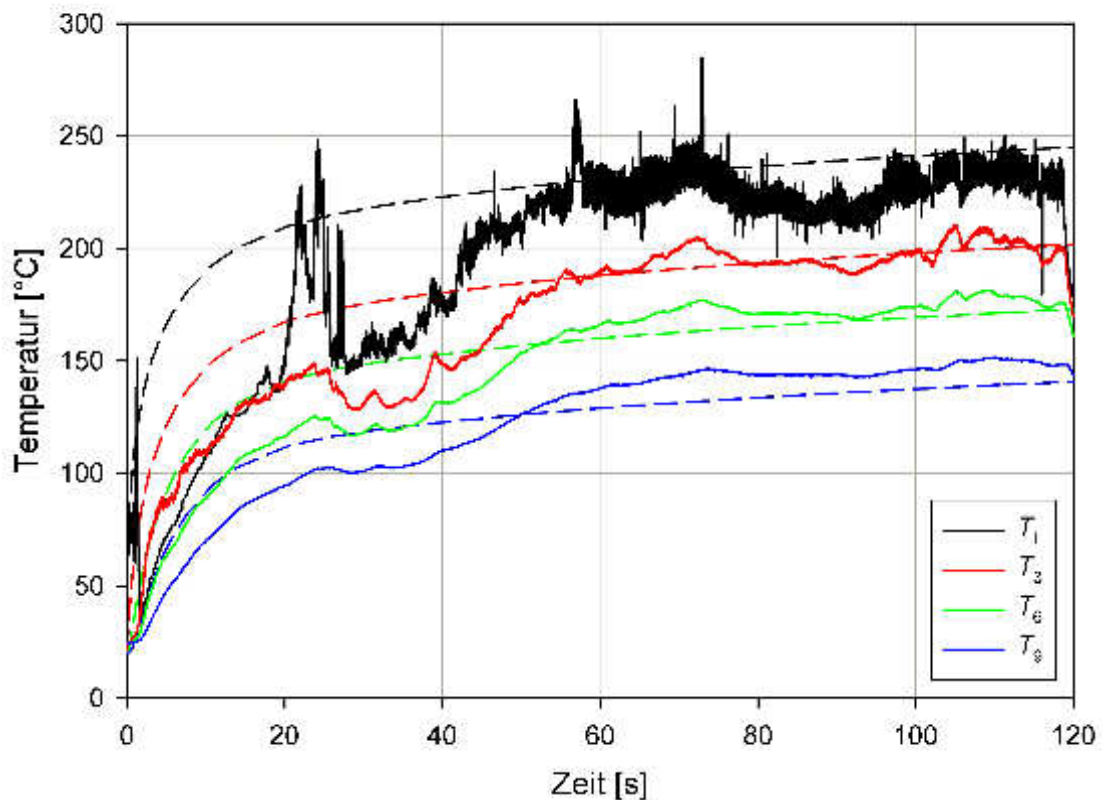


Abbildung 5.4: Beobachtete (durchgezogen) und berechnete (gestrichelt) Temperaturverläufe bei Versuch Nr. 789 an den definierten Messstellen. Bedeutung der T in der Legende wie bei Abbildung 5.3.

Für die Simulation des Versuches Nr. 789 aus den Tabellen 5.1 und 5.2 wurden die Materialdaten angepasst und ansonsten die Parameter aus den Tabellen verwendet. Als Wärmeleitkoeffizient des Stiftmaterials liefert die COMSOL-Materialdatenbank für Stahl 1.0038 den Wert $\lambda = 44,5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Für das Reibscheibenmaterial wird dieser Wert ebenfalls übernommen erhöht um $5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ auf $\lambda = 49,5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Diesem Vorgehen liegt die Überlegung zugrunde, dass die Reibfläche des Stiftes ständig mit der durch Rotation gekühlten Reibfläche der Reibscheibe in Kontakt steht und der Wärmefluss aus dem Stift in Richtung der Reibscheibe deshalb von der Wärmeleitfähigkeit des Stiftmaterials dominiert ist. Als Emissionskoeffizient für Stahl 1.0038 wurde der von der PTB gemessene Wert von $\varepsilon = 0,84$ angesetzt.

Auch die Temperaturverläufe dieses Versuches lassen sich mit dem einfachen Modell recht gut wiedergeben, wie man Abbildung 5.4 entnehmen kann.

Fazit: Um zu untersuchen, zu welchen Temperaturverläufen die bei den PTB- und FSA-Versuchen verwendeten Parameter an den verschiedenen Versuchsapparaturen führen würden, kann die Simulation mit COMSOL Multiphysics verwendet werden.

5.2.1 Vergleich bei gleicher Leistungsdichte

An dieser Stelle wurde untersucht, ob identische Leistungsdichten - also gleiche Flächenpressung, Relativgeschwindigkeit und gleicher Reibungskoeffizient - identische Temperaturverläufe an der FSA- und PTB-Apparatur hervorrufen oder nicht.

Zu diesem Zweck wurden die Versuch Nr. 936, Nr. 789 der PTB (Tabellen 5.1 und 5.2) sowie Nr. 4 aus Versuchsreihe 1 der FSA (Tabellen 3.1, 3.2, 3.3) herangezogen und mit Hilfe von COMSOL an der FSA- und PTB-Apparatur virtuell durchgeführt. Dabei wurden die Materialdaten aus der COMSOL-Materialdatenbank verwendet. Die Temperaturmesspunkte wurden im Modell der FSA-Apparatur gleich denen im Modell der PTB-Apparatur gesetzt, nämlich ins Zentrum der Reibfläche (T_i) sowie 3 mm, 6 mm und 9 mm (T_3 , T_6 , T_9) oberhalb der Reibfläche auf die Oberfläche der Reibscheibe bzw. des Reibstiftes. In Tabelle 5.3 sind die Parameter zusammengestellt, mit denen die virtuellen Versuche durchgeführt wurden. Die Anpresskraft wurde jeweils so an die Versuchsapparatur angepasst, dass mit gleicher Leistungsdichte gerechnet wurde.

App.	Nr.	Material	q [W/mm ²]	p_A [N/mm ²]	P [W]	F_n [N]	v_r [m/s]	μ
FSA	936	1.4 - 1.4	2,26	1,0	17.750	7.854	2,0	1,13
PTB	936	1.4 - 1.4	2,26	1,0	113,7	50,3	2,0	1,13
FSA	789	1.4 - 1.0	2,7	1,0	21.206	7.854	2,0	1,35
PTB	789	1.4 - 1.0	2,7	1,0	135,8	50,3	2,0	1,35
FSA	4	1.0 - 1.0	0,0109	0,0637	85,95	500	0,5	0,34
PTB	4	1.0 - 1.0	0,0109	0,0637	0,55	3,2	0,5	0,34

Tabelle 5.3: Parameter der virtuellen Versuchsdurchführungen. 1.4 und 1.0 stehen für die Stähle 1.4541 und 1.0038.

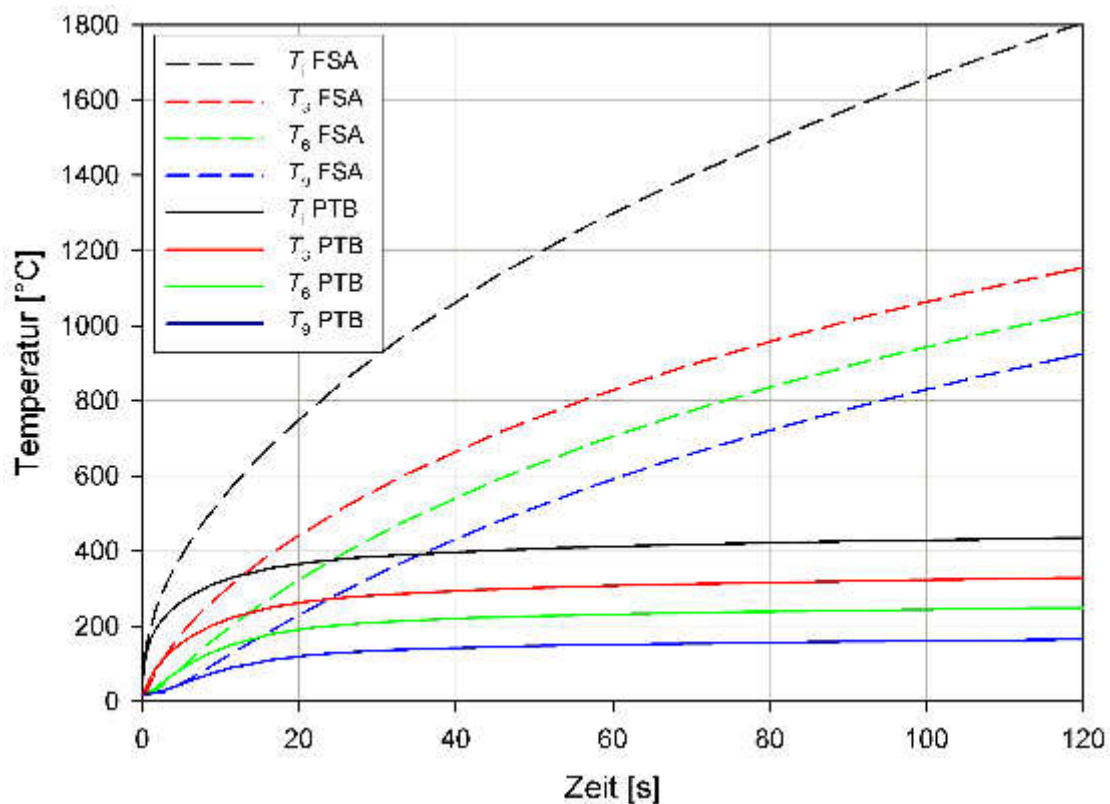


Abbildung 5.5: Ergebnisse der Simulation von Versuch Nr. 936 an der FSA- und PTB-Apparatur.

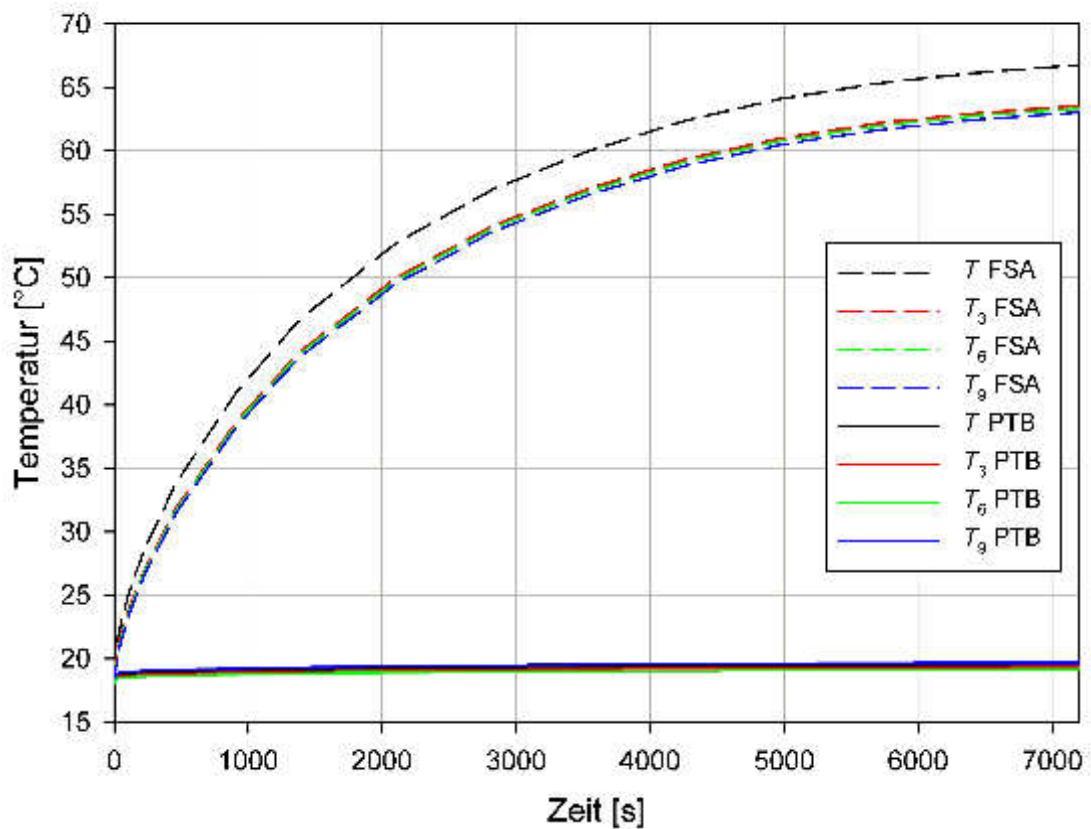
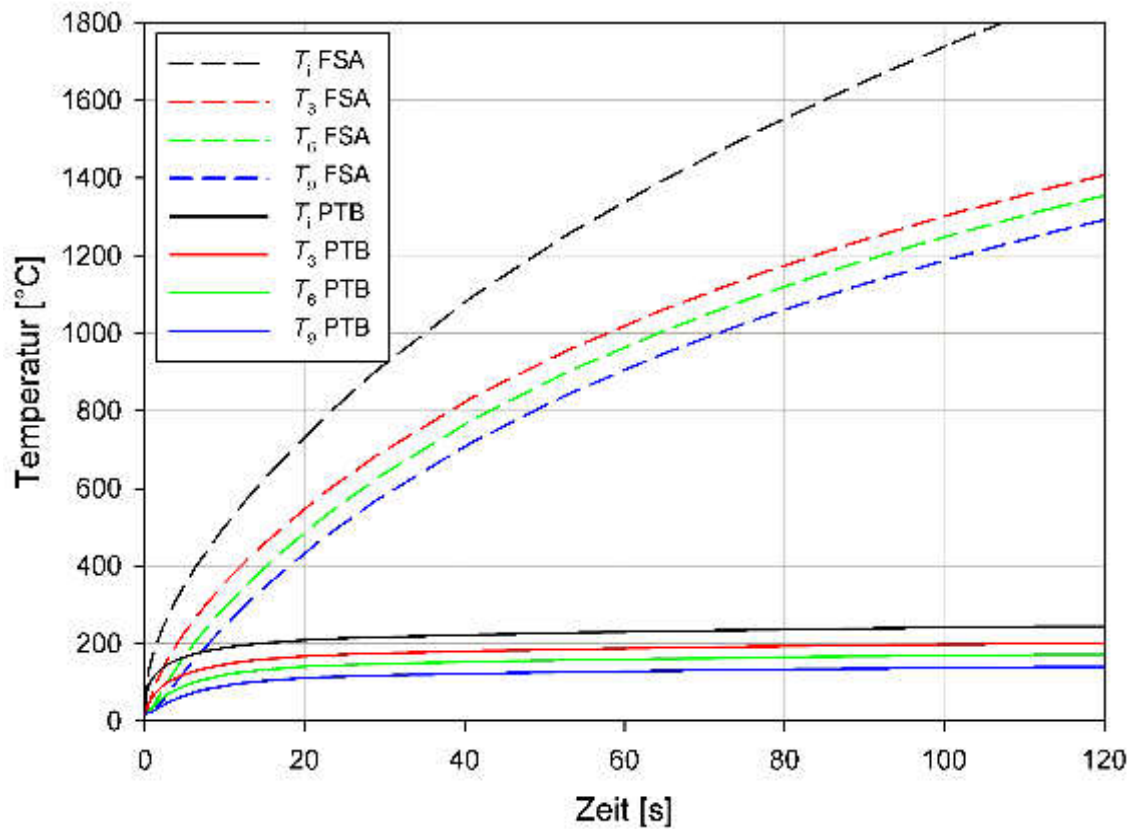


Abbildung 5.6: Ergebnisse der Simulationen von Versuch Nr. 789 (oben) und Versuch Nr. 4 aus Tabelle 3.1 (unten) an der FSA- und PTB-Apparatur.

In den Abbildungen 5.5 und 5.6 sind die Ergebnisse der Berechnungen zu sehen. Pro Abbildung sind die berechneten Temperaturverläufe an der FSA- und PTB-Apparatur für jeweils einen Versuch zusammen dargestellt.

Bei allen durchgeführten virtuellen Versuchen unterscheiden sich Temperaturverläufe an den beiden Apparaturen stark. An der FSA-Apparatur werden erheblich höhere Oberflächentemperaturen erreicht als an der PTB-Apparatur, obwohl jeweils die gleiche Leistungsdichte und Flächenpressung wirksam ist.

Gleichwohl der Tatsache, dass die Simulationsergebnisse oberhalb von 1.100°C angezweifelt werden dürfen, wird durch diese Betrachtungen mehr als deutlich, dass es nicht alleine die Leistungsdichte sein kann, die den Grad der Erwärmung bei Reibvorgängen bestimmt. Folglich kann diese Größe für sich allein genommen auch nicht zur Vorhersage von Temperaturentwicklungen oder Maximaltemperaturen bei Reibvorgängen herangezogen werden.

5.2.2 Vergleich bei gleicher Flächenpressung und Relativgeschwindigkeit und verschiedenen Reibungskoeffizienten

Um zu sehen, ob die Flächenpressung p_A in Kombination mit der Relativgeschwindigkeit v_r mit apparatespezifischen Reibungskoeffizienten zu einheitlicheren Ergebnissen hinsichtlich Temperaturverläufen oder Maximaltemperaturen führen, wurden die in Abschnitt 5.2.1 durchgeführten Simulationen nochmals gerechnet, wobei dieses Mal jedoch die in den Experimenten ermittelten Reibungskoeffizienten verwendet wurden.

App.	Nr.	Material	q [W/mm ²]	p_A [N/mm ²]	P [W]	F_n [N]	v_r [m/s]	μ
FSA	936	1.4 - 1.4	0,5894	1,0	4.629	7.854	2,0	0,29
PTB	936	1.4 - 1.4	2,26	1,0	113,7	50,3	2,0	1,13
FSA	789	1.4 - 1.0	0,5894	1,0	4.629	7.854	2,0	0,29
PTB	789	1.4 - 1.0	2,7	1,0	135,8	50,3	2,0	1,35
FSA	4	1.0 - 1.0	0,0109	0,0637	85,95	500	0,5	0,34
PTB	4	1.0 - 1.0	0,0353	0,0637	1,776	3,2	0,5	1,11

Tabelle 5.4: Parameter der virtuellen Versuchsdurchführungen mit gleicher Flächenpressung aber mit unterschiedlichen (gemessenen) Reibungskoeffizienten. 1.4 und 1.0 stehen für die Stähle 1.4541 und 1.0038. Die Reibungskoeffizienten 0,29 und 1,11 sind die Mittelwerte der Reibungskoeffizienten aus den Tabellen 3.3 und 5.2.

Das Resultat der Vergleiche ähnelt dem aus dem vorigen Abschnitt, wie man den umseitigen Abbildungen 5.7 und 5.8 leicht entnimmt. Die Maximalwerte der erreichten Oberflächentemperaturen an den beiden Versuchsapparaturen bewegen sich nicht einmal annähernd auf einem gemeinsamen Niveau und dies bei keiner der Simulationen.

Aus dieser Erkenntnis muss der Schluss gezogen werden, dass weder die Angabe einer Leistungsdichte, noch die einer Flächenpressung und schon gar nicht die einer Anpresskraft oder Relativgeschwindigkeit eine Aussage über sich einstellende maximale Oberflächentemperaturen bei Reibvorgängen ermöglichen. Es muss stets die spezielle Situation betrachtet werden.

