



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN



FAKULTÄT FÜR MASCHINENWESEN  
UND BETRIEBSWISSENSCHAFTEN  
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT WIEN

Diplomarbeit

# Prototypenkonstruktion eines Stirlingmotors mit Nockentrieb

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing. oder DI)

unter der Leitung von

Hauptbetreuer

**Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Grafinger**

(Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung,  
Forschungsbereich Maschinenbauinformatik und Virtuelle Produktentwicklung E307-04)

und

Mitbetreuer

**Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Ponweiser**

(Institut für Energietechnik und Thermodynamik,  
Forschungsgruppe Thermodynamik und Wärmetechnik E302-01)

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

**Zhang Peng DU**



Wien, September 2019

\_\_\_\_\_  
Zhang Peng DU

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

### **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, September 2019

---

Zhang Peng DU

## Kurzfassung

Stirlingmotoren mit Kurbeltrieb können aufgrund der Kinematik des Kurbeltriebs keinen idealen Stirlingprozess nachfahren. Das Problem soll mit einem Nockentrieb gelöst werden, weil die Form der Nocke beinahe beliebig gestaltet werden kann.

Aufbauend auf einen Algorithmus, der im Rahmen einer Projektarbeit ausgearbeitet wurde, soll ein Stirlingmotor berechnet, ausgelegt und konstruiert werden. Während der Ausarbeitung wurde stets darauf geachtet, dass die Bauteile der Maschine fertigbar beziehungsweise beschaffbar sind. Darüber hinaus soll die Herstellung der Maschine möglichst wirtschaftlich sein.

Zuerst wurden die Startwerte und Parameter für die Berechnung festgelegt. Darunter fallen Konstanten wie Umgebungstemperatur oder Umgebungsdruck, aber auch Werte die iterativ ermittelt werden mussten. Zum Beispiel das optimale Maschengewebe des Regenerators oder die optimale Regeneratorlänge wurden iterativ ermittelt.

Der Algorithmus aus der Projektarbeit berechnet eine Stirlingmaschine, die den idealen Stirlingprozess nachfährt. Mit realen Parametern resultieren daraus teilweise unstetige oder unvorteilhafte Nockenkonturen. Der Grund ist, dass die isotherme Volumenzunahme und die isotherme Volumenabnahme in den seltensten Fällen gleich groß sind. Um dieses Problem zu umgehen, wurde der Algorithmus so abgeändert, dass er den idealen Stirlingprozess nur noch annähert.

Mit dem abgeänderten Algorithmus wurde anschließend iterativ eine optimale Nockenform ermittelt. Für eine Gebenüberstellung wurden die Zustands- und Prozessgrößen der Maschine mit Nockentrieb und der Maschine mit Kurbeltrieb mit denselben Parametern berechnet. Die Ergebnisse wurden miteinander verglichen und es war im  $p,v$ -Diagramm deutlich ersichtlich, dass der Nockentrieb den idealen Stirlingprozess besser als einen Kurbeltrieb annähern konnte. Die berechnete Nockenkontur der Maschine, die den idealen Stirlingprozess nachfährt (ursprünglicher Algorithmus), war unvorteilhaft.

Aufbauend auf den Berechnungsergebnissen der Maschine mit Nockentrieb wurden die Bauteile ausgelegt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Zukaufteile schnell beschaffbar sind. Nach der Auslegung wurden die Teile mit einem CAD-Programm konstruiert beziehungsweise modelliert.

Mit den fertigen Bauteilmodellen wurden Angebote von Rapid Prototyping-Unternehmen eingeholt. Die resultierenden Kosten übersteigen leider das angedachte Budget um ein Vielfaches. Daher fiel der Entschluss die Maschine nicht zu bauen.

Am Ende wurden noch ein paar Verbesserungsvorschläge genannt, die noch beachtet beziehungsweise eingearbeitet werden können.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Zielsetzung.....	2
1.3	Methodik und Vorgehensweise.....	2
2	Berechnung.....	3
2.1	Parameter und Startwerte.....	3
2.1.1	Stirlingmotor.....	3
2.1.2	Arbeitsmedium und Umgebung.....	5
2.1.3	Regenerator.....	6
2.1.4	Diskretisierung.....	7
2.1.5	Startwerte für Volumina und Massen.....	7
2.1.6	Widerstandsbeiwert.....	7
2.1.7	Wärmeübertragung.....	8
2.2	Optimierung des Algorithmus'.....	8
2.3	Bestimmung der Nockenformen.....	11
2.3.1	Wärmeübertragung.....	11
2.3.2	Berechnung.....	13
2.3.2.1	Maschengewebe.....	13
2.3.2.2	Länge des Regenerators.....	15
2.3.2.3	Parameter.....	21
2.3.2.4	optimale Volumenänderung.....	24
2.3.2.5	eingeschwungener Zustand.....	30
2.3.3	Nockenform.....	32
2.4	Vergleich der Maschinen.....	35
3	Auslegung und Konstruktion.....	40
3.1	Auslegung.....	40
3.1.1	Welle.....	40
3.1.2	Synchronisierung der Nocken.....	42
3.1.3	Zylinder.....	44
3.1.4	Kolben.....	45
3.1.5	Nocken.....	48
3.1.6	Leistungsabnahme.....	49
3.1.7	Riemenspanner.....	51
3.1.8	Lager.....	51
3.1.9	Fundament.....	54
3.2	Konstruktion.....	54
3.2.1	Nocken.....	54
3.2.2	Lagerbock für die Nockenwellen.....	55
3.2.3	Wellen für die Nocken.....	56
3.2.4	Regenerator.....	56
3.2.5	Zylinder.....	57
3.2.6	Kolben mit Pleuel.....	58
3.2.7	Achse für das Pleuel.....	59
3.2.8	Leistungsabnahme.....	59
3.2.9	Riemenspanner – Tragarm.....	60

3.2.10	Riemenspanner – Befestigung.....	61
3.2.11	Riemenspanner – Achsen.....	61
3.2.12	Riemen.....	62
3.2.13	Fundament.....	63
3.2.14	Gesamtmodell.....	65
3.2.15	Schnittansicht.....	69
4	Beschaffung.....	71
4.1	Stückliste.....	71
4.2	Bedarf.....	71
4.3	Rapid Prototyping.....	73
4.4	Zukaufteile.....	77
5	Schlussfolgerungen.....	80
5.1	Verbesserungsmöglichkeiten.....	80
5.1.1	Algorithmus.....	80
5.1.1.1	Diskretisierung.....	80
5.1.1.2	Zylinderwandmodellierung.....	80
5.1.1.3	Regeneratormodellierung.....	80
5.1.2	Konstruktion.....	81
5.1.2.1	Parameterauswahl.....	81
5.1.2.2	Pleueführung.....	81
5.1.2.3	Werkstoffauswahl.....	82
5.1.2.4	Schwungscheibe.....	82
5.1.3	Thermodynamik.....	82
5.1.3.1	Feuerzeugflamme.....	82
5.1.3.2	Wärmeabfuhr.....	83
5.1.3.3	Werkstoffauswahl.....	83
5.1.3.4	Regenerator.....	83
5.1.4	Vorgehensweise.....	83
5.1.4.1	Zeitmanagement.....	83
5.1.4.2	Budget.....	84
5.2	Fazit.....	84
6	Verzeichnisse.....	85
6.1	Literaturverzeichnis.....	85
6.2	Abbildungsverzeichnis.....	88
6.3	Tabellenverzeichnis.....	90
6.4	Abkürzungsverzeichnis.....	93
6.5	Formelzeichenverzeichnis.....	93
7	Anhang.....	97
7.1	MATLAB-Skript.....	97
7.2	Ergebnisse Maschengewebe.....	114
7.3	Ergebnisse Regeneratorlänge.....	123
7.4	Ergebnisse Maschengewebe 2. Iteration.....	127
7.5	Angebote.....	131
7.5.1	Proto Labs – Fundament (Teil 1).....	131
7.5.2	Proto Labs – Nocke (Teil 2).....	137
7.5.3	Proto Labs – Lagerbock für die Nocken (Teil 4).....	139
7.5.4	Proto Labs – Regenerator (Teil 8).....	141

## Inhaltsverzeichnis

7.5.5	Proto Labs – Zylinder (Teil 9).....	143
7.5.6	Proto Labs – Kolben mit Pleuel (Teil 10) .....	144
7.5.7	Proto Labs – RiemenSpanner Fundament (Teil 14).....	146
7.5.8	Proto Labs – RiemenSpanner Tragarm (Teil 15) .....	148
7.5.9	1zu1 – alle Teile außer Fundament und RiemenSpanner Tragarm (alle Teile außer Teil 1 und Teil 15) .....	150
7.5.10	1zu1 – Fundament (Teil 1).....	155
7.5.11	1zu1 – RiemenSpanner Tragarm (Teil 15).....	157

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der ideale Stirlingprozess besteht aus vier Zustandsänderungen. Bezieht man sich auf Abbildung 1 sind diese

- von 1 nach 2 eine isochore Zustandsänderung,
- von 2 nach 3 eine isotherme Zustandsänderung,
- von 3 nach 4 eine isochore Zustandsänderung und
- von 4 nach 1 eine isotherme Zustandsänderung.

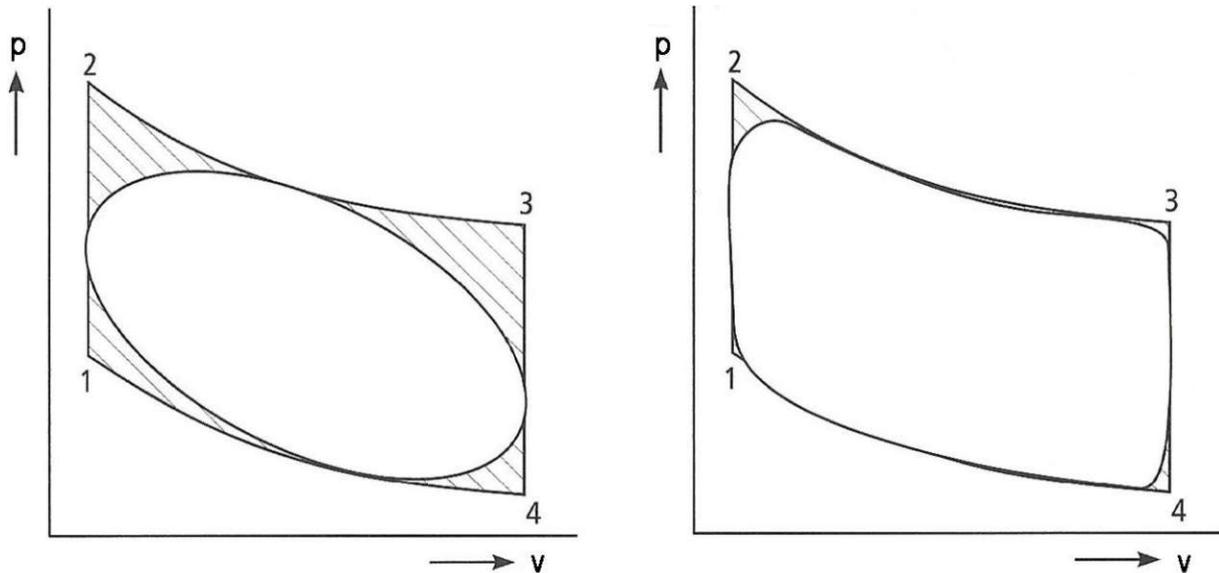


Abbildung 1: Auswirkung der Bewegungsarten auf den Kreisprozess im p,v-Diagramm, links: sinusförmige Bewegung; rechts: diskontinuierliche Bewegung [1, S. 31] – bearbeitet

Der ideale Stirlingprozess umschließt im p,v-Diagramm die schraffierte Fläche. Die umschlossene Fläche entspricht der Arbeit eines Kreisprozesses pro Periode. Viele Stirlingmotoren verwenden einen Kurbeltrieb wie in Abbildung 2. Durch den Kurbeltrieb folgen die Kolben in den Zylindern kinematisch bedingt einer nahezu sinusförmigen Bewegung. Dadurch erhalten wir in Abbildung 1 im linken p,v-Diagramm die nicht schraffierte Fläche.

Wenn eine Stirlingmaschine „die Ecken des p,v-Diagramms besser ausfährt“, siehe rechtes p,v-Diagramm, dann arbeitet sie effizienter [1, S. 31]. Die Effizienzsteigerung soll dadurch erreicht werden, indem der Kurbeltrieb durch einen Nockentrieb ersetzt wird. Die Form der Nocken lassen sich beinahe beliebig gestalten und somit auch die Bewegung der Kolben selbst.

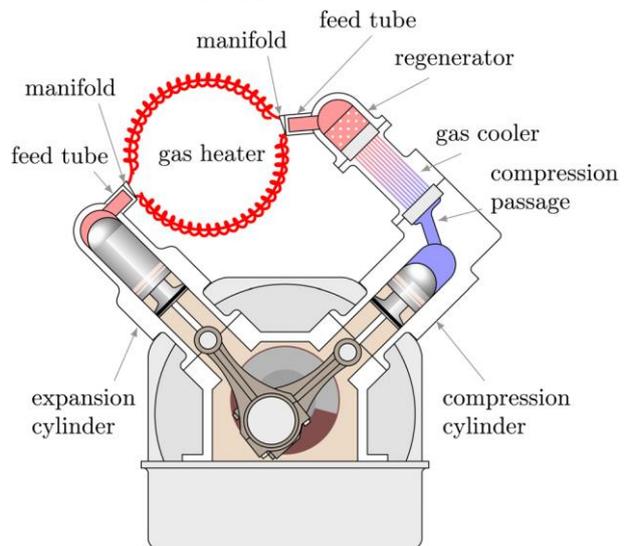


Abbildung 2: Schema eines  $\alpha$ -Stirlingmotors [2, S. 051104-2]

Diese Diplomarbeit baut auf den Ergebnissen der unveröffentlichten Projektarbeit „Konzept für einen Stirlingmotor mit Nockentrieb“ unter der Leitung von Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Ponweiser auf. Sie wurde im Wintersemester 2018 am Institut für Energietechnik und Thermodynamik (Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, Technischen Universität Wien) geschrieben [3].

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist ein funktionierendes Modell eines Stirlingmotors mit Nockentrieb zu bauen. Der Prototyp soll klein sein, da er als Anschauungsmodell leicht transportierbar sein soll. Die Größe soll sich an das in Abbildung 3 dargestellte Modell orientieren. Das dargestellte Modell hat eine Länge über alles von 155 mm, eine Breite über alles von 60 mm und eine Höhe über alles von 105 mm [4].



Abbildung 3: Modell eines Stirlingmotors [4]

Die Beschaffung, die Fertigung und die Montage sollen möglichst wirtschaftlich sein. Aus diesem Grund sollen möglichst viele Norm- und Zukaufteile verwendet werden. Die Energiezufuhr soll über ein Feuerzeug erfolgen. Bei Optimierungen ist das Ziel die Maximierung der Nutzarbeit.

## 1.3 Methodik und Vorgehensweise

Bevor die Berechnung der idealen Nockenformen erfolgen kann, gehören die Startwerte und Parameter definiert. Bereits da müssen schon Materialien und (grobe) Dimensionen festgelegt werden. Aus diesem Grund wird bereits hier ein grober Überblick über Bezugsquellen und beschaffbare Teile erstellt.

Anschließend soll der erstellte Algorithmus aus der Projektarbeit ein wenig abgeändert werden, um ein optimiertes Ergebnis zu erzielen. Mit diesem modifizierten Algorithmus soll darauffolgend eine optimale Konfiguration in Abhängigkeit der Startwerte und Parameter gefunden werden. Der bestehende Algorithmus ist in MATLAB R2017b implementiert [3, S. 21]. Die Änderungen am Algorithmus und die Berechnungen selbst werden mit demselben Programm durchgeführt.

Mit den Berechnungsergebnissen kann das Modell konstruiert werden. Die Auslegung soll mit Hilfe von Literatur und Normen erfolgen. Die 3D-Konstruktion wird in CATIA V5R21 modelliert. Dabei soll das Modell so aufgebaut werden, dass Änderungen möglichst leicht durchzuführen sind. Ausgehend von den 3D-Modellen werden bei Bedarf Zeichnungsableitungen erstellt.

Nach Fertigstellung der CAD-Modellierung werden die Norm- und Zukaufteile besorgt und die anderen Teile werden entweder selber gefertigt oder in Auftrag gegeben. Eine Fertigung bei Unternehmen, die sich auf Rapid Prototyping beziehungsweise Rapid Manufacturing spezialisiert haben, kann in Erwägung gezogen werden.

Nach der Beschaffung aller Teile kann der Zusammenbau erfolgen. Am Ende findet der Funktionstest statt und die Leistung der Maschine soll auf eine beliebige Art und Weise überprüft werden, um die Berechnungsergebnisse zu verifizieren.

## 2 Berechnung

### 2.1 Parameter und Startwerte

Die Formelzeichen sind unter „6.5 Formelzeichenverzeichnis“ beschrieben und sind ident wie in der Projektarbeit. Bei der Auswahl der Parameter wird selbstverständlich Rücksicht auf die Beschaffung und Fertigung genommen. Einige Werte sind iterativ ermittelt worden.

Einige Wertangaben werden ungewöhnlich erscheinen, beispielsweise wird  $0,5 \cdot 10^{-3}$  m anstatt 0,5 mm geschrieben. Die Werte sind alle in SI-Einheiten angegeben, da der Algorithmus mit diesen rechnet. Es gibt ein paar Ausnahmen beim Drahtgewebe des Regenerators.

#### 2.1.1 Stirlingmotor

Bei schnell laufenden Stirlingmotoren wird der Kreisprozess in einer Sekunde sehr oft durchlaufen. Dadurch bleibt für die Wärmeübertragung kaum Zeit und in den Maschinen läuft praktisch eine nahezu adiabatische Zustandsänderung ab. Um die Isotherme besser anzunähern ist daher eine niedrige Drehzahl anzustreben [1, S. 31]. Eine niedrige Drehzahl ist insbesondere auch zur Speicherung der thermischen Energie im Regenerator von Vorteil. Bei schnelllaufenden Maschinen kann die Wärmespeicherung aufgrund der kurzen Zeit nur in den äußersten Schichten des Regeneratorgewebes erfolgen. Das Modell wird für die

Drehzahl..... f = 2 Hz  
ausgelegt.

In Abbildung 4 ist die Flamme eines Benzinfeuerzeugs abgebildet. Der Stirlingmotor soll für dieses Feuerzeug ausgelegt werden. Im Hintergrund ist ein Raster abgebildet und der Abstand zwischen zwei dicken Linien entspricht 1 cm. Die Flamme ist im Foto ungefähr 3,6 cm hoch, wobei die Höhe natürlich relativ stark schwankt.

In Abbildung 5 ist eine Sechskant-Stecknuss mit einer Schlüsselweite von 8 mm in die Flamme gelegt worden. Die Nuss hat einen Außendurchmesser von 12 mm. Es ist gut ersichtlich, dass die Flamme die Stecknuss beinahe überall umhüllt. Die beiden Zylinder beziehungsweise Kammern sollen daher folgende Dimensionen haben:

Bohrung ..... d = 0,01 m  
Hub ..... l = 0,03 m

Die Fix Metall GmbH südlich von Wien kann gezogene Kupferstäbe aus CW004A mit einem Durchmesser von bis zu 90 mm in beliebigen Längen liefern [5].

Wie ersichtlich, wurde das Hub-Bohrung-Verhältnis relativ groß gewählt. Bei einem Verbrennungsmotor wäre diese Konfiguration ein Langhuber (Hub / Bohrung > 1) [6, S. 445]. Der Gedanke dahinter ist, dass die Mantelfläche für den Wärmeübergang



Abbildung 4: Flamme eines Benzinfeuerzeugs



Abbildung 5: Sechskant-Stecknuss (SW 8 mm) in der Flamme

$$O = d \pi l \tag{2.1}$$

sowohl linear mit der Bohrung als auch linear mit dem Hub wächst. Auf der einen Seite des Zylinders ist der Regenerator und auf der anderen der Kolben, welcher als adiabat angenommen wird. Daher ist die Fläche der Ober- und Unterseite des Zylinders für den Wärmeübergang vernachlässigbar. Jedoch wächst das Volumen

$$V = \frac{d^2}{4} \pi l \tag{2.2}$$

quadratisch mit der Bohrung und nur linear mit der Länge. Somit wird das Oberflächen-Volumen-Verhältnis

$$\frac{O}{V} = \frac{d \pi l}{\frac{d^2}{4} \pi l} = \frac{4}{d} \tag{2.3}$$

durch einen größeren Durchmesser immer kleiner. Das ist nicht erwünscht, weil wir viel Oberfläche pro Volumeneinheit haben wollen. Dadurch verbessert sich die Wärmeübertragung, welches ein kritischer Punkt bei Stirlingmotoren ist. Die beiden Zylinder könnten unterschiedlich dimensioniert werden, jedoch wird das aus Gründen der Einfachheit nicht gemacht.

Langhubige Verbrennungsmotoren arbeiten bei niedrigeren Drehzahlen als kurzhubige Motoren, weil Langhuber höhere Kolbengeschwindigkeiten bei derselben Drehzahl erreichen [6, S. 445]. Dieser Aspekt ist für uns nicht relevant, weil wir bewusst eine sehr kleine Drehzahl haben wollen.

Die Wanddicke wurde mit der „Kesselformel“ nach DIN 2413 abgeschätzt. Die Norm gilt nur bis 120 °C Berechnungstemperatur, welches wir überschreiten werden [7, S. 9]. Trotzdem sollen die Ergebnisse als grober Richtwert dienen. Es wird vereinfacht angenommen, dass die Belastung vorwiegend ruhend erfolgt. Die Formel zur Berechnung der (Mindest-)Wanddicke lautet nach [7, S. 10]:

$$s = \frac{d}{\frac{2 \sigma_{zul}}{p} - 2} \tag{2.4}$$

Der Auslegungsdruck  $p$  wird mit  $6,5 \cdot 10^5$  Pa angenommen und die Bohrung wurde oben bereits definiert. Die zulässige Dehngrenze  $\sigma_{zul}$  für gezogene Kupferstäbe aus CW004A ist laut DIN EN 13601 nicht festgelegt [8, S. 19]. Laut dem deutschen Kupferinstitut beginnt die Dehngrenze von weichem Kupfer bei 40 MPa und dieser Wert wird als zulässige Dehngrenze herangezogen [9].

$$s = \frac{0,01 \text{ m}}{\frac{2 \cdot 40 \cdot 10^6 \text{ Pa}}{6,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}} - 2} = 0,082592 \cdot 10^{-3} \text{ m} \tag{2.5}$$

Aus Gleichung (2.5) ist ersichtlich, dass die erforderliche Wanddicke gegen Verformung sehr gering ist. Eine dünne Wanddicke ist aus Wärmeleitungssicht ebenso wünschenswert. Aus fertigungstechnischer Sicht wird sie jedoch mit

Wanddicke ..... s =  $0,5 \cdot 10^{-3}$  m festgelegt.

Bei 300 °C hat CW004A laut [10, S. 3] eine

Wärmeleitfähigkeit des heißen Zylinders .....  $\lambda_{Z,H} = 377 \text{ W/(m K)}$ .

Die mittlere Temperatur im heißen Zylinder ist höher, jedoch endet das Datenblatt bei 300 °C. Aufgrund der schlechten Datenlage wird trotzdem mit diesem Wert gerechnet.

Bei 185 °C hat CW004A laut [10, S. 3] und „2.3.2.3 Parameter“ eine

Wärmeleitfähigkeit des kalten Zylinders .....  $\lambda_{Z,K} = 381,6 \text{ W/(m K)}$ .

185 °C entsprechen ungefähr der mittleren Temperatur der kalten Zylinderwand.

In den meisten Stirlingmaschinen beträgt laut [1, S. 32] der Totraum 40 % bis 50 % des Gesamtvolumens. Für die Auslegung wird es vorläufig mit

angenommener Totraumanteil.....  $a_{\text{Tot}} = 0,45$

festgelegt. Im Rahmen der Berechnung wurde der Ansatz mit einem fixen Anteil verworfen und durch einen „variablen“ Totraum ersetzt, siehe „2.3.2.2 Länge des Regenerators“.

## 2.1.2 Arbeitsmedium und Umgebung

Es ist davon auszugehen, dass der Stirlingmotor nicht ideal gegen die Umgebung abgedichtet ist. Das heißt, dass das Arbeitsmedium mit der Zeit entweichen wird, wenn der Druck im System größer ist als der Umgebungsdruck. Bei einem Anschauungsmodell wäre es optimal, wenn das Arbeitsmedium nicht vor jedem Betrieb nachgefüllt werden muss. Aus diesem Grund wird Luft als Arbeitsfluid gewählt. Somit herrschen im Stirlingmotor vor jedem Betrieb dieselben Zustände wie in der Umgebung. Der Normdruck beträgt 101 325 Pa [11]. Für die Berechnung wird der Umgebungsdruck vereinfacht mit  $1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  angenommen. Das Modell wird höchstwahrscheinlich vorwiegend in (Büro-)Räumen verwendet und die Norm-Innentemperatur beträgt 20 °C [12, S. 10].

Die Startwerte für die Berechnung sind daher [3, S. 21]:

Temperatur im heißen Zylinder.....  $T_{H,1} = 293,15 \text{ K}$

Temperatur im kalten Zylinder .....  $T_{K,1} = 293,15 \text{ K}$

Temperatur im ersten Regeneratorelement .....  $T_{R,1}^1 = 293,15 \text{ K}$

Temperatur im letzten Regeneratorelement .....  $T_{R,1}^{j_{\text{max}}} = 293,15 \text{ K}$

Druck im heißen Zylinder.....  $p_{H,1} = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Druck im kalten Zylinder .....  $p_{K,1} = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Im eingeschwungenen Zustand beträgt die mittlere Temperatur im System 665 K und der mittlere Druck beträgt  $3,15 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ , siehe „2.3.2.3 Parameter“. Diese Werte sind iterativ ermittelt worden. Für diesen Druck und diese Temperatur hat Luft folgende Stoffeigenschaften [13]:

spezifische Gaskonstante des Fluids.....  $R = 287,22 \text{ J/(kg K)}$

spezifische isobare Wärmekapazität des Fluids ..  $c_p = 1067,7 \text{ J/(kg K)}$

Wärmeleitfähigkeit des Fluids.....  $\lambda_{\text{Gas}} = 0,049530 \text{ W/(m K)}$

dynamische Viskosität des Fluids .....  $\mu = 33,076 \cdot 10^{-6} \text{ (Pa s)}$

Zur Berechnung des Wärmeübergangs auf der kalten Zylinderaußenseite werden Stoffwerte von Luft bei Umgebungsbedingungen benötigt. Die Umgebung hat, wie oben erläutert, eine Temperatur von 293,15 K und einen Druck von  $1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ . Die benötigten Stoffwerte lauten

daher laut [13] wie folgt:

kinematische Viskosität der Umgebung.....	$\nu_U$	=	$15,329 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Wärmeleitfähigkeit der Umgebung.....	$\lambda_U$	=	$25,684 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m K})$
Prandtl-Zahl der Umgebung .....	$Pr_U$	=	0,71486
Temperaturleitfähigkeit der Umgebung.....	$\kappa_U$	=	$214,86 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

### 2.1.3 Regenerator

Die Hutter & Schrantz Technische Gewebe GmbH im Süden von Wien bietet diverse metallische Gewebe aus dem Werkstoff 1.4301 beziehungsweise X5CrNi18-10 an [14]. Der Werkstoff 1.4301 hat laut ThyssenKrupp Materials Europe GmbH folgende Eigenschaften [15, S. 2]:

spezifische Wärmekapazität des Regenerators ...	$c_R$	=	500 J/(kg K)
Dichte des Regeneratormaterials .....	$\rho_R$	=	7900 kg/m <sup>3</sup>

Die angegebenen Eigenschaften gelten für 20 °C, jedoch herrschen im Regenerator höhere Temperaturen. Diese Werte werden trotzdem verwendet, da keine besseren Daten zur Verfügung stehen.

Der Regenerator soll denselben Innendurchmesser wie die Bohrung  $d$  der Zylinder haben.

Drahtgewebe mit sehr kleinen Drahtdurchmessern (<0,03 mm bis 0,2 mm) sind besonders gut geeignet für den Einsatz im Regenerator. Der Vorteil liegt in der großen Oberfläche für den Wärmeübergang bei gleichzeitig relativ hohem Lückengrad des Regenerators. Der Druckverlust sei bei kleinen Drahtdurchmessern größer, aber in Summe überwiege der Wärmeübergangsvorteil [16, S. 110].

Laut unserem Algorithmus liefert eine Stirlingmaschine mit sehr kleinen Drahtdurchmessern keine Nutzarbeit. Der Grund ist der hohe Druckverlust im Regenerator. Der Drahtdurchmesser wurde vergrößert, um den Druckverlust zu verringern. Jedoch muss dabei Rücksicht auf den Regeneratordurchmesser genommen werden. Beispielsweise macht ein Gewebe mit einer Maschenweite von 10 mm bei einem Innendurchmesser des Regenerators von ebenfalls 10 mm keinen Sinn. Es wurde iterativ das Gewebe ausgesucht, das die höchste Nutzarbeit, unter den gegebenen Randbedingungen, liefert.

Von Hutter & Schrantz wurde ein Gewebe mit den folgenden Eigenschaften gewählt [14]:

lichte Maschenweite .....	$l_{mw}$	=	1 mm
Drahtdurchmesser .....	$d_{dm}$	=	0,5 mm

Die Anzahl der Maschen pro Fläche  $mpf$  lassen sich laut HAVER & BOECKER [17, S. 2] mit

$$mpf = \left( \frac{10}{l_{mw} + d_{dm}} \right)^2 \quad (2.6)$$

berechnen. Für das von uns gewählte Gewebe erhalten wir:

Maschen pro Fläche .....	$mpf$	=	44,444 1/cm <sup>2</sup>
--------------------------	-------	---	--------------------------

Die Länge des Regenerators in Strömungsrichtung wird wie folgt festgelegt:

Länge des Regenerators .....	$l_{Reg}$	=	0,015 m
------------------------------	-----------	---	---------

Ein langer Regenerator hat mehr Wärmeübertragungsfläche und eine größere Masse. Durch

die größere Masse ist er unempfindlicher gegenüber Temperaturschwankungen, jedoch braucht so ein Regenerator lange zum Einschwingen. Ein langer Einschwingvorgang ist bei einem Anschauungsmodell unvorteilhaft. Ein wichtiger Aspekt ist, dass der Druckverlust und der Totraum mit zunehmender Länge größer werden und deshalb muss iterativ ein akzeptabler Wert gefunden werden [3, S. 8-13].

### 2.1.4 Diskretisierung

Folgende Werte sind für die Diskretisierung notwendig [3, S. 21]:

Zeitintervall pro Rechenschritt .....  $\Delta t = 5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

Unterteilungen des Regenerators .....  $j_{\max} = 10$

Um die Berechnungszeit möglichst kurz zu halten, sind große Zeitintervalle pro Rechenschritt besser, jedoch ist der Algorithmus in dieser Hinsicht sehr empfindlich. Deshalb musste das Zeitintervall sehr klein gewählt werden, damit ein sinnvolles Ergebnis berechnet werden kann. Ansonsten sind numerische Fehler pro Rechenschritt sehr groß und die Berechnung divergiert bereits nach wenigen Rechenschritten beziehungsweise wird singulär.

Die Unterteilung des Regenerators in Strömungsrichtung wurde so gewählt, dass plausible Ergebnisse in angemessener Zeit berechnet werden können. Bei einer Unterteilung des Regenerators in wenige Elemente wird das Temperaturgefälle pro Element sehr groß und bei einer Unterteilung in viele Elemente dauert die Berechnung dementsprechend lange.

### 2.1.5 Startwerte für Volumina und Massen

Die Startwerte für die Volumina werden wie folgt festgelegt [3, S. 21]:

Volumen des heißen Zylinders .....  $V_{H,1} = V_{\text{Tot}}$

Volumen des kalten Zylinders .....  $V_{K,1} = V_Z + V_{\text{Tot}}$

Totraumvolumen pro Zylinder .....  $V_{\text{Tot}}$

Zylindervolumen .....  $V_Z$

Das Zylindervolumen  $V_Z$  und das Totraumvolumen pro Zylinder  $V_{\text{Tot}}$  werden vom Algorithmus berechnet [3, S. 20]. Der Totraum kann in beiden Zylindern unterschiedlich groß sein, jedoch wird das hier aus Gründen der Einfachheit nicht gemacht.

Die Startwerte für die Massen im Zylinder werden mit Hilfe der thermischen Zustandsgleichung wie folgt festgelegt [3, S. 21]:

Masse des Gases im heißen Zylinder .....  $m_{H,1} = \frac{V_{H,1} p_{H,1}}{R T_{H,1}}$

Masse des Gases im kalten Zylinder .....  $m_{K,1} = \frac{V_{K,1} p_{K,1}}{R T_{K,1}}$

### 2.1.6 Widerstandsbeiwert

Um den Widerstandsbeiwert im Regenerator zu berechnen, müssen folgende zwei Startwerte definiert werden [3, S. 21]:

mittlere Dichte des Fluids .....  $\rho_m = 1 \text{ kg/m}^3$

maximale Strömungsgeschwindigkeit des Fluids.  $w_{\max} = 1 \text{ m/s}$

Diese beiden Startwerte können relativ frei gewählt werden, da sie nach jeder Iteration ak-

tualisiert werden. Damit eine Division durch null vermieden wird, werden die Werte ungleich null gesetzt.