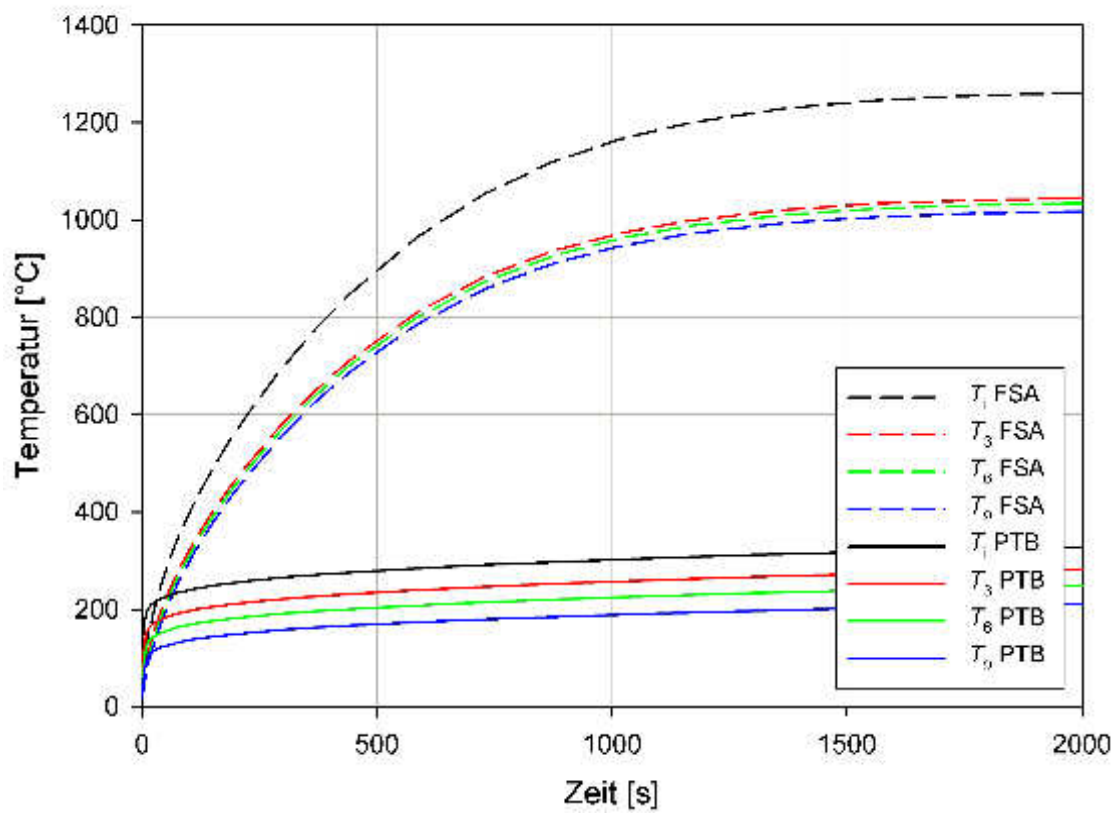
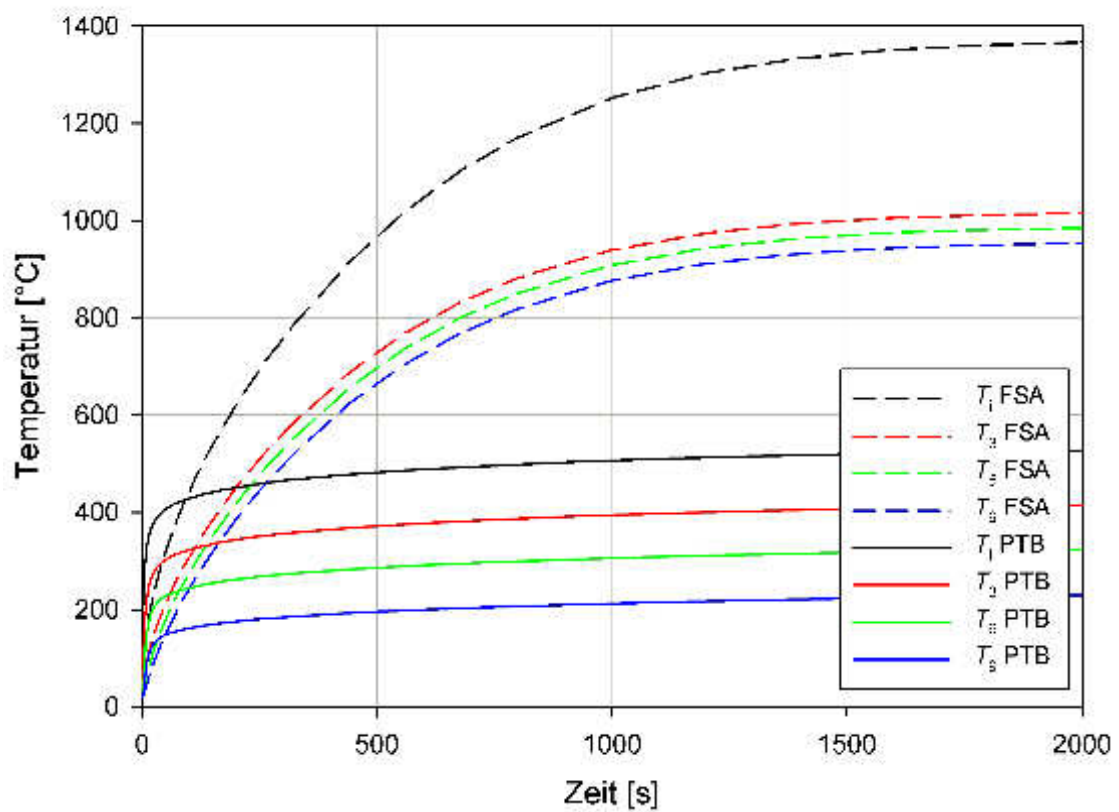


Abbildung 5.7: Ergebnisse der Simulationen von Versuch Nr. 936 (oben) und Versuch Nr. 789 (unten) an der FSA- und PTB-Apparatur bei gleicher Flächenpressung aber unterschiedlichen (gemessenen) Reibungskoeffizienten.

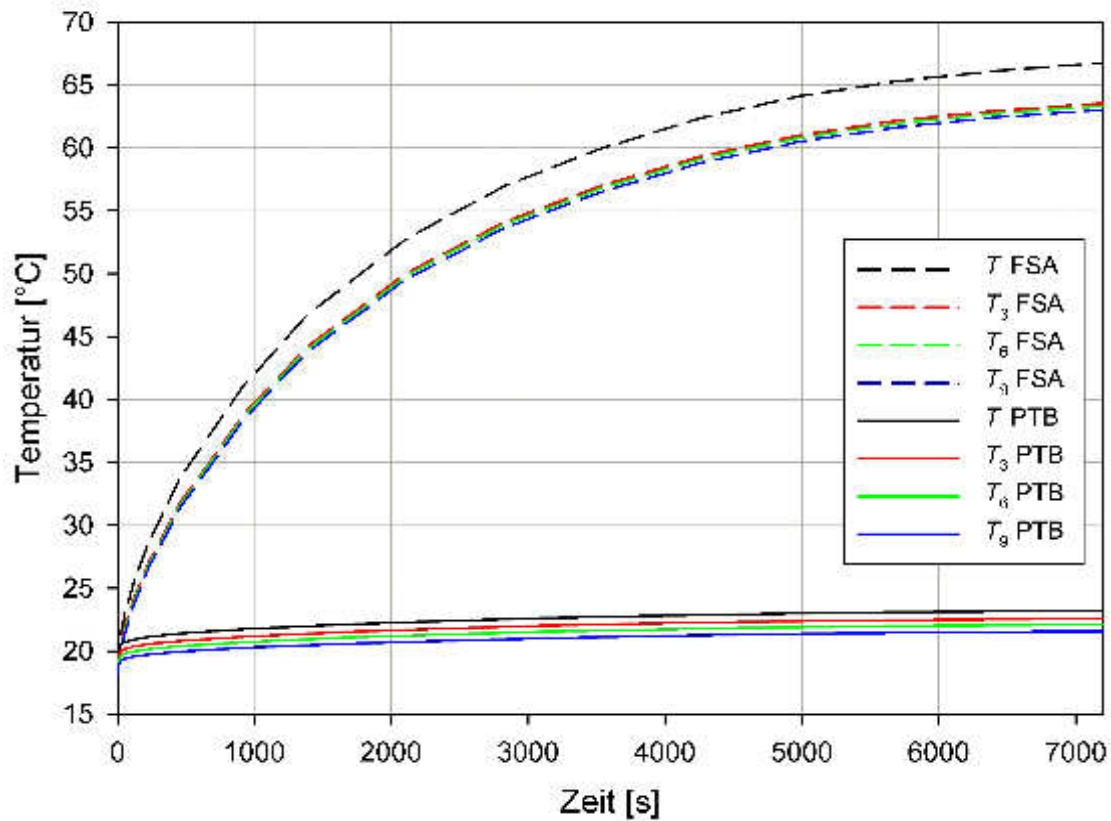


Abbildung 5.8: Ergebnisse der Simulation von Versuch Nr. 4 der Versuchsreihe 1 an der FSA- und PTB-Apparatur bei gleicher Flächenpressung aber unterschiedlichen (gemessenen) Reibungskoeffizienten.

Kapitel 6

Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

6.1 Diskussion der Ergebnisse

Zwei Versuchsreihen mit nahezu identischen Randbedingungen wurden mit der im Rahmen dieses Projektes aufgebauten Versuchsapparatur durchgeführt, wobei zwei zylindrische Scheiben aus Stahl 1.0038 an ihren Stirnseiten mit den Anpresskräften $F_n = 250\text{ N}$, 500 N und 750 N aneinander gepresst wurden. Die Relativgeschwindigkeit zwischen den Reibscheiben wurde für jeden eingestellten Wert der Anpresskraft in Schritten von $0,5\text{ m/s}$ von $v_r = 0,5\text{ m/s}$ auf $1,5\text{ m/s}$ erhöht. Mit Hilfe von Thermoelementen und einem Mikrobolometer wurde die Temperatur sowohl an verschiedenen ausgewählten Punkten der Apparatur als auch an der gesamten Oberfläche der Apparatur über die Messzeit erfasst. Der Abrieb an den Reibscheiben wurde durch Wägung vor und nach den Experimenten bestimmt.

Bei beiden Versuchsreihen stieg die erreichte Maximaltemperatur mit der Anpresskraft bzw. Flächenpresung und der Relativgeschwindigkeit an, wobei vergleichsweise starke Streuungen von Versuch zu Versuch beobachtet wurden und eine gute Reproduzierbarkeit der Einzelversuche nur bedingt gegeben war. Ebenso stieg auch die über den Antriebsmotor eingebrachte Leistung bzw. Leistungsdichte mit der Anpresskraft und der Relativgeschwindigkeit.

Für den Masseabrieb konnte keine eindeutige Abhängigkeit von der Anpresskraft und der Relativgeschwindigkeit abgeleitet werden. Stieg der Abrieb bei Versuchsreihe 1 mit der Anpresskraft und der Relativgeschwindigkeit, so zeigte sich bei Versuchsreihe 2 ein anderes Bild. Dort stieg der Abrieb mit der Anpresskraft, fiel aber mit der Relativgeschwindigkeit.

Für alle Versuche wurde der jeweilige Reibungskoeffizient ermittelt. Die Werte lagen zwischen $\mu = 0,23$ und $\mu = 0,81$, wobei der obere Wert nur bei einem Versuch auftrat und deutlich über den anderen lag. Er muss somit als Ausreißer gewertet werden. Bei Versuchsreihe 1 ergab sich als mittlerer Reibungskoeffizient $\bar{\mu} = 0,324$, bei Versuchsreihe 2 errechnete sich $\bar{\mu} = 0,428$. Es konnte keine Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Anpresskraft, Relativgeschwindigkeit oder Temperatur festgestellt werden.

Die Energiebilanzen wurden für alle Versuche aufgestellt. Dabei wurde mit relativ geringer Streuung festgestellt, dass die in den Vorgang hinein gesteckte Energie zu $1/5$ in die Erwärmung, $1/30$ in den Abrieb, $1/5$ in die Wärmestrahlung, $1/3$ in den Verlust durch Konvektion und $1/4$ in den Verlust durch Wärmeleitung fließt. Dabei ist diese Aufteilung beim hier verwendeten Versuchsaufbau abhängig von der Versuchsdauer und vom erreichten Temperaturniveau. Je länger ein Reibvorgang dauert, desto geringer ist der Anteil der aufgebrauchten Gesamtenergie, der in Form einer Erwärmung der aneinander reibenden Körper spürbar wird und umgekehrt. Je höher die Temperaturen dieser Körper werden, desto stärker wird der Anteil des Wärmestrahlungsverlustes unter den Verlustmechanismen. Ganz allgemein wird die Aufteilung der Energieflüsse auch von der Geometrie (Verhältnis Volumen zu Oberfläche) der aneinander reibenden Körper abhängig sein sowie von deren physikalischen Eigenschaften wie der Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Oberflächenbeschaffenheit (Emissionskoeffizient).

Einige der durchgeführten Experimente wurden mit dem Programm COMSOL Multiphysics modelliert und anschließend über das Modell auf höhere Anpresskräfte und Relativgeschwindigkeiten extrapoliert. Dadurch konnte gezeigt werden, dass auch bei Relativgeschwindigkeiten unter $v_r = 1,0$ m/s heiße Oberflächen durch Reibvorgänge entstehen können, die dazu in der Lage sind, brennbare Staub/Luft-Gemische zu zünden. Ein Vergleich mit Versuchen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt zeigte, dass die bei Reibvorgängen auftretenden zeitlichen Temperaturverläufe und Maximaltemperaturen ganz entscheidend von der speziellen Versuchssituation abhängen. Dies konnte mit Hilfe von Modellrechnungen untermauert werden. Daraus muss die Schlussfolgerung gezogen werden, dass es aufgrund von Laboruntersuchungen prinzipiell schwer möglich ist, generelle Grenzen bei den Parametern Anpresskraft, Relativgeschwindigkeit, Flächenpressung und Leistungsdichte anzugeben, bei deren zahlenmäßiger Unterschreitung keine zündgefährlichen heißen Oberflächen auftreten können. Der Grund dafür ist, dass die Erwärmung bei Reibvorgängen von vielen weiteren Parametern abhängt.

Trotz der relativ schlechten Reproduzierbarkeit der Einzelversuche konnten aufgrund der guten Modellierbarkeit der Versuchsergebnisse stichhaltige Resultate erzielt werden. Die in Abschnitt 1.2 formulierten Projektziele sind deshalb vollständig erreicht worden.

6.2 Ausblick

Eine der größten Unsicherheiten bei der Betrachtung von Reibvorgängen ist die Variabilität der Reibungskoeffizienten. Streuten diese bei den hier beschriebenen Experimenten schon recht stark, so variierten sie bei den Versuchen der PTB noch erheblich stärker. Wie der Vergleich der Versuche der FSA und PTB zeigt, hängt der Zahlenwert der Reibungskoeffizienten nicht nur von der Materialpaarung ab, sondern auch von der speziellen Versuchsanordnung. Deswegen ist die Beschaffung von Reibungskoeffizienten die größte Herausforderung wenn es darum geht, den Grad der Erwärmung bei Reibvorgängen vorherzusagen.

Um belastbare Zahlenwerte für Reibungskoeffizienten zu bekommen, werden hier zwei Wege vorgeschlagen:

1. Suche in der Literatur und Verwenden des größten gefundenen Reibungskoeffizienten für eine definierte Materialpaarung.
2. Aufbauen einer neuen Apparatur, mit der sich Reibungskoeffizienten ohne große Streuung bestimmen lassen und die möglichst große Zahlenwerte für Reibungskoeffizienten für eine definierte Materialpaarung liefert.

Wie eine solche Apparatur aussehen könnte, wird im Folgenden erläutert. Die Achse des Motors der bisher verwendeten Apparatur wird mit einer Reibscheibe bestückt, deren äußerer Rand aus dem zu untersuchenden Material besteht (Abbildungen 6.1 und 6.2). An einem Gelenk ist eine Stange aus möglichst leichtem aber stabilen Material drehbar befestigt. Die Stange ist parallel zu den Stirnseiten der Reibscheibe ausgerichtet. Am Ort der Reibscheibe ist eine Halterung an der Stange angebracht, an der die Materialprobe befestigt ist, die auf dem Rand der Reibscheibe schleifen soll. Mit Hilfe eines Gewichtes, welches entlang der Stange verschoben werden kann, wird die Anpresskraft erzeugt. Wenn die Anlage in Betrieb ist, befindet sich die Stange in horizontaler Position (Abbildung 6.2, unten) und die Anpresskraft ergibt sich aus

$$F_n = m \cdot g \cdot \frac{l_1}{l_2} \quad (6.1)$$

mit m als Gewichtsmasse, g als Erdbeschleunigung, l_1 als Abstand zwischen Gelenk und Materialprobe und l_2 als Abstand zwischen Gelenk und Gewichtschwerpunkt. Mit Hilfe einer Hydraulik kann die Stange mitsamt Gewicht und Materialprobe abgesenkt und angehoben werden [10], [4].

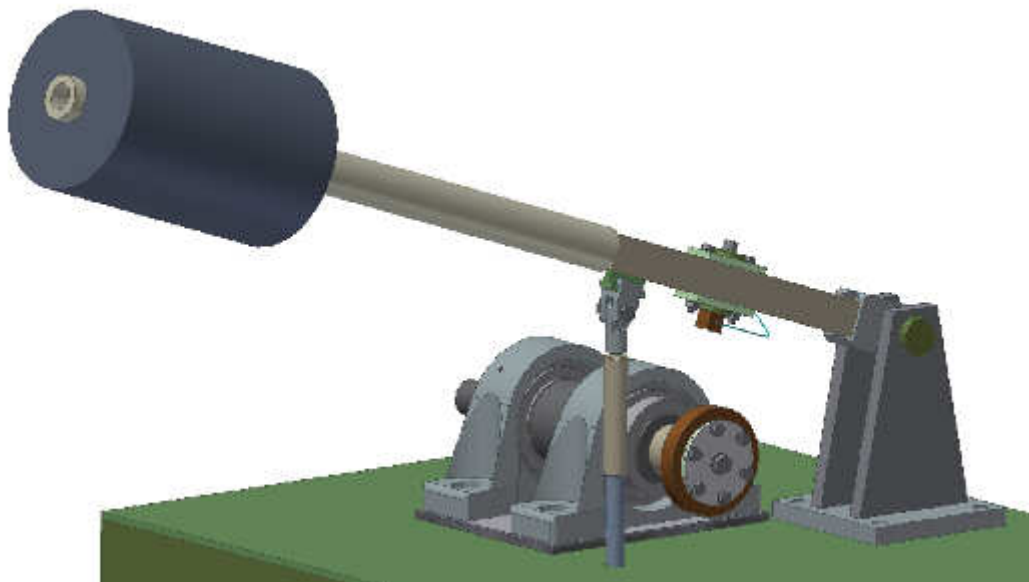


Abbildung 6.1: CAD-Zeichnung (perspektivisch) einer möglichen Apparatur zur Bestimmung von Reibungskoeffizienten [10], [4].