### 2.1.7 Wärmeübertragung

Für die Wärmeübertragung werden folgende Konstanten beziehungsweise Startwerte benötigt [3, S. 21]:

Temperatur außerhalb des heißen Zylinders .....  $T_{H,a} = 1073,15 \text{ K} = \text{const}$

Temperatur außerhalb des kalten Zylinders .....  $T_{K,a} = 293,15 \text{ K} = \text{const}$ .

mittlere Zylinderaußentemperatur der kalten Seite

.....  $T_{K,Z,m} = 293,15 \text{ K}$

mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Fluids ....  $w_m = 1 \text{ m/s}$

maximale Gaseintrittsgeschwindigkeit in den

heißen Zylinder.....  $w_{\text{ein,max,H}} = 1 \text{ m/s}$

maximale Gaseintrittsgeschwindigkeit in den

kalten Zylinder.....  $w_{\text{ein,max,K}} = 1 \text{ m/s}$

mittlere Dichte des Fluids im heißen Zylinder .....  $\rho_{m,H} = 1 \text{ kg/m}^3$

mittlere Dichte des Fluids im kalten Zylinder.....  $\rho_{m,K} = 1 \text{ kg/m}^3$

Die Temperatur außerhalb des kalten Zylinders entspricht die der Umgebung. Sie wurde wie in „2.1.2 Arbeitsmedium und Umgebung“ mit 20 °C festgelegt und ist konstant. Die Temperatur außerhalb des heißen Zylinders entspricht die der Flammentemperatur. Es wurde leider kaum Literatur gefunden, die die Flammentemperatur eines Benzinfeuerzeugs beschreiben. Lediglich auf der Homepage eines Feuerzeughändlers ist ein Hinweis, dass die ungefähre Flammentemperatur von Benzinfeuerzeugen 800 °C beträgt [18]. Dieser Wert wurde für die Berechnung herangezogen und wird als konstant angenommen.

Kupfer hat eine Solidustemperatur von 1 084,5 °C [19, S. 429]. Der Zylinderwerkstoff sollte deshalb die Flammentemperatur aushalten können.

Die mittlere Zylinderaußentemperatur der kalten Seite wird für die erste Iteration mit 20 °C festgelegt. Sie entspricht der vorher definierten Umgebungstemperatur. Diese Variable wurde in der Projektarbeit nicht verwendet und wird hier für den Wärmeübergang benötigt.

Die Startwerte können relativ frei gewählt werden, da sie nach jeder Iteration aktualisiert werden. Damit eine Division durch null vermieden wird, werden die Werte ungleich null gesetzt.

### 2.2 Optimierung des Algorithmus‘

Im Rahmen der Projektarbeit wurde ein Algorithmus entwickelt, der „ideale“ Nocken in Abhängigkeit der Startwerte und eingestellten Parameter berechnet. Mit diesen „idealen“ Nocken können die zwei isochoren und die zwei isothermen Zustandsänderungen

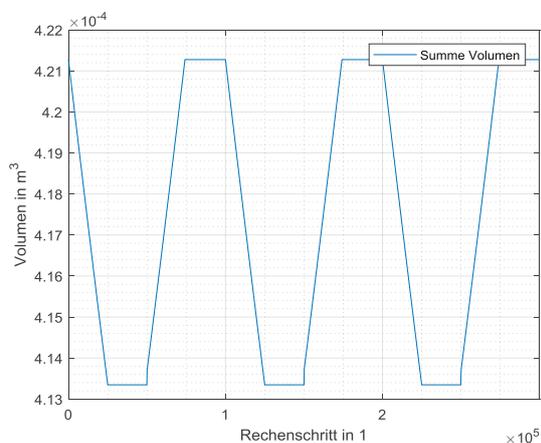


Abbildung 6: Verlauf der Volumensumme von heißer und kalter Kammer [3, S. 22]

## Berechnung

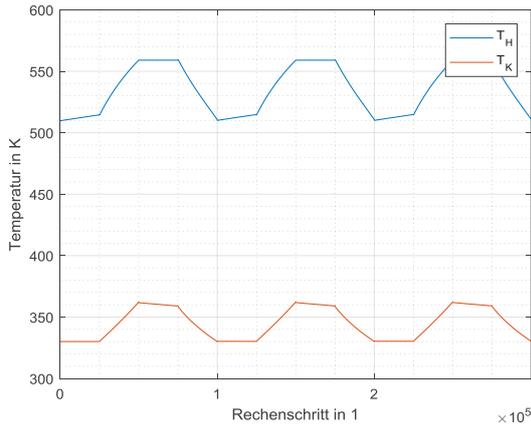


Abbildung 7: Verlauf der Gastemperatur in der heißen ( $T_H$ ) und kalten ( $T_K$ ) Kammer [3, S. 24]

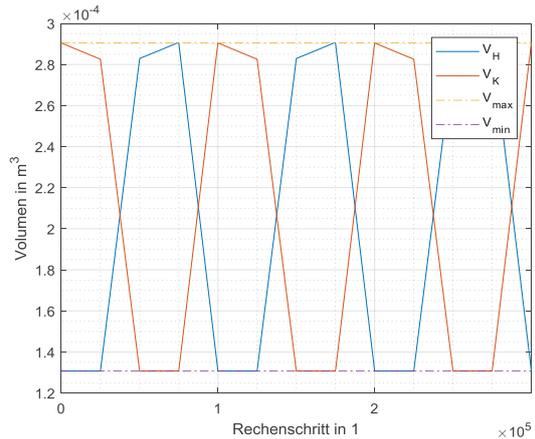


Abbildung 8: Volumenverlauf von heißer ( $V_H$ ) und kalter ( $V_K$ ) Kammer [3, S. 22]

genau nachgefahren werden, siehe Abbildung 6 und Abbildung 7 [3, S. 15].

In den Abbildungen entspricht eine dicke vertikale Linie eine Periode und die Dünnen jeweils eine Zustandsänderung [3, S. 21]. Stirlingmotoren haben meist eine heiße und eine kalte Kammer, siehe Abbildung 2. Dort sind sie als „expansion cylinder“ (heiß) und „compression cylinder“ (kalt) gekennzeichnet. In Abbildung 6 ist ersichtlich, dass die Summe der Volumen von heißer und kalter Kammer während einer Periode zwei Mal konstant bleibt. Das entspricht den zwei isochoren Zustandsänderungen. In Abbildung 7 ist ersichtlich, dass die Temperatur in der jeweiligen Kammer pro Periode einmal konstant bleibt. Das entspricht den zwei isothermen Zustandsänderungen. In Abbildung 8 ist der Volumenverlauf von heißer und kalter Kammer dargestellt.

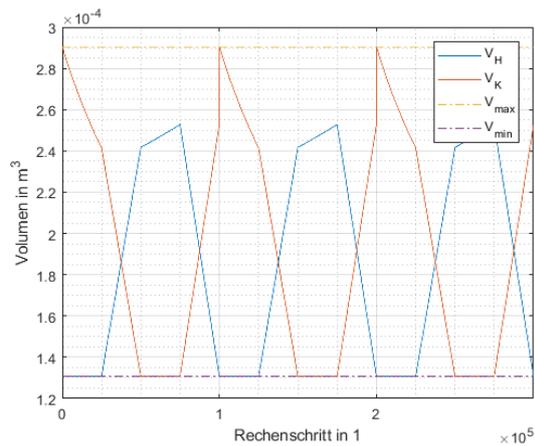


Abbildung 9: Volumenverlauf von heißer ( $V_H$ ) und kalter ( $V_K$ ) Kammer in einem ungünstigen Fall

In Abbildung 8 und Abbildung 9 stellt  $V_{min}$  das Totraumvolumen eines Zylinders dar beziehungsweise ist der Kolben hier im oberen Totpunkt.  $V_{max}$  stellt dementsprechend das Hubvolumen inklusive Totraumvolumen dar beziehungsweise ist der Kolben hier im unteren Totpunkt [3, S. 21].

Die dargestellten Verläufe in Abbildung 6, Abbildung 7 und Abbildung 8 sind leider nur in den seltensten Fällen erreichbar. Wenn die isotherme Volumenzunahme und die isotherme Volumenabnahme ungleich groß sind, erhalten wir einen Volumenverlauf der Kammern wie zum Beispiel in Abbildung 9.

Die erste Zustandsänderung stellt die Wärmeabfuhr dar, gefolgt von einer isochoren

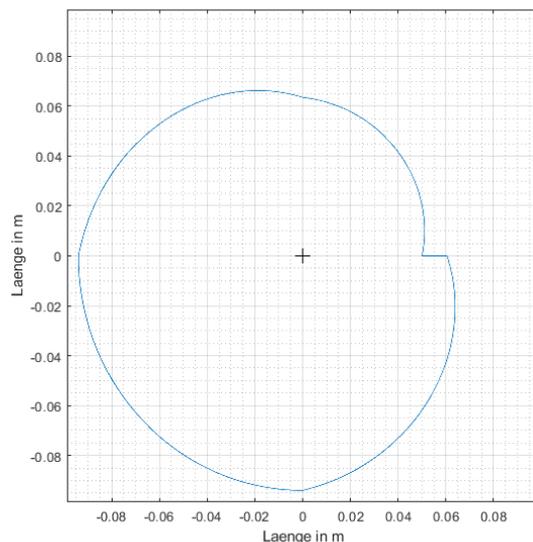


Abbildung 10: Nockenform der kalten Kammer in einem ungünstigen Fall

Zustandsänderung. Anschließend erfolgt die Wärmezufuhr, wobei die Volumenzunahme geringer ist als die vorherige Volumenabnahme. Zum Schluss findet erneut eine isochore Zustandsänderung statt. Weil die Volumenänderung bei Wärmezufuhr und die Änderung bei Wärmeabfuhr ungleich groß sind, landen wir am Ende einer Periode nicht beim Ausgangsvolumen. In Abbildung 9 ist bei Rechenschritt  $1 \cdot 10^5$  im Volumenverlauf der kalten Kammer ( $V_K$ ) deshalb ein Sprung zu sehen, weil der Verlauf periodisch fortgesetzt wird. Solche Fälle sind bei gegebenen Parametern die Regel und das führt zu Nockenformen wie in Abbildung 10. So eine Form ist natürlich für den laufenden Betrieb unbrauchbar. Zwar dreht sich die dargestellte Nocke im Uhrzeigersinn und ein Verkanten ist beim unstetigen Teil ausgeschlossen, jedoch könnten im System Stöße durch den Aufprall des Pleuels auftreten. Fraglich ist auch, wie schnell das Pleuel der Nockenform folgen kann. Aus diesen Gründen wird der Algorithmus abgeändert.

Der beschriebene ungünstige Fall ist überspitzt dargestellt. So große Unterschiede treten eher selten auf. Dafür müssten teilweise unrealistische Parameter, wie eine Außentemperatur der kalten Kammer von 100 K, gewählt werden. Das wurde nur zur Verdeutlichung des Problems gemacht.

Der jetzige Algorithmus berechnet nacheinander eine isotherme-, isochore-, isotherme- und wieder eine isochore Zustandsänderung [3, S. 15]. Die isochoren Zustandsänderungen werden belassen und die isothermen Zustandsänderungen werden nur noch angenähert.

Bei der isochoren Zustandsänderung geht der Algorithmus so vor, dass er einer Kammer ein wenig Volumen abzieht und der anderen Kammer dasselbe Volumen hinzugibt [3, S. 7]. Bei der angenäherten isothermen Zustandsänderung wird das jetzt ähnlich gehandhabt. Das Volumen das bei der Wärmeabfuhr in Summe der kalten Kammer weggenommen wird, wird bei der Wärmezufuhr der heißen Kammer wieder hinzugegeben. Bei der isochoren Zustandsänderung erfolgt die Volumenänderung zeitgleich in beiden Kammern [3, S. 7]. Bei der angenäherten isothermen Zustandsänderung erfolgt das um eine halbe Umdrehung beziehungsweise Periode versetzt. Damit stimmt das Anfangsvolumen einer Periode mit dem Endvolumen überein.

Die Volumenab- und -zunahme bei den angenäherten isothermen Zustandsänderungen erfolgt jetzt linear wie bei den isochoren Zustandsänderungen. Die lineare Annäherung erfolgt aufgrund der einfacheren Durchführung. Diese Annahme sollte gültig sein, weil die Volumenänderung bei den idealen isothermen Zustandsänderungen so gut wie linear erfolgt, welches in Abbildung 8 und Abbildung 9 ersichtlich ist.

Durch diese Änderung wird selbstverständlich weder bei der Wärmezufuhr noch bei der Wärmeabfuhr eine ideale isotherme Zustandsänderung erreicht. Der Grund ist, dass die isothermen Volumenänderungen nicht immer gleich groß und linear sind. Sie werden jedoch im Vergleich zu einem Kurbeltrieb besser angenähert.

Der optimierte Algorithmus wird qualitativ einen Volumenverlauf von heißer und kalter Kammer wie in Abbildung 8 ausgeben. Der abgebildete Verlauf wurde teilweise unter der Annahme einer isothermen Zustandsänderung berechnet. Bei der Optimierung wurde diese Annahme verworfen und der Volumenverlauf resultiert aus einer Folge von linearen Änderungen, wobei die Steigung teilweise manuell festgelegt wird. Die optimale Steigung beziehungsweise Volumenänderung für die approximierten isothermen Wärmeab- und -zufuhr wird iterativ ermittelt. Bei der Iteration wird nach der maximalen Nutzarbeit gesucht. Die Steigung ist dann bei heißer und kalter Kammer entgegengesetzt gleich groß und phasenverschoben.

## 2.3 Bestimmung der Nockenformen

Die unter „2.1 Parameter und Startwerte“ festgelegten Werte wurden in den abgeänderten Algorithmus eingegeben. Es wurden neben der erwähnten Optimierung auch weitere kleine Änderungen und Verbesserungen durchgeführt, um hauptsächlich die Berechnungsleistung zu erhöhen.

Die Endversion des MATLAB-Skripts ist im Anhang unter „7.1 MATLAB-Skript“ zu finden.

### 2.3.1 Wärmeübertragung

Vor der Berechnung muss die Wärmeübertragung definiert werden. Dieser Aspekt wurde zum Teil in der Projektarbeit außen vor gelassen, da der Schwerpunkt woanders lag.

Die Wärmeleitung im Regeneratormaterial wird als ideal angenommen. Für den Wärmedurchgangskoeffizienten des Regenerators wird daher nur der Wärmeübergang zwischen Fluid und Regenerator berücksichtigt [3, S. 20].

Für den Wärmedurchgangskoeffizienten der heißen Kammer  $k_H$  werden die Wärmeleitung in der Zylinderwand und der Wärmeübergang innen berücksichtigt. Die Wärmeübertragung außen, zwischen Flamme und Zylinder, wird als ideal angenommen. Der Koeffizient berechnet sich laut [20, S. 34] mit

$$k_H = \frac{1}{\frac{d+2s}{2\lambda_{z,H}} \ln\left[\frac{d+2s}{d}\right] + \frac{d+2s}{d} \frac{1}{\alpha_H}} \quad (2.7)$$

Wärmedurchgangskoeffizient des heißen Zylinders

.....  $k_H$  in W/(m<sup>2</sup> K)

Wärmeübergangskoeffizient im heißen Zylinder ..  $\alpha_H$  in W/(m<sup>2</sup> K)

Der Wärmedurchgangskoeffizient der kalten Kammer  $k_K$  berücksichtigt den Wärmeübergang zwischen Umgebung und Zylinder, die Wärmeleitung in der Zylinderwand und den Wärmeübergang innen. Dieser berechnet sich laut [20, S. 34] mit

$$k_K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{K,a}} + \frac{d+2s}{2\lambda_{z,K}} \ln\left[\frac{d+2s}{d}\right] + \frac{d+2s}{d} \frac{1}{\alpha_K}} \quad (2.8)$$

Wärmedurchgangskoeffizient des kalten Zylinders

.....  $k_K$  in W/(m<sup>2</sup> K)

Wärmeübergangskoeffizient außerhalb des kalten Zylinders

.....  $\alpha_{K,a}$  in W/(m<sup>2</sup> K)

Wärmeübergangskoeffizient im kalten Zylinder ...  $\alpha_K$  in W/(m<sup>2</sup> K)

Die Bohrung, die Wanddicke und die Wärmeleitfähigkeit wurden unter „2.1.1 Stirlingmotor“ bereits definiert. Die Wärmeübergangskoeffizienten im Inneren der Zylinder werden vom Algorithmus berechnet [3, S. 2-4].

Der Wärmeübergang außerhalb des kalten Zylinders kann als freie Konvektion der Luft bei einem horizontalen Zylinder beschrieben werden. Diese Annahme wurde getroffen, weil das Modell in geschlossenen Räumen verwendet werden soll und da ist kein signifikanter Luftzug zu erwarten. Der Wärmeübergangskoeffizient außerhalb des kalten Zylinders berechnet sich daher laut [20, S.754-759] mit den folgenden Gleichungen:

Berechnung

$$L = \frac{\pi}{2} (d + 2s) \quad (2.9)$$

$$\beta = \frac{1}{T_{K,a}} \quad (2.10)$$

$$Ra = \frac{\beta g (T_{K,Z,m} - T_{K,a}) L^3}{\nu_U \kappa_U} \quad (2.11)$$

$$f_3[Pr_U] = \left\{ 1 + \left( \frac{0,559}{Pr_U} \right)^{\frac{9}{16}} \right\}^{-\frac{16}{9}} \quad (2.12)$$

$$Nu = \frac{\alpha_{K,a} L}{\lambda_U} = \left\{ 0,752 + 0,387 (Ra f_3[Pr_U])^{\frac{1}{6}} \right\}^2 \quad (2.13)$$

- charakteristische Länge..... L in m
- isobarer Wärmeausdehnungskoeffizient.....  $\beta$  in 1/K
- Rayleigh-Zahl ..... Ra in 1
- Erdbeschleunigung..... g = 9,81 m/s<sup>2</sup>
- Funktion .....  $f_3$  in 1
- Nusselt-Zahl ..... Nu in 1

Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{K,a}$  kann mit der Gleichung (2.13) berechnet werden. Durch Umformung erhalten wir Gleichung (2.14).

$$\alpha_{K,a} = \frac{\lambda_U}{L} \left\{ 0,752 + 0,387 (Ra f_3[Pr_U])^{\frac{1}{6}} \right\}^2 \quad (2.14)$$

Die benötigten Parameter wurden entweder hier oder unter „2.1 Parameter und Startwerte“ definiert.

Die mittlere Zylinderaußentemperatur der kalten Seite  $T_{K,Z,m}$  entspricht am Anfang der Berechnung genau der Umgebungstemperatur. Während einer Iteration ist dieser Wert konstant und wird erst am Ende einer Iteration aktualisiert. Dabei wird folgende Gleichung verwendet:

$$\dot{Q}_{K,k} = k_K A_K (T_{K,a} - T_{K,k}) = \alpha_{K,a} A_K (T_{K,a} - T_{K,Z,k}) \quad (2.15)$$

- Wärmestrom in den kalten Zylinder .....  $\dot{Q}_K$  in W
- Wärmeübertragungsfläche des kalten Zylinders ..  $A_K$  in m<sup>2</sup>
- Temperatur im kalten Zylinder .....  $T_K$  in K
- Zylinderaußentemperatur der kalten Seite.....  $T_{K,Z}$  in K
- Größe i zum Rechenschritt k .....  $i_k$

Gleichung (2.15) kann so interpretiert werden, dass der Wärmestrom zwischen Umgebung und Fluid gleich dem Wärmestrom zwischen Umgebung und Zylinderaußenoberfläche entspricht. Durch Umformung dieser Gleichung erhalten wir Gleichung (2.16). Dadurch lässt sich die momentane Zylinderaußentemperatur  $T_{K,Z,k}$  bestimmen. Über die letzte Periode gemittelt, erhalten wir die mittlere Zylinderaußentemperatur  $T_{K,Z,m}$  für die nächste Iteration.

$$k_K A_K (T_{K,a} - T_{K,k}) = \alpha_{K,a} A_K (T_{K,a} - T_{K,Z,k}) \quad | : A_K$$

$$\begin{aligned}
k_K (T_{K,a} - T_{K,k}) &= \alpha_{K,a} (T_{K,a} - T_{K,Z,k}) \quad | : \alpha_{K,a} \\
\frac{k_K}{\alpha_{K,a}} (T_{K,a} - T_{K,k}) &= \frac{k_K}{\alpha_{K,a}} T_{K,a} - \frac{k_K}{\alpha_{K,a}} T_{K,k} = \\
&= T_{K,a} - T_{K,Z,k} \quad | + T_{K,Z,k} - \left( \frac{k_K}{\alpha_{K,a}} T_{K,a} - \frac{k_K}{\alpha_{K,a}} T_{K,k} \right) \\
T_{K,Z,k} &= T_{K,a} - \frac{k_K}{\alpha_{K,a}} T_{K,a} + \frac{k_K}{\alpha_{K,a}} T_{K,k} = T_{K,a} \left( 1 - \frac{k_K}{\alpha_{K,a}} \right) + \frac{k_K}{\alpha_{K,a}} T_{K,k} \quad (2.16)
\end{aligned}$$

Die Zahlenwerte werden automatisch vom Algorithmus eingesetzt und berechnet.

## 2.3.2 Berechnung

Bei den folgenden Berechnungen in MATLAB wird pro Iteration eine Periode berechnet. Zwischen den Iterationen werden die Startwerte aktualisiert. Der Algorithmus soll 1 400 Iterationen berechnen und das entspricht bei einer gegebenen Drehzahl von 2 U/s 11 Minuten und 40 Sekunden Betriebszeit. In dieser Zeit sollte das System eingeschwungen sein.

### 2.3.2.1 Maschengewebe

Hutter & Schrantz bieten Gewebe mit unterschiedlichen Maschenweiten und Drahtdicken an, siehe Tabelle 1 [14]. Es wurden für alle Maschen aus dem Datenblatt Berechnungen durchgeführt. Für die Volumenänderung der angenäherten isothermen Zustandsänderung wurden 12 äquidistante Werte zwischen null und dem Zylindervolumen  $V_Z$  gewählt.  $V_Z$  entspricht mit den obigen Definitionen  $2,3562 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ . Bei der Berechnung wurden manche Parameter anders als unter „2.1 Parameter und Startwerte“ definiert. Die Abweichungen sind im Laufe der Iterationen entstanden und die abweichenden Parameter sind folgende:

mittlere Temperatur der kalten Zylinderwand mit  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  angenommen, Wert aus [10, S. 3]

Wärmeleitfähigkeit des kalten Zylinders .....  $\lambda_{Z,K} = 385 \text{ W/(m K)}$

mittlere Temperatur im System mit  $300 \text{ K}$  und mittlerer Druck mit  $2,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  angenommen, Werte aus [13]

spezifische isobare Wärmekapazität des Fluids

.....  $c_p = 1009,6 \text{ J/(kg K)}$

Wärmeleitfähigkeit des Fluids .....  $\lambda_{\text{Gas}} = 0,026269 \text{ W/(m K)}$

dynamische Viskosität des Fluids .....  $\mu = 18,583 \cdot 10^{-6} \text{ (Pa s)}$

Länge des Regenerators willkürlich festgelegt

Länge des Regenerators .....  $l_{\text{Reg}} = 0,02 \text{ m}$

Alle restlichen Parameter und Startwerte entsprechen den Definitionen unter „2.1 Parameter und Startwerte“.

Um die Übersicht zu wahren, sind in der Tabelle 1 nur die Ergebnisse mit einer Volumenänderung von  $1,9278 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  aufgelistet. Alle übrigen Werte der Berechnung sind im Anhang unter „7.2 Ergebnisse Maschengewebe“ auffindbar. Es ist zu erwähnen, dass mit anderen Volumenänderungen teilweise ein höherer Wirkungsgrad erreichbar ist, aber absolut weniger Nutzarbeit gewonnen wird. Da das Optimierungsziel die Maximierung der Nutzarbeit ist, wurde die angeführte Volumenänderung gewählt. Die genannte Volumenänderung liefert die

größte Nutzarbeit mit  $-0,099449$  J pro Periode. Das dabei verwendete Gewebe hat eine Maschenweite von  $1,25$  mm und eine Drahtdicke von  $0,4$  mm.

Tabelle 1: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Maschenweite und Drahtdicke mit einer Volumenänderung von  $1,9278 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Maschenweite in mm	Drahtdicke in mm	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
10	1,5	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
8	1	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
5	1,25	-0,000444	1,1131	-1,2177	-0,00039888
5	1	-0,00041719	1,11	-1,2116	-0,00037587
4	1	0,0054975	0,75395	-0,73266	0,0072917
3,15	0,8	-0,0023425	0,49905	-0,44781	-0,004694
2,5	0,71	-0,058783	0,32489	-0,27542	-0,18093
2	0,56	-0,08384	0,27872	-0,19242	-0,30081
1,6	0,5	-0,094009	0,2513	-0,15529	-0,37409
1,4	0,25	-0,098763	0,23593	-0,13543	-0,41861
1,25	0,4	-0,099449	0,2299	-0,12904	-0,43257
1	0,5	-0,096745	0,21665	-0,11902	-0,44655
1	0,36	-0,097321	0,21588	-0,11768	-0,45082
1	0,3	-0,097496	0,21544	-0,11705	-0,45254
0,8	0,32	-0,082332	0,19937	-0,11665	-0,41296
0,71	0,3	-0,06379	0,18568	-0,12167	-0,34355
0,63	0,25	-0,03373	0,16563	-0,13179	-0,20364
0,5	0,23	0,06851	0,10125	-0,16931	0,67667
0,4	0,25	0,20743	0,0073108	-0,207	28,373
0,32	0,16	0,29247	-0,081192	-0,19192	-3,6022
0,25	0,16	0,26365	-0,13211	-0,10064	-1,9957
0,2	0,12	0,1931	-0,12374	-0,055805	-1,5606
0,16	0,11	0,12196	-0,088425	-0,029623	-1,3792
0,125	0,08	0,073033	-0,055286	-0,016901	-1,321

In Tabelle 1, Abbildung 11 und Abbildung 12 ist ersichtlich, dass bei sehr kleinen Drahtdurchmessern und Maschenweiten Arbeit in das System gesteckt werden muss, um es am Laufen zu halten. Wegen dem großen Druckverlust von kleinmaschigen Geweben wird so viel Energie dissipiert, dass heiße und kalte Kammer Wärme an die Umgebung abgeben müssen. Mit zunehmender Drahtdicke und Maschenweite erhalten wir irgendwann Nutzarbeit und die heiße Kammer nimmt Wärme auf. Die Nutzarbeit erreicht ein Optimum und danach sinkt die

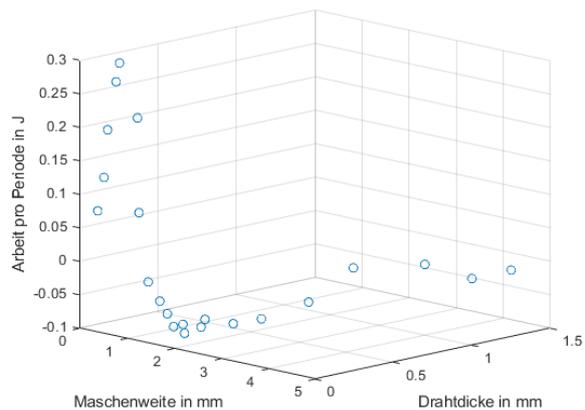


Abbildung 11: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Maschenweite und Drahtdicke bei einer Volumenänderung von  $1,9278 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

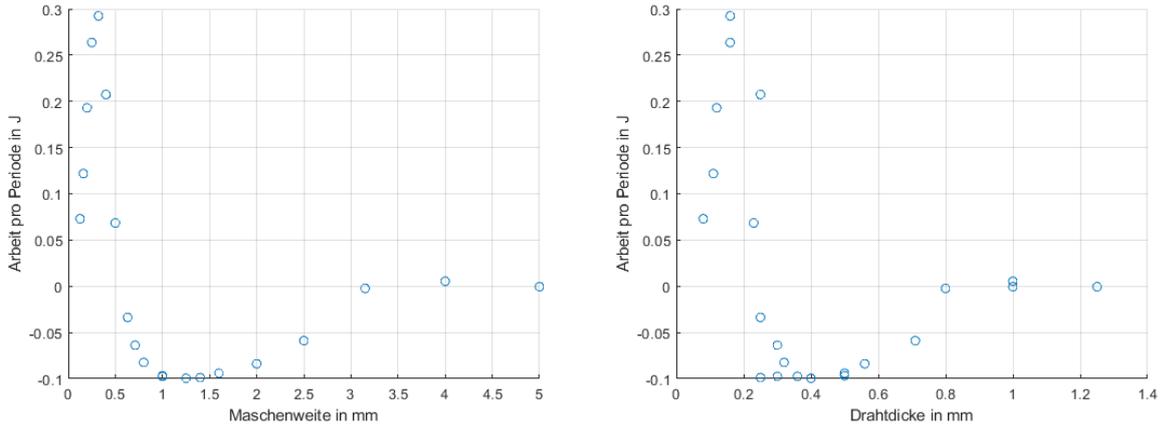


Abbildung 12: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Maschenweite beziehungsweise Drahtdicke bei einer Volumenänderung von  $1,9278 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

gewonnene Arbeit wieder, bis die Berechnung schließlich singulär wird oder divergiert. Großmaschige Gewebe haben zwar einen geringen Druckverlust, sind aber wie unter „2.1.3 Regenerator“ erwähnt hinsichtlich der Wärmeübertragung schlechter als kleinmaschige Gewebe. Das Gewebe mit einer Maschenweite von 1,25 mm und einer Drahtdicke von 0,4 mm erreicht das Optimum und dieses wird vorläufig für die Berechnung verwendet. Später wird unter „2.3.2.2 Länge des Regenerators“ ein anderes Gewebe gewählt, weil die Regeneratorlänge und die Bestimmungsgleichung für den Totraum geändert wurden.

Der Algorithmus wird für große Maschenweiten und Drahtdicken singulär beziehungsweise divergiert, weil das Zeitintervall pro Rechenschritt  $\Delta t$  mit  $5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$  zu groß gewählt worden ist. Mit diesem Zeitintervall pro Rechenschritt und der oben definierten Drehzahl haben wir bereits 100 000 (!) Rechenschritte pro Periode. Wegen dem großmaschigen Gewebe ist der Widerstand im Regenerator sehr klein und der dadurch resultierende Massenstrom sehr groß. Durch den großen Massenstrom und das „zu große“ Zeitintervall fließt sehr viel Masse pro Rechenschritt in die andere Kammer. Dadurch dreht sich das

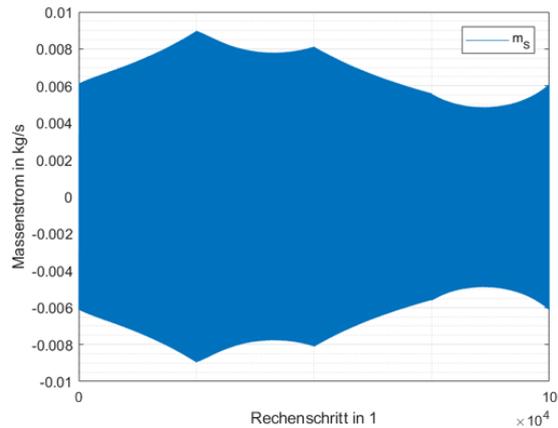


Abbildung 13: Massenstrom bei einer Maschenweite von 8 mm, Drahtdicke von 1 mm und einer Volumenänderung von  $1,0710 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Druckverhältnis um und das Gleiche passiert in die Gegenrichtung, siehe Abbildung 13. Das passiert jeden Rechenschritt und um dieses Verhalten zu vermeiden, müsste das Zeitintervall pro Rechenschritt noch kleiner gewählt werden. Das wurde nicht gemacht, weil bei immer größer werdenden Maschenweiten und Drahtdicken nach dem Optimum die Nutzarbeit pro Periode tendenziell weniger wird, siehe Tabelle 1, Abbildung 11 und Abbildung 12. Aus diesem Grund wird kein weiteres Optimum in diesem Bereich erwartet und wie in „2.1.3 Regenerator“ erwähnt, machen große Maschenweiten bei kleinen Zylinderinnendurchmessern keinen Sinn. Die nochmalige Berechnung mit einem kleineren Zeitintervall erübrigt sich dadurch.

### 2.3.2.2 Länge des Regenerators

Zuerst wurden mit dem unter „2.1.1 Stirlingmotor“ definierten fixen Totraumanteil gerechnet. Bei der Berechnung wurde die Länge des Regenerators von 1 cm schrittweise um 1 cm bis

5 cm erhöht. Auffallend war, dass mit zunehmender Länge die Nutzarbeit pro Periode immer größer war als bei einer Länge von 1 cm, siehe Tabelle 2. Dabei wurde mit einer Volumenänderung von  $1,9278 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  gerechnet.

Tabelle 2: Arbeit pro Periode bei verschiedenen Längen des Regenerators, fixem Totraum und einer Volumenänderung von  $1,9278 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Länge des Regenerators in m	Arbeit pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,01	-0,092717	-0,36684
0,02	-0,099449	-0,43257
0,03	-0,10094	-0,45705
0,04	-0,10106	-0,46838
0,05	-0,10066	-0,47378

Der Hohlraum im Regenerator ist kein unwesentlicher Bestandteil des gesamten Totraums [1, S. 32]. Aus diesem Grund ist ein fixer Totraumanteil ungeeignet, um die verschiedenen Längen des Regenerators zu vergleichen.

Der Totraum wurde vom Algorithmus bis jetzt mit der Gleichung (2.17) berechnet [3, S. 20].

$$V_{Tot} = \frac{V_Z a_{Tot}}{1 - a_{Tot}} \quad (2.17)$$

Der Hohlraumanteil  $\Psi$  vom Regenerator wird vom Algorithmus bereits nach [16, S. 69] berechnet. Dieser wird benötigt, um die Regeneratormasse beziehungsweise Drahtmasse zu berechnen [3, S. 20]. Dieser wird ab jetzt auch verwendet, um den Totraum nach Gleichung (2.18) zu berechnen.

$$V_{Tot} = \frac{\Psi A_{Quer} l_{Reg}}{2} \quad (2.18)$$

Hohlraumanteil .....  $\Psi$  in 1

Querschnittsfläche des Regenerators.....  $A_{Quer}$  in  $\text{m}^2$

Das dividiert durch zwei ist notwendig, weil  $V_{Tot}$  das Totraumvolumen pro Zylinder darstellt. Weiterfolgend wird der Totraum nur noch mit der Gleichung (2.18) bestimmt.

Mit denselben Längen für den Regenerator wie in Tabelle 2 wurden die Berechnungen noch einmal durchgeführt, diesmal aber mit der neuen Bestimmungsgleichung für den Totraum. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 ersichtlich.

Tabelle 3: Arbeit pro Periode bei verschiedenen Längen des Regenerators, individuell berechnetem Totraum und einer Volumenänderung von  $1,9278 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Länge des Regenerators in m	Arbeit pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,01	0,10445	0,17685
0,02	-0,079351	-0,17798
0,03	-0,11495	-0,32338
0,04	-0,11708	-0,39956
0,05	-0,11016	-0,44507

Wenn die Berechnungsergebnisse in Tabelle 2 und Tabelle 3 verglichen werden, ist ein qualitativer Unterschied erkennbar, siehe Abbildung 14. Mit dem fixen Totraum erhält man tendenziell mehr Nutzarbeit pro Periode und einen besseren Wirkungsgrad, wenn der Regenerator länger wird. Ein längerer Regenerator speichert zwar mehr Wärme und besitzt mehr Wärmeübertragungsfläche, hat aber gleichzeitig auch mehr Totraum und einen größeren

Druckverlust. Der Totraum spielt bei Stirlingmaschinen eine entscheidende Rolle und deshalb ist der dargestellte Verlauf mit fixem Totraum mit hoher Wahrscheinlichkeit falsch.

Wenn der Totraum unter anderem in Abhängigkeit der Regeneratorlänge bestimmt wird, erhalten wir qualitativ einen anderen Verlauf, siehe Abbildung 14. Entfernen wir uns vom Optimum, wird die Nutzarbeit pro Periode immer geringer. Das macht Sinn, weil beispielsweise ein sehr kurzer Regenerator seinen Zweck nicht gut erfüllen kann. Er hat unter anderem wenig Masse und kann deshalb nur wenig Wärme zwischenspeichern. Darüber hinaus ist er größeren Temperaturschwankungen unterworfen und hat weniger Wärmeübertragungsfläche. Um dieses Problem zu beseitigen, macht es Sinn den Regenerator länger zu machen. Jedoch werden der Druckverlust und der Totraum mit zunehmender Länge auch größer. Aus diesen Gründen muss eine ausgewogene Länge ermittelt werden. Hier wird wegen unserem Optimierungsziel die Länge gewählt, die die größte Nutzarbeit liefert. Laut Tabelle 3 wäre eine Länge von 4 cm optimal, weil sie die maximale Nutzarbeit mit -0,11708 J pro Periode liefert.

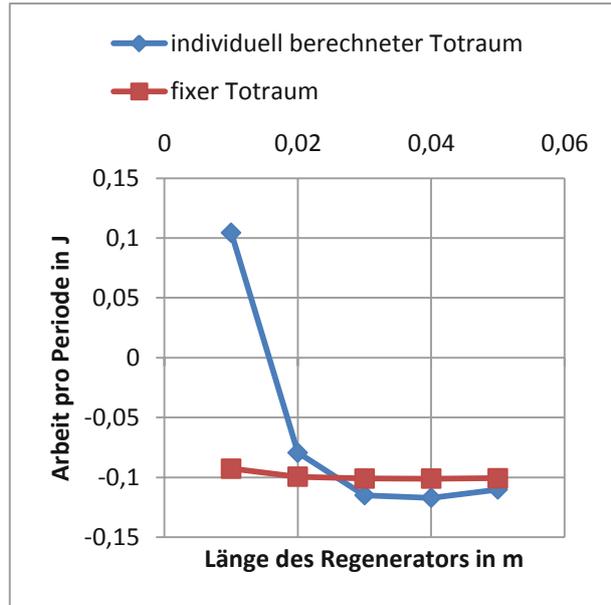


Abbildung 14: Vergleich der Arbeit pro Periode in Abhängigkeit von der Länge des Regenerators und der Totraumbestimmung bei einer Volumenänderung von  $1,9278 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Durch die neue Bestimmungsgleichung für den Totraum ist jetzt zu hinterfragen, ob die vorher „optimale“ Volumenänderung von  $1,9278 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  und damit zusammenhängend die Regeneratorlänge von 4 cm nach wie vor die höchste Nutzarbeit liefern. Dafür wurden wieder Berechnungen durchgeführt. Die Volumenänderung wurde wieder von null bis zum Zylindervolumen  $V_z$  in 12 äquidistante Werte unterteilt. Als Regeneratorlänge wurden Werte zwischen 0,5 cm und 5 cm in 0,5 cm-Abständen gewählt.

Um die Übersicht zu behalten, sind hier nur die Ergebnisse mit einer Volumenänderung von  $1,2852 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  dargestellt. Die restlichen Ergebnisse sind unter „7.3 Ergebnisse Regeneratorlänge“ zu finden. Die genannte Volumenänderung wurde gewählt, weil sie die höchste Nutzarbeit mit -0,1482 J pro Periode liefert.

Tabelle 4: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Länge des Regenerators bei einer Volumenänderung von  $1,2852 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Länge des Regenerators in m	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,005	-0,12066	0,54437	-0,41862	-0,22164
0,01	-0,14775	0,44278	-0,29113	-0,3337
0,015	-0,1482	0,38126	-0,23016	-0,3887
0,02	-0,14241	0,33503	-0,19019	-0,42506
0,025	-0,13467	0,29816	-0,1614	-0,45165
0,03	-0,12646	0,268	-0,13972	-0,47189
0,035	-0,11843	0,24284	-0,12286	-0,48769
0,04	-0,11083	0,22157	-0,10937	-0,50021

0,045	-0,10375	0,20337	-0,098323	-0,51015
0,05	-0,097197	0,18767	-0,08906	-0,51792

Wie in Tabelle 4 und Abbildung 15 ersichtlich, ist die Nutzarbeit bei einer Länge von 1,5 cm am höchsten. Bei einer noch kürzeren Länge sinkt die Nutzarbeit und hier kommen auch konstruktionstechnische und fertigungstechnische Fragen ins Spiel. Beispielsweise stellt sich die Frage bei einem Regenerator mit einer Länge von 5 mm, wie er am besten mit den Zylindern verbunden werden kann. Anschrauben mit einem Gewinde auf den Zylindern oder verbinden mit Schrauben wird platztechnisch schwierig. Mit zunehmender Länge sinkt die Nutzarbeit, aber der Wirkungsgrad verbessert sich. Unser Ziel ist die Maximierung der Nutzarbeit und deshalb wird die Länge des Regenerators mit 1,5 cm festgelegt.

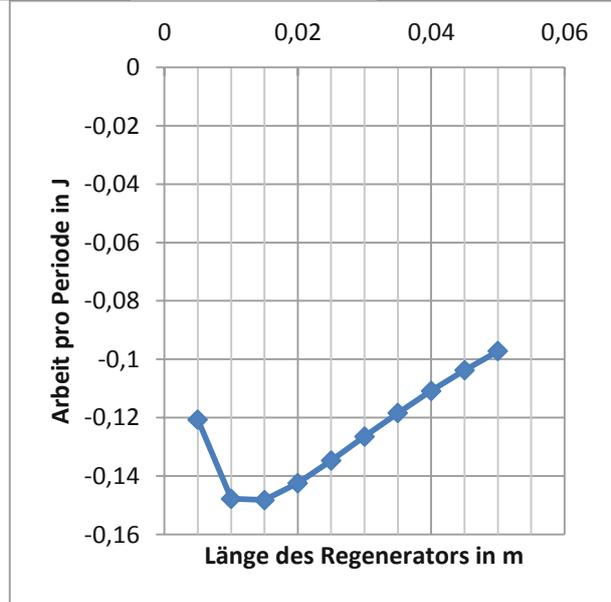


Abbildung 15: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Länge des Regenerators bei einer Volumenänderung von  $1,2852 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Durch einen kürzeren Regenerator werden die Verluste geringer und eventuell liefert die Maschine mit einem anderen Gewebe jetzt mehr Nutzarbeit. Die Volumenänderung wurde wieder in 12 äquidistante Werte zwischen null und dem Zylindervolumen  $V_Z$  unterteilt. Diesmal wurde aber nicht jedes Gewebe in der Berechnung miteinbezogen. Vom vorher gewählten Gewebe mit einer Maschenweite von 1,25 mm und einer Drahtdicke von 0,4 mm werden die vier nächstgrößeren und die vier nächstkleineren Gewebe gewählt, siehe Tabelle 5. Es werden übersichtlichkeitshalber nur die Ergebnisse mit einer Volumenänderung von  $1,2852 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  aufgelistet. Interessanterweise liefert dieselbe Volumenänderung wie vorher die höchste Nutzarbeit mit -0,15104 J pro Periode. Die restlichen Ergebnisse sind unter „7.4 Ergebnisse Maschengewebe 2. Iteration“ zu finden.

Tabelle 5: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Maschenweite und Drahtdicke mit einer Volumenänderung von  $1,2852 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Maschenweite in mm	Drahtdicke in mm	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
2,5	0,71	-0,037088	0,59802	-0,59348	-0,062017
2	0,56	-0,10787	0,45565	-0,34919	-0,23674
1,6	0,5	-0,13668	0,40383	-0,26502	-0,33847
1,4	0,25	-0,14337	0,37652	-0,22878	-0,38077
1,25	0,4	-0,1482	0,38126	-0,23016	-0,3887
1	0,5	-0,15104	0,38251	-0,23019	-0,39485
1	0,36	-0,14998	0,37092	-0,2196	-0,40436
1	0,3	-0,14935	0,36557	-0,21486	-0,40854
0,8	0,32	-0,13875	0,36044	-0,22112	-0,38496

Wie in Tabelle 5, Abbildung 16 und Abbildung 17 ersichtlich, liefert das Gewebe mit einer Maschenweite von 1 mm und einer Drahtdicke von 0,5 mm die höchste Nutzarbeit. Dieses Gewebe wird für den Stirlingmotor verwendet.

Der unter „2.1.1 Stirlingmotor“ definierte Totraumanteil  $a_{Tot}$  mit 0,45 wurde aus der Literatur entnommen. Im Algorithmus wird jetzt lediglich der Hohlraum im Regenerator als Totraum betrachtet. Da unser Volumen während einer Periode in Summe nicht konstant bleibt, ist es der Totraumanteil auch nicht. Der Totraumanteil wird nach Gleichung (2.19) berechnet.

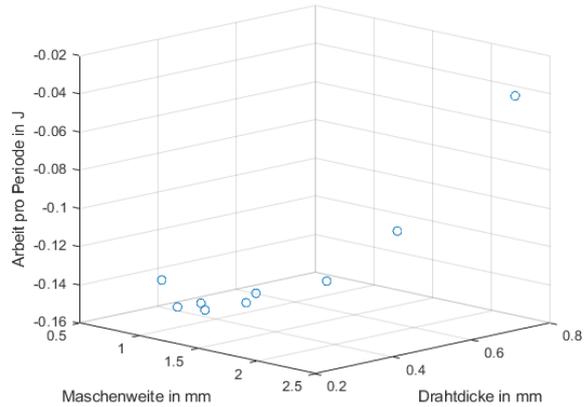


Abbildung 16: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Maschenweite und Drahtdicke bei einer Volumenänderung von  $1,2852 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

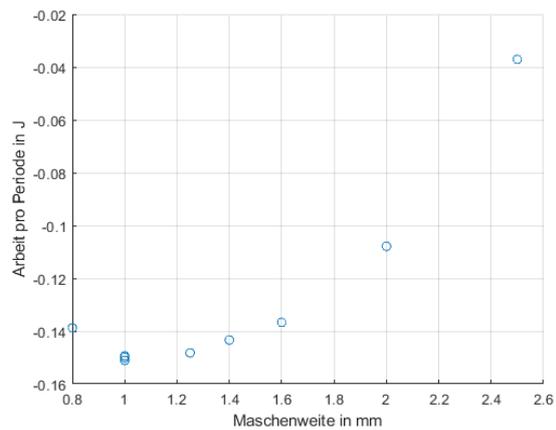
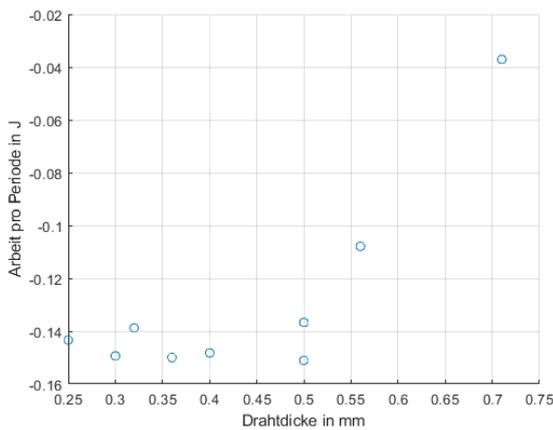


Abbildung 17: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Maschenweite beziehungsweise Drahtdicke bei einer Volumenänderung von  $1,2852 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

$$a_{Tot,k} = \frac{2 V_{Tot}}{V_{H,k} + V_{K,k}} \quad (2.19)$$

In Gleichung (2.19) stellt der Zähler den gesamten Totraum des Systems dar.  $V_{Tot}$  ist der Totraum pro Zylinder und daher mal zwei. Im Nenner würde man meinen, dass das Totraumvolumen noch fehlt, um auf das Gesamtvolumen des Systems zu kommen. Im Volumen des heißen und kalten Zylinders ( $V_H$  und  $V_K$ ) steckt bereits jeweils ein Mal das Totraumvolumen  $V_{Tot}$  drinnen, siehe „2.1.5 Startwerte für Volumina und Massen“. Deshalb ist im Nenner bereits das Gesamtvolumen des Systems berücksichtigt.

In Abbildung 18 ist der Verlauf des Totraumanteils für das gewählte Gewebe dargestellt. Über eine Periode gemittelt ergibt das einen durchschnittlichen Totraumanteil von 0,34672. Dieser Totraum

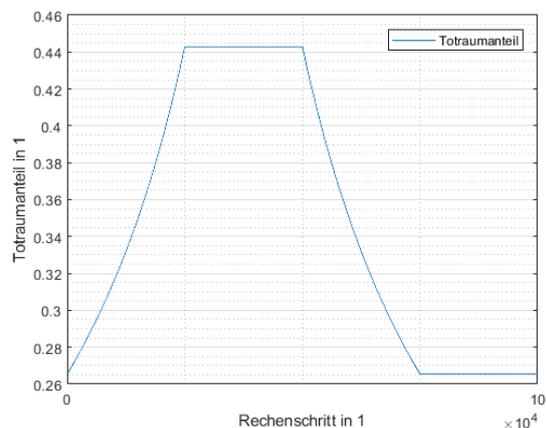


Abbildung 18: Totraumanteil bei einer Volumenänderung von  $1,2852 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

ist kleiner als die 0,45 laut Literatur [1, S. 32]. Zum Systemvolumen gehören bei der geplanten Anordnung, siehe Abbildung 19, nur zwei Zylinder und ein Regenerator. So ist es auch im Algorithmus modelliert und dadurch bleibt der Totraumanteil gering. In vielen Stirlingmaschinen ist die Anordnung eher wie in Abbildung 2. Wegen den Rohren und den Anschlusselementen hat diese Anordnung aufgrund der Konstruktion bereits einen größeren Totraumanteil. Wegen den genannten Punkten wird der geringere Totraumanteil aufgrund der nicht üblichen Anordnung als plausibel erachtet.

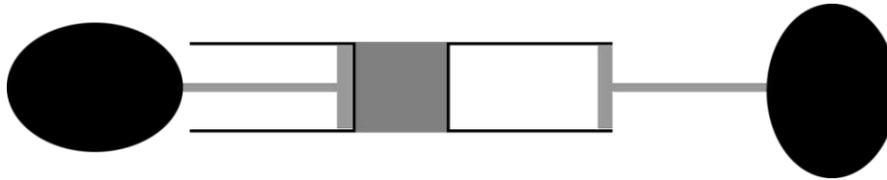


Abbildung 19: geplante Anordnung des Stirlingmotors [3, S. 1]

Damit der Algorithmus nicht unnötig lange iterieren muss, wurde eine Hilfsgröße eingeführt. Die Summe der Energie, die die Systemgrenze überschreitet, muss im eingeschwungenen Zustand über eine Periode null ergeben. Diese Summe wurde durch die zugeführte Wärme pro Periode dividiert, um eine Größe zum Abschätzen des Einschwingvorgangs zu erhalten, siehe Gleichung (2.20).

$$\frac{\text{Energiesumme}}{\text{zugeführte Wärme}} = \frac{\text{Arbeit} + \text{zugeführte Wärme} + \text{abgeführte Wärme}}{\text{zugeführte Wärme}} \quad (2.20)$$

Diese Größe wird nur für die letzte Periode pro Iteration ermittelt, falls mehrere Perioden pro Iteration berechnet werden. Für die beschriebene Konfiguration ist der Verlauf in Abbildung 20 dargestellt.

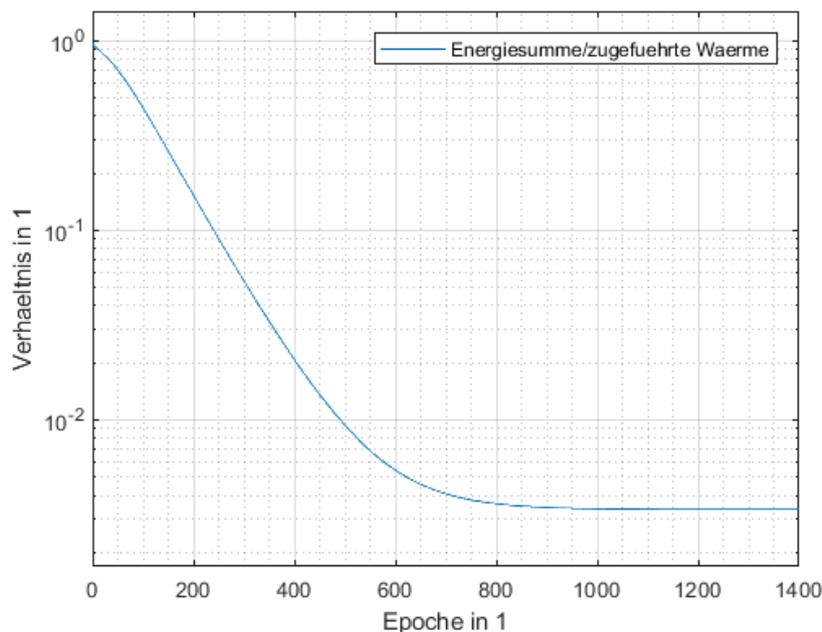


Abbildung 20: Darstellung des Einschwingvorgangs mit der Hilfsgröße

In Abbildung 20 ist ersichtlich, dass ab rund 1 000 Iterationen beziehungsweise Epochen die Kurve im Grunde eine Horizontale wird. Das heißt, dass wir bei 1 400 Iterationen kaum mehr Informationen über das System haben als bei 1 000 Iterationen. Somit werden die Iterationen im Algorithmus auf 1 000 verringert, um die Berechnungszeit zu verkürzen.

### 2.3.2.3 Parameter

Für die Zylinderwandauslegung ist der maximale Druck im System relevant. Für die beschriebene Konfiguration ist der Druckverlauf über eine Periode in Abbildung 21 dargestellt. Der maximale Druck beträgt  $4,7245 \cdot 10^5$  Pa und für die Zylinderwandauslegung wird der Maximaldruck mit  $5 \cdot 10^5$  Pa angenommen. Dieser Wert wird unter „2.3.2.4 optimale Volumenänderung“ abgeändert, weil im Laufe der Iterationen ein höherer Maximaldruck erreicht wird.

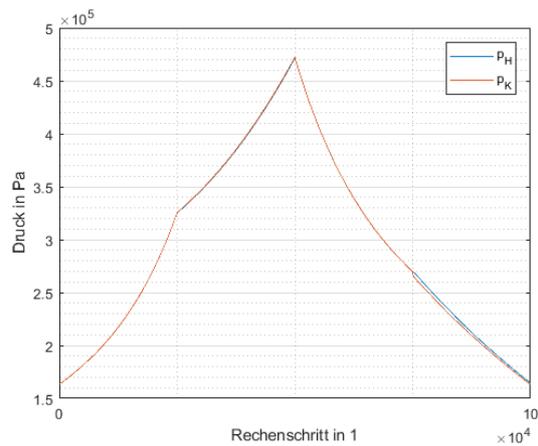


Abbildung 21: Druckverlauf des Systems im eingeschwungenen Zustand

Die Wärmeleitfähigkeit des Zylindermaterials ist von der Temperatur abhängig. In der heißen Kammer herrscht eine durchschnittliche Temperatur von 916,69 K beziehungsweise  $643,54$  °C, siehe Abbildung 22. Das Datenblatt für CW004A endet bei  $300$  °C und der dazugehörige Wert wird mangels Alternative als Wärmeleitfähigkeit des heißen Zylinders verwendet.

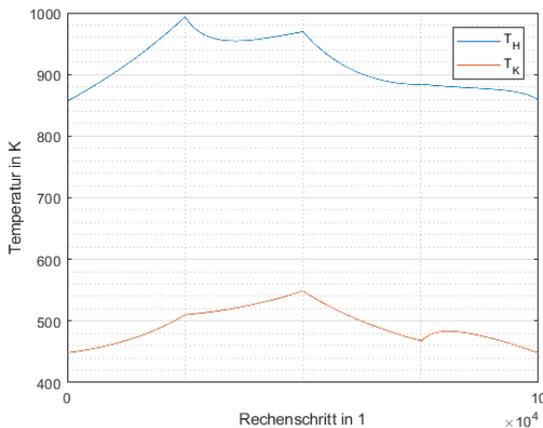


Abbildung 22: Temperaturverlauf der heißen und kalten Kammer im eingeschwungenen Zustand

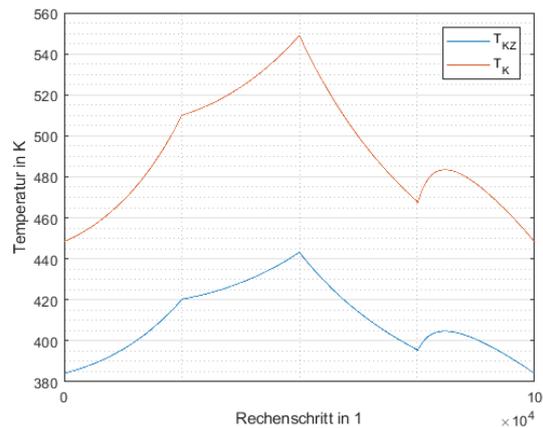


Abbildung 23: Zylinderaußentemperatur der kalten Kammer im eingeschwungenen Zustand

Bei der kalten Kammer wird neben der Temperatur im Zylinder (Fluidtemperatur  $T_K$ ) auch die Zylinderaußentemperatur ( $T_{KZ}$ ) ermittelt, siehe Abbildung 23. Diese zwei Verläufe werden zusammen über eine Periode gemittelt und das Ergebnis ist die mittlere Temperatur der kalten Zylinderwand. Sie beträgt  $451,66$  K beziehungsweise  $178,51$  °C. CW004A hat laut [10, S. 3] bei  $100$  °C eine Wärmeleitfähigkeit von  $385$  W/(m K) und bei  $200$  °C eine Wärmeleitfähigkeit von  $381$  W/(m K). Die mittlere Temperatur der kalten Zylinderwand wird mit  $180$  °C angenommen und der dazugehörige Wert wird mit linearer Interpolation ermittelt, siehe Gleichung (2.21).

$$\lambda_{z,k} = 385 \frac{\text{W}}{\text{m K}} + \frac{381 \frac{\text{W}}{\text{m K}} - 385 \frac{\text{W}}{\text{m K}}}{200 \text{ °C} - 100 \text{ °C}} (180 \text{ °C} - 100 \text{ °C}) = 381,8 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \quad (2.21)$$

Das Ergebnis aus Gleichung (2.21) wird als Wärmeleitfähigkeit des kalten Zylinders verwendet. Eigentlich müsste für die Ermittlung der mittleren Temperatur der kalten Zylinderwand statt der Fluidtemperatur die Zylinderinnentemperatur verwendet werden. Hier wird vereinfacht angenommen, dass die Fluidtemperatur gleich der Zylinderinnentemperatur entspricht.

Bei der heißen Kammer müsste ebenfalls die Zylinderinnen- und -außentemperatur ermittelt werden, um die mittlere Temperatur in der heißen Zylinderwand abschätzen zu können. Die Fluidtemperatur ist bereits weit größer als der größte Wert im Datenblatt. Daher erübrigt sich die Ermittlung der anderen Werte, weil sie noch größer sein werden. Die Zylinderaußentemperatur entspricht mit unseren Annahmen der Flammentemperatur von 800 °C.

Die mittlere Temperatur des Systems lässt sich nicht auf Anhieb berechnen. Die mittlere Temperatur des heißen Zylinders, die mittlere Temperatur des kalten Zylinders oder die mittlere Temperatur beider Zylinder repräsentieren nicht die mittlere Temperatur des Systems. Der Grund ist, dass sich zu jedem Zeitpunkt unterschiedlich viel Masse in den Zylindern befindet. Wenn beispielsweise ein Kolben im oberen Totpunkt ist, dann wäre ein Durchschnitt über beide Zylinder nicht repräsentativ. Um dieses Problem zu lösen wird eine Energiebilanz verwendet, siehe Gleichung (2.22).

$$c_p m_{H,k} T_{H,k} + c_p m_{K,k} T_{K,k} = c_p (m_{H,k} + m_{K,k}) T_m \quad (2.22)$$

Masse des heißen Zylinders.....  $m_H$  in kg

Masse des kalten Zylinders .....  $m_K$  in kg

mittlere Temperatur des Systems .....  $T_m$  in K

Gleichung (2.22) kann so interpretiert werden, dass die Energie in der heißen und kalten Kammer zusammen gleich der Energie des Gesamtsystems entspricht. Das Gesamtsystem wird durch die gesamte Masse (Masse der heißen Kammer  $m_H$  plus Masse der kalten Kammer  $m_K$ ) und die mittlere Temperatur des Systems  $T_m$  beschrieben. Durch Umformung lässt sich mit (2.23) die mittlere Temperatur des Systems berechnen.

$$\begin{aligned} c_p m_{H,k} T_{H,k} + c_p m_{K,k} T_{K,k} &= c_p (m_{H,k} + m_{K,k}) T_{m,k} \quad | : c_p \\ m_{H,k} T_{H,k} + m_{K,k} T_{K,k} &= (m_{H,k} + m_{K,k}) T_{m,k} \quad | : (m_{H,k} + m_{K,k}) \\ T_{m,k} &= \frac{m_{H,k} T_{H,k} + m_{K,k} T_{K,k}}{(m_{H,k} + m_{K,k})} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Gleichung (2.23) erhält man auch, wenn die Temperatur der Kammern mit deren Massen gewichtet wird. Der Regenerator wurde so modelliert, dass er keine Fluidmasse speichern kann.

Für den mittleren Druck des Systems  $p_m$  wird die thermische Zustandsgleichung verwendet, siehe Gleichung (2.24).

$$p_{m,k} (V_{H,k} + V_{K,k}) = (m_{H,k} + m_{K,k}) R T_{m,k} \quad (2.24)$$

mittlerer Druck des Systems.....  $p_m$  in Pa

Die thermische Zustandsgleichung (2.24) soll das Gesamtsystem beschreiben und der dazugehörige Druck wird als mittlerer Druck des Systems interpretiert. Durch Umformung lässt sich der mittlere Druck mit der Gleichung (2.25) ausdrücken.

$$p_{m,k} = \frac{(m_{H,k} + m_{K,k}) R T_{m,k}}{(V_{H,k} + V_{K,k})} \quad (2.25)$$

Der Verlauf der mittleren Temperatur ist in Abbildung 24 ersichtlich. Wird sie über eine Periode gemittelt, erhalten wir 655,84 K. Der Verlauf des mittleren Drucks ist in Abbildung 25 ersichtlich. Wird er über eine Periode gemittelt, erhalten wir  $2,9448 \cdot 10^5$  Pa.

## Berechnung

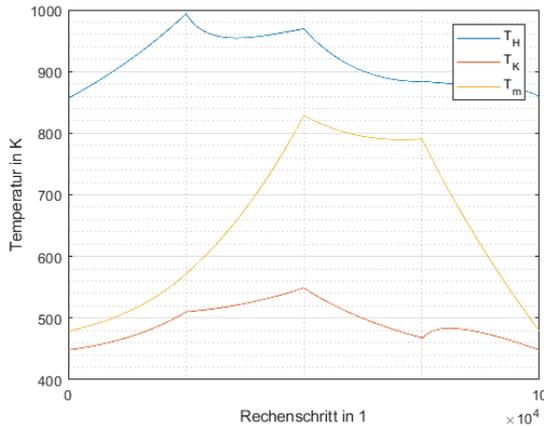


Abbildung 24: mittlere Temperatur des Systems

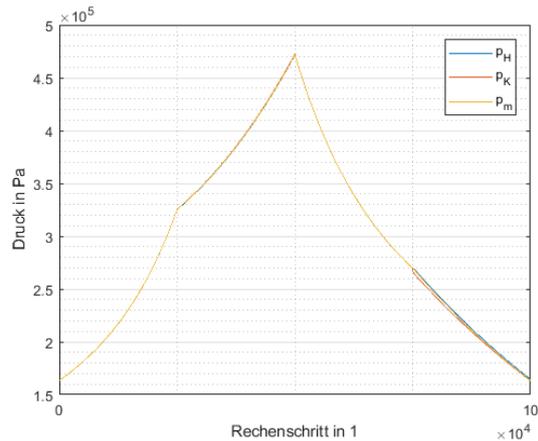


Abbildung 25: mittlerer Druck des Systems

Diese Werte werden benötigt, um die Eigenschaften des Fluids im System bestimmen zu können. Die mittlere Temperatur wird vereinfacht mit 655 K angenommen und der mittlere Druck mit  $3 \cdot 10^5$  Pa. Laut [13] hat Luft unter diesen Bedingungen folgende Eigenschaften:

spezifische isobare Wärmekapazität des Fluids .. $c_p$	=	1065,3 J/(kg K)
Wärmeleitfähigkeit des Fluids .....	$\lambda_{\text{Gas}}$	= 0,048941 W/(m K)
dynamische Viskosität des Fluids .....	$\mu$	= $32,727 \cdot 10^{-6}$ (Pa s)

Mit den neuen Parametern ergeben sich folgende neue Werte:

maximaler Druck im System .....	$4,7830 \cdot 10^5$ Pa
mittlere Temperatur heiße Kammer .....	965,19 K oder 692,04 °C
mittlere Temperatur kalte Zylinderwand .....	433,16 K oder 160,01 °C
mittlere Temperatur des Systems .....	645,16 K
mittlerer Druck des Systems .....	$2,8941 \cdot 10^5$ Pa

Für die Auslegung der Zylinderwand wurde mit  $5 \cdot 10^5$  Pa gerechnet und der neue Maximaldruck ist geringer, somit besteht hier kein Handlungsbedarf. Ebenso bei der mittleren Temperatur der heißen Kammer, da die Wärmeleitfähigkeit für so hohe Temperaturen im Datenblatt nicht gegeben ist.

Für die kalte Zylinderwand wird die mittlere Temperatur mit 160 °C angenommen. Analog der Gleichung (2.21) wird linear interpoliert und das Ergebnis ist eine Wärmeleitfähigkeit des kalten Zylinders von 382,6 W/(m K). Die neue mittlere Temperatur des Systems wird mit 645°K angenommen und der neue mittlere Druck mit  $2,9 \cdot 10^5$  Pa. Dafür ergeben sich laut [13] folgende Eigenschaften für Luft:

spezifische isobare Wärmekapazität des Fluids .. $c_p$	=	1063,0 J/(kg K)
Wärmeleitfähigkeit des Fluids .....	$\lambda_{\text{Gas}}$	= 0,048352 W/(m K)
dynamische Viskosität des Fluids .....	$\mu$	= $32,377 \cdot 10^{-6}$ (Pa s)

Mit den neuen Parametern ergeben sich folgende neue Werte:

maximaler Druck im System .....	$4,7828 \cdot 10^5$ Pa
mittlere Temperatur heiße Kammer .....	964,27 K oder 691,12 °C
mittlere Temperatur kalte Zylinderwand .....	433,51 K oder 160,36 °C
mittlere Temperatur des Systems .....	645,38 K

mittlerer Druck des Systems.....  $2,8951 \cdot 10^5$  Pa

Die Unterschiede zu den vorherigen Werten sind sehr gering und daher erfolgt keine weitere Anpassung.