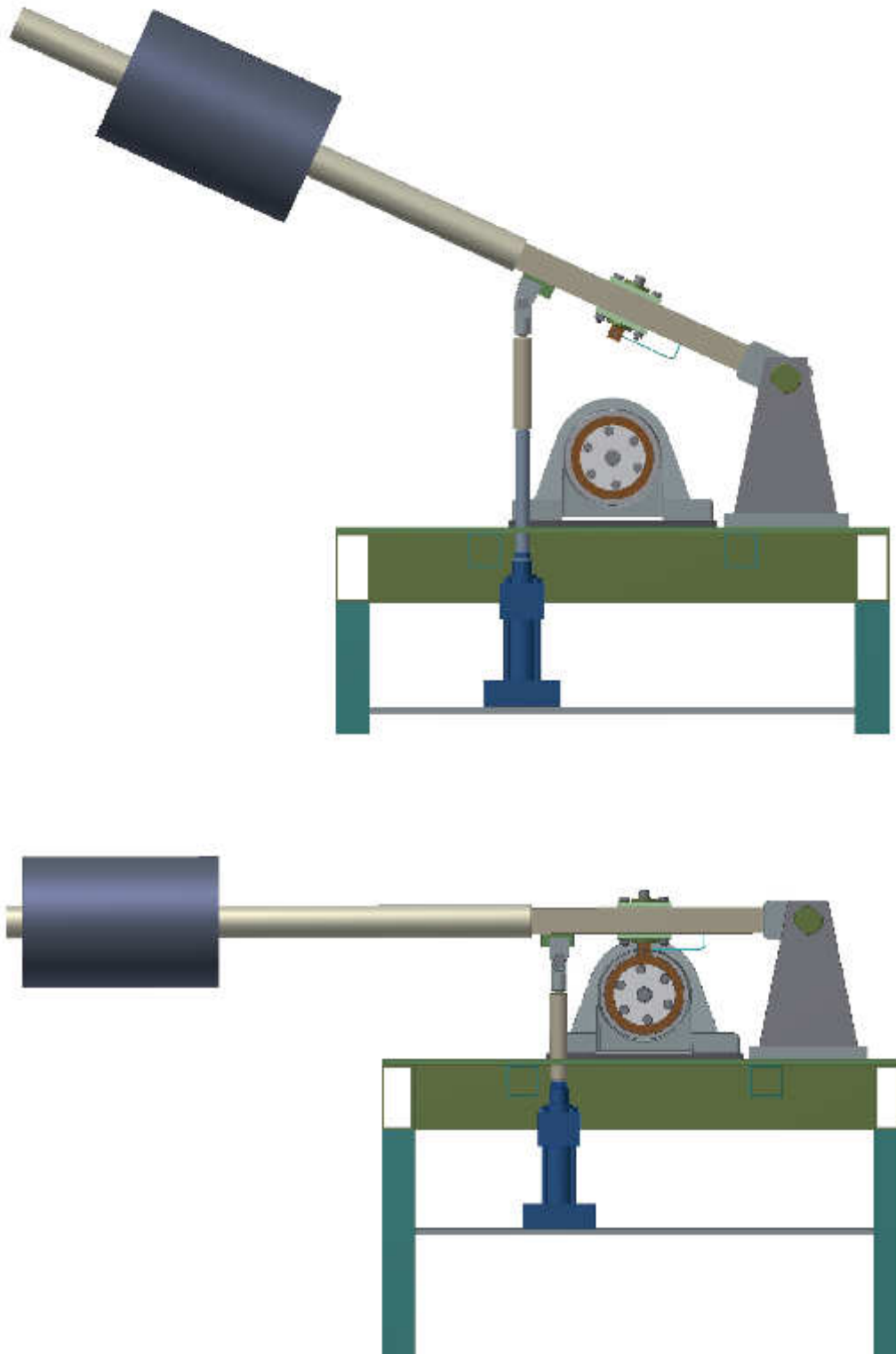


Abbildung 6.2: CAD-Zeichnung (Schnitt) einer möglichen Apparatur zur Bestimmung von Reibungskoeffizienten. Gezeigt ist die Apparatur im Leerlauf (oben) und im Reibbetrieb (unten) [10], [4].

Bei der von der PTB für ihre Versuche verwendeten Apparatur traten sehr hohe Reibungskoeffizienten auf. Deshalb wurde diese Art des Reibmechanismus (Stift auf Rand einer rotierenden Scheibe) beim Entwurf der neuen Versuchsapparatur aufgegriffen. Dadurch, dass die Anpresskraft über ein Gewicht und eine Hebelkonstruktion erzeugt wird, dürften Schwankungen in der Anpresskraft, wie sie bei Verwendung der Hydraulik auftragen, vermieden werden.

Wenn ein gesicherter Satz an Reibungskoeffizienten vorliegt, ist es möglich, mit COMSOL Multiphysics verschiedene, in der industriellen Praxis vorkommende Reibvorgänge, zu modellieren. Auf diesem Wege sollte es möglich sein, Gefahrenpotentiale durch heiße Oberflächen aufgrund von Reibvorgängen besser einschätzen zu können. Möglicherweise können auf diese Art und Weise Zahlenwerte oder Kombinationen von Zahlenwerten für die Parameter Anpresskraft, Relativgeschwindigkeit, Flächenpressung, Leistungsdichte etc. gefunden werden, unterhalb derer sicher keine gefährlichen heißen Oberflächen bei Reibvorgängen auftreten.

Literaturverzeichnis

- [1] W. FRITZ: *Skript Mechanische Verfahrenstechnik 1*, Hochschule Mannheim, 2011.
- [2] UNIVERSITÄT FRANKFURT: Elearning Physik.
- [3] INTERNET: http://www.mvt.ovgu.de/mvt_media/Vorlesungen/VO_AT_RC/Folien_AT_RC_2-p-1388.pdf.
- [4] SEITHEL, M.: *CAD-Konstruktionen für das Projekt F-05-0804 mit Hilfe von Autodesk Inventor*, Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe, Mannheim, 2014.
- [5] INTERNET: <http://www.schweizer-fn.de/stoff/reibwerte/reibwerte.php>.
- [6] INTERNET: <http://www.wikipedia.org/wik/Reibungskoeffizient>.
- [7] M. KÜHNER: *Zündwirksamkeit mechanisch erzeugter Zündquellen und die Auswirkung auf die Anforderung an mechanische Geräte*, Diplomarbeit, Physikalisch-Technische Bundesanstalt & Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Braunschweig, 2011.
- [8] M. BEYER: *Private Mitteilung*, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, 2011.
- [9] L. MEYER: *Private Mitteilung*, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, 2014.
- [10] H. SCHIEBLER: *Private Mitteilung*, Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe, Mannheim 2014.

Anhang A

Konstruktionszeichnung

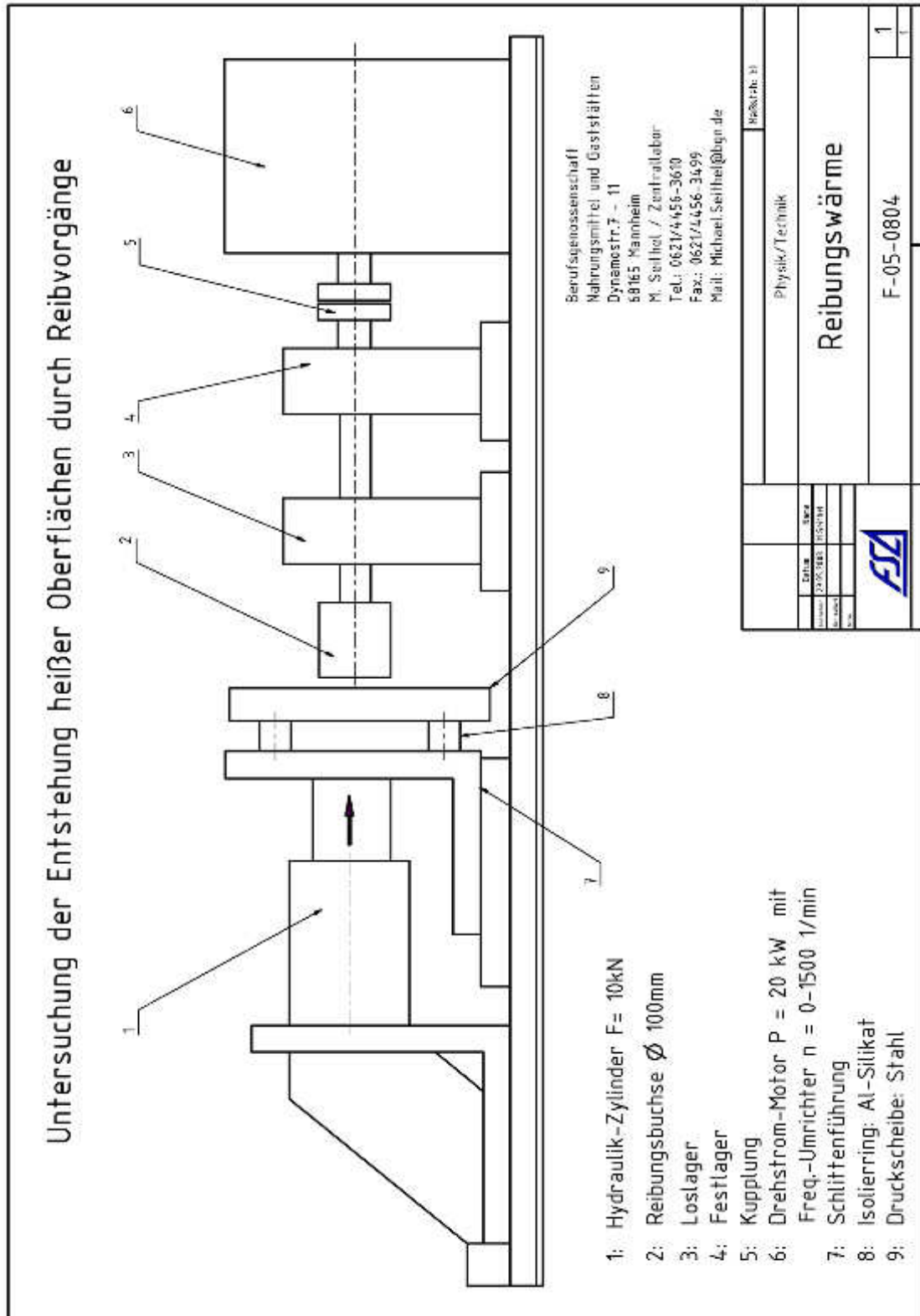


Abbildung A.1: Erster Entwurf der Versuchsapparatur.

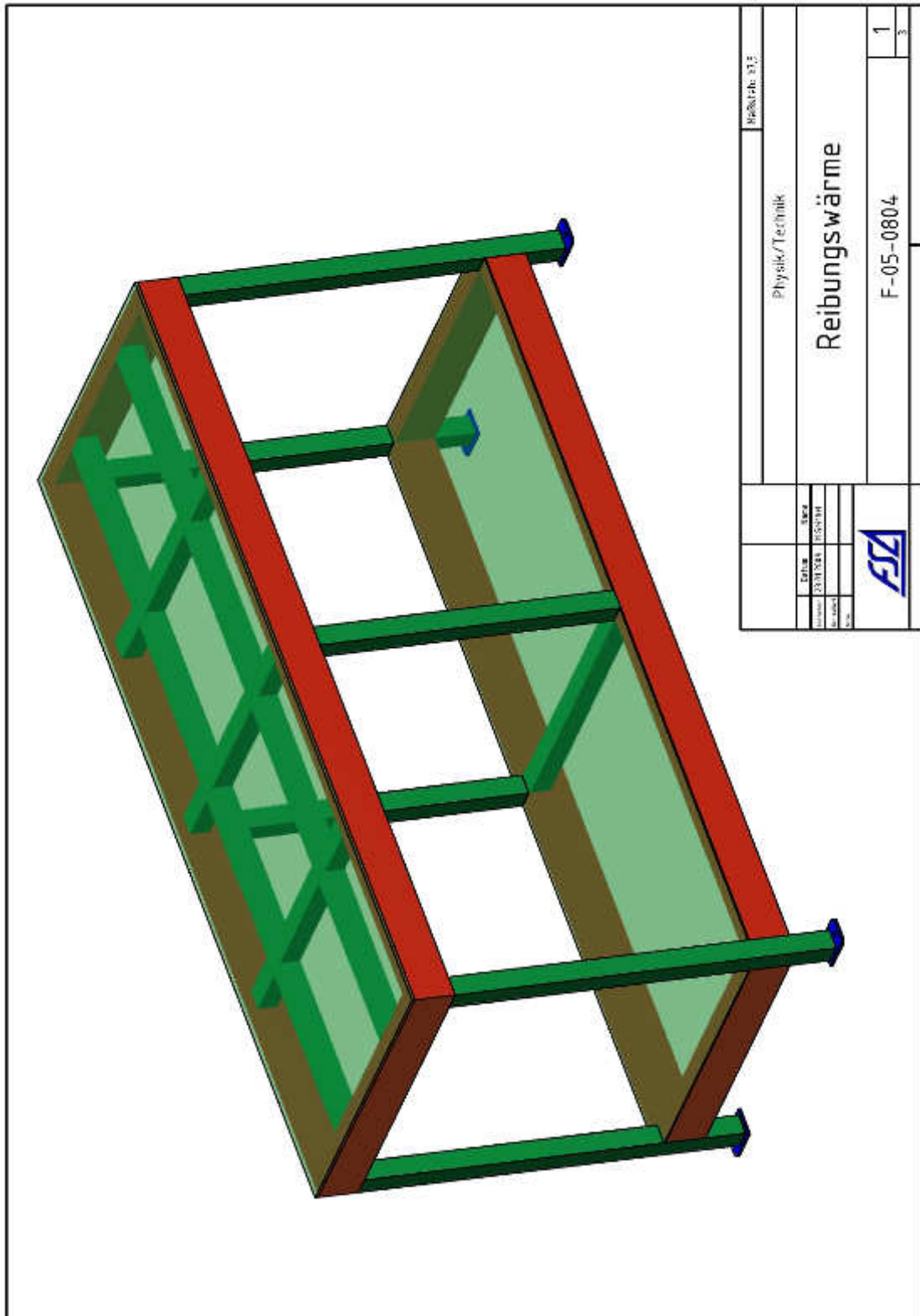


Abbildung A.2: Tischkonstruktion für den Versuchsaufbau, Teil 1.

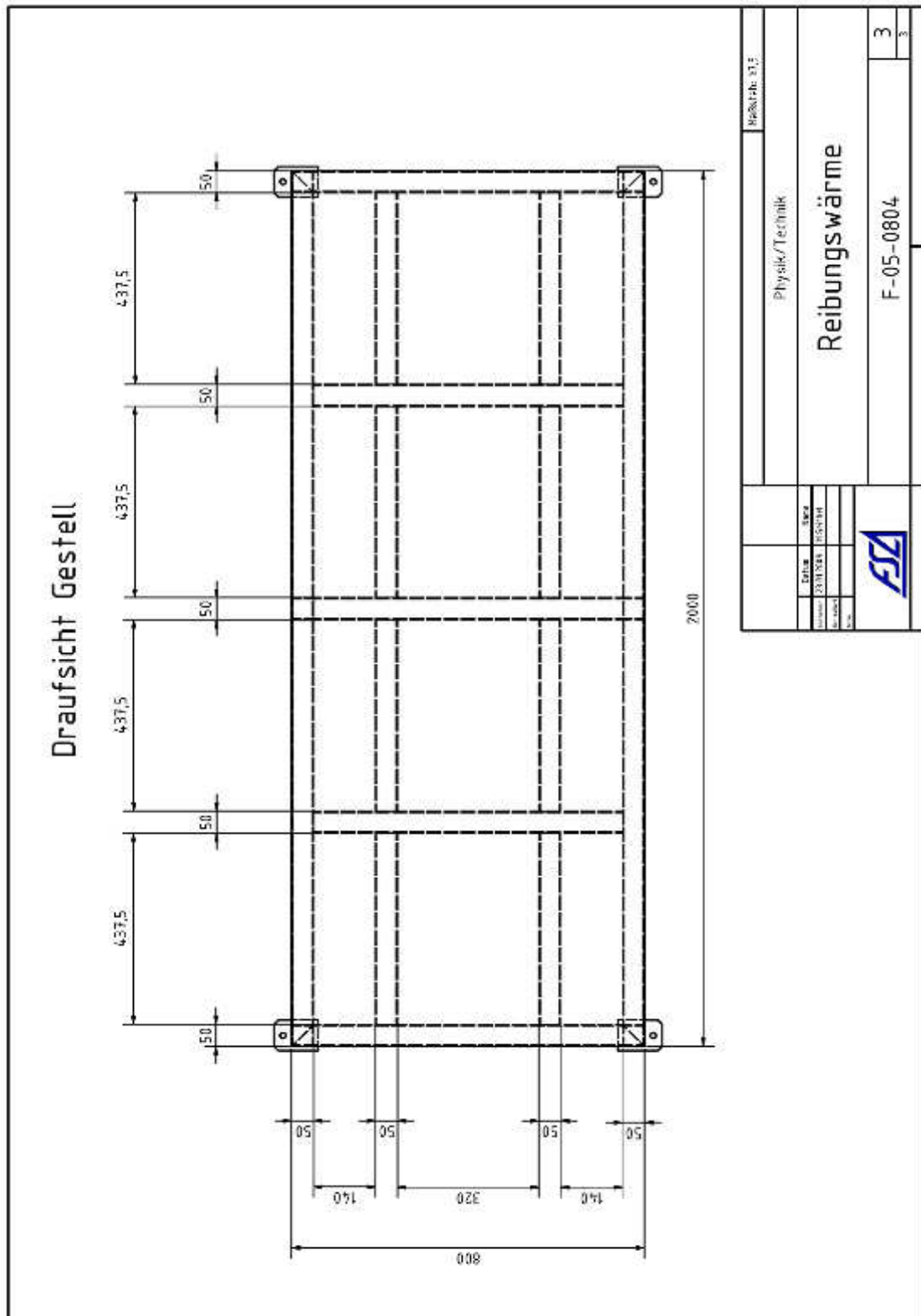


Abbildung A.4: Tischkonstruktion für den Versuchsaufbau, Teil 3.

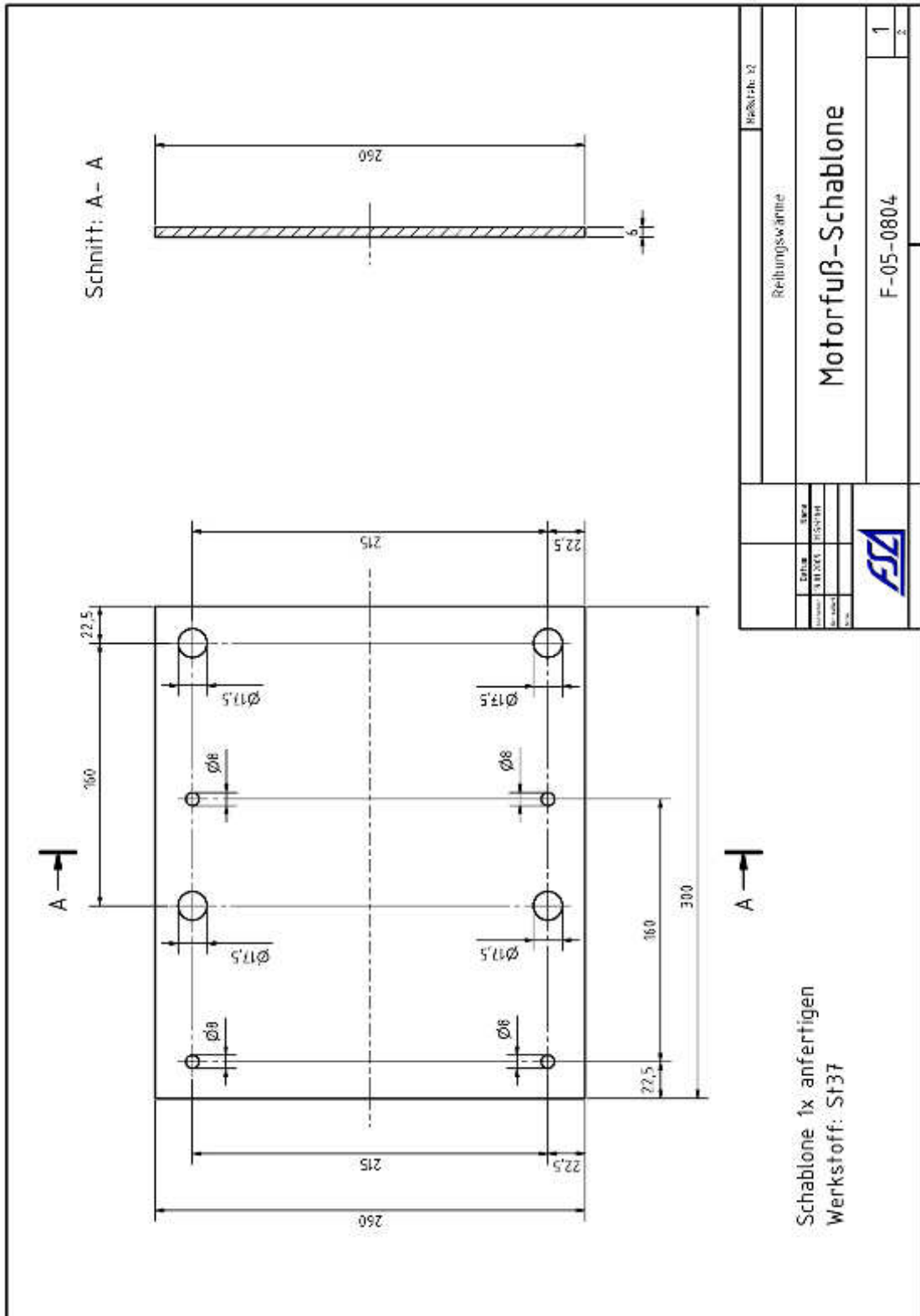


Abbildung A.5: Halterung für den Elektromotor.