### 2.3.2.4 optimale Volumenänderung

Nach all den Anpassungen wird jetzt nach der optimalen Volumenänderung gesucht. Zuerst wird die Volumenänderung wieder in 12 äquidistante Werte zwischen null und dem Zylinder-  
volumen  $V_Z$  unterteilt. Das Ergebnis ist in Tabelle 6 und Abbildung 26 ersichtlich.

Tabelle 6: Suche nach der optimalen Volumenänderung im Bereich von null bis  $V_Z$

Volumenänderung in $m^3$	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,011061	0,058322	-0,054878	0,18966
2,1420E-07	-0,028611	0,10908	-0,069161	-0,26229
4,2840E-07	-0,066747	0,16473	-0,088592	-0,40518
6,4260E-07	-0,10279	0,21993	-0,11008	-0,46739
8,5680E-07	-0,13514	0,27747	-0,1372	-0,48705
1,0710E-06	-0,16194	0,33571	-0,17055	-0,48238
1,2852E-06	-0,18	0,39432	-0,21287	-0,45648
1,4994E-06	-0,1841	0,45266	-0,26864	-0,40671
1,7136E-06	-0,16559	0,50937	-0,34509	-0,32509
1,9278E-06	-0,11153	0,56173	-0,45224	-0,19854
2,1420E-06	-0,014283	0,60494	-0,59045	-0,023611
2,3562E-06	0,075911	0,61837	-0,68079	0,12276

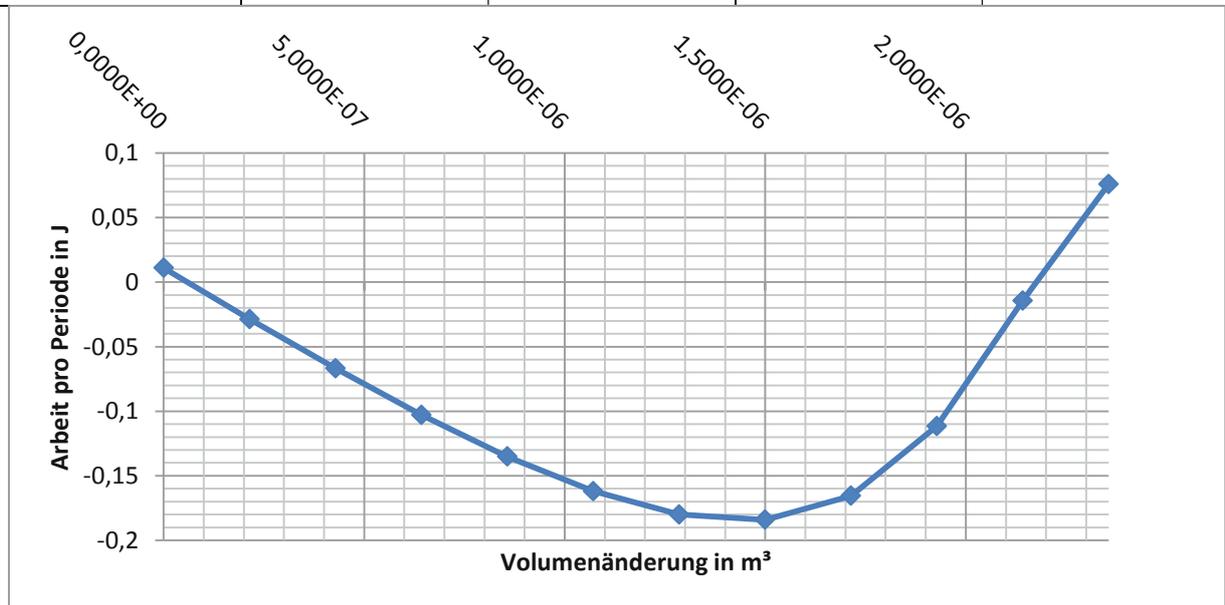


Abbildung 26: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Volumenänderung im Bereich von null bis  $V_Z$

In Tabelle 6 und Abbildung 26 ist ersichtlich, dass die maximale Nutzarbeit von -0,1841 J pro Periode bei einer Volumenänderung von  $1,4994 \cdot 10^{-6} m^3$  erreicht wird. Hinsichtlich der Maximierung der Nutzarbeit wird die nähere Umgebung des Optimums feiner abgesucht. Die Volumenänderung wird von  $1,0710 \cdot 10^{-6} m^3$  bis  $1,7136 \cdot 10^{-6} m^3$  wieder in 12 äquidistante Werte unterteilt. Die Berechnung wurde noch einmal durchgeführt und die Ergebnisse sind in Tabelle 7 und Abbildung 27 ersichtlich.

Tabelle 7: Suche nach der optimalen Volumenänderung im Bereich von  $1,0710 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  bis  $1,7136 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Volumenänderung in $\text{m}^3$	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
1,0710E-06	-0,16194	0,33571	-0,17055	-0,48238
1,1294E-06	-0,1679	0,35168	-0,18105	-0,47744
1,1878E-06	-0,17315	0,36766	-0,19228	-0,47093
1,2463E-06	-0,17757	0,38366	-0,20433	-0,46282
1,3047E-06	-0,18105	0,39965	-0,2173	-0,45302
1,3631E-06	-0,18347	0,41562	-0,23128	-0,44144
1,4215E-06	-0,18468	0,43154	-0,24642	-0,42795
1,4799E-06	-0,1845	0,4474	-0,26285	-0,41239
1,5383E-06	-0,18274	0,46315	-0,28074	-0,39457
1,5968E-06	-0,17918	0,47876	-0,30027	-0,37425
1,6552E-06	-0,17355	0,49419	-0,32164	-0,35119
1,7136E-06	-0,16559	0,50937	-0,34509	-0,32509

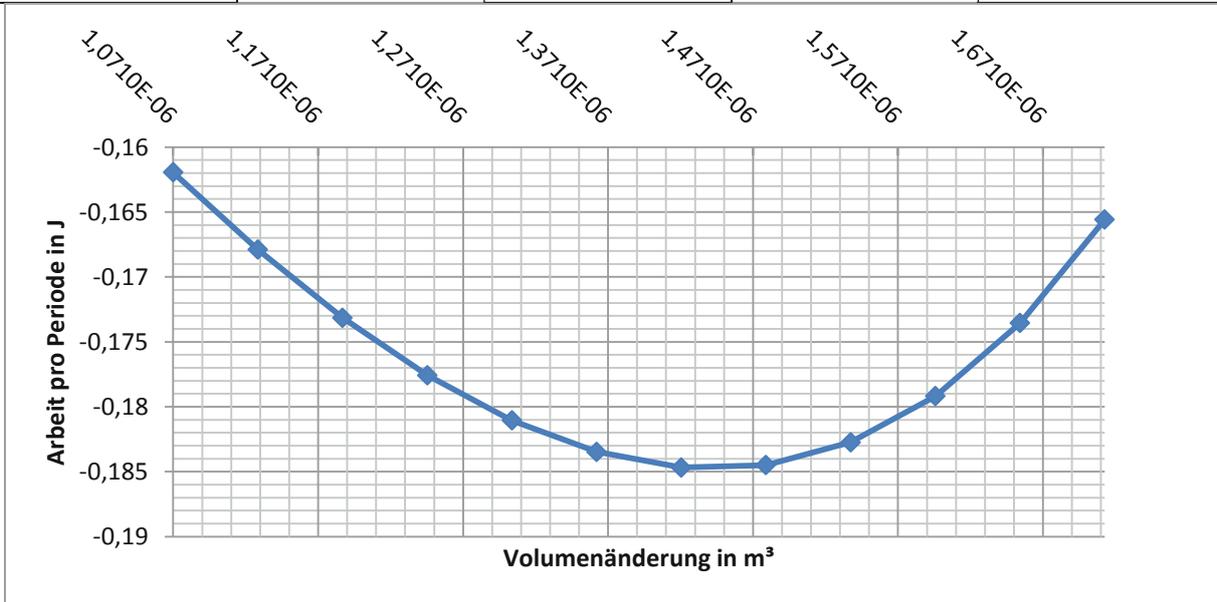


Abbildung 27: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Volumenänderung im Bereich von  $1,0710 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  bis  $1,7136 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Eine Volumenänderung von  $1,4215 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  liefert die maximale Nutzarbeit mit  $-0,18468 \text{ J}$  pro Periode. Bevor noch einmal die nähere Umgebung des Optimums abgesucht wird, sollte kontrolliert werden, ob die vorher festgelegten Parameter noch gültig sind.

Bei einer Volumenänderung von  $1,4215 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  erhalten wir folgende Werte:

- maximaler Druck im System .....  $5,1608 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
- mittlere Temperatur heiße Kammer .....  $960,59 \text{ K}$  oder  $687,44 \text{ °C}$
- mittlere Temperatur kalte Zylinderwand .....  $454,91 \text{ K}$  oder  $181,76 \text{ °C}$
- mittlere Temperatur des Systems .....  $663,16 \text{ K}$
- mittlerer Druck des Systems .....  $3,1048 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Bei der Zylinderwandauslegung wurde bisher mit einem Druck von  $5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  gerechnet. Wir haben jetzt einen größeren Maximaldruck und rechnen daher bei der Auslegung mit einem Druck von  $6,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ . Bei der Wärmeleitfähigkeit des heißen Zylinders besteht kein Hand-

lungsbedarf, weil die Temperatur im heißen Zylinder nach wie vor größer als die größte Temperatur im Datenblatt ist.

Die mittlere Temperatur in der kalten Zylinderwand wird vereinfacht mit 180 °C angenommen und wir erhalten eine Wärmeleitfähigkeit des kalten Zylinders von 381,8 W/(m K), siehe Gleichung (2.21). Die mittlere Temperatur im System wird mit 660 K und der mittlere Druck mit  $3,1 \cdot 10^5$  Pa angenommen. Luft hat unter diesen Bedingungen folgende Eigenschaften [13]:

spezifische isobare Wärmekapazität des Fluids ..  $c_p = 1066,5 \text{ J/(kg K)}$

Wärmeleitfähigkeit des Fluids .....  $\lambda_{\text{Gas}} = 0,049236 \text{ W/(m K)}$

dynamische Viskosität des Fluids .....  $\mu = 32,902 \cdot 10^{-6} \text{ (Pa s)}$

Mit den neuern Parametern wurde die vorherige Berechnung noch einmal durchgeführt und die Ergebnisse sind in Tabelle 8 und Abbildung 28 ersichtlich.

Tabelle 8: Suche nach der optimalen Volumenänderung im Bereich von  $1,0710 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  bis  $1,7136 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  mit aktualisierten Parametern

Volumenänderung in $\text{m}^3$	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
1,0710E-06	-0,16236	0,33582	-0,17024	-0,48348
1,1294E-06	-0,1684	0,35182	-0,1807	-0,47866
1,1878E-06	-0,17373	0,36784	-0,19188	-0,47229
1,2463E-06	-0,17824	0,38388	-0,20387	-0,46432
1,3047E-06	-0,18184	0,39991	-0,21677	-0,45469
1,3631E-06	-0,18438	0,41592	-0,23067	-0,4433
1,4215E-06	-0,18572	0,43189	-0,24571	-0,43002
1,4799E-06	-0,1857	0,44779	-0,26204	-0,4147
1,5383E-06	-0,18411	0,46359	-0,2798	-0,39714
1,5968E-06	-0,18075	0,47925	-0,29918	-0,37714
1,6552E-06	-0,17535	0,49473	-0,32038	-0,35443
1,7136E-06	-0,16765	0,50998	-0,34363	-0,32874

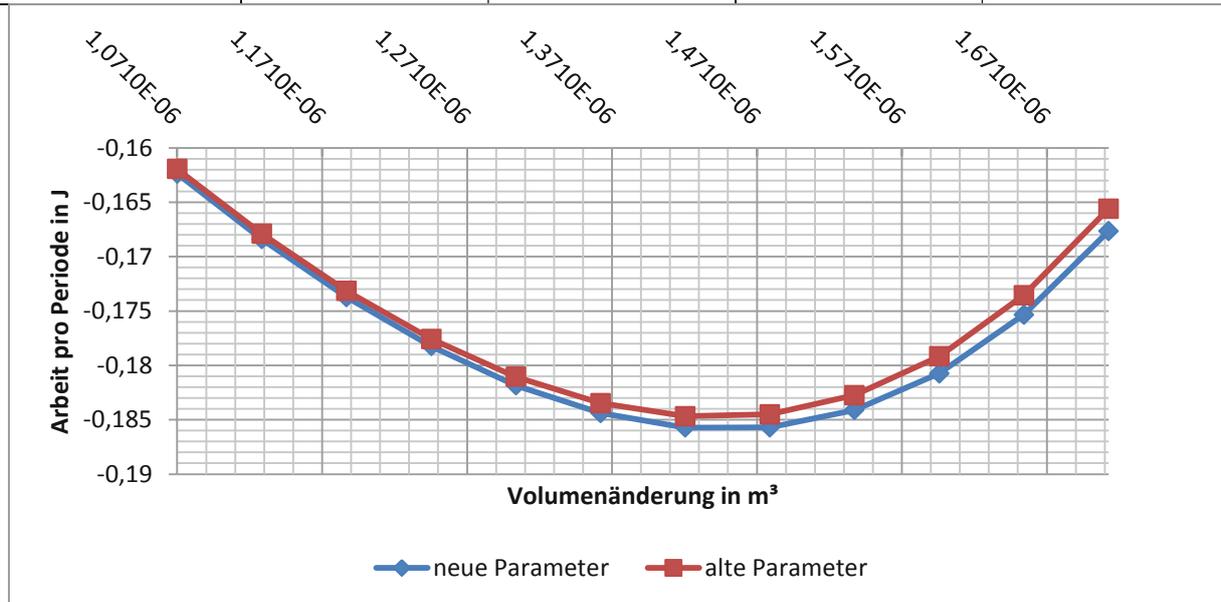


Abbildung 28: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Volumenänderung im Bereich von  $1,0710 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  bis  $1,7136 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  mit aktualisierten Parametern

Wie in Tabelle 8 und Abbildung 28 ersichtlich, hat sich qualitativ am Verlauf der Arbeit pro Periode nicht viel geändert. Mit den aktualisierten Parametern erhalten wir ein wenig mehr Nutzarbeit als mit den alten Parametern. Die größte Nutzarbeit mit  $-0,18572 \text{ J}$  pro Periode erhalten wir nach wie vor mit einer Volumenänderung von  $1,4215 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .

Bei einer Volumenänderung von  $1,4215 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  erhalten wir mit den aktualisierten Parametern folgende Werte:

- maximaler Druck im System .....  $5,1607 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
- mittlere Temperatur heiße Kammer .....  $962,02 \text{ K}$  oder  $688,87 \text{ °C}$
- mittlere Temperatur kalte Zylinderwand .....  $454,23 \text{ K}$  oder  $181,08 \text{ °C}$
- mittlere Temperatur des Systems .....  $662,71 \text{ K}$
- mittlerer Druck des Systems .....  $3,1024 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Im Vergleich zur vorherigen Iteration sind die Unterschiede nur sehr gering. Aus diesem Grund erfolgt keine Anpassung der Parameter.

Die nähere Umgebung des neuen Optimums wird jetzt wieder feiner abgesucht. Die Volumenänderung wird von  $1,3631 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  bis  $1,5383 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  erneut in 12 äquidistante Werte unterteilt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 und Abbildung 29 ersichtlich.

Tabelle 9: Suche nach der optimalen Volumenänderung im Bereich von  $1,3631 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  bis  $1,5383 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Volumenänderung in $\text{m}^3$	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
1,3631E-06	-0,18438	0,41592	-0,23067	-0,4433
1,3790E-06	-0,18487	0,42028	-0,23466	-0,43987
1,3950E-06	-0,18527	0,42463	-0,23873	-0,4363
1,4109E-06	-0,18557	0,42899	-0,24289	-0,43258
1,4268E-06	-0,18578	0,43333	-0,24714	-0,42871
1,4427E-06	-0,18588	0,43768	-0,25149	-0,42469
1,4587E-06	-0,18587	0,44201	-0,25594	-0,42052
1,4746E-06	-0,18576	0,44634	-0,2605	-0,41618
1,4905E-06	-0,18553	0,45067	-0,26515	-0,41168
1,5065E-06	-0,18518	0,45498	-0,26992	-0,40701
1,5224E-06	-0,18471	0,45929	-0,2748	-0,40216
1,5383E-06	-0,18411	0,46359	-0,2798	-0,39714

Wie in Tabelle 9 und Abbildung 29 ersichtlich, erhalten wir die maximale Nutzarbeit von  $-0,18588 \text{ J}$  pro Periode mit einer Volumenänderung von  $1,4427 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .

Bei einer Volumenänderung von  $1,4427 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  erhalten wir folgende Werte für das System:

- maximaler Druck im System .....  $5,2270 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
- mittlere Temperatur heiße Kammer .....  $961,52 \text{ K}$  oder  $688,37 \text{ °C}$
- mittlere Temperatur kalte Zylinderwand .....  $457,97 \text{ K}$  oder  $184,82 \text{ °C}$
- mittlere Temperatur des Systems .....  $665,84 \text{ K}$
- mittlerer Druck des Systems .....  $3,1391 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Die Änderungen zur vorherigen Berechnung sind marginal und daher werden die Parameter nicht angepasst.

Berechnung

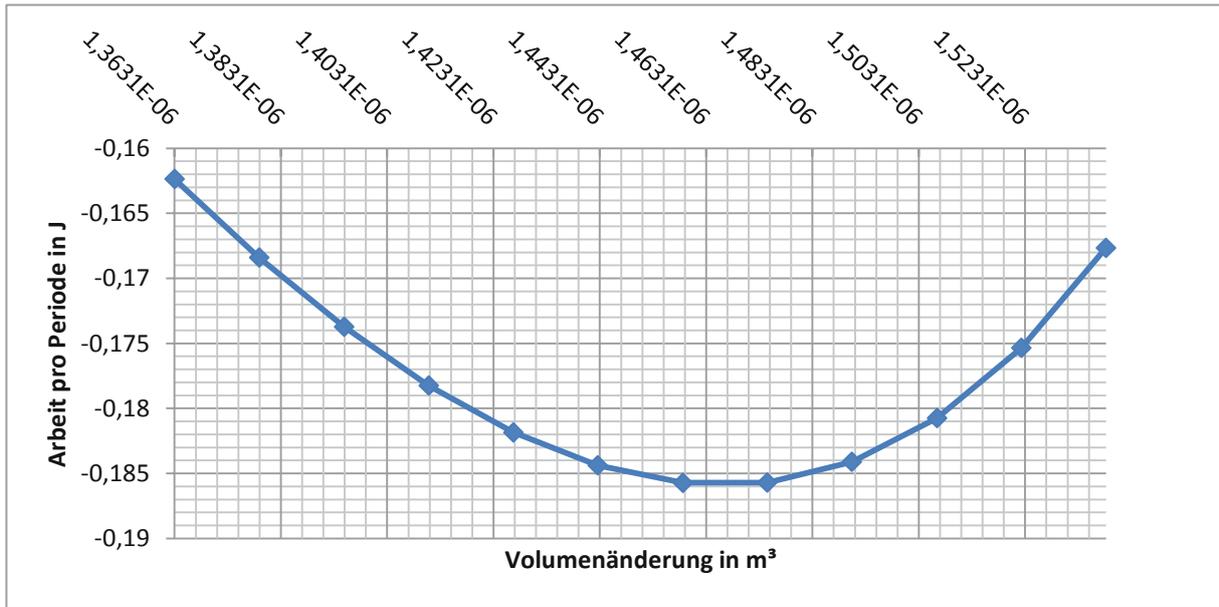


Abbildung 29: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Volumenänderung im Bereich von  $1,3631 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  bis  $1,5383 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Die nähere Umgebung des neuen Optimums wird noch ein letztes Mal feiner abgesucht. Die Volumenänderung wird von  $1,4268 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  bis  $1,4746 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  erneut in 12 äquidistante Werte unterteilt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 und Abbildung 30 ersichtlich.

Tabelle 10: Suche nach der optimalen Volumenänderung im Bereich von  $1,4268 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  bis  $1,4746 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Volumenänderung in m³	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
1,4268E-06	-0,185776822	0,43333	-0,24714	-0,42871
1,4312E-06	-0,185815008	0,43452	-0,24832	-0,42763
1,4355E-06	-0,185845475	0,4357	-0,2495	-0,42654
1,4399E-06	-0,185868146	0,43689	-0,2507	-0,42544
1,4442E-06	-0,185882943	0,43807	-0,25189	-0,42432
1,4485E-06	-0,18588979	0,43925	-0,2531	-0,42319
1,4529E-06	-0,185888606	0,44044	-0,25431	-0,42205
1,4572E-06	-0,185879313	0,44162	-0,25553	-0,4209
1,4616E-06	-0,185861831	0,4428	-0,25676	-0,41974
1,4659E-06	-0,185836077	0,44398	-0,258	-0,41857
1,4703E-06	-0,185801971	0,44516	-0,25924	-0,41738
1,4746E-06	-0,185759429	0,44634	-0,2605	-0,41618

Wie in Tabelle 10 und Abbildung 30 ersichtlich, erhalten wir die maximale Nutzarbeit von  $-0,18588979 \text{ J}$  pro Periode mit einer Volumenänderung von  $1,4485 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ . Es ist gut erkennbar, dass sich die Werte der Arbeit nur noch sehr gering unterscheiden. Beispielsweise unterscheidet sich erst die sechste signifikante Stelle zwischen den zwei größten Nutzarbeiten. Aus diesem Grund wird die nähere Umgebung des Optimums nicht noch feiner abgesucht, weil die erzielbare Verbesserung nur noch vernachlässigbar klein wäre.

Jedoch werden die Parameter des Systems kontrolliert, ob sie nach wie vor Gültigkeit haben. Bei einer Volumenänderung von  $1,4485 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  erhalten wir folgende Werte für das System:

maximaler Druck im System .....  $5,2454 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Berechnung

mittlere Temperatur heiße Kammer ..... 961,39 K oder 688,24 °C  
 mittlere Temperatur kalte Zylinderwand ..... 459,01 K oder 185,86 °C  
 mittlere Temperatur des Systems ..... 666,72 K  
 mittlerer Druck des Systems .....  $3,1494 \cdot 10^5$  Pa

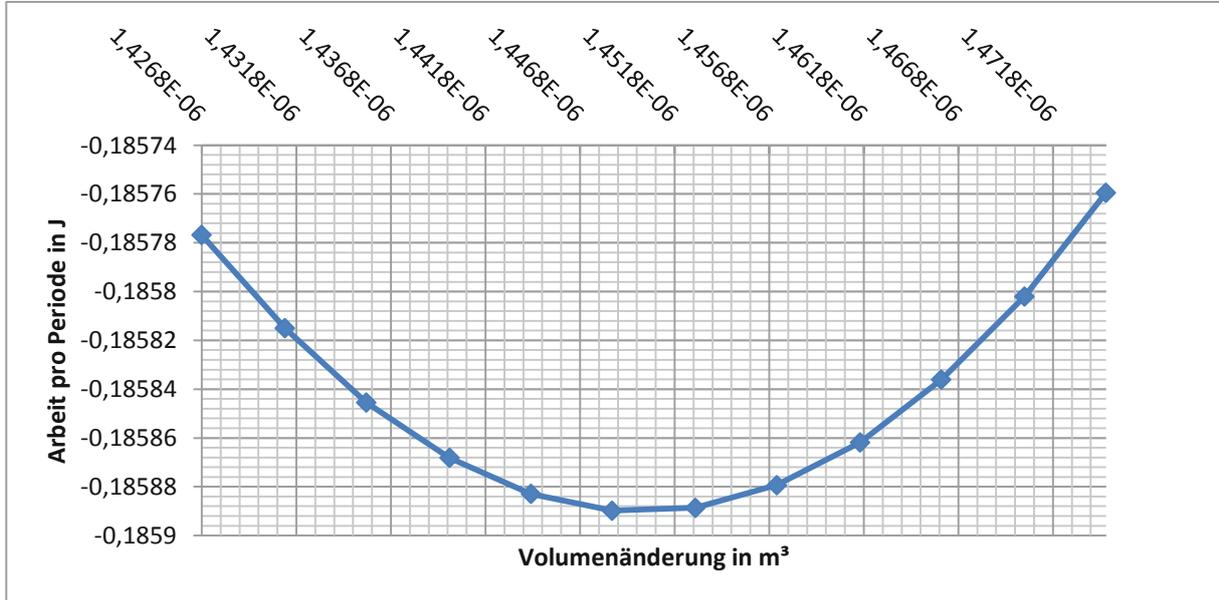


Abbildung 30: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Volumenänderung im Bereich von  $1,4268 \cdot 10^{-6}$  m³ bis  $1,4746 \cdot 10^{-6}$  m³

Hinsichtlich der Zylinderwandauslegung besteht kein Handlungsbedarf, da dort der maximale Druck mit  $6,5 \cdot 10^5$  Pa angenommen wurde. Ebenso bei der Wärmeleitfähigkeit des heißen Zylinders, weil das Datenblatt so hohe Temperaturen nicht mehr auflistet.

Die mittlere Temperatur der kalten Zylinderwand wird vereinfacht mit 185 °C angenommen. Durch lineare Interpolation wie in Gleichung (2.21) erhalten wir eine Wärmeleitfähigkeit des kalten Zylinders von 381,6 W/(m K). Die mittlere Temperatur des Systems wird mit 665 K und der mittlere Druck mit  $3,15 \cdot 10^5$  Pa angenommen. Laut [13] hat Luft unter diesen Bedingungen folgende Eigenschaften:

- spezifische isobare Wärmekapazität des Fluids ..  $c_p = 1067,7$  J/(kg K)
- Wärmeleitfähigkeit des Fluids .....  $\lambda_{\text{Gas}} = 0,049530$  W/(m K)
- dynamische Viskosität des Fluids .....  $\mu = 33,076 \cdot 10^{-6}$  (Pa s)

Mit den neuen Parametern wurde die Berechnung erneut durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 11 und Abbildung 31 ersichtlich.

Tabelle 11: Suche nach der optimalen Volumenänderung im Bereich von  $1,4268 \cdot 10^{-6}$  m³ bis  $1,4746 \cdot 10^{-6}$  m³ mit aktualisierten Parametern

Volumenänderung in m³	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
1,4268E-06	-0,186120732	0,43345	-0,24691	-0,4294
1,4312E-06	-0,186162505	0,43463	-0,24808	-0,42832
1,4355E-06	-0,186196592	0,43582	-0,24926	-0,42724
1,4399E-06	-0,186222917	0,437	-0,25045	-0,42614
1,4442E-06	-0,186241405	0,43819	-0,25165	-0,42503
1,4485E-06	-0,186251976	0,43937	-0,25285	-0,42391

1,4529E-06	-0,186254553	0,44056	-0,25406	-0,42277
1,4572E-06	-0,186249056	0,44174	-0,25528	-0,42163
1,4616E-06	-0,186235406	0,44292	-0,25651	-0,42047
1,4659E-06	-0,186213522	0,4441	-0,25774	-0,4193
1,4703E-06	-0,186183321	0,44529	-0,25898	-0,41812
1,4746E-06	-0,186144723	0,44647	-0,26023	-0,41693

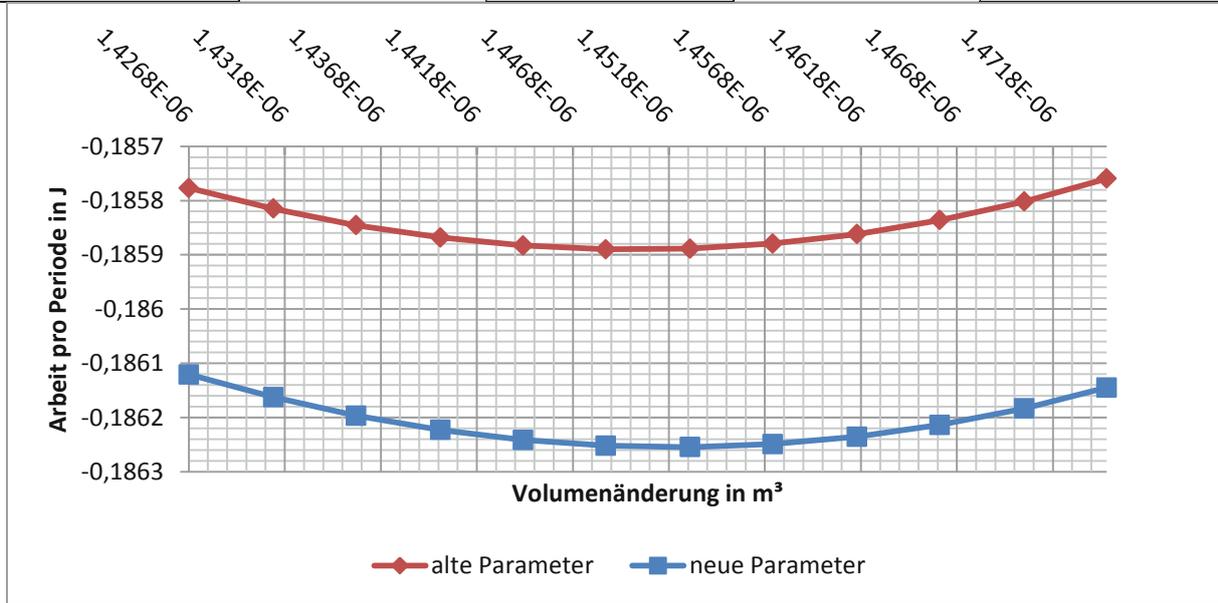


Abbildung 31: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Volumenänderung im Bereich von  $1,4268 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  bis  $1,4746 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  mit aktualisierten Parametern

Qualitativ hat sich am Verlauf der Arbeit nichts geändert. Mit den neuen Parametern erhalten wir ein wenig mehr Nutzarbeit als mit den Alten. Die maximale Nutzarbeit von  $-0,186254553 \text{ J}$  pro Periode erhalten wir jetzt nicht mehr mit einer Volumenänderung von  $1,4485 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  sondern mit  $1,4529 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .

Mit den neuen Parametern und einer Volumenänderung von  $1,4529 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  erhalten wir folgende Werte für das System:

- maximaler Druck im System.....  $5,2593 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
- mittlere Temperatur heiße Kammer.....  $961,76 \text{ K}$  oder  $688,61 \text{ °C}$
- mittlere Temperatur kalte Zylinderwand.....  $459,56 \text{ K}$  oder  $186,41 \text{ °C}$
- mittlere Temperatur des Systems.....  $667,21 \text{ K}$
- mittlerer Druck des Systems.....  $3,1563 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Die Unterschiede zu den Werten der letzten Berechnung sind minimal und somit erfolgt keine weitere Anpassung der Parameter.

### 2.3.2.5 eingeschwungener Zustand

Die Volumenänderung, mit der im Algorithmus gerechnet wurde, beträgt  $1,45288736 \dots \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ . Mit Hilfe der Gleichung (2.20) wird der Einschwingvorgang abgebildet, siehe Abbildung 32. Es ist gut erkennbar, dass bei rund 1 000 Iterationen beziehungsweise Epochen die Kurve quasi eine Horizontale wird. Das System ist daher so gut wie eingeschwungen. Die Energiesumme bezogen auf die zugeführte Wärme über eine Periode ist nicht null, sondern rund  $5,5 \cdot 10^{-4}$ . Das entspricht einer Genauigkeit von circa 4 bis 5 signifikant-

ten Stellen. Das heißt, dass der angeführte Wert der genauen Volumenänderung nur eine hohe Genauigkeit vortäuscht.

Der tatsächliche Volumenverlauf ist in Abbildung 33 ersichtlich. Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen dem abgebildeten Verlauf und dem Verlauf in Abbildung 8 erkennbar. Die Volumenänderung bei der isothermen Wärmeabfuhr in Abbildung 8 (erstes Viertel der ersten Periode) ist weitaus geringer als die iterativ ermittelte Änderung in Abbildung 33 (erstes Viertel). Dadurch ist in Abbildung 8 die Volumenänderung bei der folgenden isochoren Zustandsänderung (zweites Viertel der ersten Periode) größer als bei der iterativ ermittelten Änderung. Bei der iterativ ermittelten Änderung ist bemerkenswert, dass der Verlauf in der ersten Hälfte fast einer Geraden entspricht. Eine mögliche Erklärung ist, dass mit so einem Verlauf die Verluste im Regenerator gering gehalten werden. Das Fluid wird dabei mit niedrigeren Geschwindigkeiten durch den Regenerator gedrückt. Bei einer großen Änderung wie in Abbildung 8 entstehen viel größere Geschwindigkeitsspitzen und die Verluste wachsen dementsprechend mit.

In Abbildung 34 ist der Fluidtemperaturverlauf mit der festgelegten Volumenänderung ersichtlich. Im Vergleich zur Abbildung 7 sind die isothermen Zustandsänderungen nicht mehr vorhanden. Von einer Annäherung der Isothermen kann eigentlich auch nicht gesprochen werden, weil im ersten Viertel in der kalten Kammer eine isotherme Zustandsänderung stattfinden sollte und im dritten Viertel in der heißen Kammer. Dennoch liefert diese Konfiguration die höchste Nutzarbeit bei den gegebenen Parametern. Die isochoren Zustandsänderungen existieren nach wie vor, siehe zweites und viertes Viertel in Abbildung 33. Die Volumenänderung erfolgt zeitgleich und umgekehrt gleich groß.

Ein weiteres interessantes Diagramm ist der Verlauf der Arbeit in Abbildung 35. Im vierten Viertel findet eine isochore Zustandsänderung statt. In Abbildung 33 ist ersichtlich, dass hier das ganze Zylindervolumen durch den Regenerator gedrückt wird. Da dieser Prozess nicht verlustfrei stattfindet, muss Arbeit aufgewendet werden. Das ist dadurch erkennbar, dass die Kurve der Arbeit im vierten Viertel geringfügig über null ist. Im zweiten Viertel findet auch

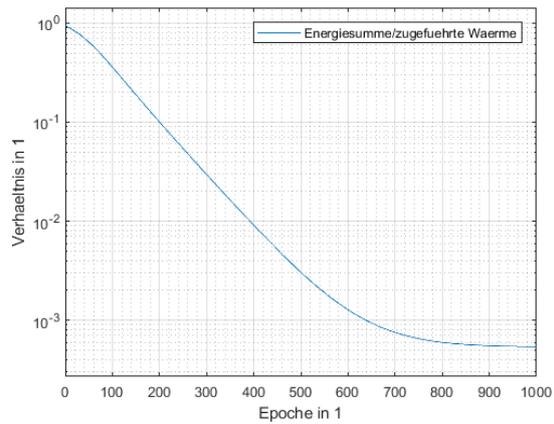


Abbildung 32: Einseitige Konvergenz mit endgültiger Volumenänderung

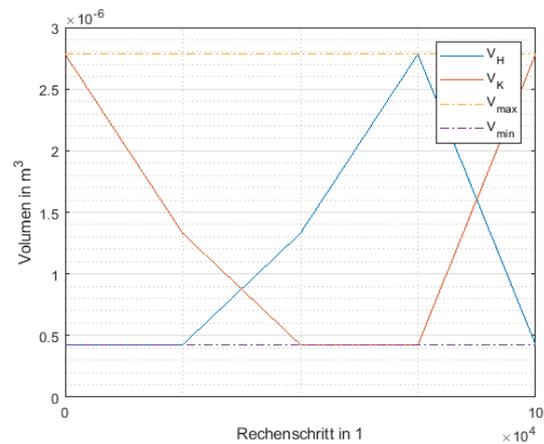


Abbildung 33: Volumenverlauf mit endgültiger Volumenänderung

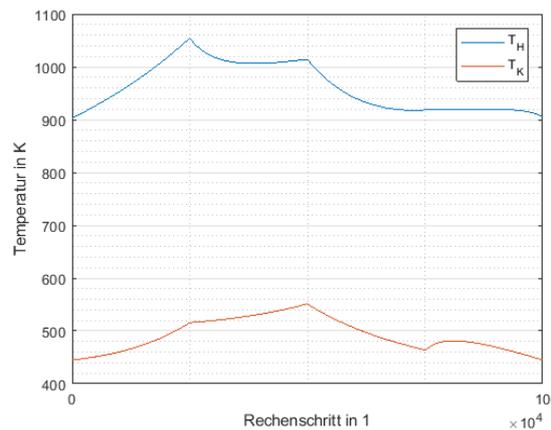


Abbildung 34: Fluidtemperaturverlauf mit endgültiger Volumenänderung

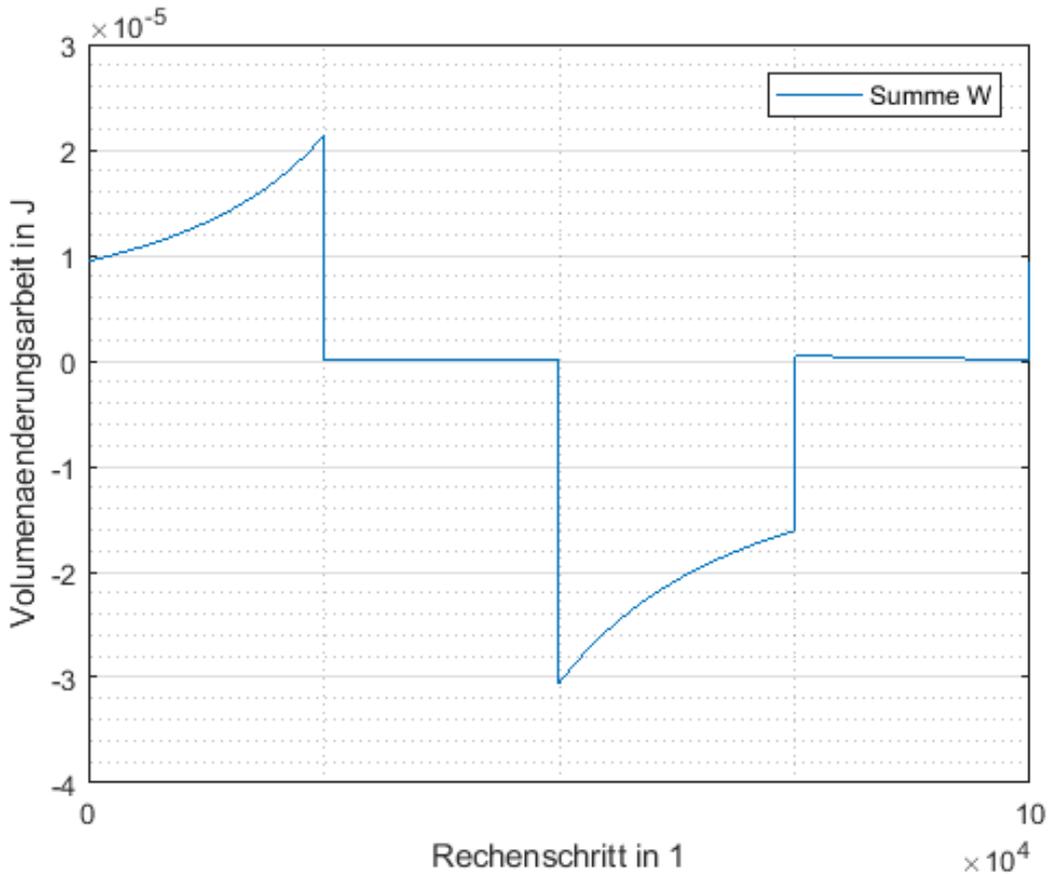


Abbildung 35: Verlauf der Volumenänderungsarbeit mit der endgültigen Volumenänderung eine isochore Zustandsänderung statt. Die aufgewendete Arbeit ist hier jedoch geringer, da weniger Volumen durchgepresst werden muss, siehe Volumenverlauf. Die Kurve der Arbeit ist hier quasi bei null, weil sie in Relation zum restlichen Verlauf sehr gering ist.

### 2.3.3 Nockenform

Aus dem berechneten Volumenverlauf lässt sich die Nockenform in Abhängigkeit einiger Parameter berechnen, siehe Abbildung 36.

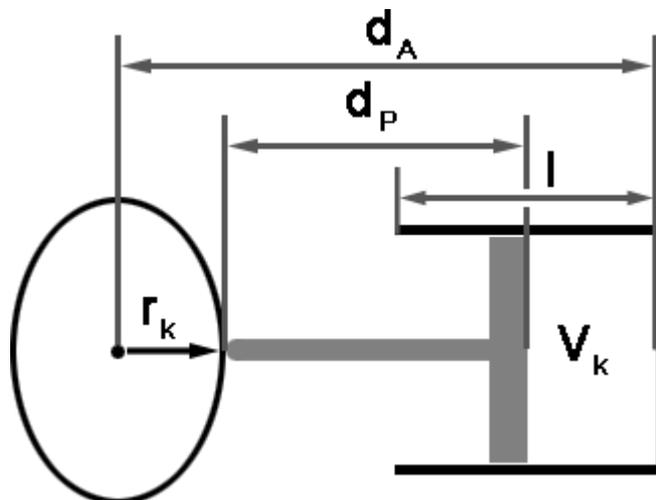


Abbildung 36: Bestimmung der Nockenform [3, S. 13] – bearbeitet

Der Volumenverlauf ist bekannt, siehe Abbildung 33. Das Volumen  $V_k$  in Abbildung 36 beschreibt das Volumen ohne Totraum, daher muss vom berechneten Volumen ( $V_H$  und  $V_K$ ) der Totraum noch abgezogen werden. Um den Radius  $r_k$  der Nocke zu berechnen, sind die Parameter  $d_A$ , Abstand von der Drehachse der Nocke bis zum oberen Totpunkt des Zylinders, und  $d_P$ , Pleuellänge inklusive Kolbenhöhe, zu definieren [3, S. 13]. Die Pleuellänge  $d_P$  muss mindestens so lang sein wie der Hub  $I$ . Wenn das Pleuel mit Kolben genau die Länge  $I$  hat und sich im oberen Totpunkt befindet, dann kann die Nocke das Pleuel gerade noch berühren ohne in den Zylinderraum zu dringen. Die Länge  $d_A$  muss mindestens so lang sein wie  $d_P$  und mindestens doppelt so lang wie der Hub  $I$ . Wenn das Pleuel mit Kolben genau die Länge  $I$  hat und sich im unteren Totpunkt befindet, dann beträgt der Abstand von der Drehachse der Nocke bis zum oberen Totpunkt des Zylinders genau zwei Mal Hub  $I$ .

Die beiden Parameter werden wie folgt festgelegt:

Abstand von der Drehachse der Nocke bis zum oberen Totpunkt des Zylinders

.....  $d_A = 0,09 \text{ m}$

Pleuellänge inklusive Kolbenhöhe .....  $d_P = 0,04 \text{ m}$

Um Reibungsverluste möglichst gering zu halten, sollte man die Nocke radial möglichst klein halten. Die Kraft, mit dem das Pleuel auf die Nocke drückt, ist unabhängig von der Größe der Nocke. Jedoch wächst die Geschwindigkeit im Kontaktpunkt mit dem Pleuel linear mit dem Radius der Nocke an. Aus diesem Grund ist eine kleine Nocke erstrebenswert.

Zu kurz darf die Pleuellänge inklusive Kolbenhöhe auch nicht ausfallen. Wenn sie beispielsweise genauso lang wie der Hub  $I$  ist und der Kolben sich im oberen Totpunkt befindet, dann kann er eventuell nicht mehr geführt werden, weil das Pleuel als Ganzes im Zylinderraum verschwindet. Bei einem Pleuel, der radial kleiner ist als der Kolben, kann sich der Kolben im Zylinder verkeilen, wenn das Pleuel nicht mehr geführt wird.

Umgekehrt darf der Zylinder auch nicht genau so lang sein wie der Hub  $I$ . Denn in diesem Fall kann der Kolben nicht mehr vom Zylinder geführt werden, wenn er sich im unteren Totpunkt befindet. Die obere Kante vom Kolben würde mit dem Ende vom Zylinder bündig abschließen und dabei kann der Kolben aus dem Zylinder „fallen“.

Mit den Berechnungsergebnissen und den gegebenen Parametern schauen die Nocken wie

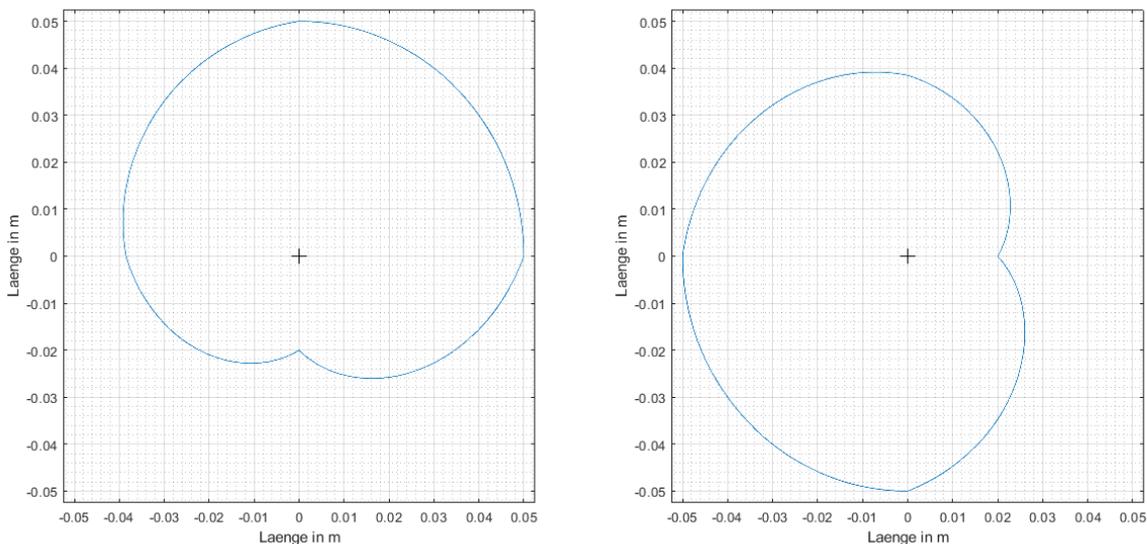


Abbildung 37: Nocke der heißen Seite (links) und der kalten Seite (rechts)

in Abbildung 37 aus.

Optimal hinsichtlich der Größe der Nocke sind ein Abstand von der Drehachse der Nocke bis zum oberen Totpunkt des Zylinders  $d_A$  von 6 cm und eine Pleuellänge inklusive Kolbenhöhe  $d_P$  von 3 cm, siehe Abbildung 38. Das entspricht genau den kleinstmöglichen Werten von  $d_A$  und  $d_P$ , damit der berechnete Volumenverlauf gerade noch nachgefahren werden kann. Bei dieser Konfiguration erreicht die Nocke die geringsten Geschwindigkeiten im Kontaktpunkt. Dem gegenüber steht jedoch ein fertigungstechnisches Problem. Es kann keine vollständige Bohrung für die Welle (Kreuz in der Mitte vom Bild) gefertigt werden, weil die Drehachse genau am Rand beziehungsweise an der Kante der Nocke liegen würde.

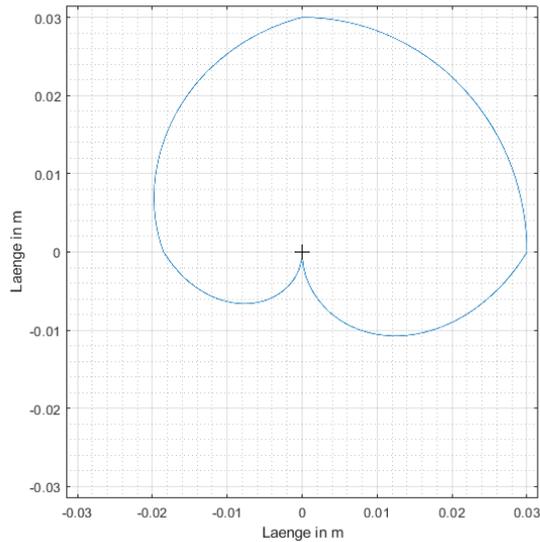


Abbildung 38: Nocke mit den kleinstmöglichen Werten der Parameter  $d_A$  und  $d_P$

Zusätzlich besteht die Gefahr, dass das Pleuel sich im spitz zulaufenden Teil der Nocke (beim Kreuz im Bild) verkantet und das System somit zum Stillstand bringt. Aus diesen Gründen wurden die genannten Parameter ein wenig größer gewählt. Die höheren Geschwindigkeiten im Kontaktpunkt, die dadurch entstehen, werden in Kauf genommen.

Beim alten Algorithmus, der ideale Isothermen berechnet hat, unterscheiden sich die Nocken der kalten und heißen Seite [3, S. 28-29]. Im abgeänderten Algorithmus kann ein Volumenverlauf in den anderen übergeführt werden, wenn er um die vertikale Achse gespiegelt wird. Daher gilt auch dasselbe für die Nocken. Nimmt man beispielhaft die Nocke der kalten Seite, in Abbildung 37 rechts, dreht sie um  $90^\circ$  im Uhrzeigersinn und spiegelt danach das ganze Bild um vertikale Achse, dann erhält man genau die Nocke der heißen Seite. Anstatt das Bild um die vertikale Achse zu spiegeln, kann die Nocke auch von der „Rückseite“ betrachtet werden, dann ist sie ebenfalls identisch wie die der heißen Seite. Das wurde auch so geplottet und in Abbildung 39 ist ersichtlich, dass beide Nocken deckungsgleich sind. Hinsichtlich der Konstruktion ist das natürlich ein Vorteil, weil nur ein Bauteil konstruiert werden muss und nicht zwei.

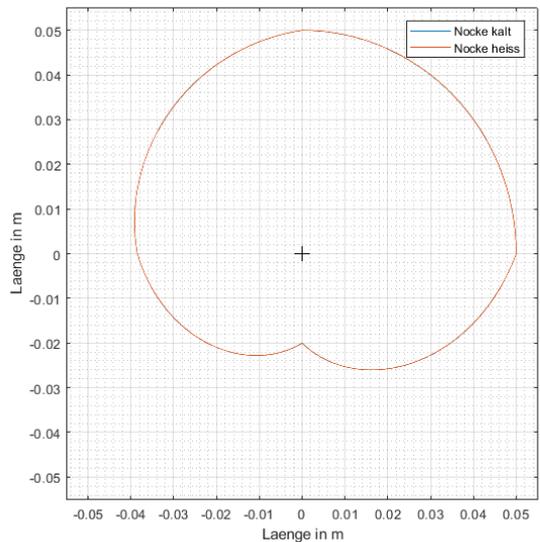


Abbildung 39: Nocke der heißen und kalten Seite übereinander dargestellt

Betrachtet man die Nocken stellt sich die Frage, ob der Kolben aus dem oberen Totpunkt auch „zurückgezogen“ werden kann. Ein Kurbeltrieb kann den Kolben drücken und ziehen, aber die Nocke kann nur drücken. Der Druck im System ist teilweise um ein Vielfaches größer als der Umgebungsdruck und dadurch soll der Kolben aus dem oberen Totpunkt rausge-

drückt werden. Unterstützend kommt hinzu, dass die Maschine relativ langsam läuft und somit hat der Kolben mehr Zeit der Nocke zu folgen. Unter „3.2.6 Kolben mit Pleuel“ wird rechnerisch kontrolliert, ob der Kolben von der Nocke abhebt.

Auffallend ist auch die relativ große Dimension der Nocken. Aus Abbildung 39 kann abgelesen werden, dass der größte Durchmesser (vom linken Rand bis zum rechten Rand der Nocke) rund 9 cm beträgt. Das ist im Verhältnis zu den Zylindern selbst ziemlich groß, da die Zylinder nur einen Hub von 3 cm haben. Für kleinere Nocken müsste auch der Hub kleiner werden.

Wegen der Größe der Nocken macht es Sinn diese gleichzeitig auch als Schwungscheiben zu verwenden. In Abbildung 39 ist ersichtlich, dass die Drehachse nicht im Schwerpunkt liegt. Hier kommen Fragen hinsichtlich der Unwucht auf. Die Kompensation der Unwucht kann konstruktiv durch Ausgleichsmassen auf den seitlichen Flächen der Nocke realisiert werden. Sie könnte jedoch auch vernachlässigt werden, weil das System bei einer niedrigen Drehzahl läuft.

Zusätzlich ist zu erwähnen, dass die Form der Nocke nicht ideal nachgefahren werden kann, siehe Abbildung 40. Der abgerundete schwarze Balken unten stellt ein Pleuel dar und er ist radial auf die Drehachse der Nocke ausgerichtet. Damit das Pleuel und somit auch der Kolben die Nockenkontur ideal nachfahren können, muss der höchste Punkt der Rundung direkt auf der Nocke aufliegen. Das heißt, dass der höchste Punkt der Rundung bei der grau gestrichelten Linie auf der Nocke aufkommen müsste. Aufgrund der Geometrie ist das nicht möglich und das Pleuel kommt etwas versetzt auf der Nocke auf. Somit wird auch der berechnete Volumenverlauf nicht exakt nachgefahren. Dieses Problem tritt vor allem im spitz zulaufenden Teil (links von der grauen Linie) auf, weil das Pleuel aufgrund der Geometrie nicht komplett in die Vertiefung eindringen kann. Dieses Problem kann verringert werden, indem das Pleuelende spitzer oder alternativ der Rundungsradius kleiner wird. Eine weitere Möglichkeit ist, dass die Nockenform selbst korrigiert wird, um diesen Fehler zu kompensieren. Für unser Anschauungsmodell wird dieser Fehler akzeptiert.

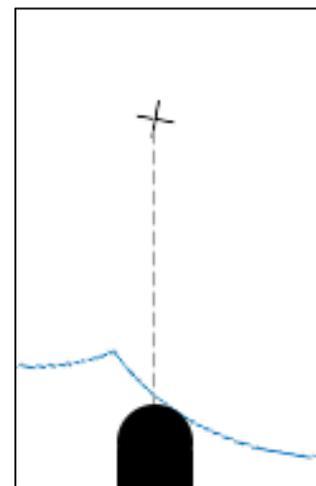


Abbildung 40: Form der Nocke kann nicht ideal nachgefahren werden

## 2.4 Vergleich der Maschinen

Das Ziel der ganzen Berechnung ist, dass die „Ecken“ des p,v-Diagramms durch den Nockentrieb besser ausgefahren werden. Für einen direkten Vergleich werden daher die Diagramme des Stirlingmotors mit Nockentrieb und des Stirlingmotors mit Kurbeltrieb verglichen. Letzteres wird durch eine Sinusfunktion für die Kolben angenähert. Dabei läuft der Kolben der heißen Seite um 90° vor. Bei einem realen Kurbeltrieb entspricht die Bewegung der Kolben keiner idealen Sinusfunktion, aber für Anschauungszwecke genügt die Näherung.

Der mittlere Druck des Systems  $p_m$  wurde bereits definiert. Zur Darstellung des p,v-Diagramms fehlt noch das spezifische Volumen. Letzteres wurde wie in Gleichung (2.26) im Algorithmus bestimmt.

$$v_k = \frac{V_{H,k} + V_{K,k}}{m_{H,k} + m_{K,k}} \quad (2.26)$$

spezifisches Volumen des Systems..... v in m<sup>3</sup>/kg

Die p,v-Diagramme sind in Abbildung 41 ersichtlich. Die blaue Kurve ist die berechnete Kur-

## Berechnung

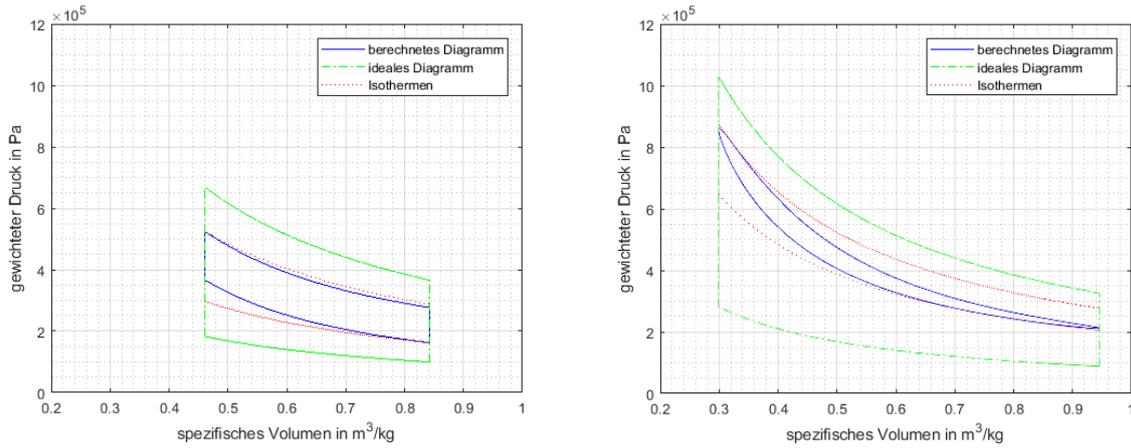


Abbildung 41: p,v-Diagramm vom System mit Nockentrieb (links) und vom System mit Kurbeltrieb (rechts) des Systems. Die grüne Kurve stellt das ideale Diagramm dar, die untere Isotherme entspricht der Umgebungstemperatur und die Obere die Temperatur der Feuerzeugflamme. Auf den Totraum wurde beim idealen Verlauf keine Rücksicht genommen und deshalb überdecken sich die isochoren Zustandsänderungen teilweise. Die roten Isothermen entsprechen der höchsten beziehungsweise niedrigsten Temperatur im berechneten System.

Beim Modell mit dem Kurbeltrieb wurden alle Parameter gleich belassen wie beim System mit Nockentrieb, außer das Startvolumen der heißen Kammer. Dieses startet nicht beim minimalen Volumen. Die Startvolumen sind:

Volumen des heißen Zylinders .....  $V_{H,1} = V_Z / 2 + V_{\text{Tot}}$

Volumen des kalten Zylinders.....  $V_{K,1} = V_Z + V_{\text{Tot}}$

Der Grund liegt in der Phasenverschiebung der heißen Kammer. Im Nockenmodell starten die kalte Kammer mit dem maximalen und die heiße Kammer mit dem minimalen Volumen, siehe Abbildung 33. Mit dem Kurbeltrieb ist das nicht möglich, weil die Phasenverschiebung nur  $90^\circ$  beträgt. Daher muss die heiße Kammer in der Mitte des Zylinders starten, während die kalte Kammer im unteren Totpunkt startet, siehe Abbildung 42. Der beschriebene Fall gilt nur bei einer V-Anordnung mit einem Winkel von  $90^\circ$  zwischen den zwei Zylindern. Die Phasenverschiebung lässt sich mit dem Winkel der Zylinder zueinander steuern.

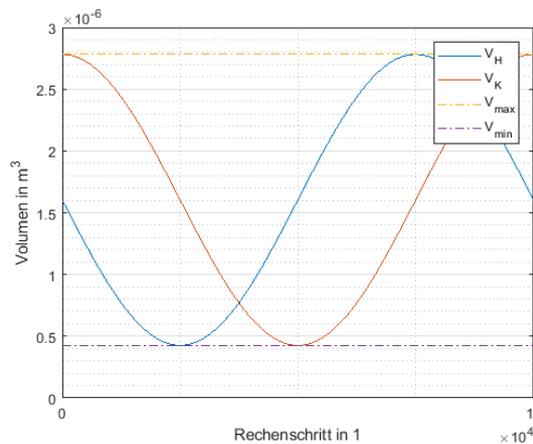


Abbildung 42: Volumenverlauf der Kammern mit einem Kurbeltrieb

Betrachtet man die Volumensumme des Systems mit Nockentrieb und des Systems mit Kurbeltrieb, siehe Abbildung 43, ist ersichtlich, dass beim Kurbeltrieb das maximale Gesamtvolumen größer und das minimale Gesamtvolumen niedriger ist. Das ist interessant, weil beide Systeme denselben Totraum und denselben Hub haben. Wenn beim System mit Kurbeltrieb eine Kammer im unteren Totpunkt ist, dann ist die andere Kammer nicht im oberen Totpunkt, was beim Nockentrieb jedoch der Fall ist. Daraus resultiert ein größeres Gesamtvolumen beim System mit Kurbeltrieb. Wenn beide Kammern beim System mit Kurbeltrieb sich dem oberen Totpunkt nähern folgt aus der nichtlinearen Änderung ein geringeres Gesamtvolumen als beim System mit Nockentrieb, wo die Änderung linear erfolgt, siehe Abbildung 33 und Abbildung 42.

## Berechnung

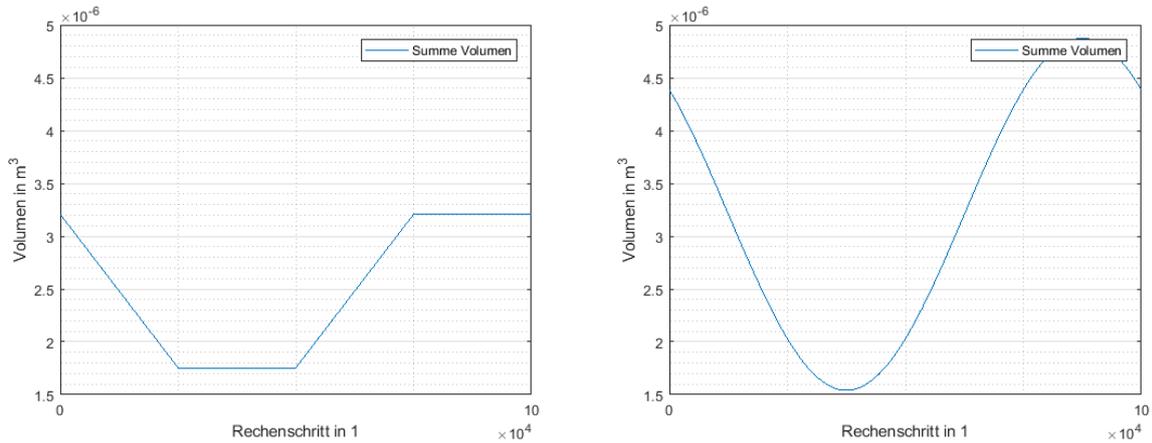


Abbildung 43: Volumensumme des Systems mit Nockentrieb (links) und des Systems mit Kurbeltrieb (rechts)

Wegen diesen Aspekten und der Tatsache, dass das System mit Kurbeltrieb, aufgrund der Phasenverschiebung, mit einem größeren Volumen und daher auch mit einer größeren Masse startet, ist der Bereich des spezifischen Volumens beider Diagramme ungleich, siehe Abbildung 41. Ein Plotten der Kurven beider Systeme in ein Diagramm ist daher unübersichtlich, weil sie sich mehrfach schneiden würden.

Es ist zu erwähnen, dass das System mit Kurbeltrieb eingeschwungen ist, siehe Abbildung 44. Jedoch sind die systemabhängigen Parameter wie Arbeitsfluideigenschaften hier nicht extra angepasst worden. Der Vergleich dient nur zur groben Orientierung und deshalb erfolgt hier keine mehrmalige Iteration.

Folgend werden die Nutzarbeit und der Wirkungsgrad der Maschine mit Nockentrieb und der Maschine mit Kurbeltrieb verglichen, siehe Tabelle 12.

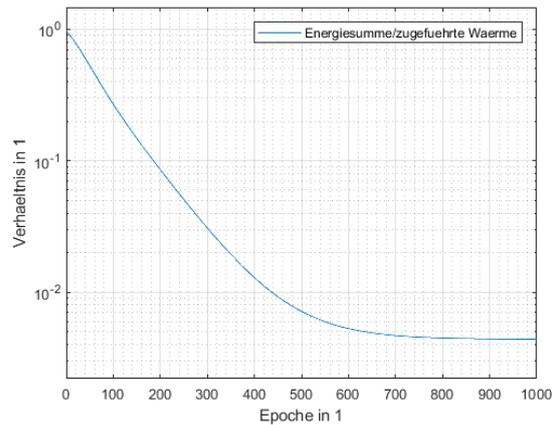


Abbildung 44: Einschwingvorgang vom System mit Kurbeltrieb

Tabelle 12: Vergleich der Maschine mit Nockentrieb und der Maschine mit Kurbeltrieb

Maschineart	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
Nockentrieb	-0,18625	0,44056	-0,25406	-0,42277
Kurbeltrieb	-0,15341	0,83995	-0,68284	-0,18264

In Tabelle 12 ist ersichtlich, dass die Maschine mit Nockentrieb mehr Nutzarbeit pro Periode liefert und einen besseren Wirkungsgrad vorweist. Es ist nochmals zu erwähnen, dass die Werte für den Kurbeltrieb nicht unter mehrmaliger Iteration ermittelt worden sind. Beispielsweise sind die Arbeitsfluideigenschaften nicht angepasst worden. Es ist davon auszugehen, dass sich die Werte für die Maschine mit Kurbeltrieb nur gering ändern werden, wenn eine mehrmalige Iteration erfolgt. Denn bei der Maschine mit Nockentrieb hat die Iteration auch nur geringe Veränderungen gebracht. Da die Iteration uns unserem Ziel nicht näher bringt, wird sie nicht durchgeführt.

Ob unser Wirkungsgrad gut oder schlecht ist, lässt sich einerseits im p,v-Diagramm abschätzen, siehe Abbildung 41, und andererseits sollte sie mit dem Carnot-Wirkungsgrad verglichen werden, siehe Gleichung (2.27).

$$\eta_C = 1 - \frac{T_{K,a}}{T_{H,a}} = 1 - \frac{293,15 \text{ K}}{1073,15 \text{ K}} = 0,72683 \quad (2.27)$$

Carnot-Wirkungsgrad .....  $\eta_C$  in 1

Der Carnot-Wirkungsgrad wurde mit den Temperaturen an der Systemgrenze berechnet, einerseits die Umgebungstemperatur  $T_{K,a}$  und andererseits die Temperatur der Flamme  $T_{H,a}$ . Die Maschine mit Nockentrieb erreicht 58,166 % des Carnot-Wirkungsgrads. Im Vergleich zur Maschine mit Kurbeltrieb, die nur 25,128 % erreicht, ist das eine deutliche Verbesserung.

Ein Vergleich mit dem ursprünglichen Algorithmus, der ideale Isothermen berechnet, wird auch durchgeführt. Hier wurden ebenfalls alle Parameter vom oben definierten Modell mit Nockentrieb übernommen. Die Startwerte wurden aus dem eingeschwungenen Zustand des Modells mit Nockentrieb übernommen. Diese sind:

- Temperatur im heißen Zylinder.....  $T_{H,1} = 904,99 \text{ K}$
- Temperatur im kalten Zylinder .....  $T_{K,1} = 444,72 \text{ K}$
- Temperatur im ersten Regeneratorelement .....  $T_{R,1}^1 = 898,68 \text{ K}$
- Temperatur im letzten Regeneratorelement .....  $T_{R,1}^j = 544,82 \text{ K}$
- Druck im heißen Zylinder.....  $p_{H,1} = 1,6401 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
- Druck im kalten Zylinder .....  $p_{K,1} = 1,6259 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Das System mit dem ursprünglichen Algorithmus ist nicht eingeschwungen und die systemabhängigen Parameter wurden nicht angepasst. Die Ergebnisse dienen nur zur groben Orientierung und daher erfolgt keine mehrmalige Iteration.