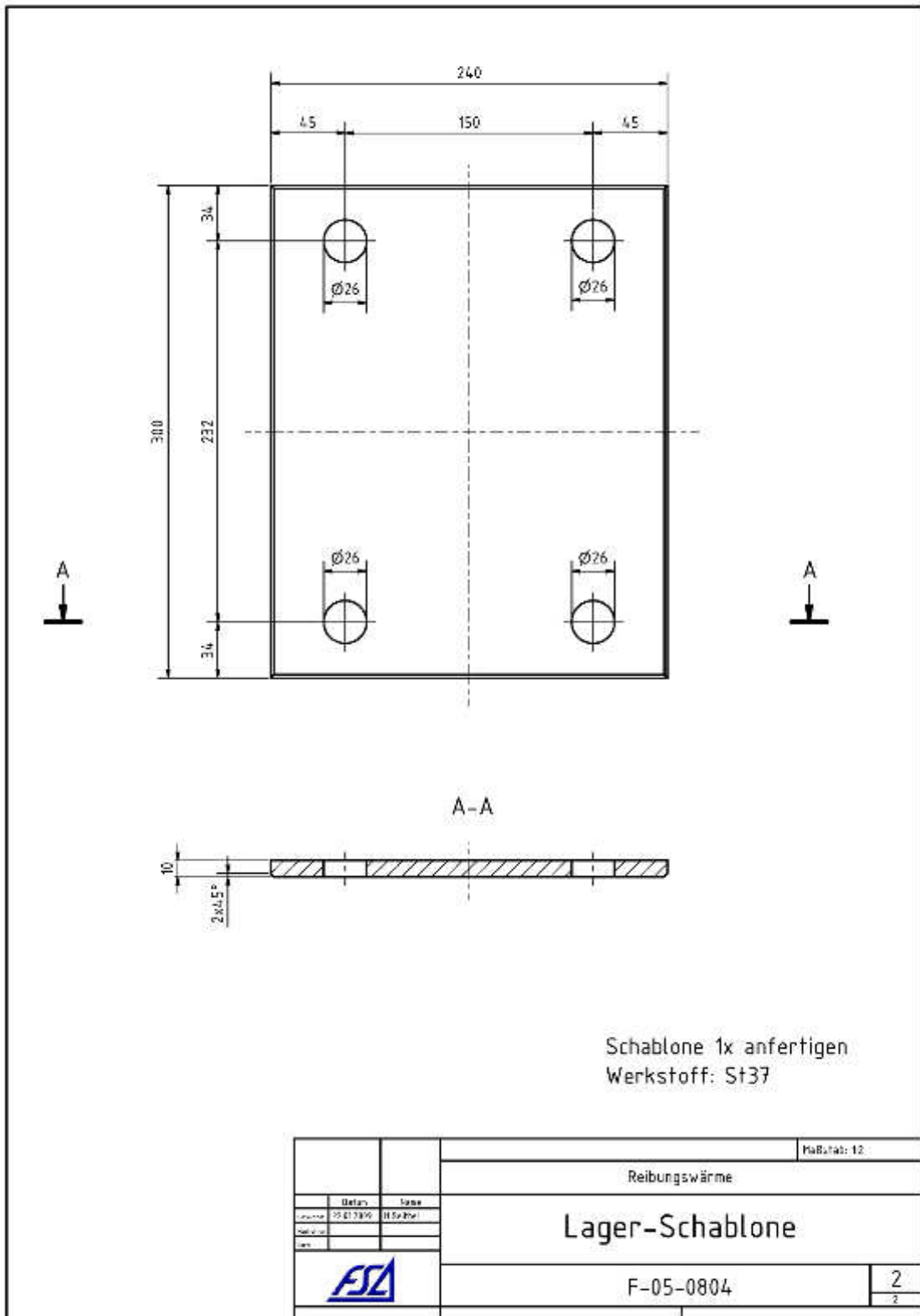


Abbildung A.6: Halterung für das Lager der Antriebswelle.

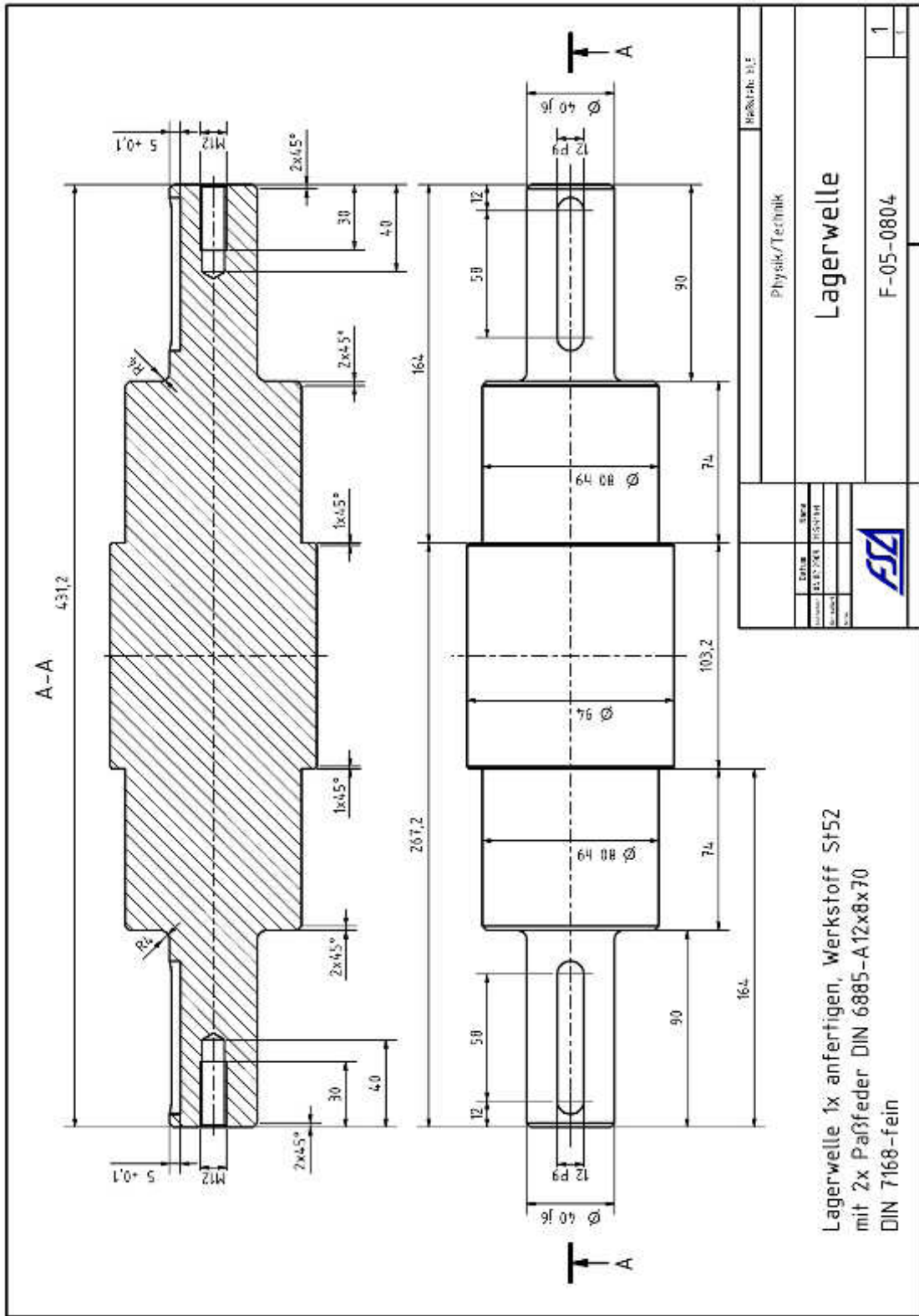


Abbildung A.7: Antriebswelle.

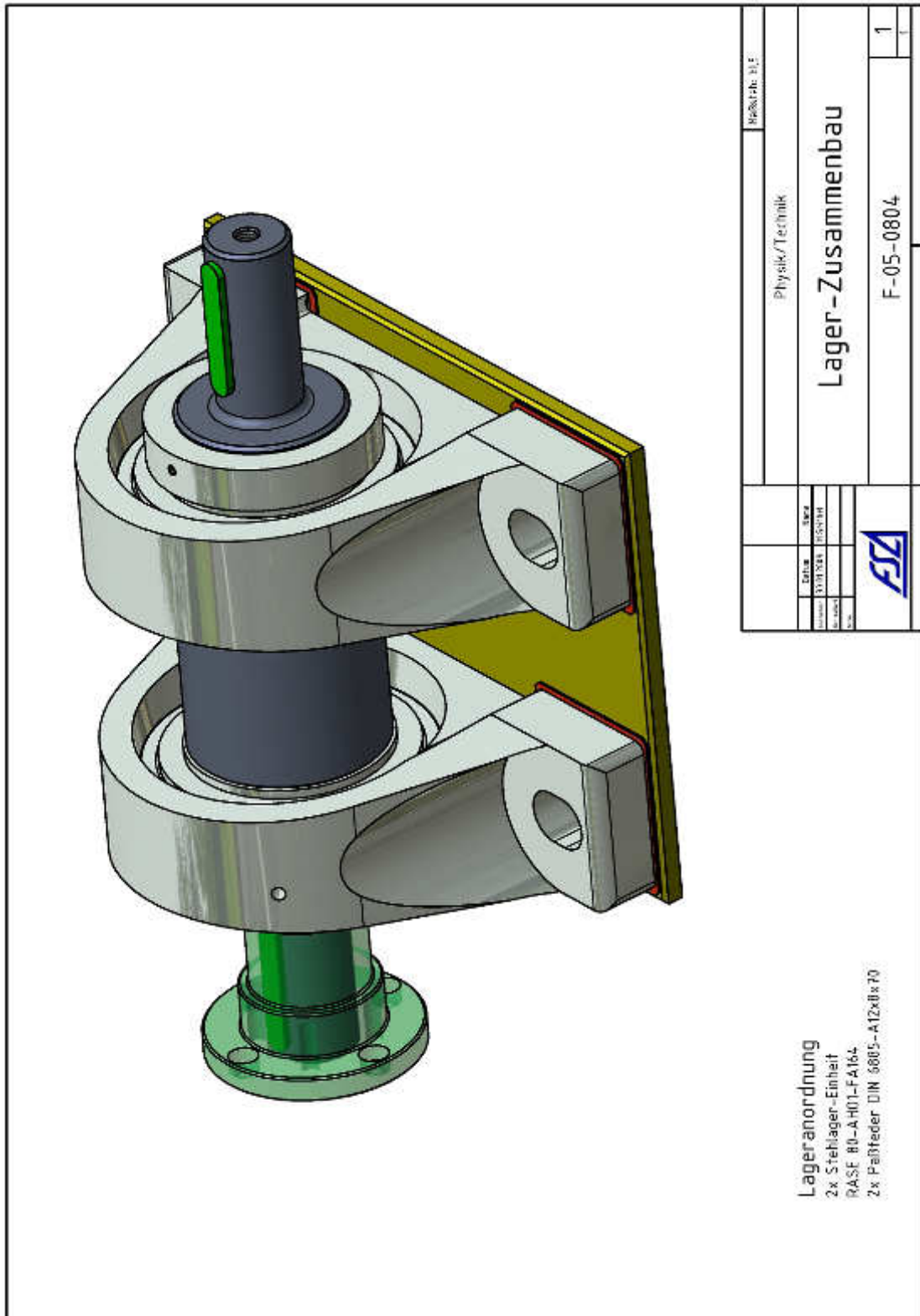


Abbildung A.8: Lager mit Antriebswelle.

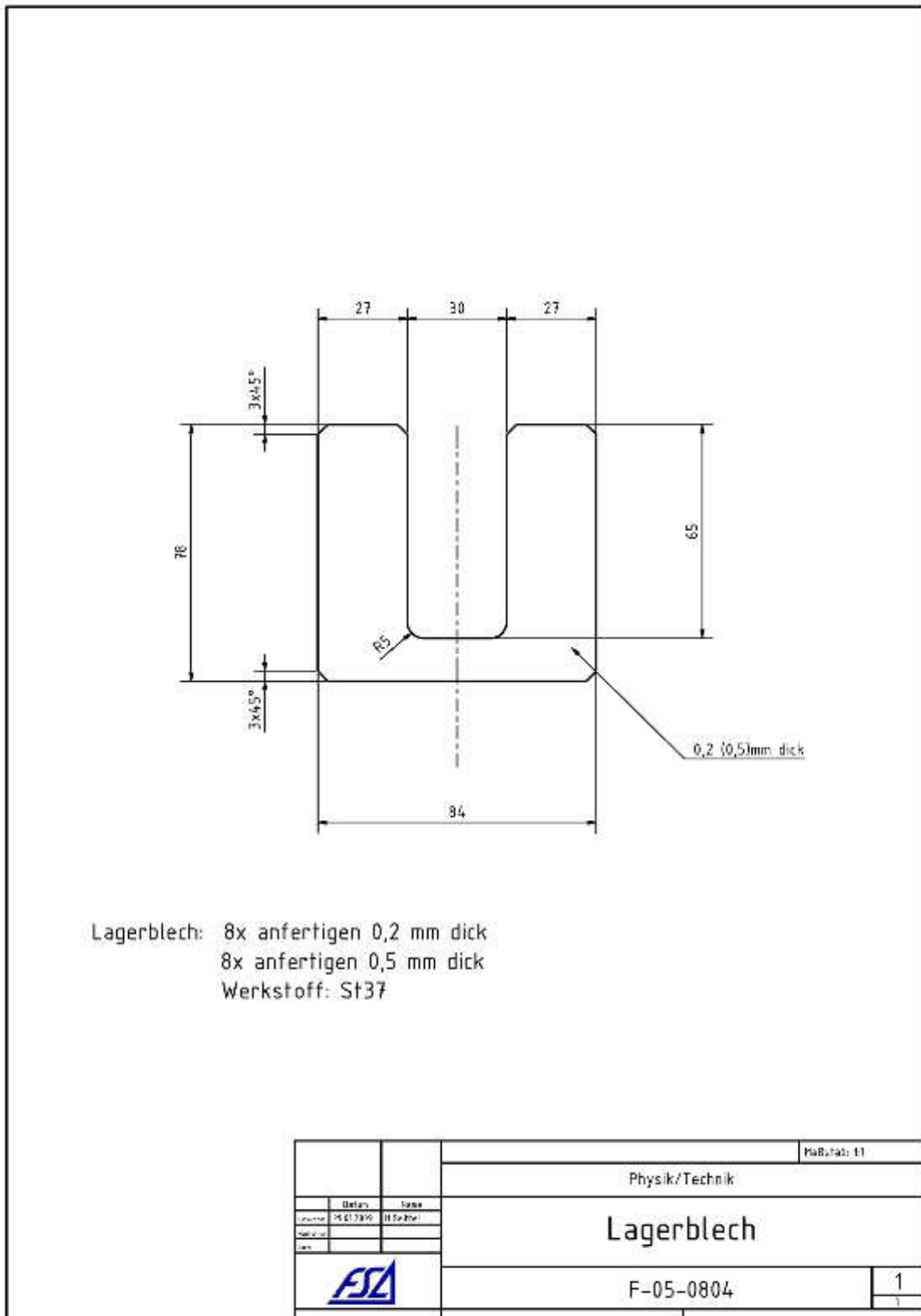


Abbildung A.9: Unterlagsblech zum Ausgleichen von Höhenunterschieden.

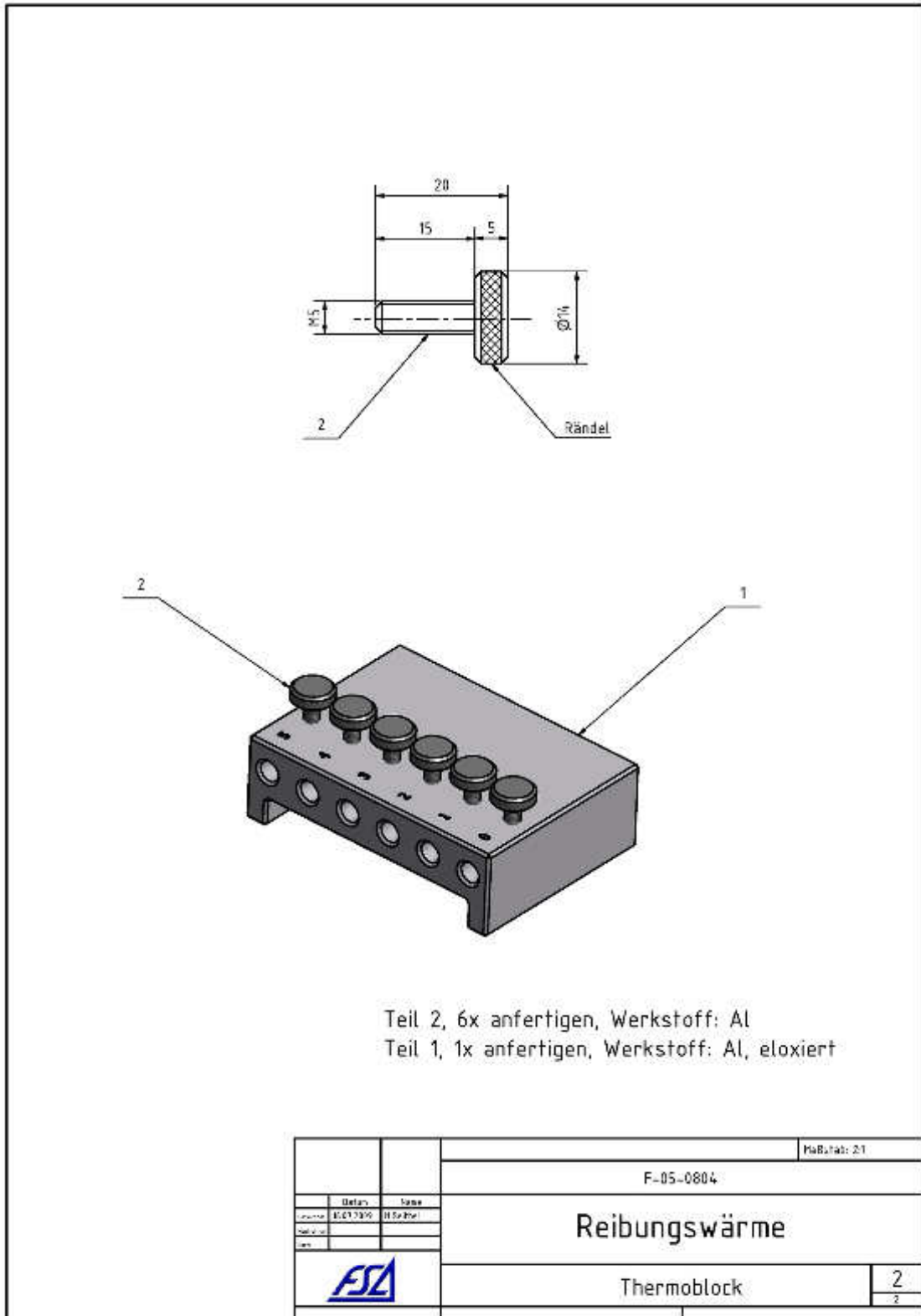


Abbildung A.11: Block zum Einspannen der Thermoelemente, Teil 2.