In Abbildung 45 ist das unter „2.2 Optimierung des Algorithmus“ erwähnte Problem ersichtlich. Die Volumenabnahme ist bei der Wärmeabfuhr (erstes Viertel) relativ gering und bei der Wärmezufuhr (drittes Viertel) müsste für eine isotherme Zustandsänderung das Volumen stark zunehmen. Das ist aber nicht möglich, weil das maximale Hubvolumen schnell erreicht worden ist.

Das dazugehörige p,v-Diagramm ist in Abbildung 46 ersichtlich. Die untere Isotherme wird sehr gut angenähert, aber die Obere nicht. Dieses Verhalten war wegen dem nicht optimalen Volumenverlauf zu erwarten.

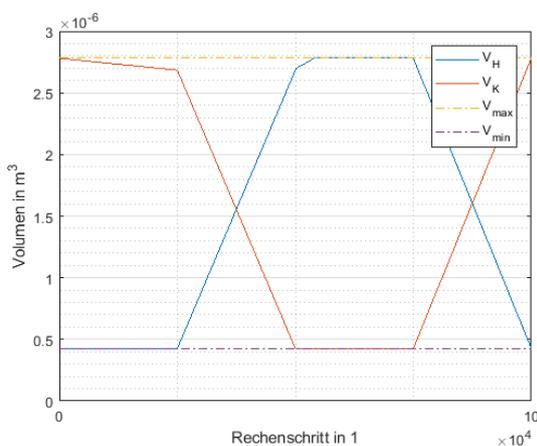


Abbildung 45: Volumenverlauf der Kammern mit dem ursprünglichen Algorithmus

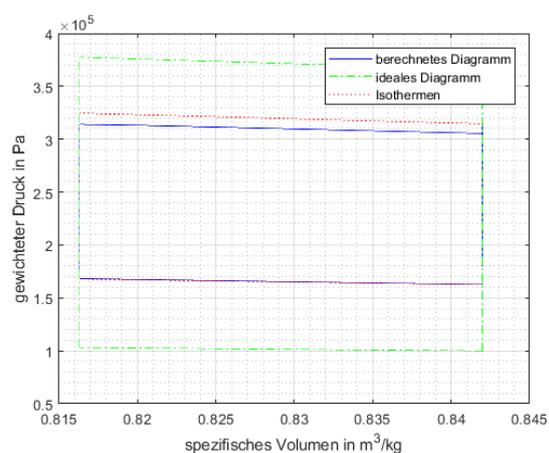


Abbildung 46: p,v-Diagramm mit dem ursprünglichen Algorithmus

Das ist auch in Abbildung 47 sehr gut ersichtlich. Die Temperatur der kalten Kammer ist im ersten Viertel (isotherme Wärmeabfuhr) konstant. Die Temperatur der heißen Kammer ist im dritten Viertel (isotherme Wärmezufuhr) nur anfangs konstant. Nachdem das maximale Hubvolumen erreicht worden ist, steigt die Temperatur der heißen Kammer an und die Zustandsänderung ist nicht mehr isotherm.

Bei allen Abbildungen vom System mit dem ursprünglichen Algorithmus ist nochmals zu erwähnen, dass das System nicht eingeschwungen ist. Das ist auch in den Abbildungen ersichtlich, weil der Verlauf nicht stetig periodisch fortgesetzt werden kann. Da ein mehrmaliges Iterieren bis das System einschwingt uns unserem Ziel nicht näher bringt, wird es nicht gemacht.

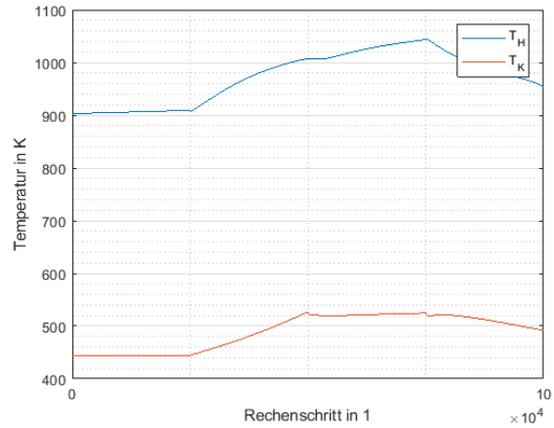


Abbildung 47: Temperaturverlauf der Kammern mit dem ursprünglichen Algorithmus

### 3 Auslegung und Konstruktion

#### 3.1 Auslegung

Bei der Auslegung wird großen Wert darauf gelegt, dass die erforderlichen Teile schnell beschafft werden können. Der Elektronik-Händler „Conrad“ bietet diverse Produkte für den „technischen Modellbau“ an [21]. Die verwendeten Bauteile werden sich stark am Sortiment vom erwähnten Händler orientieren.

Das Eigengewicht der Bauteile wird bei der Auslegung vernachlässigt. Ein Grund ist, dass bei einigen Zukaufteilen das Gewicht unbekannt ist. Zusätzlich werden die Gewichtskräfte im Verhältnis zu den auftretenden Kräften als vernachlässigbar angenommen.

##### 3.1.1 Welle

In Abbildung 35 ist die Summe der Volumenänderungsarbeit ersichtlich. Die Arbeit der einzelnen Kammern ist in Abbildung 48 ersichtlich. Der maximale Betrag der Arbeit, der pro Rechenschritt in einer Kammer verrichtet wird, wird für die Auslegung der nockentragenden Welle herangezogen. Das entspricht  $3,0524 \cdot 10^{-5}$  J und dieser Wert ist in der Mitte des Diagramms bei der blauen Kurve (heiße Kammer) zu finden. Dieser Wert wird durch das Zeitintervall pro Rechenschritt  $\Delta t$  dividiert, um die maximale Leistung zu ermitteln, siehe Gleichung (3.1).

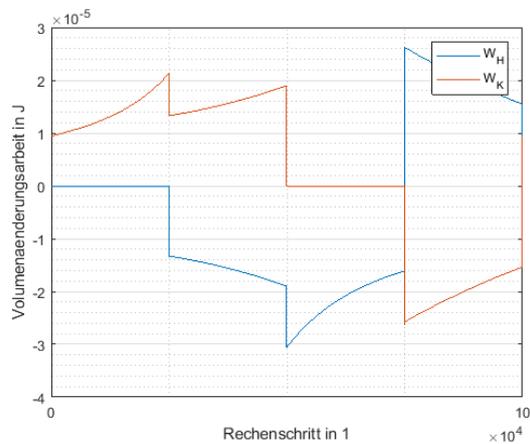


Abbildung 48: Volumenänderungsarbeit der jeweiligen Kammern

$$P_{max} = \frac{W_{max}}{\Delta t} = \frac{3,0524 \cdot 10^{-5} \text{ J}}{5 \cdot 10^{-6} \text{ s}} = 6,1048 \text{ W} \quad (3.1)$$

maximale Leistung .....  $P_{max}$  in W

maximale Arbeit pro Rechenschritt .....  $W_{max}$  in J

Unser System arbeitet bei einer durchschnittlichen Drehzahl beziehungsweise Frequenz  $f$  von 2 Hz. Damit lässt sich aus der maximalen Leistung das maximale Drehmoment ermitteln, siehe Gleichung (3.2).

$$M_{max} = \frac{P_{max}}{\omega} = \frac{P_{max}}{2 \pi f} = \frac{6,1048 \text{ W}}{2 \pi \cdot 2 \text{ Hz}} = 0,48580 \text{ Nm} \quad (3.2)$$

maximales Moment .....  $M_{max}$  in Nm

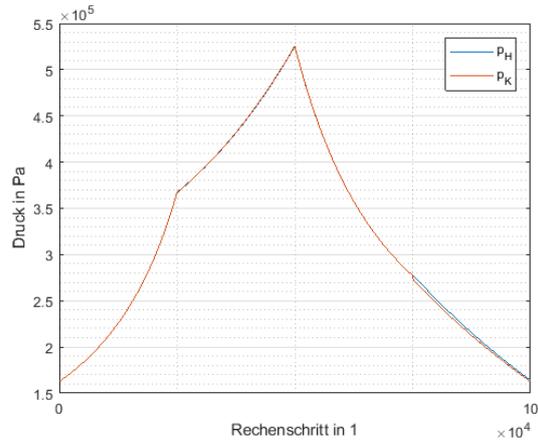
Winkelgeschwindigkeit .....  $\omega$  in rad/s

Die maximale Kraft, die auf die Welle wirkt, lässt sich aus dem Druckverlauf der Kammern ermitteln, siehe Abbildung 49. Der maximale Druck beträgt  $5,2593 \cdot 10^5$  Pa. Wird der Druck mit der Querschnittsfläche des Kolbens multipliziert, erhalten wir die Kraft, die auf die Welle wirkt, siehe Gleichung (3.3).

$$F_{max} = p_{max} \cdot A_{Quer} = 5,2593 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 7,8540 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = 41,307 \text{ N} \quad (3.3)$$

maximale Kraft des Kolbens .....  $F_{max}$  in N  
 maximaler Druck im System .....  $p_{max}$  in Pa

Mit den berechneten Belastungen könnte jetzt eine Welle mit der passenden Festigkeit ausgewählt werden. Jedoch bietet der Händler nur Wellen aus dem Werkstoff 1.2210 beziehungsweise 115CrV3 an [22]. Für diesen Werkstoff wurde leider keine Literatur gefunden, die die zulässige Biege- und Torsionsspannung angibt. Aus diesem Grund erfolgt die Auslegung lediglich nach der zulässigen Verdrehung und Durchbiegung.



Der Verdrehwinkel soll  $0,25^\circ$  bis  $0,5^\circ$  je m Wellenlänge nicht überschreiten. Der Verdrehwinkel für glatte Wellen berechnet sich aus Gleichung (3.4) [23, S. 399-400].

$$\varphi = \frac{180^\circ}{\pi} \frac{M_{max} l_{Welle}}{G I_t} \quad (3.4)$$

Verdrehwinkel .....  $\varphi = 0,5^\circ$   
 Wellenlänge .....  $l_{Welle} = 1000 \text{ mm}$   
 Schubmodul Stahl .....  $G = 81\,000 \text{ N/mm}^2$   
 polares Flächenmoment 2. Grades .....  $I_t = (\pi/32) \cdot d_{Welle}^4 \text{ in mm}^4$   
 Wellendurchmesser .....  $d_{Welle}$  in mm

Die Werte wurden aus [23, S. 399-400] entnommen. Werden diese eingesetzt und die Gleichung nach dem Wellendurchmesser  $d_{Welle}$  umgeformt, erhalten wir die Gleichung (3.5).

$$\varphi = \frac{180^\circ}{\pi} \frac{M_{max} l_{Welle}}{G I_t} = \frac{180^\circ}{\pi} \frac{M_{max} l_{Welle}}{G \frac{\pi}{32} d_{Welle}^4}$$

$$d_{Welle} = \sqrt[4]{\frac{180^\circ \cdot 32 M_{max} l_{Welle}}{\pi^2 G \varphi}} = \sqrt[4]{\frac{180^\circ \cdot 32 \cdot 0,48580 \text{ Nm} \cdot 1000 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \cdot 1000 \text{ mm}}{\pi^2 \cdot 81\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 0,5^\circ}} \quad (3.5)$$

$$d_{Welle} = 9,1471 \text{ mm}$$

Der benötigte Mindestdurchmesser gegen Verdrehung beträgt laut Gleichung (3.5) 9,1471 mm. Der Wellendurchmesser  $d_{Welle}$  wird mit 10 mm festgelegt. Das ist gleichzeitig auch die Welle mit dem größten Durchmesser, die der Händler anbietet [22]. Würde ein Verdrehwinkel von  $0,25^\circ$  gewählt werden, ergäbe das einen Wellendurchmesser von 10,878 mm und die Welle müsste anderweitig besorgt werden.

In der Berechnung wurde die Wellenlänge  $l_{Welle}$  mit 1000 mm festgelegt. Die verbaute Welle wird kürzer sein, aber für die Durchmesserenauslegung macht das keinen Unterschied. Bei einer kürzeren Welle wird der Verdrehwinkel proportional kleiner. Beispielsweise beträgt der

Verdrehwinkel bei einer Wellenlänge von 100 mm nur  $0,05^\circ$  und das Endergebnis bleibt ident.

Wird vereinfacht angenommen, dass nur eine Last in der Mitte der Welle angreift, lässt sich laut [23, S. TB-178 bis TB-179] die maximale Durchbiegung mit der Gleichung (3.6) berechnen.

$$f_m = \frac{F_{max} l_{Welle}^3}{48 E I} \quad (3.6)$$

maximale Durchbiegung .....  $f_m$  in mm

Elastizitätsmodul Stahl .....  $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$

Flächenmoment 2. Grades .....  $I = (\pi/64) d_{Welle}^4 \text{ in mm}^4$

Die zulässige Durchbiegung beträgt  $l_{Welle}/3000$  [23, S. TB-177] und der Wellendurchmesser  $d_{Welle}$  wurde oben bereits definiert. Die restlichen Werte wurden aus [23, S. TB-188] und [23, S. TB-175] entnommen. Werden diese Werte eingesetzt und die Gleichung nach der Wellenlänge umgeformt, erhalten wir die Gleichung (3.7).

$$f_m = \frac{l_{Welle}}{3000} = \frac{F_{max} l_{Welle}^3}{48 E I} = \frac{F_{max} l_{Welle}^3}{48 E \frac{\pi}{64} d_{Welle}^4}$$

$$l_{Welle} = \sqrt{\frac{48 E \pi d_{Welle}^4}{64 F_{max} 3000}} = \sqrt{\frac{48 \cdot 210\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \pi (10 \text{ mm})^4}{64 \cdot 41,307 \text{ N} \cdot 3000}} = 199,82 \text{ mm} \quad (3.7)$$

Unter Berücksichtigung der zulässigen Durchbiegung, kann bei einem Wellendurchmesser von 10 mm die Wellenlänge knapp 200 mm betragen. Das ist mehr als ausreichend, weil die Wellen höchstwahrscheinlich kürzer sein werden.

Auf der heißen und kalten Seite der Maschine wird dieselbe Welle verbaut. Die Kerbwirkung wird für das Anschauungsmodell vernachlässigt, weil unter anderem nicht genügend Werkstoffdaten vorhanden sind. Die kritische Drehzahl wird ebenso nicht berücksichtigt, weil wir nur bei einer Frequenz von 2 Hz arbeiten.

### 3.1.2 Synchronisierung der Nocken

Die Wellen, auf denen die Nocken sitzen, sollen synchron laufen. Die geplante Anordnung ist in Abbildung 19 ersichtlich. Es ist essenziell, dass beide Nocken mit der gleichen Drehzahl laufen und dass sie sich nicht zueinander verdrehen können. Andernfalls kann die Maschine den berechneten Verlauf nicht nachfahren. Daher ist ein Flach- und Keilriementrieb ungeeignet, weil sich hier die Räder zueinander verdrehen können.

Der Händler bietet auch diverse Kettentriebe an, aber die angebotenen Kettenräder können radial nicht gesichert werden [24]. Aus diesem Grund sind Kettentriebe auch keine Option. Der Kettentrieb würde aber den Vorteil bieten, dass sich die Kettenlänge relativ flexibel einstellen lässt. Ein zusätzlicher Nachteil ist, dass beim Kettentrieb der Polygoneffekt auftritt.

Aus demselben Grund wie beim Kettentrieb können auch keine Kegelhäder verwendet werden. Die angebotenen Kegelhäder bieten ebenfalls keine ausreichenden radialen Sicherungsmöglichkeiten an [25]. Zur Überbrückung des Nockenachsabstands hätten die Kegelhäder mit einer langen Welle verbunden werden sollen.

Beim Händler sind ebenfalls Zahnriemen und -scheiben erhältlich und Letztere können, mit ein paar Ausnahmen, radial gesichert werden. Für das Modell werden daher Zahnriemen verwendet. Es werden lediglich zwei Zahnriemen-Scheiben mit einer Bohrung von 10 mm angeboten. Eine mit 52 Zähnen und eine mit 60 Zähnen [26]. Es wird die Scheibe mit 52 Zähnen gewählt, weil sie einerseits günstiger und andererseits für die Riemenlebensdauer besser ist. Der kleinere Durchmesser führt dazu, dass der Zahnriemen eine geringere Anzahl an Lastwechsel erfährt als bei einem größeren Durchmesser, siehe Gleichung (3.8).

$$\begin{aligned} \frac{\text{Riemenlänge}}{\text{Weg pro Periode}} &= \frac{2 \text{ Achsabstand} + \pi \text{ Scheibendurchmesser}}{\pi \text{ Scheibendurchmesser}} \\ &= \frac{2 \text{ Achsabstand}}{\pi \text{ Scheibendurchmesser}} + 1 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Gleichung (3.8) kann so interpretiert werden, dass die gesamte Riemenlänge (zwei Mal Achsabstand plus Umfang der Scheibe) durch den Weg pro Periode dividiert wird. Letzteres ist der Weg der pro Prozessdurchlauf von der Scheibe abgerollt wird und das entspricht genau dem Scheibenumfang. Als Ergebnis erhalten wir die Anzahl an Prozessperioden pro voller Umdrehung des Riemens. Hinsichtlich der Lebensdauer ist natürlich ein hohes Ergebnis zu bevorzugen. In der Gleichung ist ersichtlich, dass die Perioden mit zunehmendem Scheibendurchmesser geringer werden.

Ein kleinerer Scheibendurchmesser führt zu größeren Riemenkräften aufgrund des kürzeren Hebelarms. Die genaue Riemenlänge wird erst im Rahmen der Konstruktion ermittelt, aber für die Überprüfung der Belastung wurde vorerst ein Riemen mit einem Außenumfang von 660,4 mm betrachtet. Dieser kann laut Händler eine Leistung bis 0,3 kW übertragen und ist für maximale Drehzahlen von 5 000 bis 10 000 U/min, je nach Scheibengröße, ausgelegt [27]. Riemen mit einer anderen Länge, wie [28] mit 584,2 mm und [29] mit 711,2 mm, haben dieselben Spezifikationen. Die Riemenbelastung sollte daher für uns kein Problem darstellen.

Die Scheiben mit 40, 52 und 60 Zähnen, das sind gleichzeitig die größten Scheiben, haben keine Bordscheiben. Damit der Riemen nicht von den Scheiben runterfällt, wird der Riemenspanner eine kleinere Zahnriemenscheibe mit Bordscheiben erhalten [30]. Der Riemen wird daher lediglich vom Riemenspanner in Laufrichtung geführt wird, siehe „3.1.7 Riemenspanner“.

Im Verlauf der Arbeit, siehe Abbildung 48, ist ersichtlich, dass sowohl die heiße als auch die kalte Kammer Arbeit aufnehmen und abgeben. Daher lässt sich nicht so einfach ein Lasttrum bestimmen. Da über eine Periode die heiße Kammer mehr Arbeit abgibt als aufnimmt, soll dieser als Antrieb und die kalte Kammer als Abtrieb betrachtet werden. Ein zusätzlicher Verbraucher wird vorerst außen vor gelassen. Dadurch lässt sich eindeutig ein Lasttrum definieren. Die Laufrichtung soll so gewählt werden, dass sich das Lasttrum unten befindet. Das unten liegende Lasttrum wird durch die Last gespannt und das oben liegende Leertrum hängt aufgrund des Eigengewichts durch. Das Leertrum soll zusätzlich durch einen Riemenspanner gespannt werden. Dadurch wird der Umschlingungswinkel der Scheiben ein wenig vergrößert.

Wir haben einen Abstand von der Drehachse der Nocke bis zum oberen Totpunkt des Zylinders  $d_A$  von 9 cm, siehe Abbildung 36, und einen Regenerator mit einer Länge  $l_{Reg}$  von 1,5 cm. Damit lässt sich der Achsabstand der Wellen zueinander mit der Gleichung (3.9) bestimmen.

$$\text{Achsabstand} = d_A + l_{Reg} + d_A = 9 \text{ cm} + 1,5 \text{ cm} + 9 \text{ cm} = 19,5 \text{ cm} \quad (3.9)$$

Die Zahnteilung der Riemen beträgt 1/5 Zoll beziehungsweise 5,08 mm [30]. In Gleichung (3.10) wird der Achsabstand durch die Zahnteilung dividiert.

$$\text{Achsabstand in Zähne} = \frac{\text{Achsabstand}}{\text{Zahnteilung}} = \frac{195 \text{ mm}}{5,08 \text{ mm}} = 38,386 \text{ Zähne} \quad (3.10)$$

In Gleichung (3.10) ist ersichtlich, dass der Achsabstand in Zähne kein ganzzahliger Wert ist. Die Scheiben auf der heißen und kalten Seite müssen daher aufgrund der Zahnteilung ein wenig verdreht zueinander montiert werden. Darauf muss bei der Montage geachtet werden, denn ansonsten kann sich eine falsche Lage der Nocken zueinander einstellen.

Beispielsweise kann die Gewindestiftbohrungsachse der Zahnriemenscheiben als Orientierung hergenommen werden. Bei der Montage können die Achsen aufgrund der Zahnteilung nicht parallel zueinander ausgerichtet werden. Wenn eine Achse vertikal ausgerichtet wird, muss die andere leicht versetzt von der Vertikalen ausgerichtet werden, siehe Abbildung 50.

Der genaue Differenzwinkel lässt sich aus dem Achsabstand in Zähnen ermitteln. Wenn eine Scheibe ausgerichtet ist, muss die andere Scheibe um 0,386 Zähne weitergedreht werden, damit beide Scheiben mit dem Zahnriemen im Eingriff sind. Der Winkel lässt sich mit der Gleichung (3.11) berechnen.

$$\text{Differenzwinkel} = \frac{0,386 \text{ Zähne}}{52 \text{ Zähne pro Rad}} 360^\circ = 2,672^\circ \quad (3.11)$$

In Gleichung (3.11) werden die 0,386 Zähne durch die Anzahl der Zähne pro Rad dividiert. Der Term wird mit  $360^\circ$  multipliziert, damit das Ergebnis die Einheit Grad hat. Der Differenzwinkel beträgt  $2,672^\circ$ .

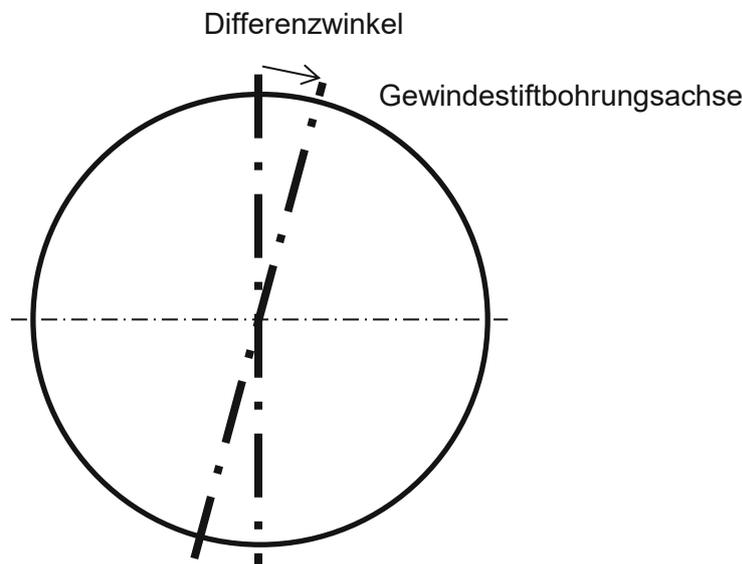


Abbildung 50: Versetzt ausgerichtete Gewindestiftbohrungsachse einer Zahnriemenscheibe, Abbildung ist nicht maßstabsgetreu

### 3.1.3 Zylinder

Die Pleuellänge inklusive Kolbenhöhe  $d_p$  beträgt 4 cm. Der Hub im Zylinder wurde mit 3 cm festgelegt. Das heißt, wenn der Kolben im oberen Totpunkt ist, dann bleibt 1 cm des Pleuels außerhalb des Hubbereichs, siehe Abbildung 36. Damit der Kolben im unteren Totpunkt nicht aus dem Zylinder „fliegt“, wird der Zylinder insgesamt 3,8 cm lang gemacht. Dann verbleiben im unteren Totpunkt 8 mm vom Kolben im Zylinder.

Der Zylinder wird nicht 4 cm lang, weil dann die Nocke am Zylinder streifen würde. Der Mindestabstand zwischen Nocke und Zylinder beträgt 2 mm. Der Zylinder wird durch die Flamme auf eine sehr hohe Temperatur erhitzt. Deshalb muss die Wärmeausdehnung des Zylinders kontrolliert werden. Die Flammentemperatur beträgt 800 °C [18]. Es wird vereinfacht angenommen, dass der ganze Zylinder dieselbe Temperatur wie die Flamme hat. Der Zylinderwerkstoff CW004A hat im Bereich von 20 °C bis 300 °C einen Längenausdehnungskoeffizienten von  $17,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [10, S. 2]. Wir erreichen höhere Temperaturen, aber mangels besserer Daten wird trotzdem dieser Koeffizient verwendet, siehe Gleichung (3.12).

*Zylinderausdehnung*

$$= \text{Längenausdehnungskoeffizient} \cdot \text{Zylinderlänge} \cdot \text{Temperaturunterschied} \quad (3.12)$$

$$\text{Zylinderausdehnung} = 17,7 \cdot \frac{10^{-6}}{\text{K}} \cdot 38 \text{ mm} (800 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) = 0,52463 \text{ mm}$$

In Gleichung (3.12) ist ersichtlich, dass die axiale Zylinderausdehnung ein wenig über 0,5 mm beträgt. Das sollte sich ausgehen, aber sicherheitshalber kann das Ende vom Zylinder, das zur Nocke zeigt, ein wenig abgerundet werden, siehe Abbildung 51. Damit soll sichergestellt werden, dass auch im schlechtesten Fall die Nocke nicht am Zylinder streift.

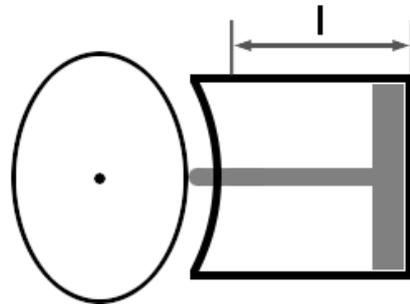


Abbildung 51: abgerundeter Zylinder

Die Zylinderseite, die zum Regenerator zeigt, soll an den Regenerator angeflanscht werden. Die Flanschfläche kann mit KFZ-Auspuffpaste abgedichtet werden. Andere Dichtungsmöglichkeiten könnten bei den hohen Temperaturen eventuell Schwierigkeiten bereiten.

### 3.1.4 Kolben

Der Kolbenwerkstoff muss auf jeden Fall einen kleineren Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen als der Zylinderwerkstoff. Ansonsten dehnt sich der Kolben stärker aus als der Zylinder und beide Bauteile verkanten sich. Für den Kolben und das Pleuel soll Baustahl verwendet werden. Das sollte kein Problem darstellen, weil Baustahl, zum Beispiel S235JR, im Bereich von 20 °C bis 300 °C einen mittleren Wärmeausdehnungskoeffizienten von  $12,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  besitzt [31, S. 3]. Der Werkstoff vom Zylinder, CW004A, hat im selben Bereich einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von  $17,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [10, S. 2].

Bei der unterschiedlichen Wärmeausdehnung muss auch daran gedacht werden, dass das entstehende Spiel zwischen Kolben und Zylinder die Dichtheit des Systems beeinflusst.

$$\text{radiales Spiel} = \text{Differenz der Wärmeausdehnungskoeffizienten} \cdot \text{Kolbenradius} \cdot \text{Temperaturunterschied} \quad (3.13)$$

$$\text{radiales Spiel} = (17,7 - 12,9) \cdot \frac{10^{-6}}{\text{K}} \cdot 5 \text{ mm} (800 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) = 0,01872 \text{ mm}$$

In Gleichung (3.13) wurde das radiale Spiel, das durch die Erwärmung entsteht, berechnet. Es wird vereinfacht angenommen, dass sowohl Kolben als auch Zylinder einen Nennradius von 5 mm haben. Beide sollen die Flammentemperatur von 800 °C haben [18]. Die Wärmeausdehnung vom Kolben wird von der Ausdehnung des Zylinders abgezogen (durch die Differenz der Wärmeausdehnungskoeffizienten berücksichtigt) und die Differenz ist das ent-

stehende radiale Spiel. Das Spiel ist im Hundertstel-mm-Bereich und wird daher für das Anschauungsmodell vernachlässigt.

Während der Inbetriebnahme und während des Auskühlens ändert sich durch die unterschiedlichen Temperaturen zwischen Zylinder und Kolben ebenfalls das radiale Spiel. Die Fertigungstoleranzen spielen hier eine große Rolle, jedoch kann bei Rapid Prototyping eine gewählte Fertigungstoleranz meist nicht berücksichtigt werden. Daher wird das radiale Spiel bei den erwähnten Fällen für das Anschauungsmodell ebenfalls vernachlässigt.

Der Kolben könnte auch aus demselben Werkstoff wie der Zylinder hergestellt werden. Sie hätten dann dieselben Wärmeausdehnungskoeffizienten und sollten sich daher nicht ineinander verkanten. Derselbe Werkstoff ist jedoch hinsichtlich der Wärmeleitung unvorteilhaft. Denn dann würde das Material der Zylinderwand und das des Kolbens die Wärme gleichermaßen gut leiten. Dieses Verhalten ist nicht erwünscht, weil die Wärme im Kolben nicht genutzt werden kann. Der Zylinderwerkstoff CW004A hat bei 20 °C eine Wärmeleitfähigkeit von 394 W/(m K) [10, S. 3]. Baustahl hat bei 20 °C eine Wärmeleitfähigkeit von 54 W/(m K) [31, S. 3]. Die Wärmeleitfähigkeit vom Zylinder ist mehr als sieben Mal größer und deshalb sollte die Wärmeleitung hauptsächlich durch die Zylinderwand erfolgen.

Baustahl S235JRG2 hat seinen Schmelzpunkt bei 1 250 °C [32] und sollte daher die Flammentemperatur von 800 °C [18] aushalten können.

Wie unter „3.1.3 Zylinder“ erwähnt, nähert sich die Nocke dem Zylinder bis auf 2 mm an. Es existiert somit im Grunde kein Platz, um eine Pleueführung außerhalb des Zylinders zu realisieren. Im unteren Totpunkt verbleibt der Kolben bereits 8 mm im Zylinder. Damit die Führung des Kolbens besser wird und dieser sich nicht verkantet, wird das Pleuel und der Kolben aus einem Bauteil mit dem gleichen Durchmesser gefertigt. Das heißt, dass der Kolben nur vom Zylinder geführt wird.

Unsere Maschine wird laut Berechnung eine Arbeit von -0,18625 J pro Periode liefern. Bei einer Frequenz von 2 Hz entspricht das einer Leistung von -0,3725 W. Das ist nicht sehr viel und deshalb sollen die Verluste möglichst gering gehalten werden. Um die Reibungsverluste zu verringern, soll der Kolben mit KFZ-Bremspaste geschmiert werden. Andere Schmiermittel wie Fahrradketten- oder Motoröl könnten bei den hohen Temperaturen Schwierigkeiten bereiten.

Beispielsweise bietet der Hersteller LIQUI MOLY eine „Bremsen-Anti-Quietsch-Paste“ an. Laut Hersteller ist es eine spezielle Schmier- und Trennpaste aus synthetischen und keramischen Wirkstoffen. Sie ist einerseits ein guter Korrosionsschutz und hat andererseits auch einen extrem niedrigen Reibwert. Die Paste besitzt ebenfalls eine hervorragende Temperaturbeständigkeit. Der Temperatureinsatzbereich reicht von -40 °C bis zu 1 200 °C. Sie eignet sich ebenfalls für zahlreiche Einsätze außerhalb des Anwendungsbereiches der Bremse [33].

Um die Reibungsverluste zwischen Pleuel und Nocke zu verringern, können am Pleuelende Wälzlager montiert werden, die auf der Nocke abrollen. Die maximale Kraft, die auf den Kolben wirkt, beträgt laut Gleichung (3.3) 41,307 N. Der Händler bietet ein Radial-Kugellager mit einem Außendurchmesser von 5 mm und einem Innendurchmesser von 2 mm an. Dieser ist für Drehzahlen bis zu 100 000 U/min geeignet und hat eine dynamische radiale Tragzahl von 119 N. Zusätzlich hat das Lager beidseitige Deckscheiben [34]. Es sind zwei Lager pro Pleuel geplant und die nominelle Lebensdauer berechnet sich nach [35, S. 64] mit der Gleichung (3.14).

$$L_{10h} = \frac{10^6}{\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} f \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}} \left( \frac{\text{dynamische Tragzahl}}{\text{äquivalente dynamische Lagerbelastung}} \right)^3 \quad (3.14)$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} 2 \frac{1}{\text{s}} \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}} \left( \frac{119 \text{ N}}{\frac{1}{2} 41,307 \text{ N}} \right)^3 = 26\,566 \text{ h}$$

nominelle Lebensdauer bei 90 % Erlebenswahrscheinlichkeit

.....  $L_{10h}$  in h

In Gleichung (3.14) wurde bei der Lagerbelastung nur die halbe Maximalkraft eingesetzt, weil die Last auf zwei Lager aufgeteilt wird. Die Lebensdauer der Lager ist für ein Anschauungsmodell mehr als ausreichend. Bei einem durchgehenden Betrieb hätte es eine Lebensdauer von über 1 106 Tage. Dabei wurde die größte Kraft eingesetzt, die während einer Periode auftritt. Das heißt, dass die tatsächliche Lebensdauer noch größer sein wird.

Der Händler würde auch Lager mit einem Außendurchmesser von 3 mm anbieten. Damit wäre ein genaueres Nachfahren der Nockenkontur möglich, aber da beträgt der Innendurchmesser nur 1 mm [36]. Der Händler bietet keine Wellen mit 1 mm Durchmesser an und deshalb müsste anderweitig so eine Welle beschafft werden. Damit die spätere Beschaffung einfacher wird, wurde für die Pleuellager die dünnste Welle gewählt, die angeboten wird. Das ist eine Welle mit einem Durchmesser von 2 mm [22]. Mit dem genannten Innendurchmesser hat das oben gewählte Lager den kleinsten Außendurchmesser [37].

Die Achse für die Lager wird nur auf Biegung und nicht auf Verdrehung belastet, da kein Moment übertragen wird. Es wird vereinfacht angenommen, dass die Maximalkraft nur in der Mitte angreift. Um die Durchbiegung zu kontrollieren, kann daher analog wie in Gleichung (3.7) vorgegangen werden, siehe Gleichung (3.15). Alle angebotenen Wellen vom Händler sind aus demselben Werkstoff, 1.2210 beziehungsweise 115CrV3, gefertigt [22].

$$l_{\text{Welle}} = \sqrt{\frac{48 E \pi d_{\text{Achse}}^4}{64 F_{\text{max}} 3000}} = \sqrt{\frac{48 \cdot 210\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \pi (2 \text{ mm})^4}{64 \cdot 41,307 \text{ N} \cdot 3000}} = 7,9929 \text{ mm} \quad (3.15)$$

In Gleichung (3.15) ist ersichtlich, dass die Achse für die Lager knapp 8 mm lang sein darf, damit die zulässige Durchbiegung nicht überschritten wird. Das sollte kein Problem darstellen, da das Pleuel selbst nur einen Durchmesser von 10 mm hat. Die Achse wird normal zur Pleuelachse montiert und die Länge der Achse wird kürzer als 8 mm sein. Die Scherungsbeanspruchung der Achse wird vernachlässigt.

### 3.1.5 Nocken

Die Nocken dienen gleichzeitig als Schwungscheiben und sollen ausgewuchtet werden. Dazu sollen auf den seitlichen Flächen Ausgleichsmassen konstruktiv berücksichtigt werden. Die genaue Ausgestaltung erfolgt im Rahmen der Konstruktion.

Die radiale und axiale Sicherung soll mit einem Gewindestift realisiert werden. Dazu muss die Nocke eine Bohrung für den Gewindestift erhalten. Die Bohrung kann in der Ausgleichsmasse integriert werden. Da die Form der Ausgleichsmasse noch unbekannt ist, erfolgt die genaue Ausgestaltung im Rahmen der Konstruktion.

In Abbildung 52 ist dasselbe Pleuel in verschiedenen Perspektiven dargestellt. Betrachtet man die geplante Anordnung der Maschine in Abbildung 19, dann kann das Pleuel im Betrieb nur die Stellung wie in Abbildung 52 links unten einnehmen. Würde sich beispielsweise das Pleuel verdrehen und die Stellung rechts unten einnehmen, dann würde er teilweise auf seinen Kanten laufen, siehe Abbildung 53.

In Abbildung 53 sind die Bauteile nicht maßstabsgetreu dargestellt und dienen nur zur Veranschaulichung des Problems.

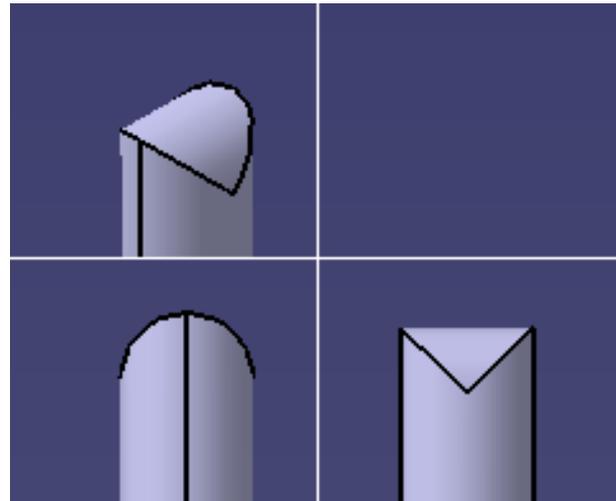


Abbildung 52: Form des Pleuels ohne Wälzlager

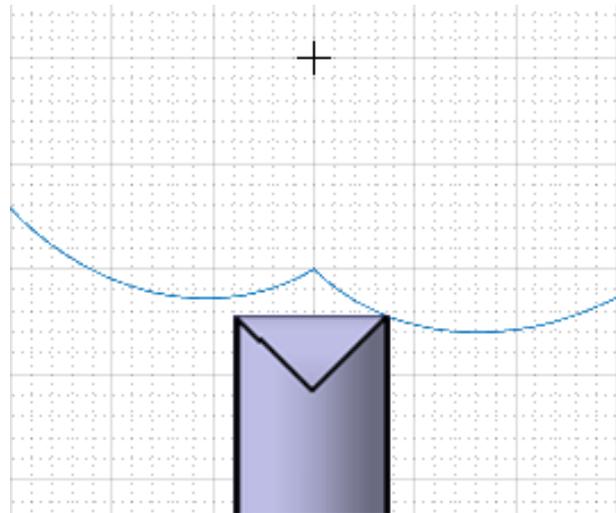


Abbildung 53: unvorteilhafte Pleuelstellung



Abbildung 54: Führung des Pleuels durch eine Nut



Abbildung 55: Führung des Pleuels mit Wälzlager durch einen Vorsprung

Daher muss eine Führungsmöglichkeit vorgesehen werden, damit sich das Pleuel im Betrieb nicht verdreht. Eine Möglichkeit wäre, dass die Nocke entlang der Gleitfläche eine Nut erhält. Das Pleuel erhält das dementsprechende Gegenstück, siehe Abbildung 54. Ebenso eine Möglichkeit ist, dass umgekehrt das Pleuel die Nut erhält und die Nocke das Gegenstück.

Das Pleuel soll Wälzlager erhalten und daher muss die Idee ein wenig adaptiert werden, siehe Abbildung 55. Zwei Wälzlager sollen auf der Nockenoberfläche abrollen und dazwischen soll ein Vorsprung auf der Nocke sein. Dieser Vorsprung soll verhindern, dass sich das Pleuel verdreht. Diese Variante soll in der Konstruktion berücksichtigt werden. Dieser Vorsprung muss sehr klein ausfallen, denn ansonsten droht Kollisionsgefahr mit dem Zylinder.

Die Nocke soll aus massivem Stahl hergestellt werden und die Dicke wird höchstwahrscheinlich 5 mm bis 10 mm betragen. Es wird angenommen, dass dieses massive Metallstück den Belastungen standhalten kann und deshalb erfolgt kein Festigkeitsnachweis.

### 3.1.6 Leistungsabnahme

Die Leistung wird vom Zahnriemen über eine Zahnriemenscheibe abgenommen. Die abgenommene Leistung wird betragsmäßig nicht größer sein als die Leistung bei der heißen oder kalten Kammer. Daher wird dieselbe Welle und Scheibe wie bei den Kammern verwendet und es kann davon ausgegangen werden, dass die Dimensionierung ausreichend ist.

Die abgenommene Leistung soll von der Zahnriemenscheibe über eine Welle auf eine runde Scheibe übertragen werden. Auf der runden Scheibe soll ein Metallstück gleiten und die Leistung soll über Reibung verbraucht werden, siehe Abbildung 56.

Die dabei verbrauchte Leistung berechnet sich aus der Gleitreibungskraft mal der Umfangsgeschwindigkeit der Scheibe, siehe Gleichung (3.16).

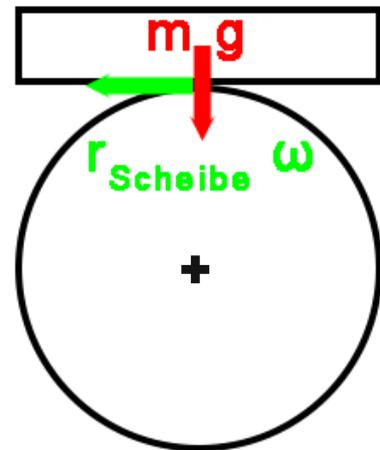


Abbildung 56: Leistungsverbrauch über Gleitreibung

$$P = m g \mu_G \frac{d_{Scheibe}}{2} \omega = m g \mu_G \frac{d_{Scheibe}}{2} 2 \pi f = m g \mu_G d_{Scheibe} \pi f \quad (3.16)$$

- Leistung ..... P in W
- Masse ..... m in kg
- Durchmesser der Scheibe .....  $d_{Scheibe}$  in m
- Gleitreibungskoeffizient .....  $\mu_G$  in 1

Unsere Maschine liefert eine durchschnittliche Leistung P von 0,3725 W. Der Gleitreibungskoeffizient  $\mu_G$  zwischen Stahl und Stahl hat laut [38] den Wert 0,12. Die Zahnriemenscheibe hat einen Außendurchmesser von 84 mm [30]. Damit die Reibungsscheibe nicht größer als die Zahnriemenscheibe wird, soll sie einen Durchmesser  $d_{Scheibe}$  von 80 mm haben. Die Masse des Metallstücks, das auf der Scheibe gleitet, ist noch unbekannt. Die Masse kann durch Umformung der Gleichung (3.16) ermittelt werden, siehe Gleichung (3.17).

$$m = \frac{P}{g \mu_G d_{Scheibe} \pi f} = \frac{0,3725 \text{ W}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 0,12 \cdot 0,08 \text{ m} \pi 2 \text{ Hz}} = 0,62952 \text{ kg} \quad (3.17)$$

Die erforderliche Masse beträgt laut Gleichung (3.17) 0,62952 kg. Es wird angenommen,

dass das Metallstück ein Würfel ist und aus dem Stahl S235JRG2 mit der Dichte  $7\,850\text{ kg/m}^3$  [32] hergestellt wird. Die Kantenlänge kann dann mit der Gleichung (3.18) berechnet werden.

$$\text{Kantenlänge} = \sqrt[3]{\frac{m}{\text{Dichte}}} = \sqrt[3]{\frac{0,62952\text{ kg}}{7\,850\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} = 43,123\text{ mm} \quad (3.18)$$

In Gleichung (3.18) ist ersichtlich, dass die Kanten des Würfels ein wenig über 43 mm lang sind. Der resultierende Würfel ist größer als erwartet. Es müsste auch eine Vorrichtung konstruiert werden, die diesen Würfel führt. Aufgrund der Würfelgröße würde die Dimension der Vorrichtung nicht klein ausfallen. Dieses Konzept wird als unhandlich betrachtet und wird daher verworfen.

Es ist zu erwähnen, dass der Leistungsverbrauch einstellbar sein muss. Die berechnete Leistung wird in der realen Maschine nicht exakt erreicht und die reale Leistung kann höher oder niedriger ausfallen. Wenn sie höher ausfällt, wird die Maschine mit dem gleichbleibenden Leistungsverbrauch immer schneller. Wenn die Leistung niedriger ausfällt, wird die Maschine immer langsamer und kommt zum Stillstand.

Ein möglicher Lösungsansatz ist, wenn ein 0,5 kg-Metallstück verwendet wird. Dieser wird zusätzlich durch darauf abgelegte Münzen oder Gewichtsstücke schwerer gemacht. Dadurch ist eine gewisse Einstellbarkeit gewährleistet.

Alternativ soll die leistungsverbrauchende Welle eine Schnur aufrollen. Die Schnur kann beispielsweise an einer durchgehenden und normal zur Wellenachse orientierten Bohrung befestigt werden. Dadurch soll sich die Schnur mit der Welle mitdrehen. Diese Schnur soll ein Gewicht hochziehen und dadurch soll die Leistung verbraucht werden, siehe Abbildung 57. Wenn die Maschine beispielsweise an der Kante eines Tisches steht, kann die Masse an der Schnur neben der Tischkante frei hängen.

Die Einstellbarkeit kann beispielsweise dadurch erreicht werden, indem am hängenden Ende der Schnur ein Korb befestigt wird. Durch hinzufügen von Gewichtsstücken oder Münzen kann die Masse eingestellt werden.

Der Wellendurchmesser  $d_{\text{Welle}}$  beträgt 10 mm. Damit lässt sich die benötigte Masse mit der Gleichung (3.19) bestimmen. Diese Gleichung ist fast ident mit der Gleichung (3.17). Statt dem Scheibendurchmesser  $d_{\text{Scheibe}}$  wird der Wellendurchmesser  $d_{\text{Welle}}$  verwendet und der Gleitreibungskoeffizient  $\mu_G$  entfällt.

$$m = \frac{P}{g d_{\text{Welle}} \pi f} = \frac{0,3725\text{ W}}{9,81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} 0,01\text{ m} \pi 2\text{ Hz}} = 0,60433\text{ kg} \quad (3.19)$$

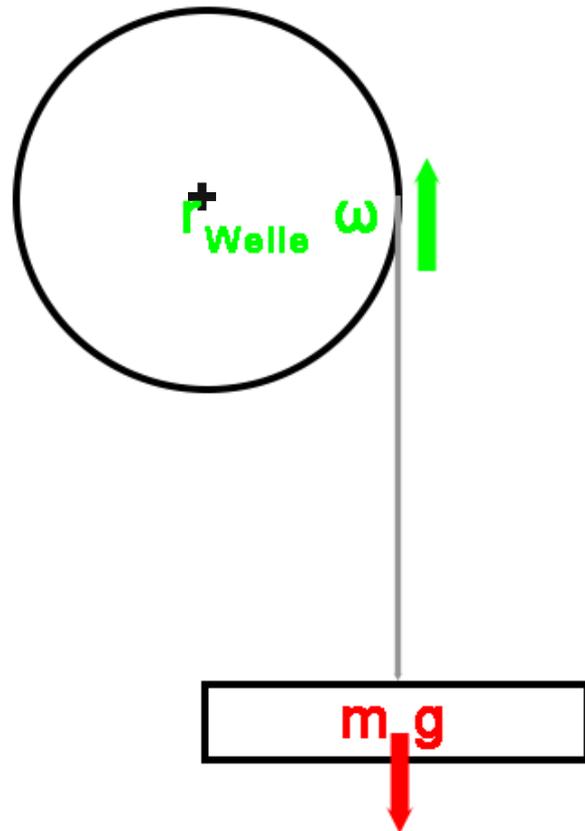


Abbildung 57: Leistungsverbrauch über das Heben einer Masse

Würde im aktuellen Konzept eine Welle mit einem Durchmesser von 80 mm verwendet werden, wäre die benötigte Masse laut Gleichung (3.20) nur 0,075542 kg.

$$m = \frac{P}{g d_{\text{Welle}} \pi f} = \frac{0,3725 \text{ W}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 0,08 \text{ m } \pi 2 \text{ Hz}} = 0,075542 \text{ kg} \quad (3.20)$$

Es wird trotzdem nur eine Welle mit 10 mm Durchmesser genommen. Einerseits weil der Händler keine größeren Wellen anbietet und andererseits weil es sonst eine stark überdimensionierte und schwere Welle wäre.

Unter „3.2.8 Leistungsabnahme“ wird das Konzept aus konstruktiven Gründen abgeändert.

### 3.1.7 Riemenspanner

Der Riemen soll im laufenden Betrieb gespannt werden. Als einfachste Lösung wird eine Zahnriemenscheibe betrachtet, die unter ihrem Eigengewicht den Riemen spannt. Dafür soll die Scheibe auf einem Arm befestigt werden, der sich um einen fixen Punkt frei drehen kann, siehe Abbildung 58.

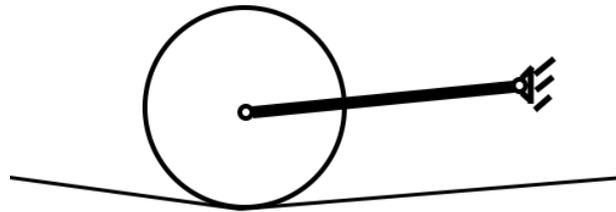


Abbildung 58: Riemen durch Eigengewicht der Scheibe gespannt

Die bisher verwendeten Zahnriemenscheiben haben alle keine Bordscheiben. Daher hat der Zahnriemen keine Führung in Laufrichtung und könnte von den Scheiben runterspringen. Die Riemenführung soll der Riemenspanner zusätzlich übernehmen und sie soll über Bordscheiben realisiert werden.

Damit die Spannwirkung möglichst groß ist, sollte die Scheibe eine möglichst große Masse haben. Die größte Scheibe mit Bordscheiben hat 35 Zähne und einen Innendurchmesser von 8 mm [30]. Die dazugehörige Welle wird nicht auf die zulässige Verformung kontrolliert, weil der Riemenspanner bis auf ein wenig Reibung und Eigengewicht nicht belastet wird.

Der Riemenspanner wird so positioniert, dass er unter seinem Eigengewicht das über dem Lastrum liegende Leertrum spannt. Neben der zusätzlichen Riemenspannung wird dadurch der Umschlingungswinkel der Zahnriemenscheiben ein wenig erhöht. Es wird davon ausgegangen, dass diese Riemenführung in Laufrichtung ausreicht.

### 3.1.8 Lager

Die Wellen sollen mit einer Fest-Los-Lagerung gelagert werden. Der Innenring der Lager soll mit der Welle gesichert werden. Der Außenring wird beim Loslager nicht gesichert, damit er sich im Lagerbock frei bewegen kann. Der Außenring beim Festlager soll im Lagerbock gesichert werden. Eine stoffschlüssige Verbindung, zum Beispiel eine flüssige Schraubensicherung, sollte ausreichen, da alle Wellen keine Axialkräfte aufnehmen. Dadurch entfällt der zusätzliche Platzbedarf für Sicherungselemente der Lager.

In Abbildung 59 sind die auf die Welle wirkenden Kräfte ersichtlich. Es wird vereinfacht angenommen, dass alle Kräfte in einer Ebene wirken.  $F_N$  ist die Kraft mit der die Nocke auf die Welle drückt.  $F_A$  und  $F_B$  sind die Kräfte auf die Lager A und B.  $F_M$  resultiert aufgrund des übertragenen Moments. Diese Kraft ist immer in dieselbe Richtung orientiert, egal ob die Scheibe antreibt oder angetrieben wird, siehe oberen Teil der Abbildung. Bei der linken Scheibe ist das Lastrum unten und bei der rechten Scheibe oben. In der Kraft  $F_M$  wird zu-

sätzlich die Riemenspannkraft rechnerisch mitberücksichtigt. Die Parameter a und b geben die Abstände an. Es wird angenommen, dass die Kraft  $F_N$  symmetrisch zwischen den zwei Lagern angreift. Ob die Kraft  $F_M$  links vom Lager A oder rechts vom Lager B angreift, spielt für die Lagerauslegung keine Rolle. Falls sie rechts vom Lager B angreifen sollte, dann werden nur die Lagerkräfte  $F_A$  und  $F_B$  vertauscht. Da die Lager nach der größten Belastung ausgelegt werden, macht das keinen Unterschied. Die Skizze der Kräfte für die heiße und kalte Seite ist ident, sie wird lediglich entlang der Wellenachse gespiegelt.

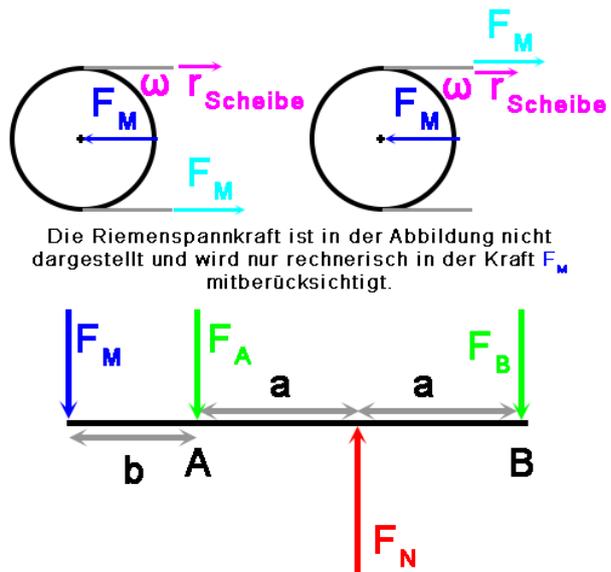


Abbildung 59: auf die Welle wirkenden Kräfte, Skizze ist nicht maßstabsgetreu

Die Lagerkräfte  $F_A$  und  $F_B$  lassen sich über ein Momentengleichgewicht um die Punkte A und B berechnen. Das Momentengleichgewicht um Punkt A ist in Gleichung (3.21) und das um Punkt B in Gleichung (3.22) ersichtlich.

$$M_A = F_M b + F_N a - F_B 2 a = 0 \tag{3.21}$$

$$M_B = F_M (2 a + b) + F_A 2 a - F_N a = 0 \tag{3.22}$$

Momente um den Punkt A .....	$M_A$ in Nm
Kraft aufgrund des Moments inklusive Riemenspannkraft .....	$F_M$ in N
Abstand b .....	b in m
Nockenkraft auf die Welle.....	$F_N$ in N
Abstand a .....	a in m
Kraft auf das Lager B.....	$F_B$ in N
Momente um den Punkt B .....	$M_B$ in Nm
Kraft auf das Lager A.....	$F_A$ in N

Durch umformen der Gleichung (3.21) erhalten wir die Kraft  $F_B$ , siehe Gleichung (3.23), und durch umformen der Gleichung (3.22) die Kraft  $F_A$ , siehe Gleichung (3.24).

$$F_B = F_M \frac{b}{2 a} + \frac{F_N}{2} \tag{3.23}$$

$$F_A = \frac{F_N}{2} - F_M \left( 1 + \frac{b}{2 a} \right) \tag{3.24}$$

In Gleichung (3.3) wurde die Maximalkraft des Kolbens berechnet. Dazu wurde der Maximaldruck mit der Querschnittsfläche multipliziert. Analog dazu kann auch die momentane Kraft des Kolbens auf die Nocke und somit auch die Kraft der Nocke auf die Welle  $F_N$  berechnet werden. Dafür wird anstatt dem Maximaldruck der momentane Druck eingesetzt. Die Kraft  $F_M$  lässt sich durch Umformung der Gleichung (3.25) berechnen, siehe (3.26).

$$\frac{W}{\Delta t} = P = M_M \omega = M_M 2 \pi f = F_M r_{Scheibe} 2 \pi f \quad (3.25)$$

$$F_M = \frac{|W|}{\Delta t r_{Scheibe} 2 \pi f} \quad (3.26)$$

das von der Welle übertragene Moment.....  $M_M$  in Nm

Von der Arbeit pro Rechenschritt  $W$  wird der Betrag genommen, da es für die Kraft  $F_M$  unerheblich ist, ob die Scheibe antreibt oder angetrieben wird.

Es wird vereinfacht angenommen, dass die Riemen­spannkraft 10 % der maximalen Nutz­kraft entspricht und konstant ist. Die Kraft  $F_M$  inklusive Riemen­spannkraft wird mit der Gleichung (3.27) ermittelt.

$$F_M = \frac{|W|}{\Delta t r_{Scheibe} 2 \pi f} + \frac{\left| \frac{W_{max}}{10} \right|}{\Delta t r_{Scheibe} 2 \pi f} = \frac{|W| + \left| \frac{W_{max}}{10} \right|}{\Delta t r_{Scheibe} 2 \pi f} \quad (3.27)$$

Folgende Parameter müssen vor der Berechnung definiert werden:

- Radius der Scheibe .....  $r_{Scheibe}$  = 0,042 m
- Abstand a ..... a = 0,013 m
- Abstand b ..... b = 0,01 m

Die Zahnriemenscheiben für dienockentragenden Wellen haben 52 Zähne und einen Abroll­durchmesser von 84 mm [30]. Der dazugehörige Radius wird für die Berechnung verwendet. Die Abstände a und b sind vorerst willkürlich gewählt worden.

Die genannten Gleichungen und Parameter wurden in MATLAB hinterlegt. Die Lagerkräfte  $F_A$  und  $F_B$  wurden einmal für die heiße und einmal für die kalte Kammer berechnet, siehe Abbildung 60 und Abbildung 61.

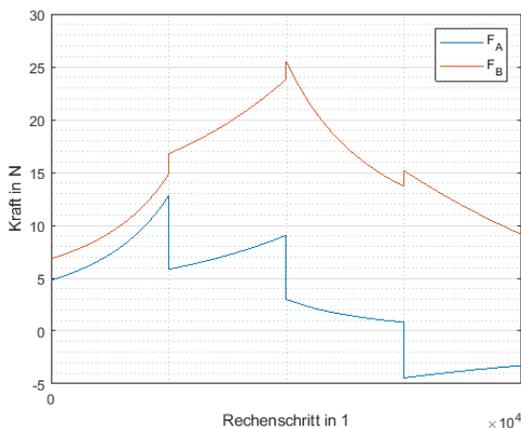


Abbildung 60: Lagerkräfte heiße Seite

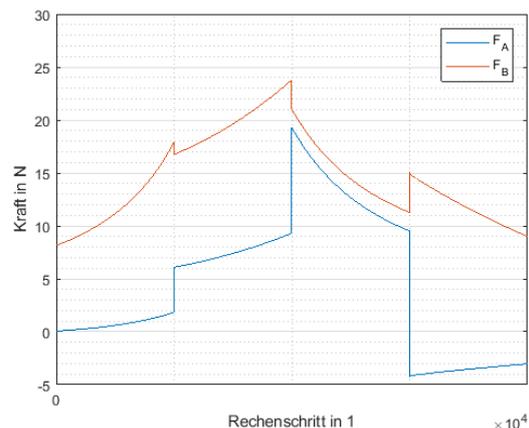


Abbildung 61: Lagerkräfte kalte Seite

Der maximale Betrag der Lagerkraft beträgt 25,520 N. Sie ist im Lager B der heißen Seite in der Mitte des Diagramms zu finden, siehe Abbildung 60. Das gewählte Lager für die Welle hat eine dynamische Tragzahl von 855 N und ist für eine Drehzahl bis 15 000 U/min ausgelegt [39]. Die Lagerlebensdauer kann analog wie in Gleichung (3.14) ermittelt werden, siehe Gleichung (3.28).

$$L_{10h} = \frac{10^6}{\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} f \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}} \left( \frac{\text{dynamische Tragzahl}}{\text{äquivalente dynamische Lagerbelastung}} \right)^3 \quad (3.28)$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} 2 \frac{1}{\text{s}} \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}} \left( \frac{855 \text{ N}}{25,520 \text{ N}} \right)^3 = 5\,223\,000 \text{ h}$$

Bei einer Drehzahl von 2 Hz könnten die Lager über 5,2 Millionen Stunden in Betrieb sein. Das sind 596 Jahre, wenn die Maschine durchgehend im Betrieb ist. Die tatsächliche Lebensdauer wird noch größer sein, weil wir mit der Spitzenbelastung gerechnet haben. Die durchschnittliche Belastung ist im Betrieb geringer. Bei einem gegebenem Innendurchmesser von 10 mm ist das eines der Lager mit den kleinsten Außendurchmessern, daher wird die starke Überdimensionierung in Kauf genommen [40].

Die Lager bei der Leistungsabnahme werden anders angeordnet sein und somit auch anders belastet. Es werden die oben berechneten Lager verwendet, weil ebenfalls eine Welle mit 10 mm Durchmesser verbaut wird. Da das Lager bereits für die nockentragenden Wellen stark überdimensioniert ist, wird auch angenommen, dass es für die Leistungsabnahme überdimensioniert ist. Dafür spricht, dass überall die gleiche Zahnriemenscheibe verwendet wird und daher laufen alle Scheiben mit der gleichen Drehzahl. Zusätzlich wird die abgenommene Leistung betragsmäßig nicht größer sein als die Leistungen der heißen oder kalten Seite. Aus diesen Gründen wird die Lebensdauer der Lager bei der Leistungsabnahme nicht gesondert nachgerechnet.

Der Riemenspanner läuft prinzipiell leistungslos und daher werden die Lager bis auf das Eigengewicht der Bauteile nicht belastet. Daher wird die Lebensdauer dieser Lager ebenfalls nicht nachgerechnet.

### 3.1.9 Fundament

Das Fundament, worauf alle Bauteile montiert sind, soll aus massivem Stahl hergestellt werden. Diverse Bauteile sollen auf das Fundament aufgeschraubt werden. Dabei sollen die Bauteile unten eine Gewindebohrung erhalten und das Fundament eine dazugehörige gesenkte Durchgangsbohrung. Die Oberseite des Fundaments kann ebenfalls Ausfräsungen in Form der Bauteile erhalten, damit ein zusätzlicher Formschluss entsteht. Dieser soll Verschiebungen in der Ebene verhindern. Durch die Modularisierung der Maschine in mehrere Bauteile soll die Fertigung vereinfacht werden.

Da unsere Maschine relativ geringe Kräfte erzeugt, wird auf einen Festigkeitsnachweis des Fundaments und der Schrauben verzichtet.

## 3.2 Konstruktion

### 3.2.1 Nocken

Im MATLAB-Algorithmus wird eine Periode in 100 000 Rechenschritte unterteilt. Somit gibt es auch dieselbe Anzahl an Datenpunkte für die Nocke. Die Datenpunkte wurden aus MATLAB in Microsoft Excel importiert. Mit einem CATIA-eigenen Makro können diese Datenpunkte dann in CATIA übertragen werden. Leider wird die Übertragung mit einer Fehlermeldung unterbrochen. Diese besagt, dass nicht ausreichend Speicherplatz zur Verfügung steht. Deshalb wurde nur jeder 100. Datenpunkt ausgewählt und es verbleiben nur noch 1 000

Punkte zum Importieren. Mit der geringeren Anzahl hat das Importieren funktioniert.

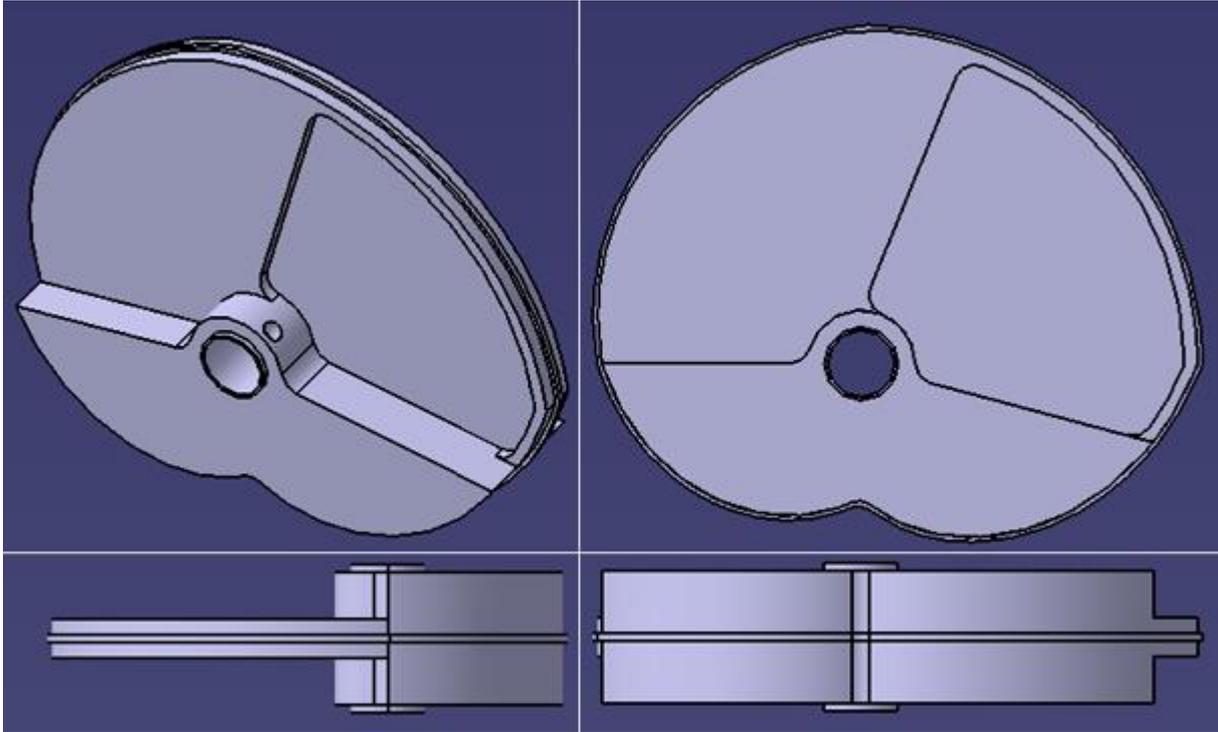


Abbildung 62: konstruierte Nocke

Der Vorsprung zur Führung des Pleuels ist 1 mm breit und 0,7 mm hoch. Die Abrollfläche für die Wälzlager inklusive Vorsprung ist mindestens 6 mm und maximal 20 mm breit. Die Nocke hat eine Gesamtbreite von 22 mm.

Wie erwartet, war der Schwerpunkt der Nocke nicht in der Drehachse. Ohne diverse Anpassungen ist der Schwerpunkt radial 11,92 mm von der Drehachse entfernt. Mit Ausgleichsmassen und Taschen konnte die radiale Entfernung des Schwerpunkts auf 0,01044 mm verringert werden. Dieser Wert wird als akzeptabel betrachtet und es werden keine weiteren Optimierungen des Schwerpunkts durchgeführt.