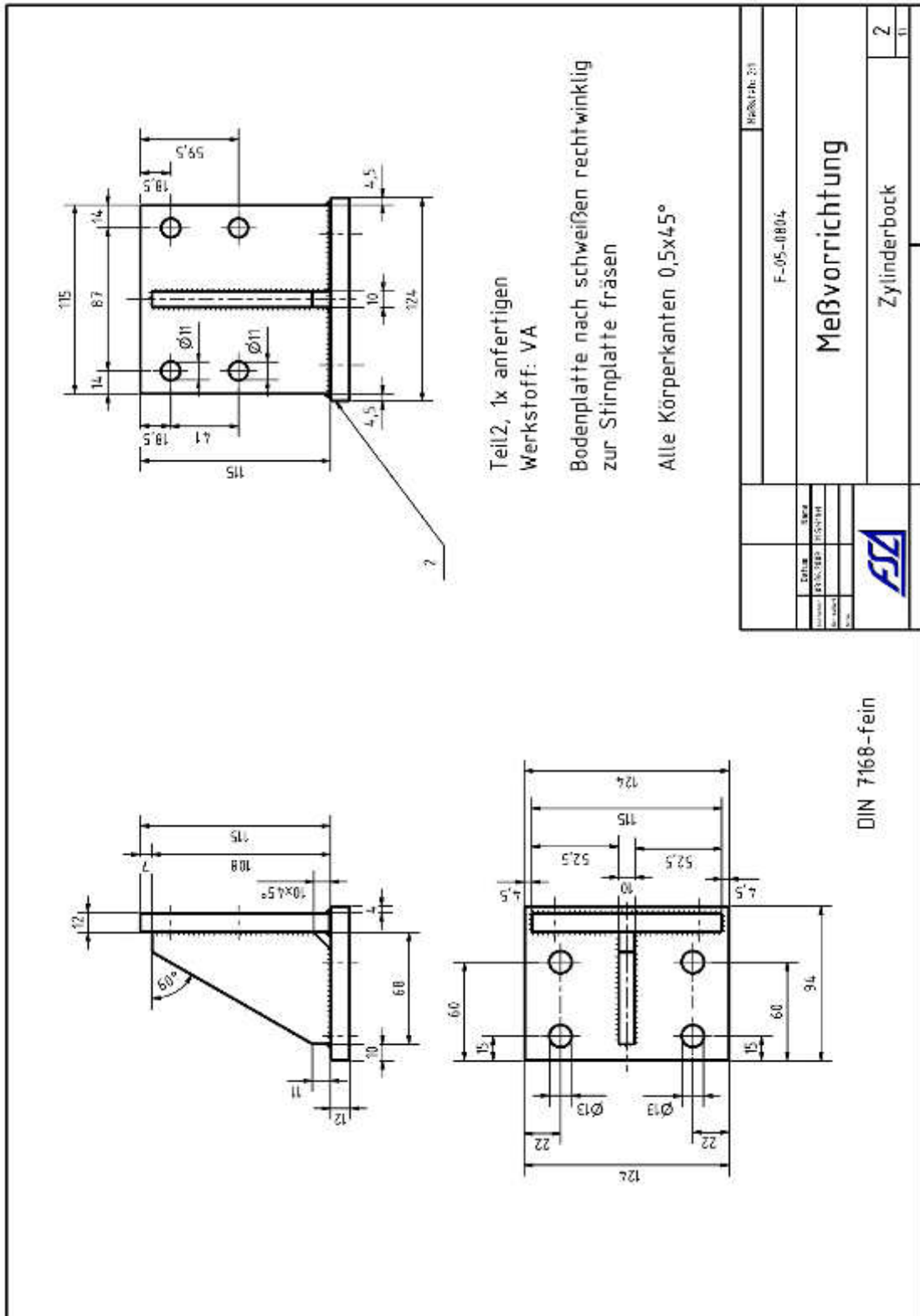


Abbildung A.13: Verankerung für den Hydraulikzylinder.

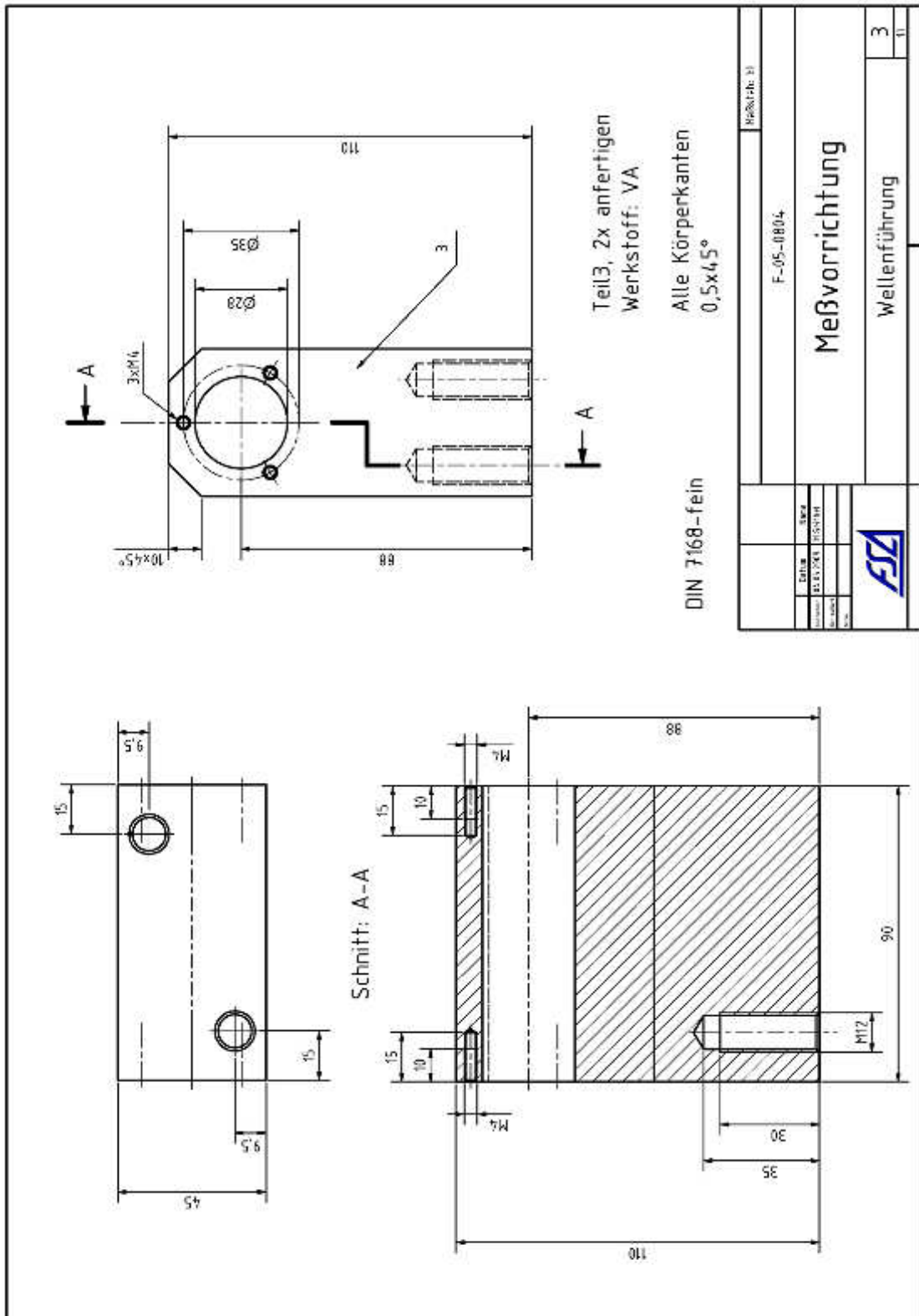


Abbildung A.14: Führung der Bolzen zur Stabilisierung der drückenden Basisplatte und Reibscheibe.

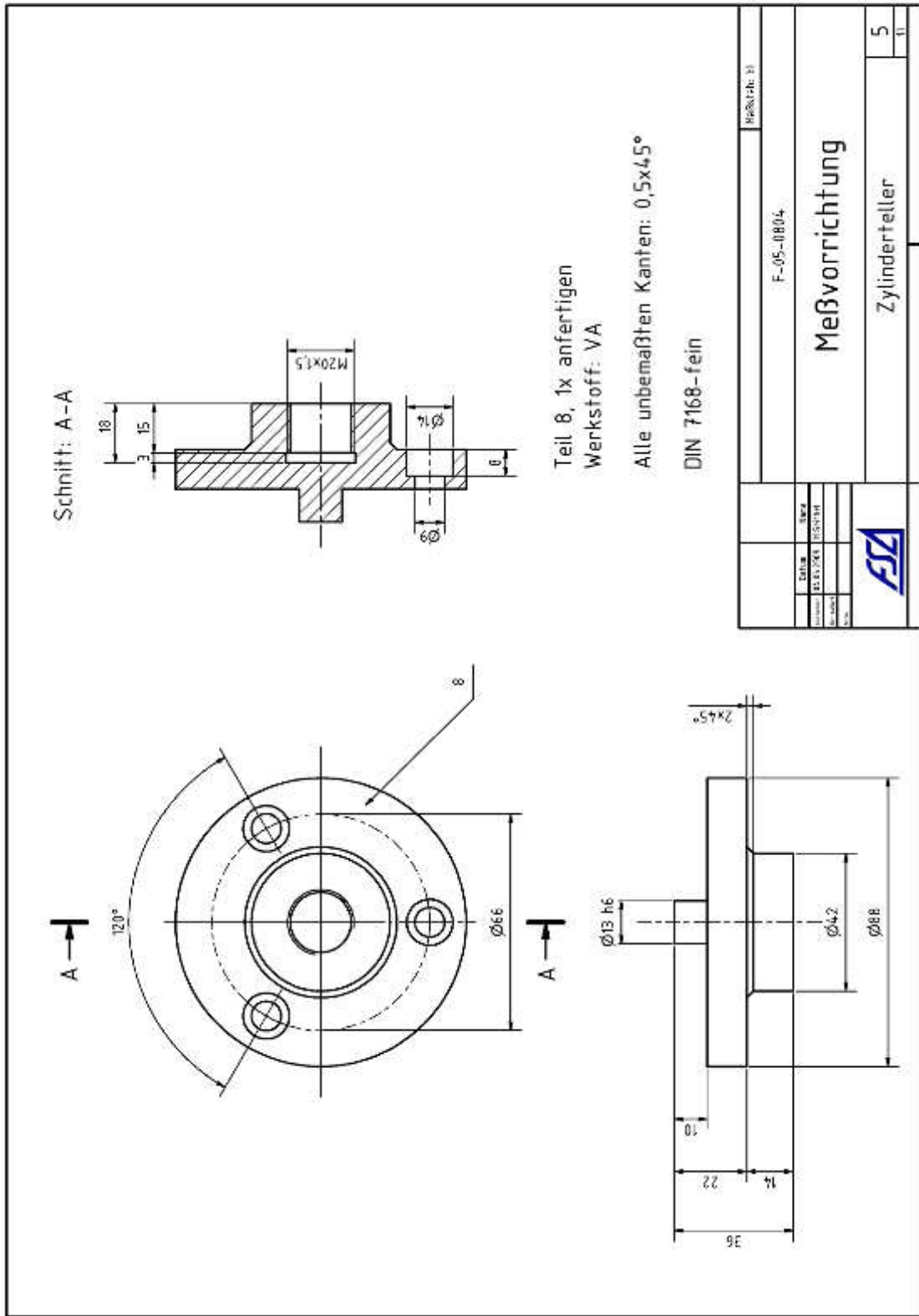


Abbildung A.16: Platte zur Aufnahme der Hubstange des Hydraulikzylinders.

Achtung: Maße an Buchse geändert.

Teil 10, 10x anfertigen
Werkstoff: Zirkonoxid

Teil 11, 20x anfertigen
Werkstoff: Zirkonoxid

Alle Kanten 0,5x45°
Alle Maße ± 0,1 mm

Erbitte ein Preisangebot

FSA e.V.
M.Seithel/Labor
Dynamostr.7-11
68165 Mannheim
Telefon (0621) 4456-3610
Fax (0621) 4456-3499

FSA		F-05-0804	
Meßvorrichtung		Isolierteile, neu	
		7	11

Abbildung A.18: Keramikteile zur Wärmeisolierung der starren Basisplatte und Reibscheibe.

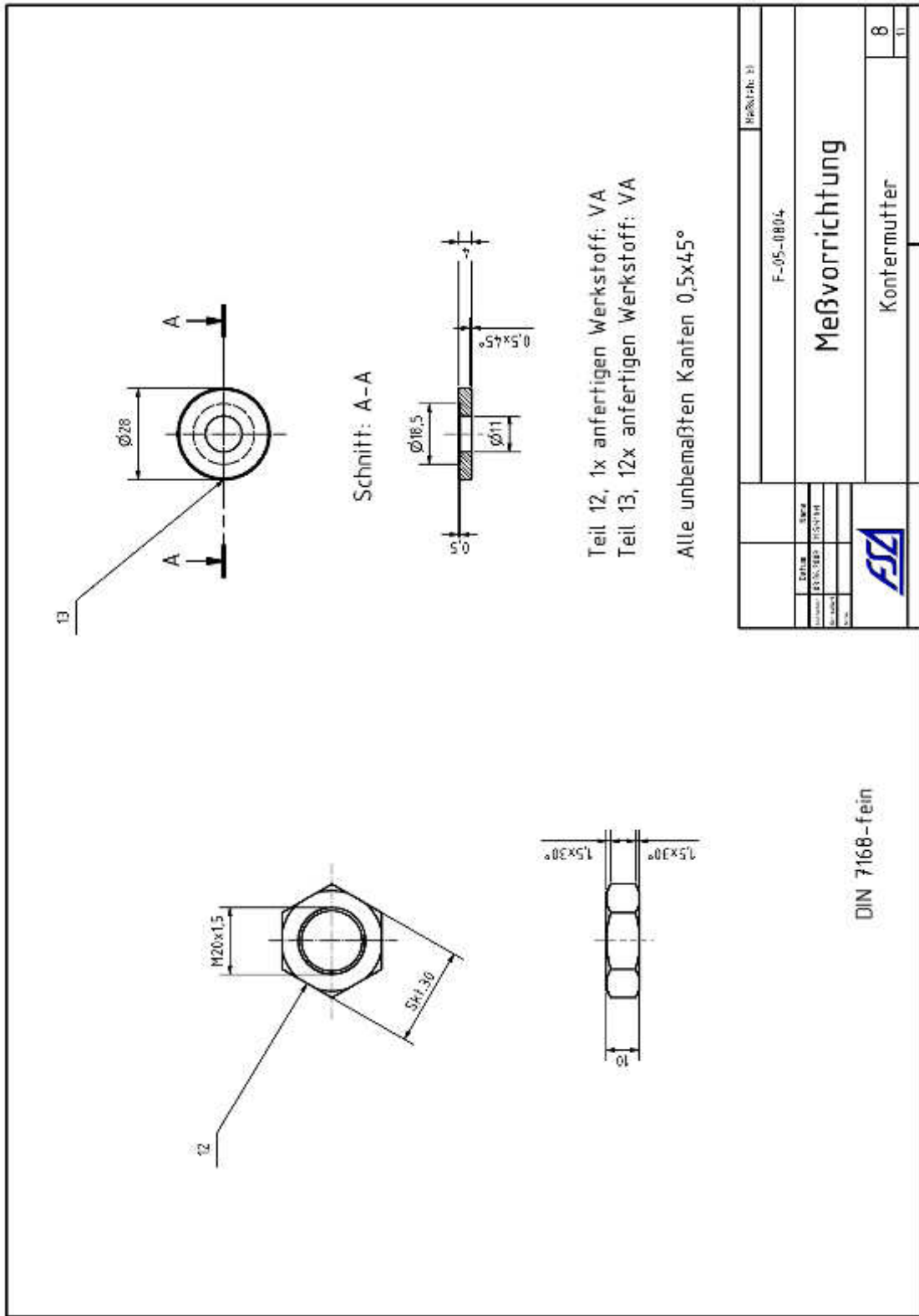


Abbildung A.19: Muttern zur Befestigung.

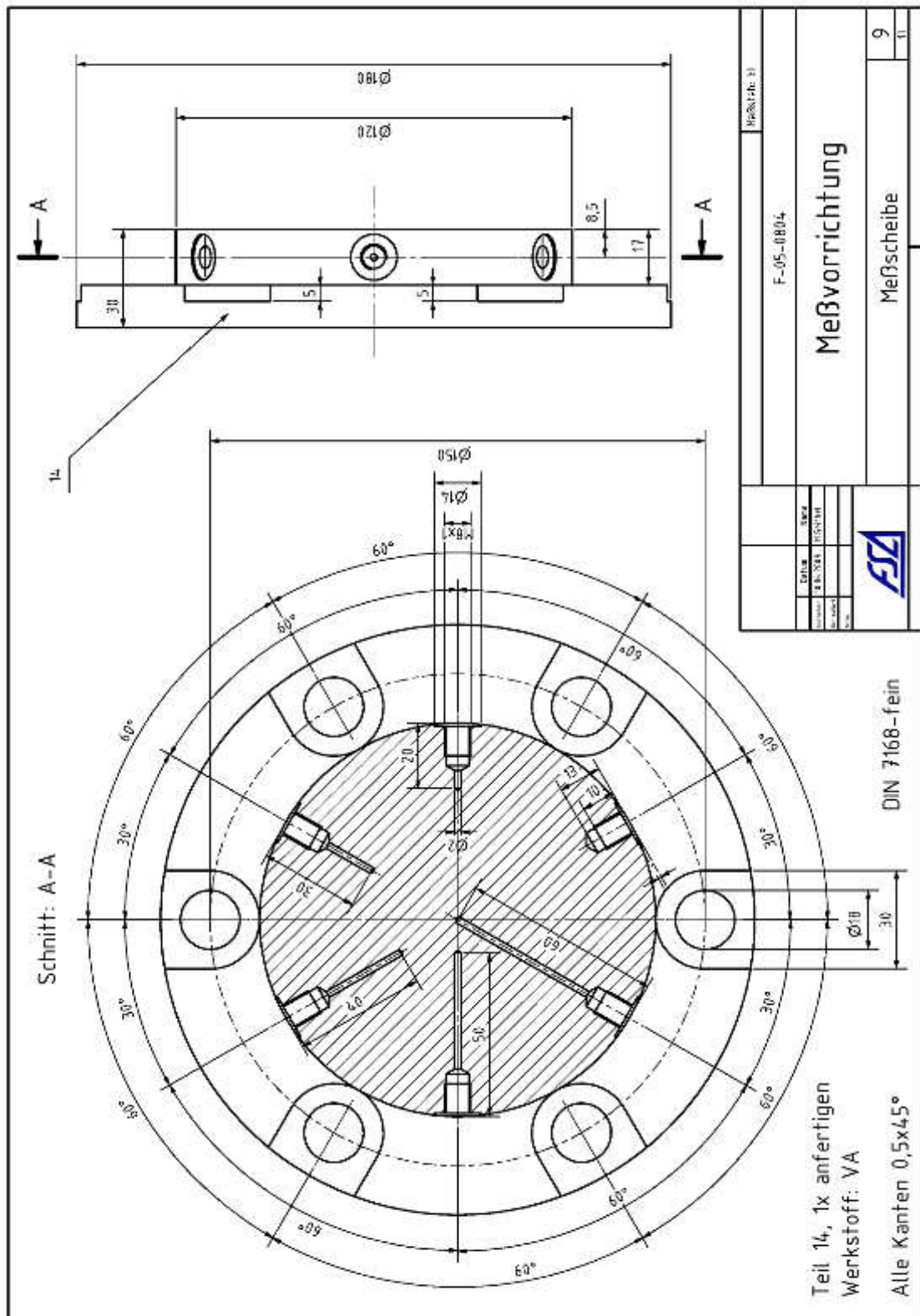


Abbildung A.20: Basisplatte der Druckseite mit Vorrichtungen zur Aufnahme der Thermoelemente.

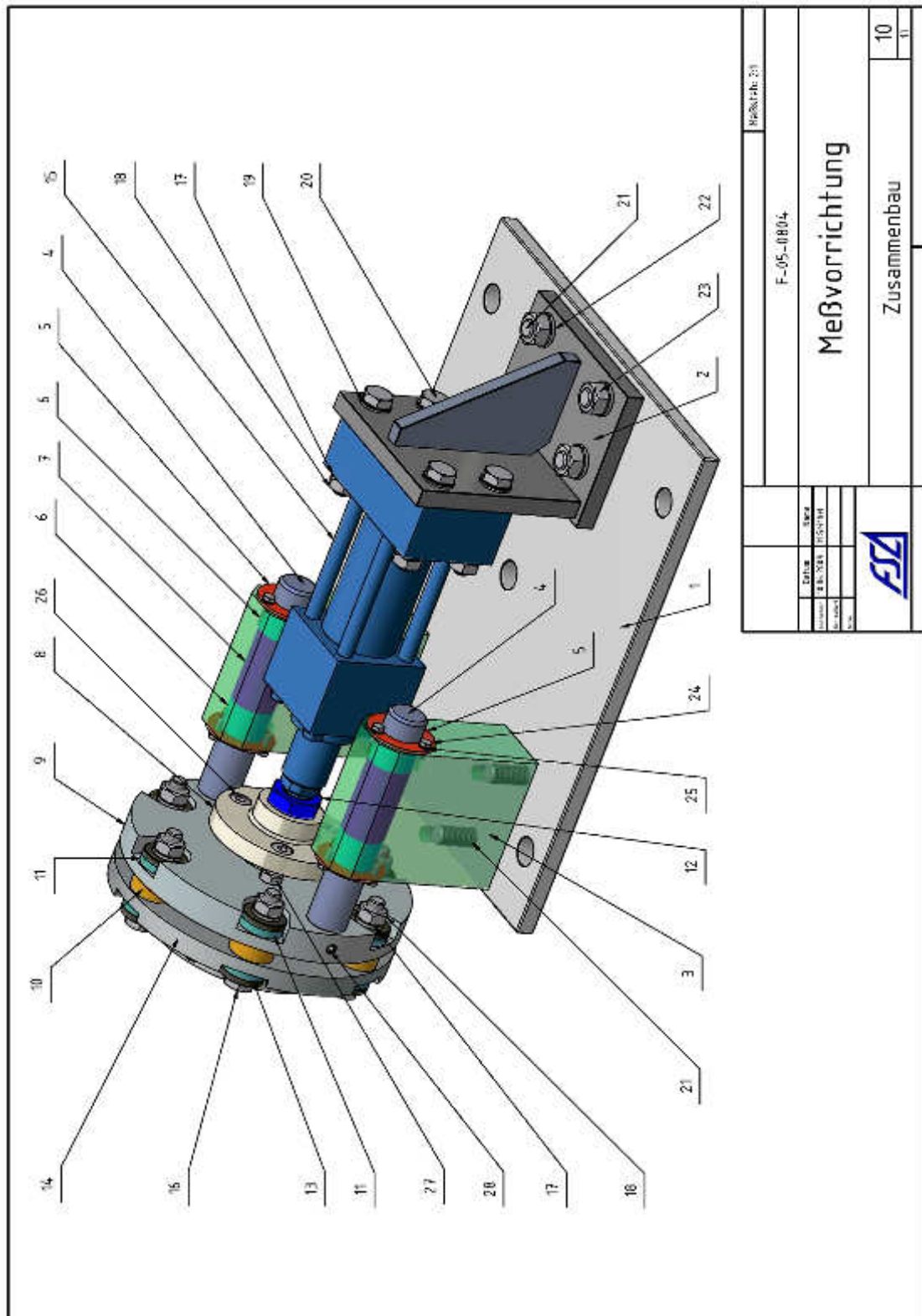


Abbildung A.21: Starrer bzw. drückender Teil der Apparatur zusammengebaut.


30	Kraftmeßdose 9031 A, Fa. Kistler	1	vorh.
29	Gewindestift DIN 913 - M4 x 8	1	VA
28	Gewindestift DIN 913 - M8 x 10	2	VA
27	Skt.-Mutter DIN 934 - M8 -8	3	VA
26	Zylinderschraube DIN 912 - M8 x 30	3	VA
25	Federring DIN 127 - A4	12	VA
24	Skt.-Schraube DIN 933 - M4 x 10	12	VA
23	Skt.-Mutter DIN 934 - M12 -8	4	VA
22	Federring DIN 127 - A 12	4	VA
21	Zylinderschraube DIN 6912 - M12 x 30	8	VA
20	Skt.-Schraube DIN 931 - M10 x 65	4	VA
19	Scheibe DIN - 125 - B 10,5	4	VA
18	Skt.-Mutter DIN 934 - M10 -8	10	VA
17	Federring DIN 127 - A 10	10	VA
16	Skt.-Schraube DIN 931 - M10 x 60	6	VA
15	Zylinder	1	vorh.
14	Meßscheibe	1	VA
13	Unterlagscheibe	12	VA
12	Kontermutter	1	VA
11	Isolierscheibe, Macor	20	vorh.
9	Druckscheibe	1	VA
8	Zylinderteller	1	VA
7	Distanzbuchse	2	AL
6	Gleitbuchse	4	vorh.
5	Sicherungsscheibe	4	AL
4	Führungswelle	2	VA
3	Wellenführung	2	VA
2	Zylinderbock	1	VA
1	Grundplatte	1	VA
OBJEKT	BEZEICHNUNG	ANZAHL	MATERIAL
		Maßstab:	
		F-05-0804	
	Datum	Name	
Genehmigt	5.06.2009	H.Seithel	
Korrigiert			
gepr.			
		Stückliste	
		11	
		11	

Abbildung A.22: Teileliste des starren bzw. drückenden Teils der Apparatur.

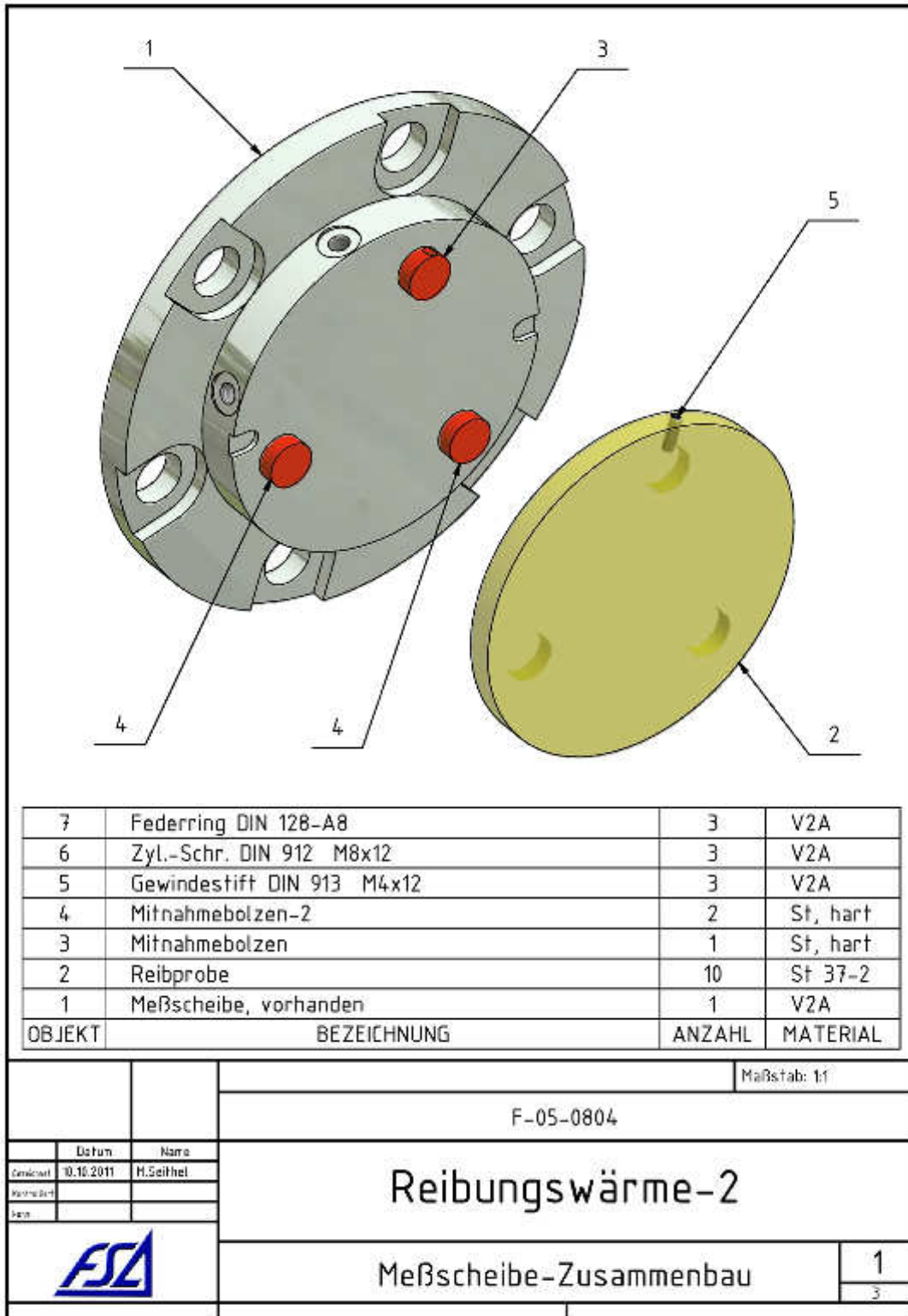


Abbildung A.23: Veränderte Basisplatte und Reibscheibe der Druckseite der Apparatur.

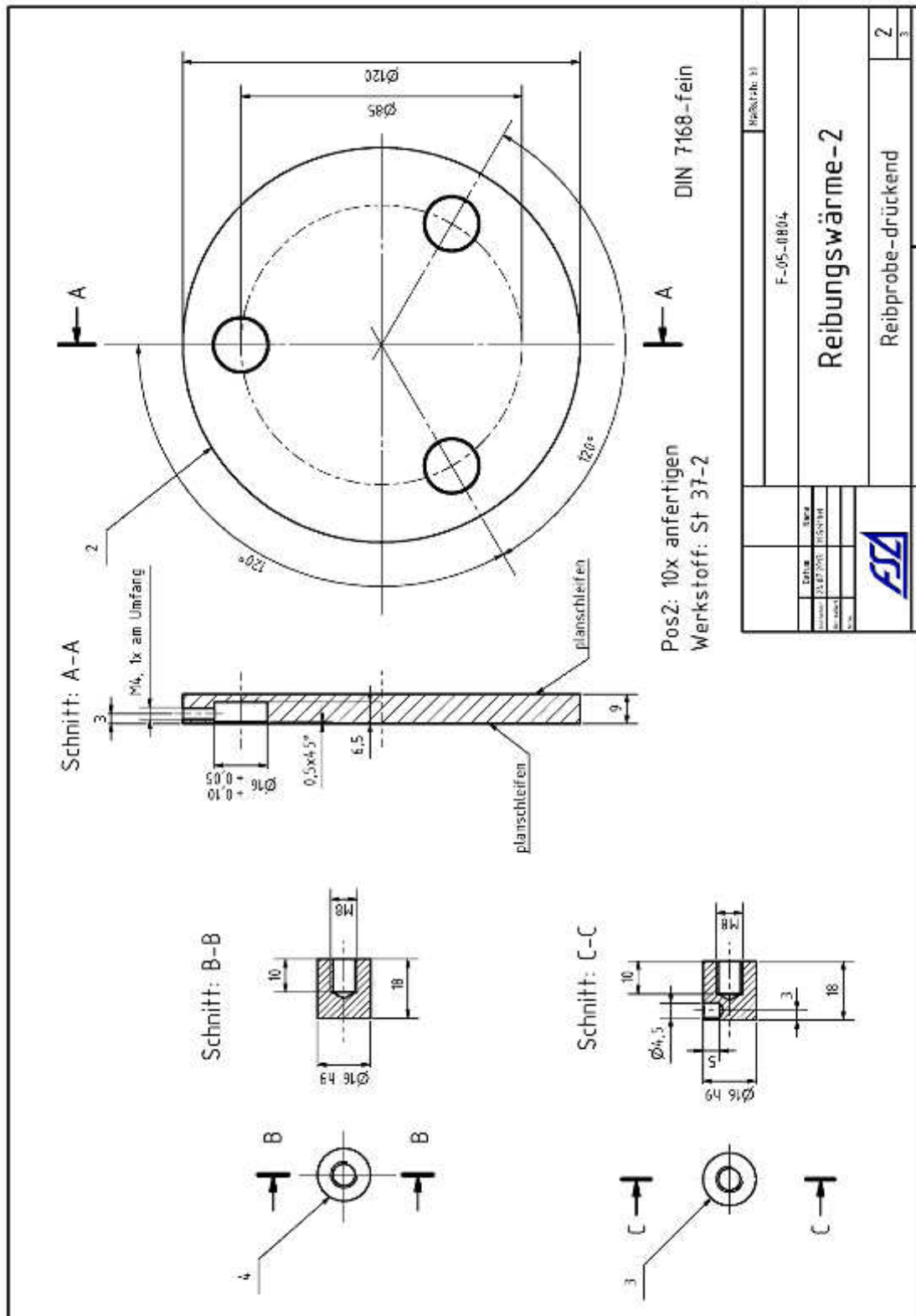


Abbildung A.24: Veränderte Reibscheibe der Druckseite der Apparatur.

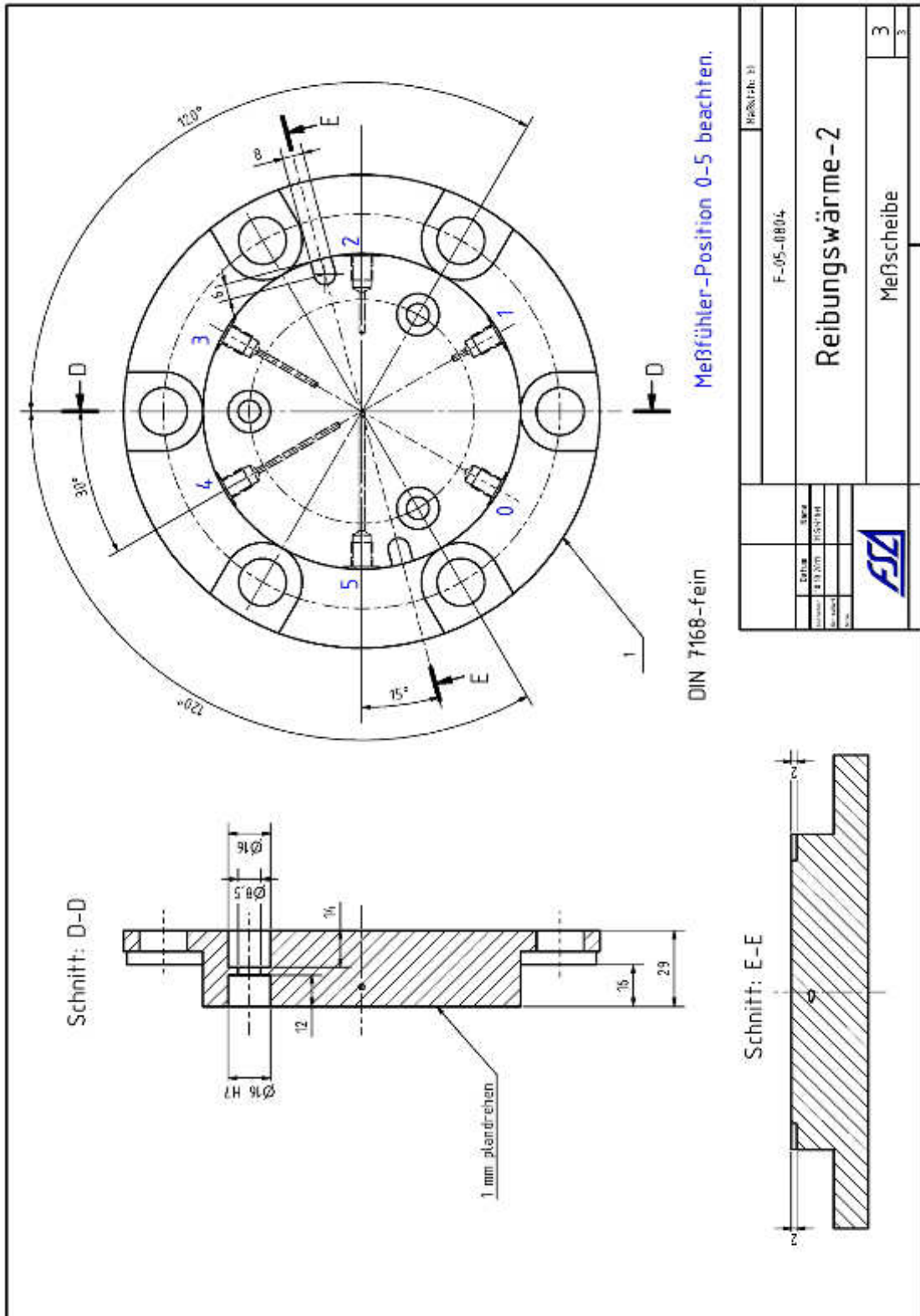


Abbildung A.25: Veränderte Basisplatte der Druckseite der Apparatur mit Vorrichtungen zur Aufnahme der Thermoelemente und Definition der Messorte T_0 bis T_5 .

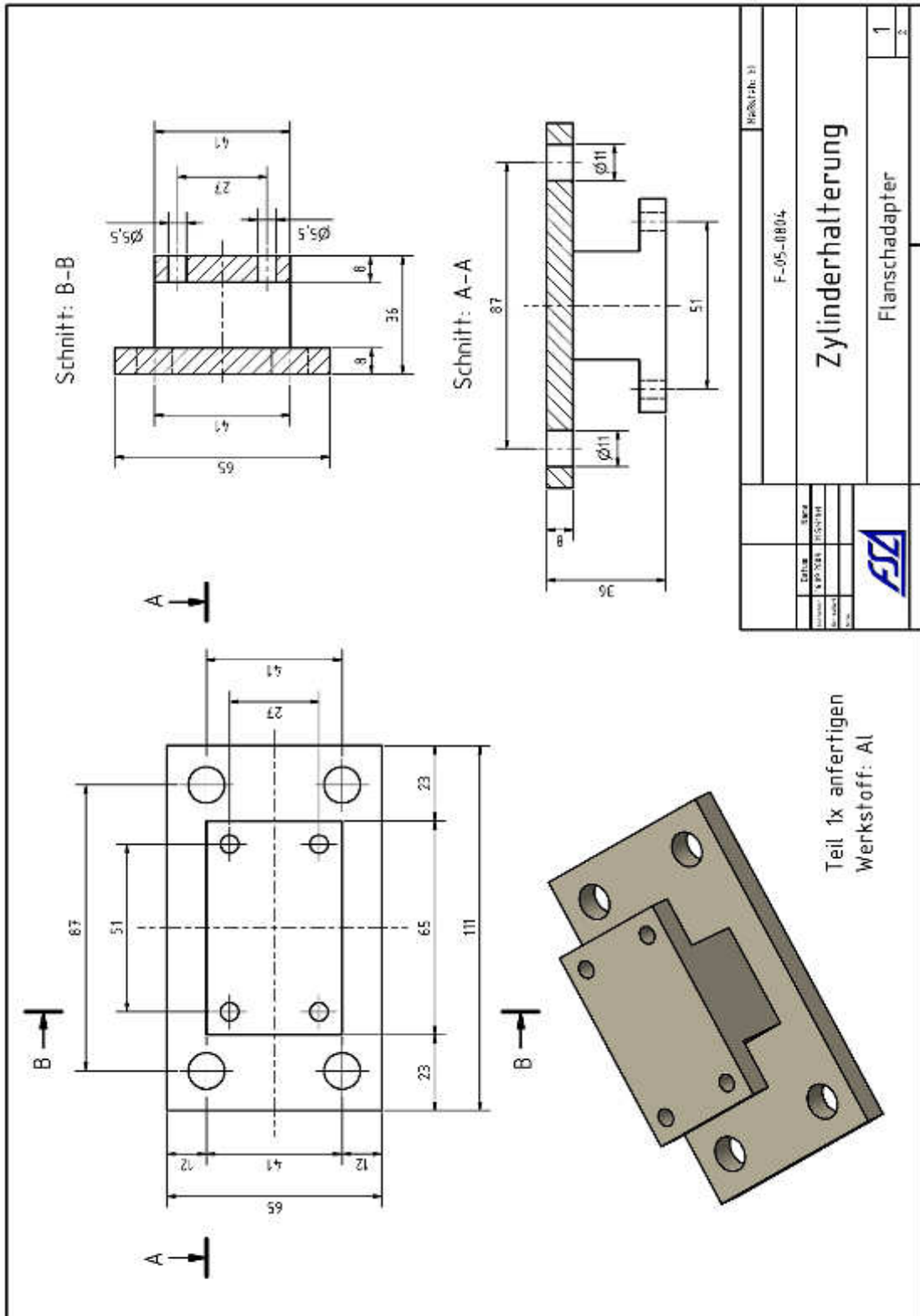


Abbildung A.26: Distanzstück zur Verankerung des Hydraulikzylinders.

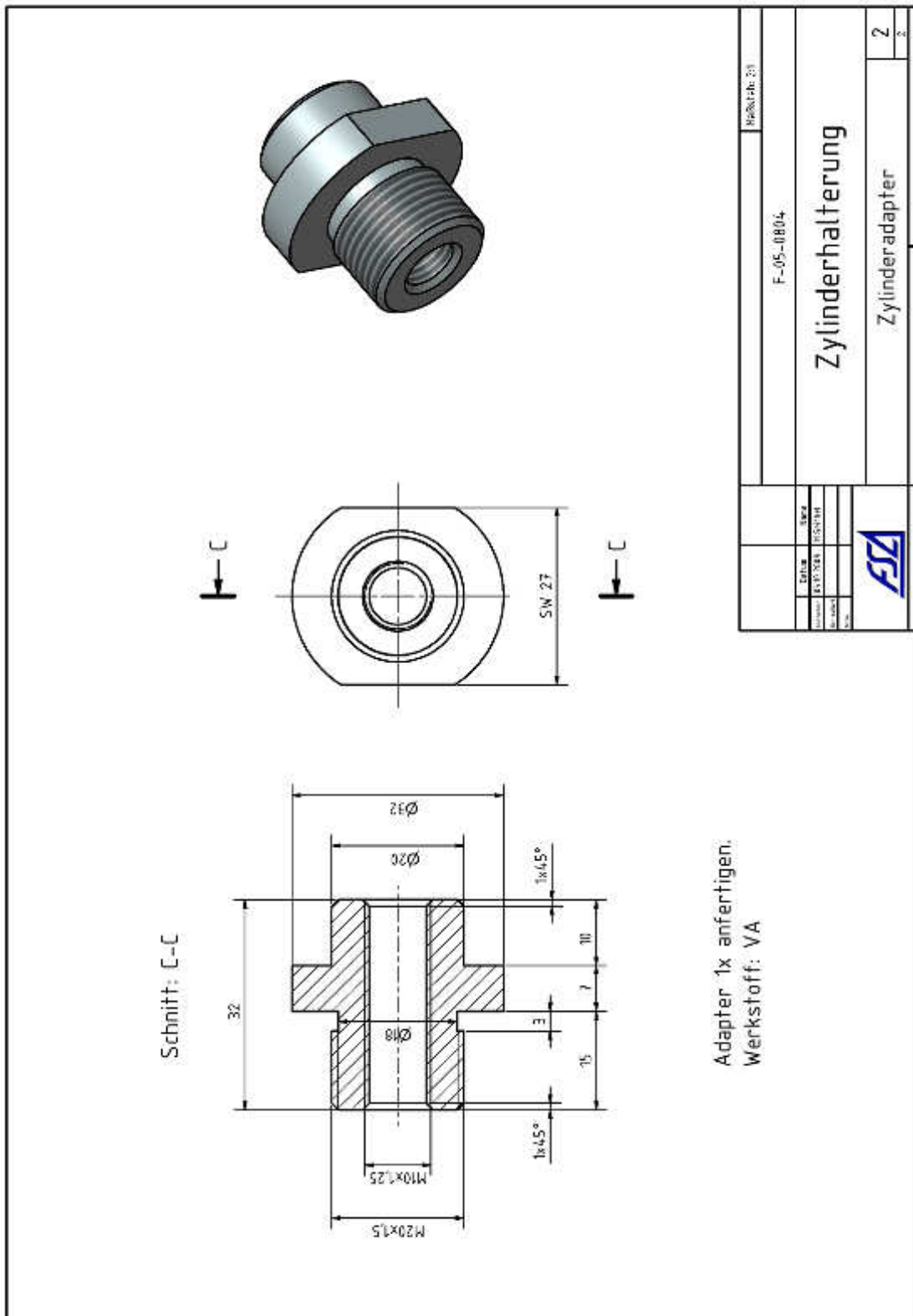


Abbildung A.27: Adapter für die Hubstange des Hydraulikzylinders.

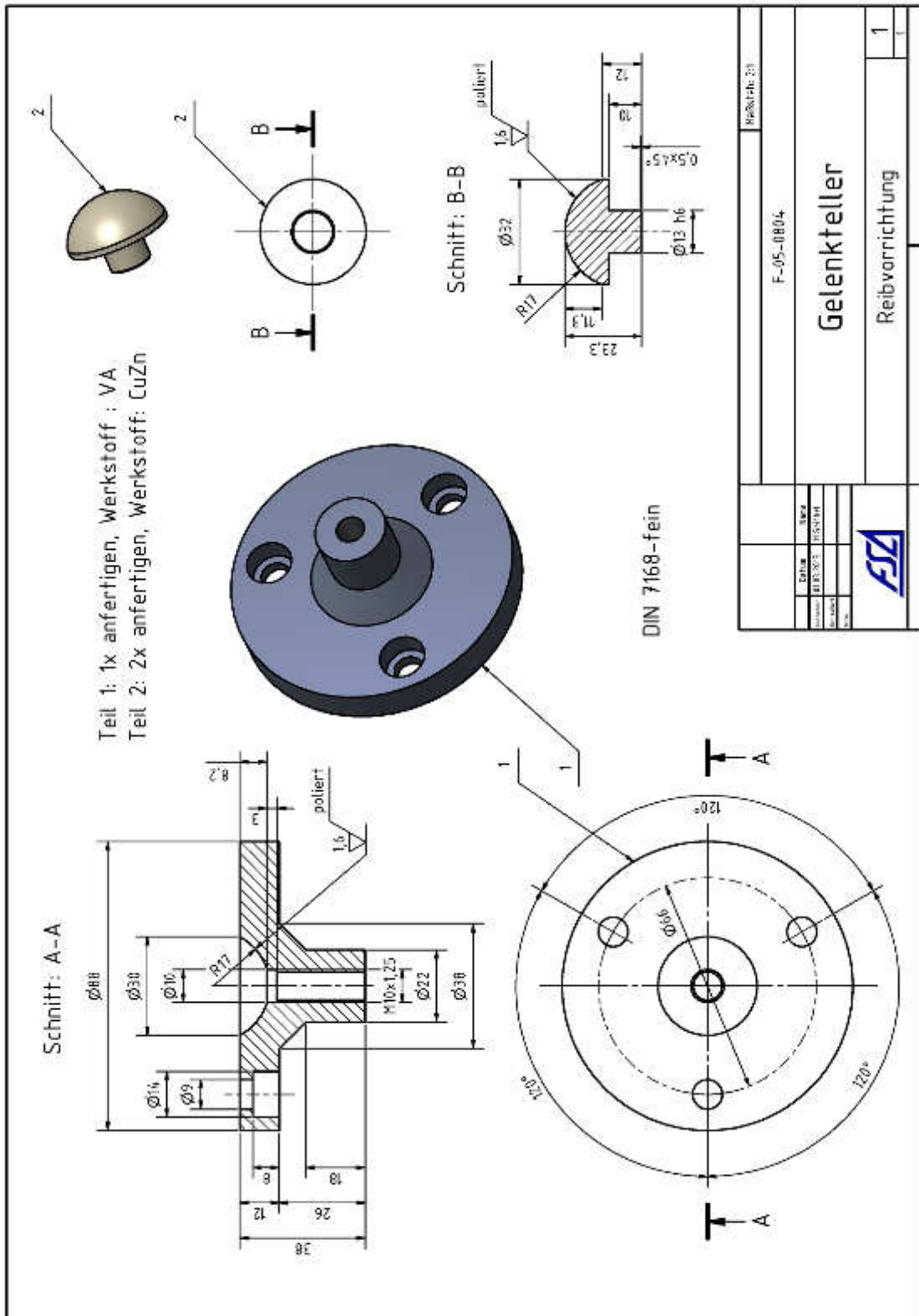


Abbildung A.28: Gelenk für die Basisplatte der Druckseite, eingebaut vor Durchführung der Versuchsreihe 2.

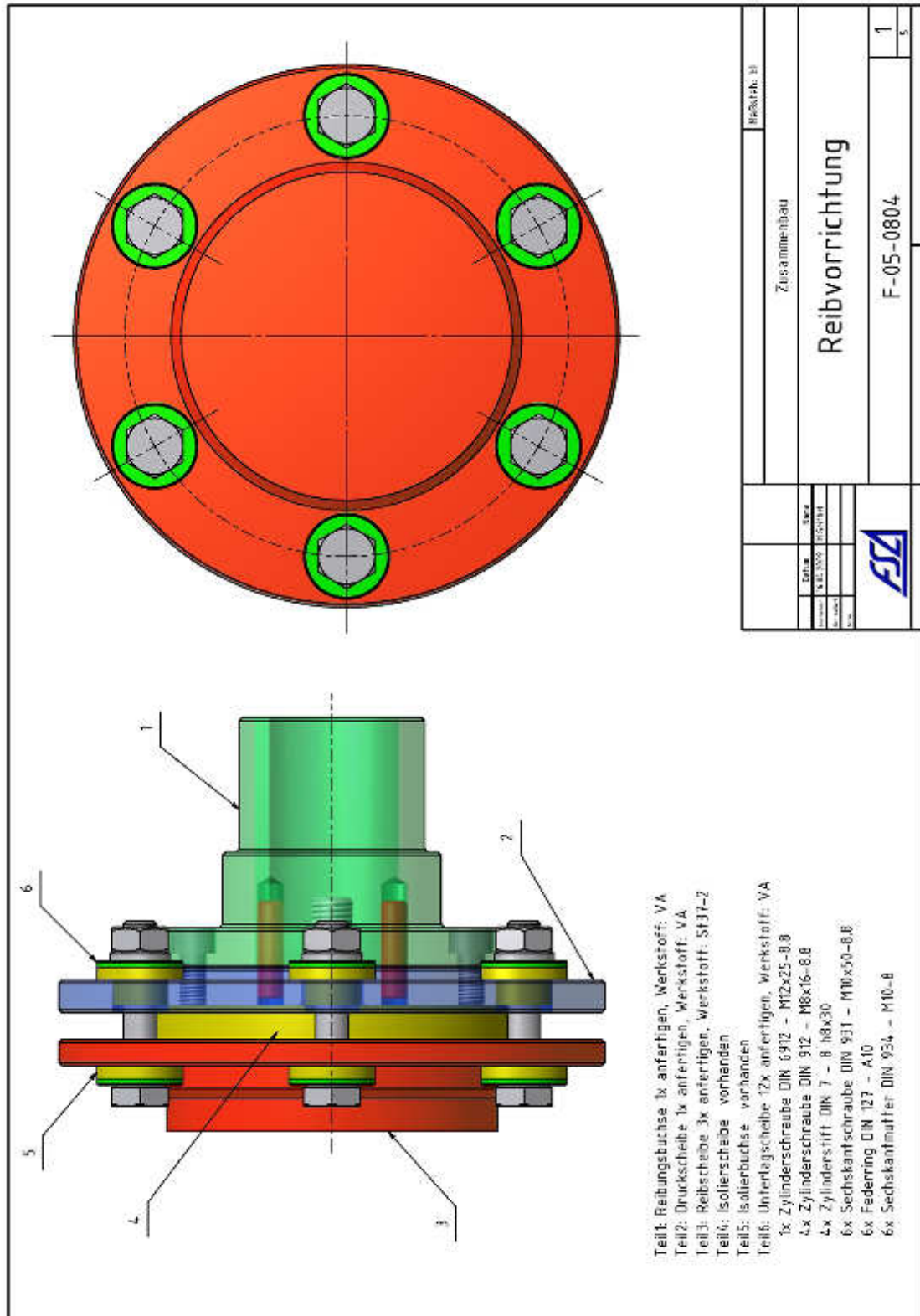


Abbildung A.29: Rotierender Teil der Apparatur zusammgebaut.

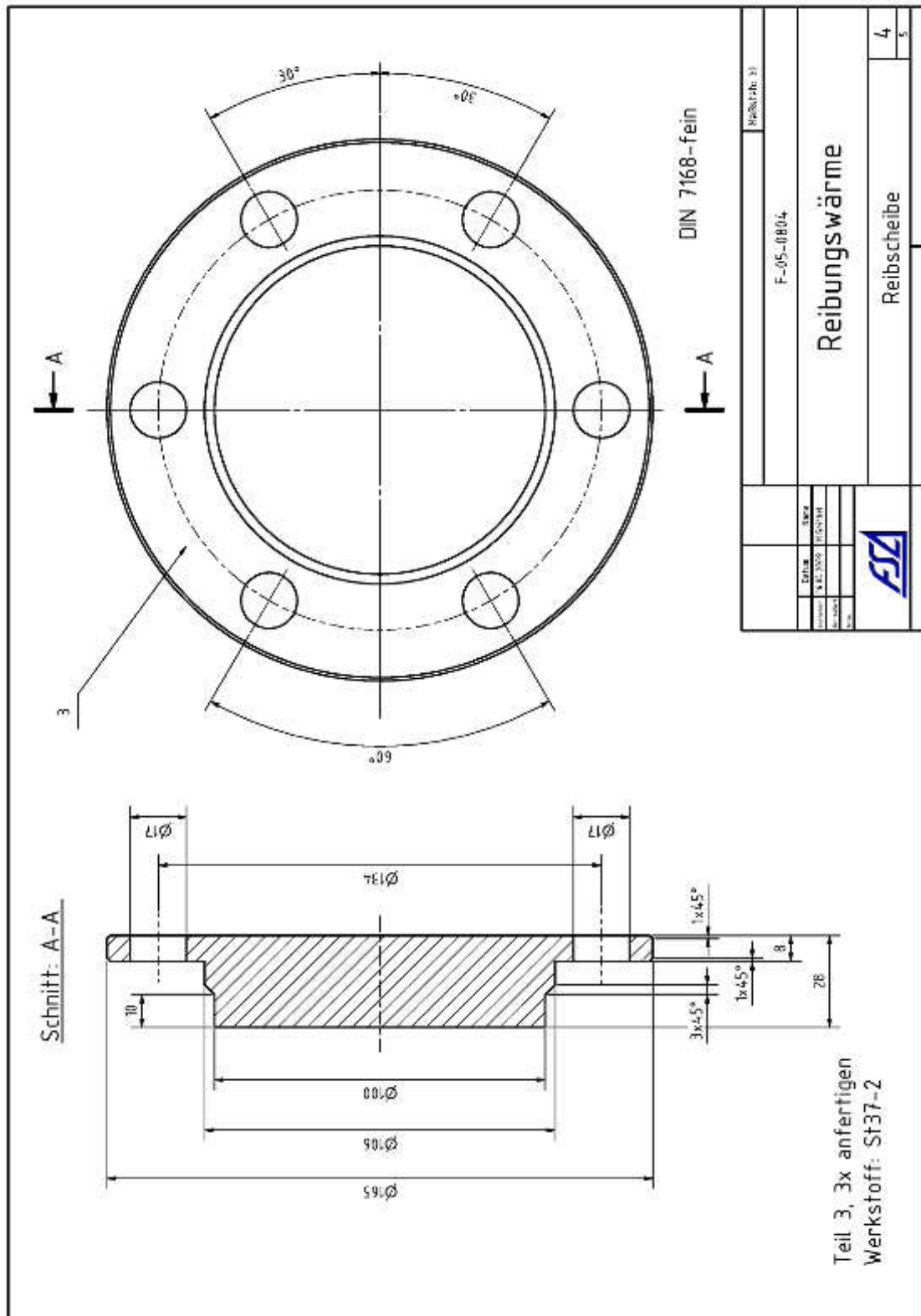


Abbildung A.32: Basisplatte und Reibscheibe der rotierenden Seite der Apparatur.

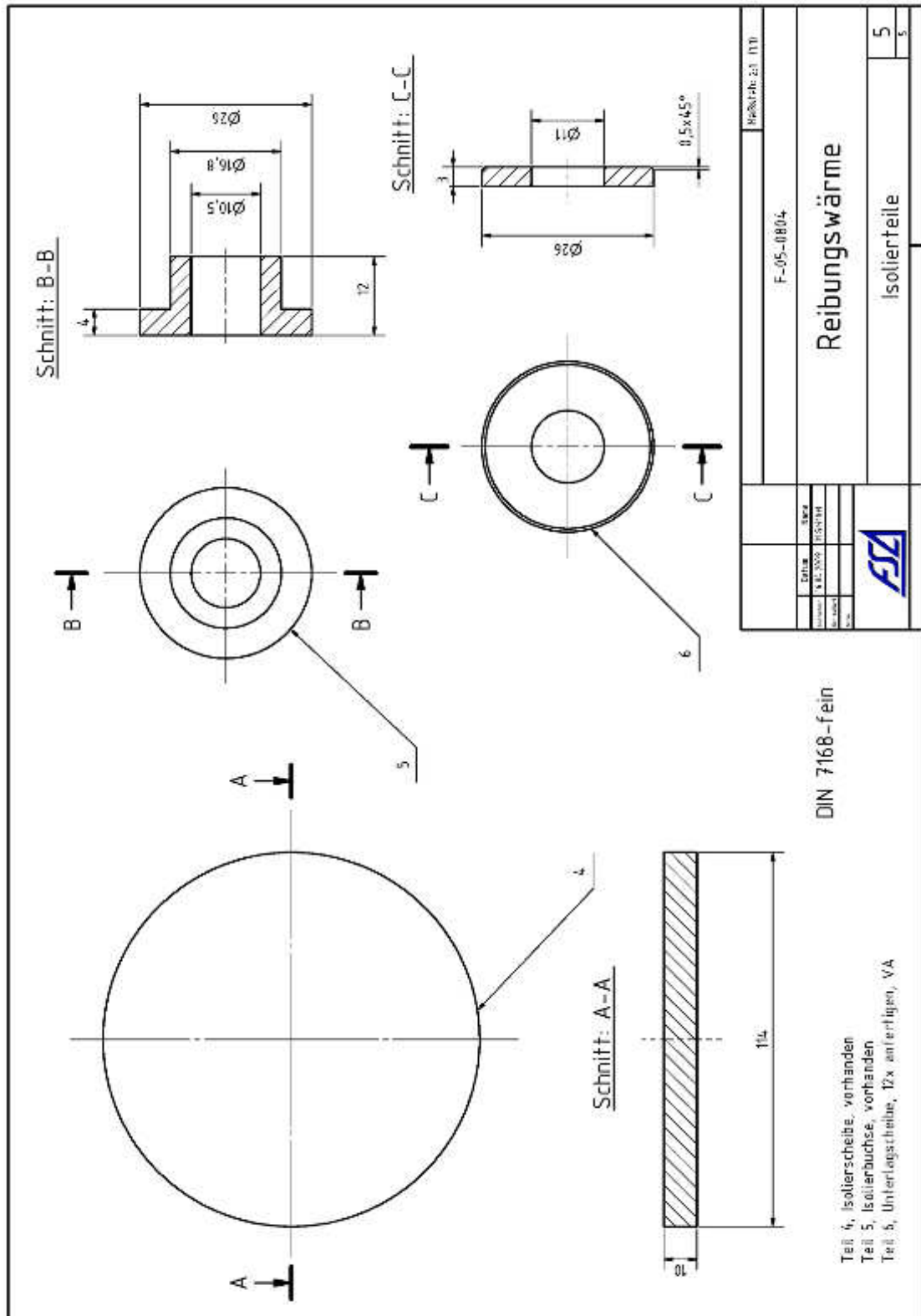


Abbildung A.33: Keramikteile zur Wärmeisolierung der rotierenden Basisplatte und Reibscheibe.

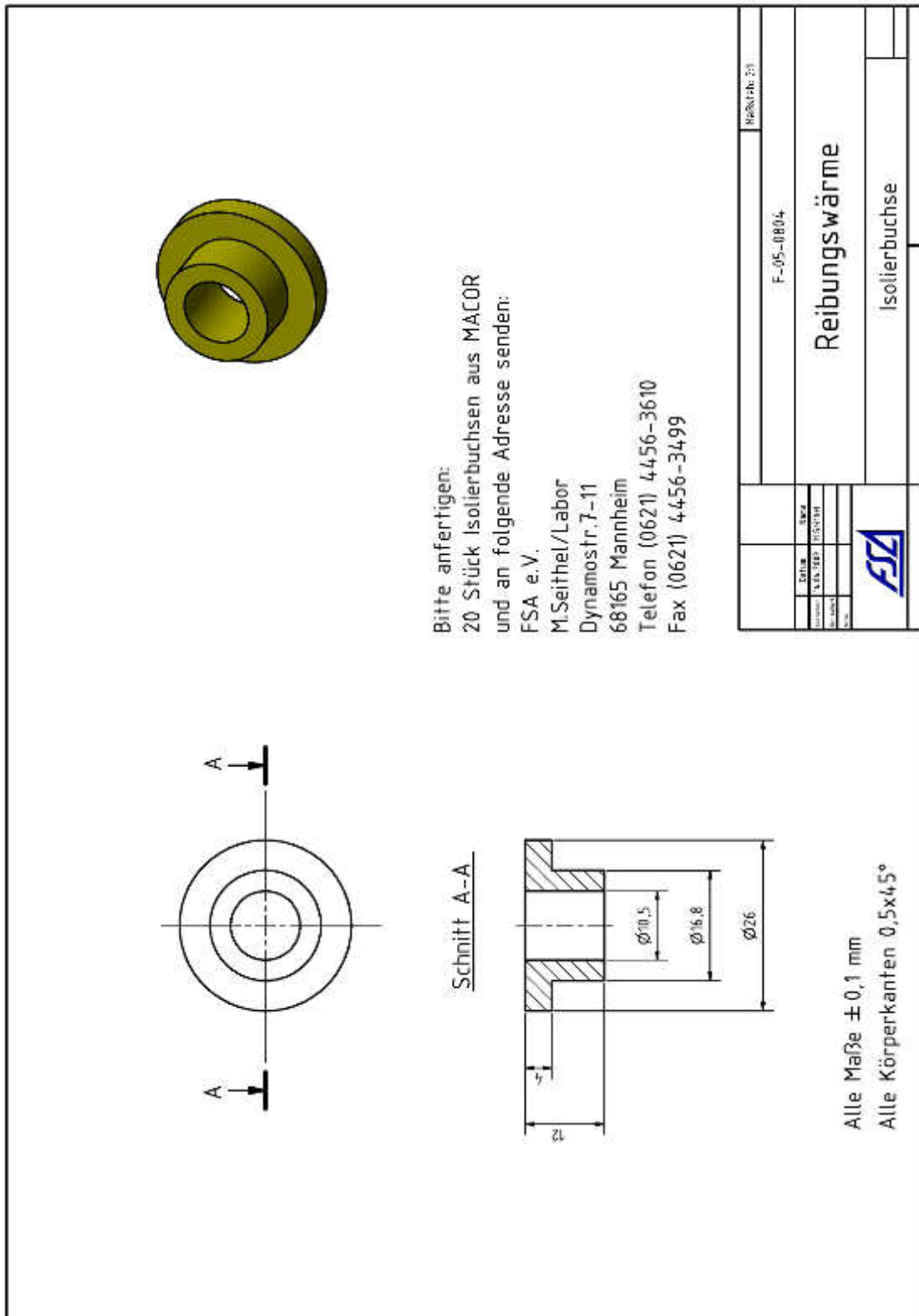


Abbildung A.34: Keramikbuchse zur Wärmeisolierung der rotierenden Basisplatte und Reibscheibe.

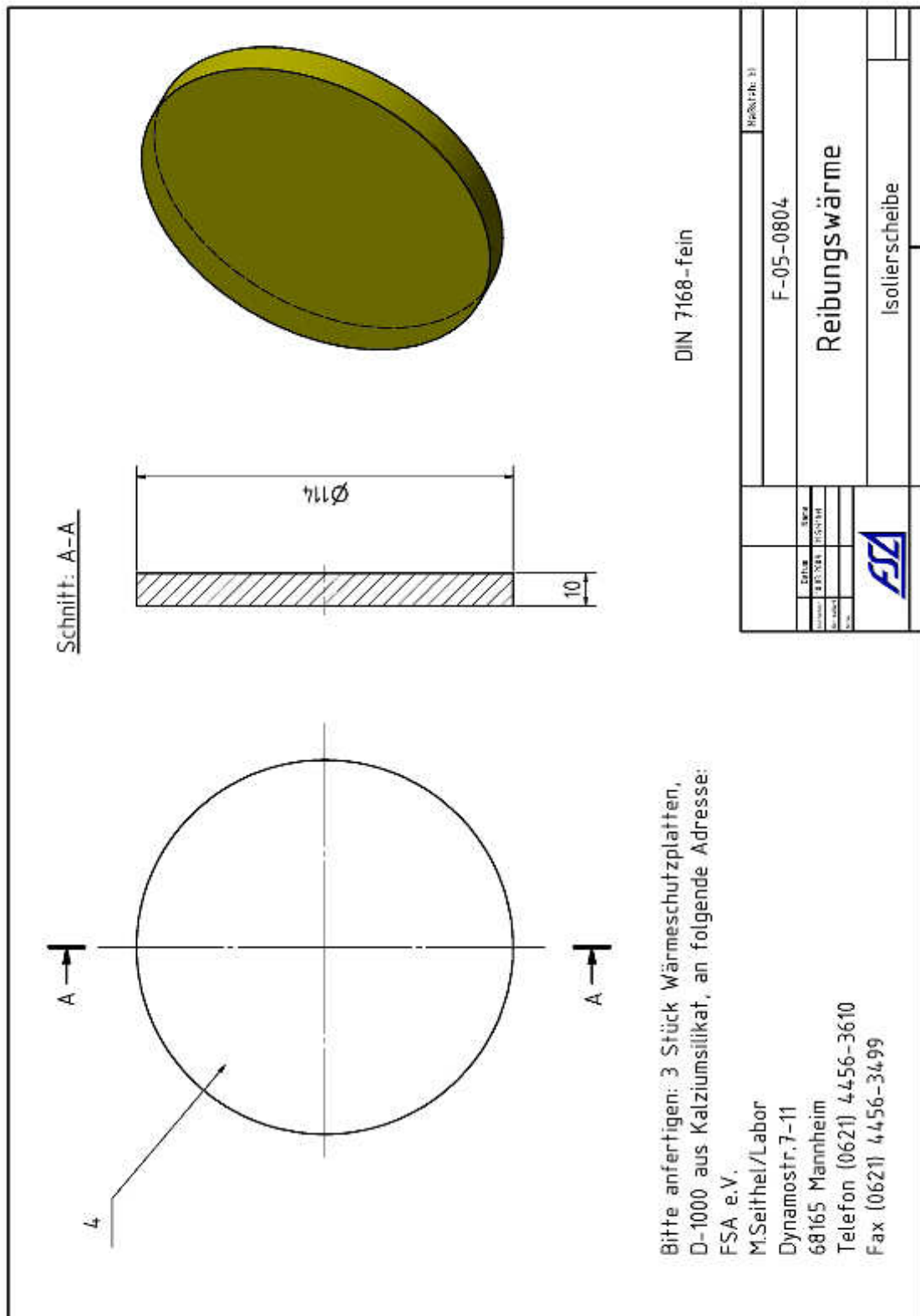


Abbildung A.35: Keramikscheibe zur Wärmeisolierung der rotierenden Basisplatte und Reibscheibe.

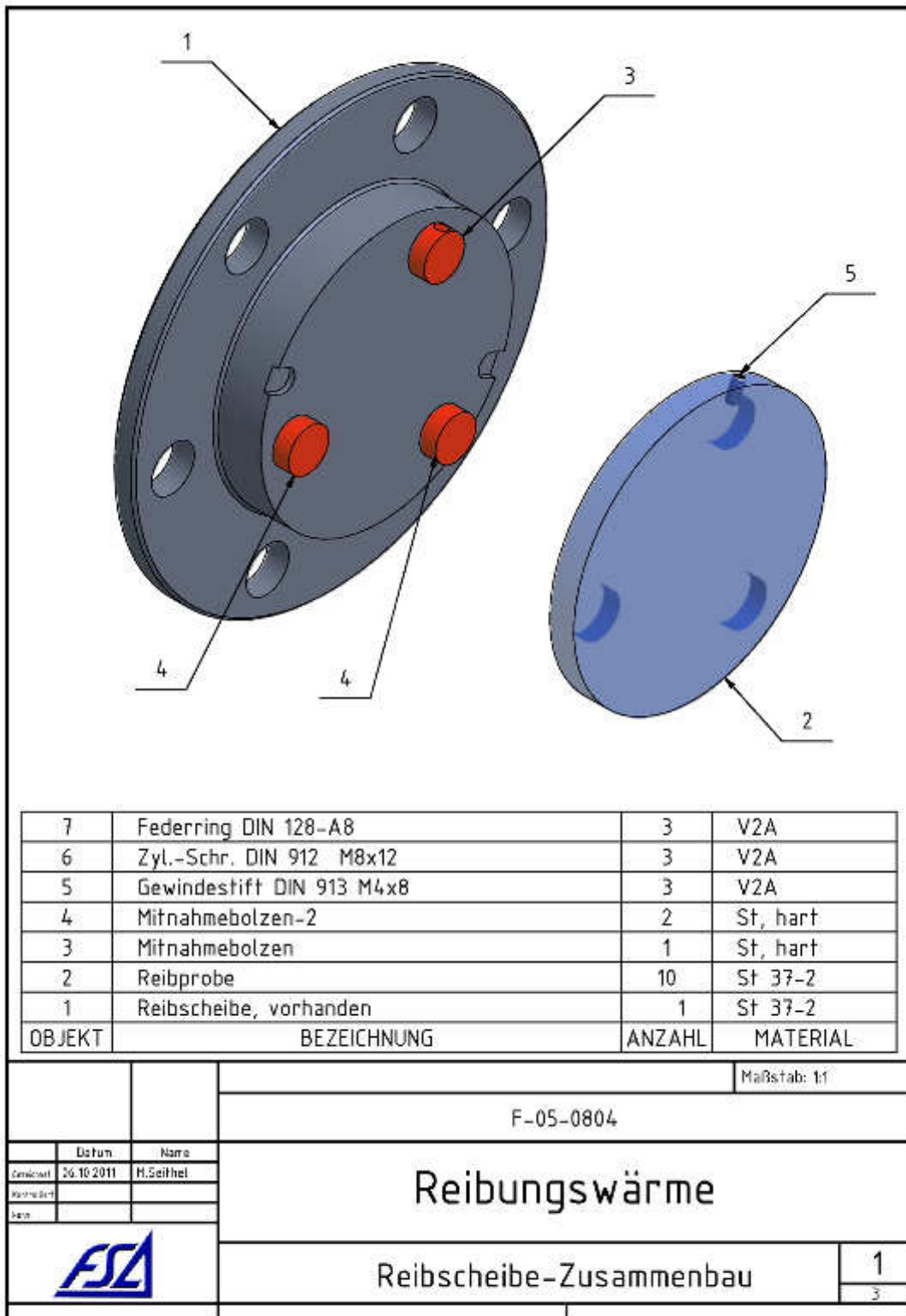


Abbildung A.36: Veränderte Basisplatte und Reibscheibe der rotierenden Seite der Apparatur.

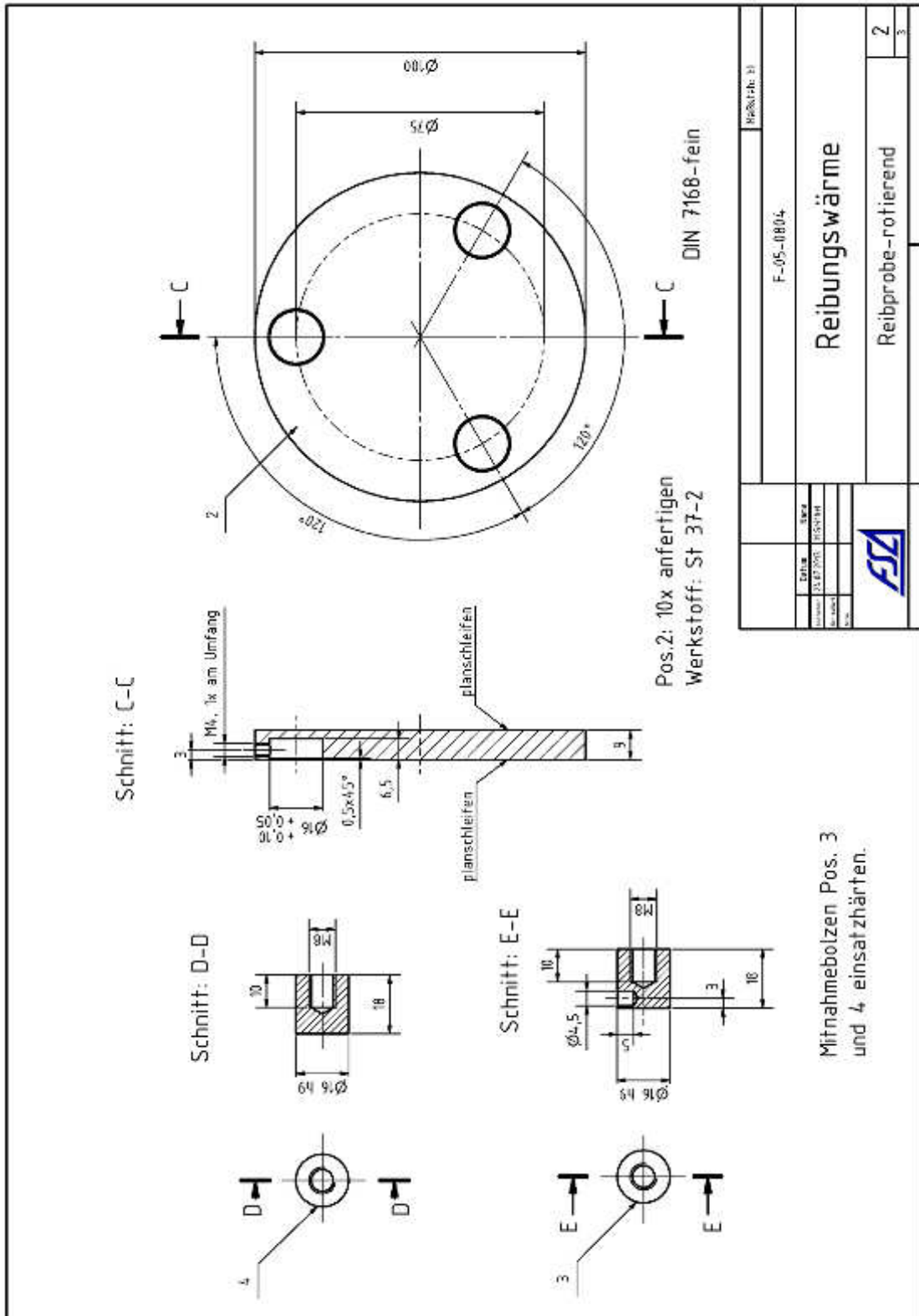


Abbildung A.37: Veränderte Reibscheibe der rotierenden Seite der Apparatur.

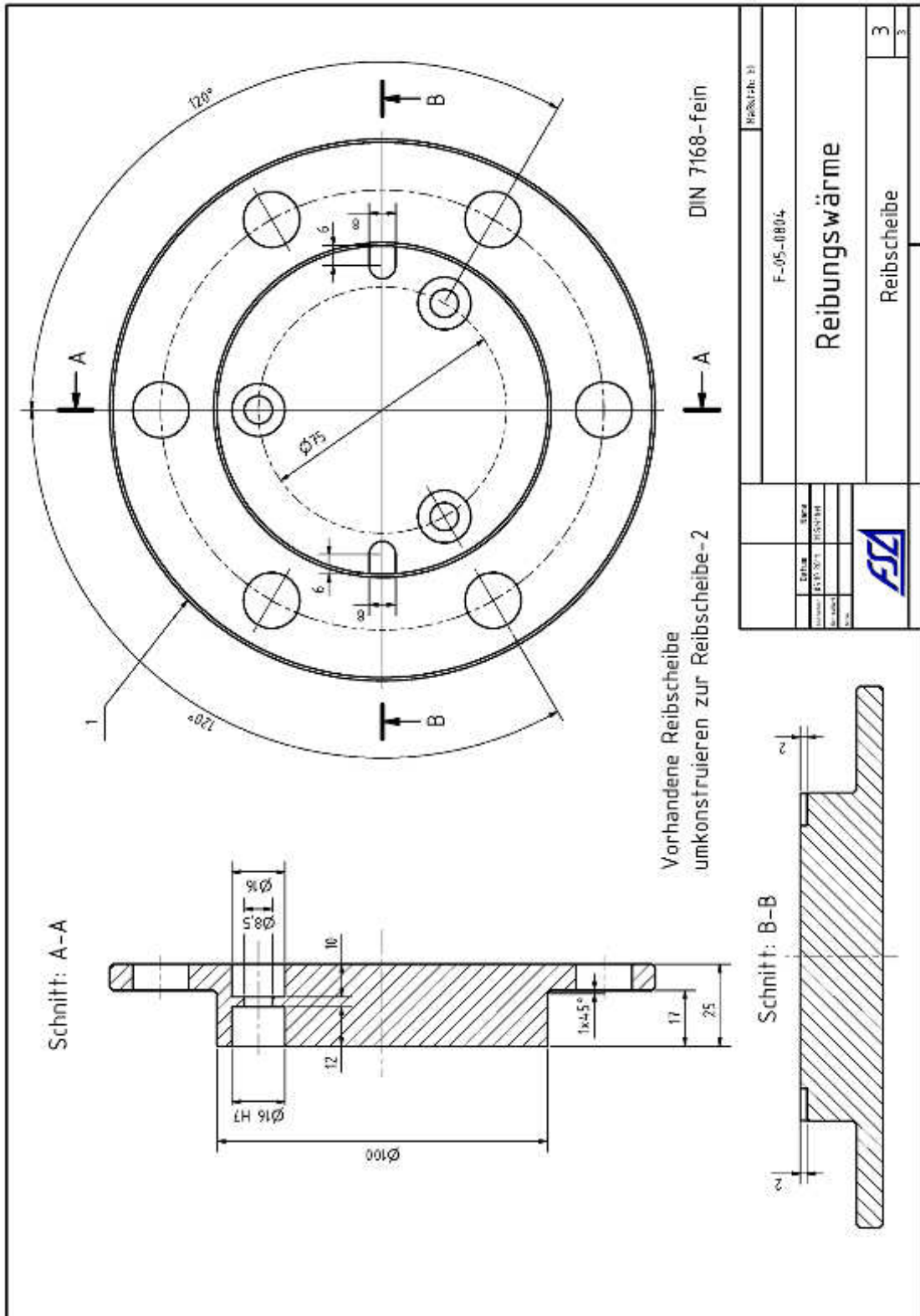


Abbildung A.38: Veränderte Basisplatte der rotierenden Seite der Apparatur.