Die Nocke hat auf der Lauffläche einen spitz zulaufenden Abschnitt, der schwer zu fertigen ist. Darüber hinaus kann die genaue Form sowieso nicht nachgefahren werden, weil das abrollende Wälzlager einen Außendurchmesser von 5 mm hat [34]. Daher wird dieser Abschnitt mit einem Radius von 2,5 mm abgerundet. Die Rundungen in der Tasche haben einen Radius von 3 mm.

Die Gewindestiftbohrung hat ein M4-Gewinde und das Material an der Stelle ist 3 mm dick. Diese Bohrung passt genau zum Gewindestift [41]. Die konstruierte Nocke ist in Abbildung 62 ersichtlich.

### 3.2.2 Lagerbock für die Nockenwellen

Das Lager für die nockentragende Welle hat eine Breite von 4 mm und einen Außendurchmesser von 15 mm [39]. Die Lagerböcke sollen daher auch 4 mm dick sein und in der Breite 21 mm breit. Damit umhüllt mindestens eine 3 mm dicke Materialschicht das Lager.

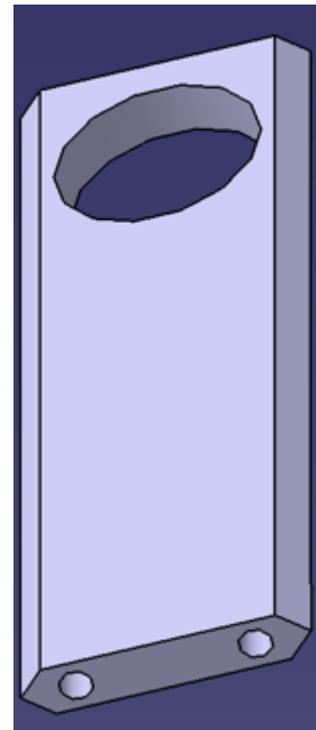


Abbildung 63: Lagerbock für die Nocken

Am Boden erhalten die Böcke zwei Sacklochbohrungen mit Gewinde für M3-Zylinderschrauben. Die Bohrung ist so ausgelegt, dass eine 6 mm lange Zylinderschraube verwendet werden kann. Die Tasche für den Lagerbock im Fundament wird gefräst und die Ecken des Lagerbocks können daher nicht ideal rechtwinkelig sein. Daher erhält der Bock an seinen Ecken jeweils eine 2 mm mal 45° Fase, siehe Abbildung 63.

Der Lagerbock hat eine Gesamthöhe von 67,5 mm. Zwischen Lagerachse und Fundamentoberseite beträgt der Abstand 55 mm. Damit bleibt zwischen Fundament und Nocke ein Mindestabstand von 5 mm.

### 3.2.3 Wellen für die Nocken

Die angebotene Welle mit einem Durchmesser von 10 mm hat eine Länge von 500 mm [22]. Für die Nocke wird ein Wellenstück mit 56 mm abgeschnitten und die Enden erhalten eine Fase mit 0,5 mm mal 45°. Die 56 mm ergeben sich aus der Nocke mit 22 mm Breite, zwei Lager mit 4 mm, der Zahnriemenscheibe mit 25 mm und dem zusätzlichen Abstand von 1 mm zwischen Lager und Zahnriemenscheibe.

Damit die Nocken und Zahnriemenscheiben auf den Wellen genau ausgerichtet werden können, erhalten die Wellen an den Stellen der Gewindeschrauben eine plane Fläche.

Die Welle für die heiße Seite ist in Abbildung 64 ersichtlich und die für die kalte Seite in Abbildung 65. Die plane Fläche am Wellenende ist für die Gewindeschraube der Zahnriemenscheibe und die kleinere plane Fläche ist für die Gewindeschraube der Nocke. Die kleine plane Fläche ist bei beiden Wellen an einer anderen Stelle, weil die Gewindeschraube nur auf einer Seite der Nocke montiert werden kann. Die Nocke der heißen und die der kalten Seite sind ident, sie werden jedoch jeweils in einer anderen Stellung montiert. Bei der Welle der kalten Seite sind die zwei planen Flächen wegen der Zahnriementeilung um 2,672° verdreht, das ist jedoch aufgrund des geringen Winkels kaum sichtbar. Die kleinen planen Fläche beider Wellen werden bei der Montage parallel ausgerichtet, damit die Orientierung der Nocken zueinander stimmt.

Die Welle für die heiße Seite wird unter „3.2.8 Leistungsabnahme“ aus konstruktiven Gründen abgeändert.

### 3.2.4 Regenerator

Der Metallblock für den Regenerator erhält eine Bohrung mit 10 mm Durchmesser und die Bohrung beziehungsweise Regeneratorlänge soll 15 mm lang sein. Die Regeneratorlänge entspricht auch der Dicke des Metallblocks. Die Kanten erhalten eine 2 mm mal 45° Fase, damit der Block besser in das Fundament passt.

Der Block soll am Boden vier Sacklochbohrungen mit M3-Gewinde erhalten. Die Bohrungen sind so ausgelegt, dass eine 6 mm lange Zylinderschraube montiert werden kann.

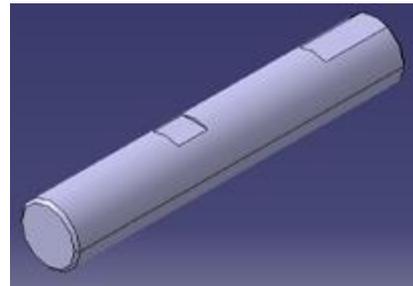


Abbildung 64: Welle für die Nocke der heißen Seite

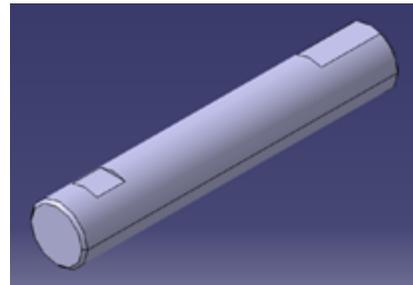


Abbildung 65: Welle für die Nocke der kalten Seite

Die Zylinder sollen angeflanscht werden und deshalb erhält die 10 mm-Bohrung auf jeder Seite 4 M3-Sacklochbohrungen. Diese sind für eine 5 mm lange Zylinderschraube ausgelegt. Damit das Maschengewebe nicht in den Zylinder wandert, soll die erste und letzte Gewebelage formschlüssig gesichert werden. Dafür erhält die 10 mm-Bohrung auf beiden Seiten eine Plansenkung mit 1 mm Tiefe und einem Durchmesser von 12 mm. Das Regeneratorgewebe hat eine Drahtdicke von 0,5 mm [14] und eine Gewebeschicht ist somit 1 mm dick, welches genau in die Plansenkung passt. Wenn die erste und letzte Lage einen Durchmesser von 12 mm haben und die Zylinder mit einem Innendurchmesser von 10 mm angeflanscht werden, sind die genannten Lagen formschlüssig gesichert. Durch diese Sicherungsart erhöht sich das Regeneratorvolumen, welches jedoch vernachlässigt wird.

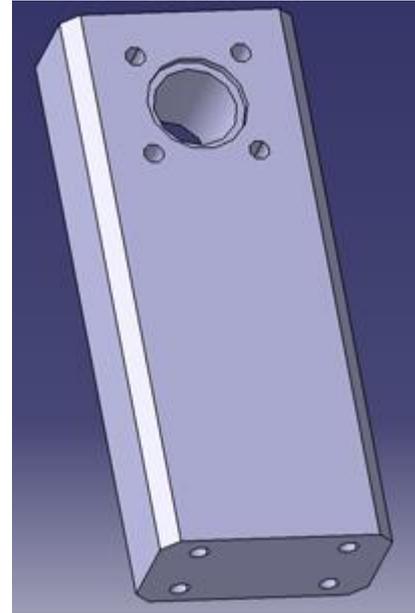


Abbildung 66: Regenerator

Der Regenerator ist in Abbildung 66 ersichtlich.

### 3.2.5 Zylinder

Die Zylinder sind von Flanschfläche bis zum Ende 38 mm lang. Die Bohrung ist 10 mm groß und die Wanddicke beträgt 0,5 mm. Der Flansch ist 1 mm dick und besitzt vier Durchgangsbohrungen mit einem Durchmesser von 4 mm für die M3-Zylinderschrauben.

Die Mantelfläche des Hubsraums ist für die Wärmeübertragung relevant. Der Hub beginnt bei der Flanschfläche und deshalb steht für die Wärmeübertragung der 1 mm vom Flansch nicht mehr zur Verfügung. Das heißt, dass bei einem Hub von 30 mm nur noch 29 mm für die Wärmeübertragung berücksichtigt werden darf. Dieser Unterschied wird für das Modell vernachlässigt. Der Zylinder ist in Abbildung 67 dargestellt.

Wie erwähnt, erfährt der Zylinder eine Wärmeausdehnung. Um eine Kollision mit der Nocke zu vermeiden, wird das Ende des Zylinders abgerundet, siehe Abbildung 68. Die Nocke hat einen maximalen Radius von 50 mm, siehe Abbildung 37. Daher wird das Ende des Zylinders mit dem gleichen Radius abgerundet.

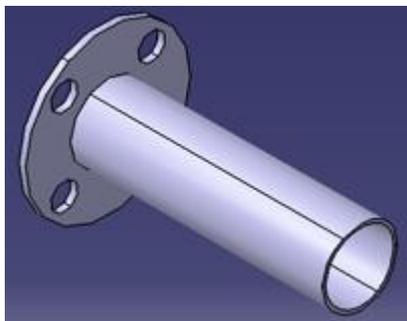


Abbildung 67: Zylinder

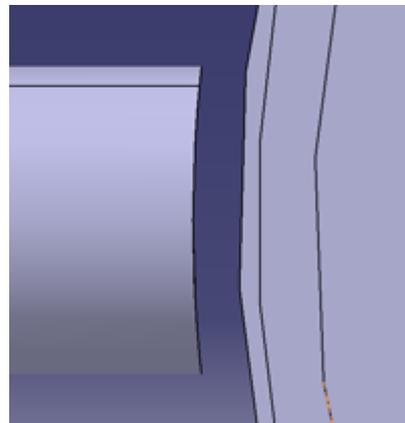


Abbildung 68: Abrundung des Zylinders

Das Bauteil wird aus einem Rohling hergestellt. Alternativ hätte es auch aus einem Rohr und einer Scheibe hergestellt werden können. Beide Teile werden zusammen verlötet und dabei wird weniger Material benötigt als bei einer Fertigung aus einem Rohling. Die alternative Methode ist zwar kostengünstiger, aber die meisten Rapid Prototyping-Unternehmen verlöten keine Teile. Sie bieten nur eine CNC- oder Drehfertigung an und aus diesem Grund soll der Zylinder aus einem Rohling gefertigt werden.

### 3.2.6 Kolben mit Pleuel

Die Pleuellänge inklusive Kolbenhöhe  $d_p$  beträgt 40 mm. Das Maß  $d_p$  geht von der Kolbenoberfläche bis zur Nockenoberfläche, siehe Abbildung 36. Der gefertigte Kolben mit Pleuel kann auch tatsächlich so lang werden, wenn er auf der Nocke gleiten würde. Zur Minimierung der Reibungsverluste werden Wälzlager eingesetzt, die auf der Nocke abrollen. Daher wird die Gesamtlänge des Kolbens mit Pleuel nur 39,5 mm betragen. Die 0,5 mm zur Nocke überbrückt das teilweise rausstehende Wälzlager. Die Wälzlager sollen auf einer Achse mit 2 mm Durchmesser montiert werden. Daher erhält das Pleuelende eine durchgehende Bohrung mit 2 mm Durchmesser.

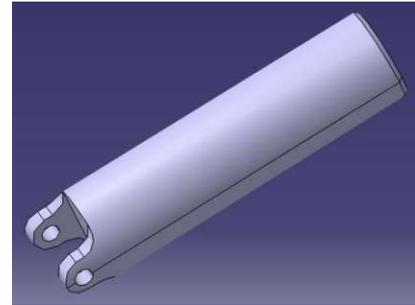


Abbildung 69: Kolben mit Pleuel

Auf der anderen Seite erhält der Kolben eine Fasse mit 0,5 mm mal 45°, um ein Verkanten im Zylinder zu verhindern. Der Durchmesser vom Kolben mit Pleuel beträgt 10 mm. Das Bauteil ist in Abbildung 69 dargestellt.

Mit dem Schwerpunktsatz kann jetzt explizit kontrolliert werden, ob der Kolben der Nocke folgen kann, siehe Gleichung (3.29). Die dazugehörige Skizze ist in Abbildung 70 ersichtlich.

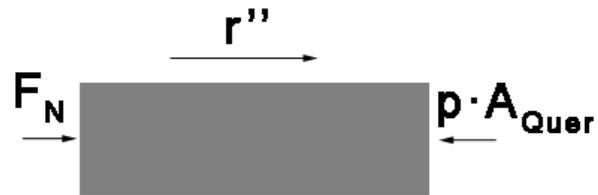


Abbildung 70: Kräfte auf den Kolben

$$m \ddot{r} = F_N - p A_{\text{Quer}} \quad (3.29)$$

Der Kolben hat eine Masse  $m$  von 0,022 kg, wenn eine Dichte von 7 850 kg/m<sup>3</sup> angenommen wird [32]. Die Querschnittsfläche  $A_{\text{Quer}}$  multipliziert mit dem momentanen Druck  $p$  ergibt die momentane Druckkraft des Fluids auf den Kolben. Die Beschleunigung des Kolbens wird aus dem Radius der Nocke berechnet. Dafür wird die zweite Ableitung mit einem Differenzenquotient angenähert, siehe Gleichung (3.30).

$$\ddot{r}[t] \approx \frac{r[t + \Delta t] - 2r[t] + r[t - \Delta t]}{\Delta t^2} \quad (3.30)$$

Wenn die Kraft des Kolbens auf die Nocke  $F_N$  kleiner null wird, dann hebt der Kolben von der Nocke ab. Daher wird die Gleichung (3.29) nach  $F_N$  umgeformt, siehe Gleichung (3.31).

$$F_N = m \ddot{r} + p A_{\text{Quer}} \quad (3.31)$$

Die Formeln wurden mit MATLAB ausgewertet und wir erhalten die Verläufe für die Kraft  $F_N$  in Abbildung 71.

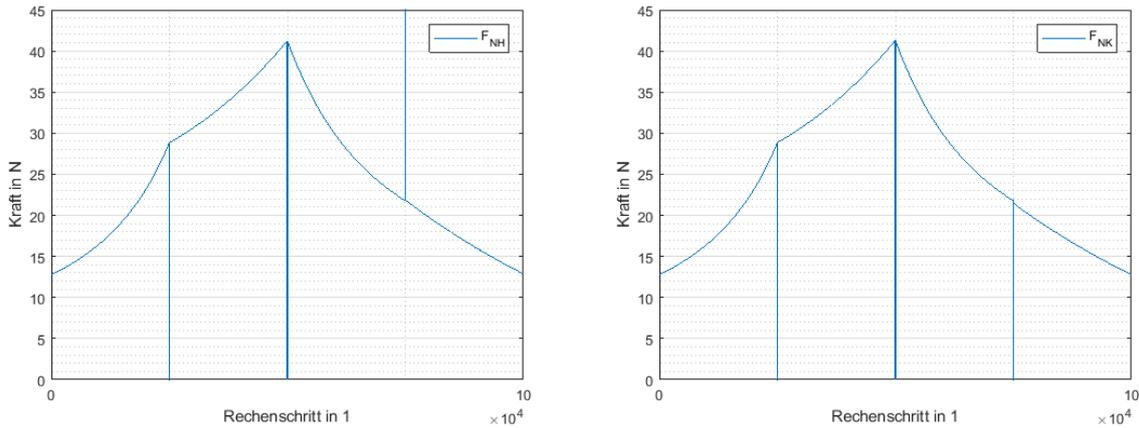


Abbildung 71: Verlauf der Kraft  $F_N$  der heißen Seite (links) und der kalten Seite (rechts)

In Abbildung 71 ist ersichtlich, dass die Kräfte stets größer null sind. Das heißt, dass die Kolben immer auf die Nocken drücken und nicht abheben. Die abgebildeten Verläufe sind qualitativ fast ident mit den Druckverläufen. Der Grund dafür ist, dass die Massenkräfte sehr gering sind. An den nicht tangenzenstetigen Stellen ist der Kraftverlauf nicht stetig.

### 3.2.7 Achse für das Pleuel

Die Wälzlager für das Pleuel werden auf einer Achse mit 2 mm Durchmesser montiert. Der Händler bietet diese Achsen mit einer Länge von 500 mm an [22]. Davon soll ein 10 mm langes Stück abgeschnitten werden, weil das Pleuel auch nur einen Außenradius von 10 mm hat. Zur leichteren Montage erhalten die Enden eine 0,5 mm mal 45° Fase. Die Fasen dienen auch dazu, dass die Kanten der Achse nicht aus dem Pleuel herauschauen und mit dem Zylinder kollidieren. Der Zylinderinnendurchmesser und die Achsenlänge betragen jeweils genau 10 mm. Die Achse ist in Abbildung 72 dargestellt.

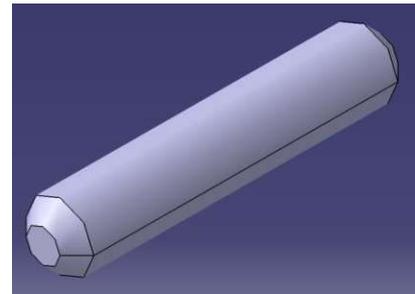


Abbildung 72: Achse für das Pleuel

### 3.2.8 Leistungsabnahme

Die Leistung der Maschine soll vom Zahnriemen über eine Riemenscheibe abgenommen werden. Die Leistung wird auf eine Welle übertragen und eine auf der Welle befestigte Schnur soll eine Masse hochziehen. Durch das Heben der Masse soll die Leistung verbraucht werden.

Leider ist erst im 3D-Modell aufgefallen, dass die Zahnriemenscheiben (im Screenshot schwarz transparent dargestellt) in der Konstruktion nicht viel Platz haben, siehe Abbildung 73. Die mittlere untere Zahnriemenscheibe ist für die Leistungsabnahme vorgesehen. Die Zahnriemenscheibe darüber sollte als Riemenspanner dienen. Es könnte eine Konstruktion entwickelt werden auf die die mittleren Riemenscheiben montiert werden. Jedoch wird die Konstruktion relativ aufwendig und daher wird die geplante Variante der Leistungsabnahme verworfen.

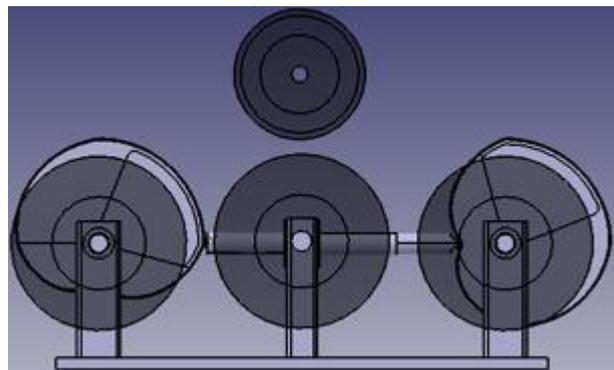


Abbildung 73: Bauraumanalyse der Zahnriemenscheiben

Bei der verworfenen Variante soll eine Schnur mit einer Welle aufgewickelt werden und die Schnur zieht eine Masse hoch. Dafür ist gar keine eigene Scheibe mit Welle notwendig. Die Welle auf der heißen oder kalten Seite kann einfach verlängert werden und auf der wird eine Schnur befestigt. Durch Entfall der Scheibe für die Leistungsabnahme bleibt genügend Platz für den Riemenspanner übrig. Da die heiße Seite als Antrieb betrachtet wird, wird diese Welle verlängert.

Die Welle für die Nocke der heißen Seite wird um 30 mm verlängert und ist jetzt 86 mm lang. Sie erhält eine 2 mm-Durchgangsbohrung für die Schnur und diese ist 10 mm vom Rand entfernt platziert, siehe Abbildung 74.

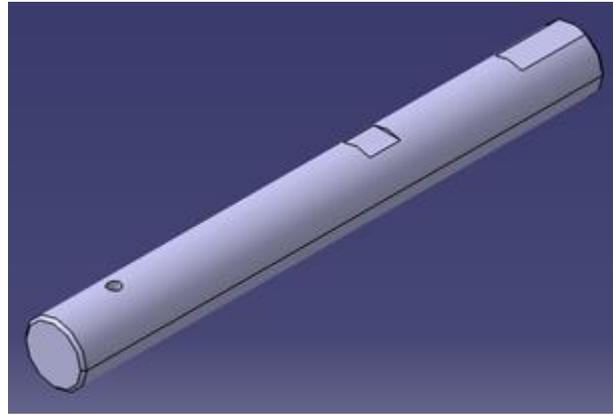


Abbildung 74: Welle der heißen Seite

Weil die Welle der heißen Seite jetzt anders belastet wird, müsste die Lebensdauer der Lager neu berechnet werden. Es wird davon ausgegangen, dass die neue Belastung nicht um ein Vielfaches größer als die Alte sein wird. Da die Lager bereits extrem überdimensioniert sind, wird daher auf eine neue Berechnung verzichtet.

Die Welle selbst ist nach wie vor ausreichend gegen Verdrehung dimensioniert. Das maximale Moment hat sich durch die längere Welle nicht verändert und daher genügt nach wie vor ein Durchmesser von 10 mm, siehe „3.1.1 Welle“.

Hinsichtlich der Durchbiegung hat sich die Belastung schon geändert. Wird die Welle nur durch die maximale Kolbenkraft mittig belastet, darf die Welle nicht länger als knapp 200 mm lang sein, um die zulässige Durchbiegung nicht zu überschreiten. Jetzt wird die Welle zusätzlich durch die Gewichtskraft der zu hebenden Masse belastet. Die Masse beträgt 0,60433 kg und das entspricht einer Gewichtskraft von 5,9285 N. Die maximale Kolbenkraft beträgt 41,307 N und ist fast sieben Mal so groß wie Gewichtskraft. Weil die jetzige Welle nur 86 mm lang und die Gewichtskraft um ein Vielfaches kleiner als die maximale Kolbenkraft ist, wird davon ausgegangen, dass die Welle ausreichend gegen Durchbiegung dimensioniert ist. Daher wird auf eine neue Berechnung verzichtet.

### 3.2.9 Riemenspanner – Tragarm

Der Riemen soll von einer Zahnriemenscheibe unter dessen Eigengewicht gespannt werden. Dafür sind zusätzlich ein Tragarm für die Scheibe und eine Befestigung für den Tragarm auf dem Fundament notwendig. Durch den Tragarm kann sich die Scheibe auf einer Kreisbahn bewegen.

Die Zahnriemenscheibe hat einen Innendurchmesser von 8 mm [30]. Daher soll der Tragarm zwei Durchgangsbohrungen mit 9 mm erhalten, worin sich die Achsen frei drehen können. Die Bohrungen erhalten auf jeder Seite zusätzlich eine Plansenkung mit 3,5 mm Tiefe und einem Außendurchmesser von 12 mm. Die Dimension der Senkung entspricht die der Lager und darin sollen sie auch montiert werden [42]. Zwischen den Lagersenkungen auf einer Achse ist 4 mm

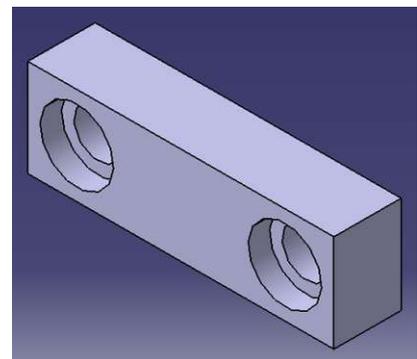


Abbildung 75: Tragarm

Material und daher ist der Tragarm 11 mm dick. Zwischen den Bohrungsachsen ist ein Abstand von 34 mm und der gesamte Tragarm ist 50 mm lang. Die Dimension des Arms ist so gewählt, dass sich zwischen einer Bohrung und dem Rand mindestens 2 mm Material befindet.

Durch die Achsen ist der Tragarm mit der Befestigung auf dem Fundament und der Scheibe drehbar verbunden. Eine Drehung erfolgt lediglich in den Lagern des Tragarms. Pro Achse wird ein Lager als Festlager und eines als Loslager verwendet. Die Außenringe sollen alle im Tragarm gesichert werden. Ein Innenring pro Achse wird gesichert und der andere nicht, um eine Fest-Los-Lagerung zu realisieren. Die Sicherung kann über eine stoffschlüssige Verbindung, zum Beispiel flüssige Schraubensicherung, erfolgen. Das sollte ausreichen, weil der Riemenspanner bis auf Eigengewicht und Reibung nicht belastet wird.

Der Tragarm ist Abbildung 75 in ersichtlich.

### 3.2.10 Riemenspanner – Befestigung

Die Befestigung erhält eine Durchgangsbohrung mit 8 mm Durchmesser, damit die Achse aufgenommen werden kann. Die Achse wird mit einer stoffschlüssigen Verbindung, zum Beispiel flüssige Schraubensicherung, gesichert. Die Befestigung ist ebenfalls wie der Tragarm 11 mm dick. Auf der Unterseite befinden sich 2 M3-Gewindebohrungen, damit das Bauteil auf dem Fundament montiert werden kann. Die Bohrungen sind so dimensioniert, dass 6 mm lange Zylinderschrauben montiert werden können. Die Bohrungsachse für den Tragarm befindet sich 113 mm über der Fundamentoberfläche. Damit die Befestigung besser in das Fundament passt, werden die Ecken mit 2 mm mal 45° angefast.

Die Befestigung ist in Abbildung 76 ersichtlich.

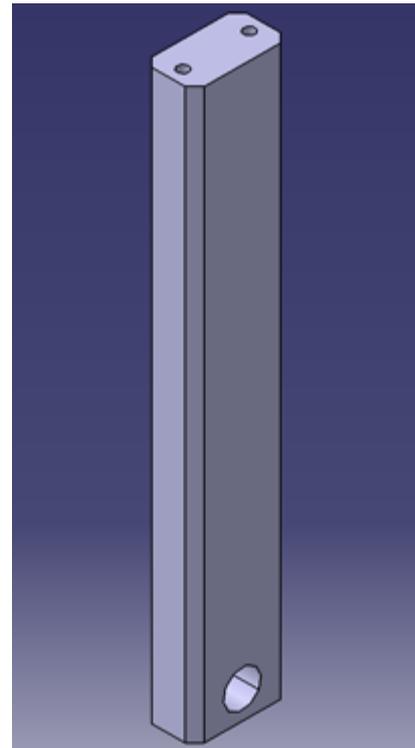


Abbildung 76: Befestigung des Tragarms

### 3.2.11 Riemenspanner – Achsen

Die Achsen für den Tragarm sind unterschiedlich lang. Der Tragarm ist genauso wie die Befestigung 11 mm dick und dazwischen soll ein Spalt von 1 mm sein. Das ergibt eine Länge von 23 mm für die Achse zwischen Befestigung und Tragarm.

Der Tragarm ist wie erwähnt 11 mm dick und die Zahnriemenscheibe 25 mm [30]. Mit einem Spalt von 1 mm dazwischen ergibt das eine Länge von 37 mm für die Achse zwischen Tragarm und Scheibe.

Die Enden beider Achsen sollen zur leichteren Montage eine Fase mit 0,5 mm mal 45° erhalten. Die Achsen haben einen Durchmesser von 8 mm, welches gleich dem Innendurchmesser der Scheibe entspricht [30].

Die Achsen sind in Abbildung 77 und Abbildung 78 ersichtlich.

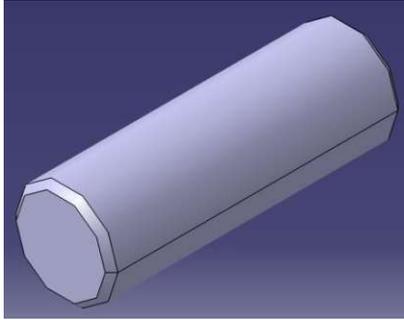


Abbildung 77: Achse zwischen Befestigung und Tragarm

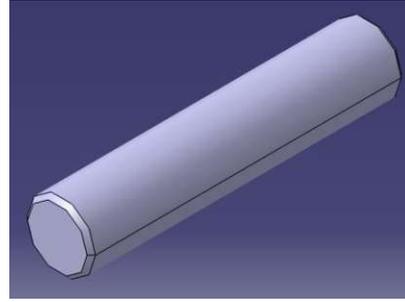


Abbildung 78: Achse zwischen Tragarm und Scheibe

### 3.2.12 Riemen

Durch die Änderung der Leistungsabnahme entfällt eine Zahnriemenscheibe. Jetzt genügt ein Zahnriemen, der nur die Scheiben der heißen und kalten Seite umlaufen kann. Die als Riemenspanner dienende Scheibe muss bei der Berechnung der Riemenlänge nicht berücksichtigt werden, weil sie frei platziert werden kann. Sie wird sinnvollerweise zwischen der heißen und kalten Seite platziert. Dadurch kann sie auf dem Riemen abrollen und diesen spannen.

Zur Berechnung der Riemenlänge wird die Gleichung (3.32) verwendet. Die Riemenlänge berechnet sich aus zwei Mal dem Achsabstand plus zwei Mal dem halben Scheibenumfang. Der Achsabstand wurde bereits in Gleichung (3.9) bestimmt und beträgt 195 mm. Die verwendeten Scheiben haben einen Durchmesser von 84 mm [30].

$$\text{Riemenlänge} = 2 \text{ Achsabstand} + \pi \text{ Scheibendurchmesser} \quad (3.32)$$

$$\text{Riemenlänge} = 2 \cdot 195 \text{ mm} + \pi \cdot 84 \text{ mm} = 653,89 \text{ mm}$$

Die benötigte Riemenlänge beträgt laut Gleichung (3.32) 653,89 mm. Der Händler bietet ein Riemen mit einer Länge von 660,4 mm an und dieser soll verwendet werden [27]. Der etwas längere Riemen sollte kein Problem darstellen, weil er durch den Riemenspanner gespannt wird.

Der Riemen ist beispielhaft in Abbildung 79 dargestellt.

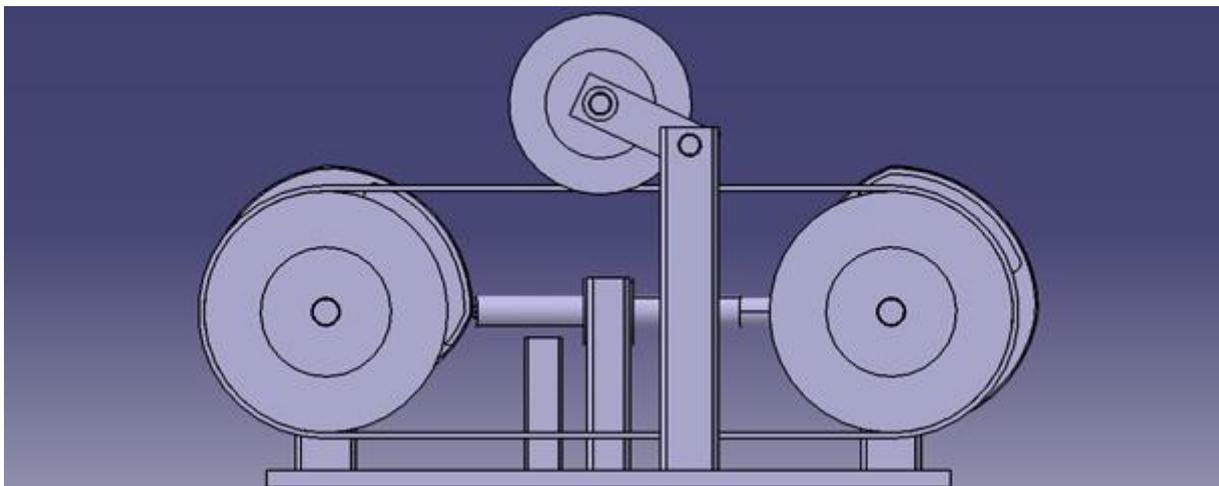


Abbildung 79: Riemen

### 3.2.13 Fundament

Auf dem Fundament sollen alle Bauteile montiert werden. Auf der Oberseite hat das Fundament Taschen, damit die Bauteile formschlüssig in der Ebene gesichert werden. Diese Taschen sind 2 mm tief. Auf der Unterseite befinden sich gesenkte Bohrungen für die Zylinderschrauben. Die Senkungen sind alle 3 mm tief und das Fundament hat eine Dicke von 7 mm. Das heißt, dass zwischen Tasche und Senkung 2 mm Material verbleibt. Alle Ecken der Taschen werden mit einem Radius von 2 mm verrundet.

Das Feuerzeug hat eine Breite von 38 mm, eine Dicke von 13 mm und eine Höhe (vom Feuerzeugboden bis zum oberen Ende des „Kamins“) von 52 mm, siehe Abbildung 80 und Abbildung 81.

Der Abstand zwischen der Außenoberfläche des Arbeitszylinders und der Fundamentoberseite beträgt 49,5 mm. Würde man das Feuerzeug nur auf das Fundament stellen, würde es mit dem Zylinder kollidieren. Um das Feuerzeug zu sichern, soll das Fundament eine durchgehende Tasche erhalten, worin das Feuerzeug hineingestellt werden kann. Von der Unterseite des Fundaments bis zur Zylinderaußenoberfläche beträgt der Abstand 56,5 mm, welcher ausreichend für das Feuerzeug ist. Die Tasche wird in der Länge und in der Breite um 1 mm größer als das Feuerzeug gemacht, um eine leichtere Handhabung zu ermöglichen. Die Tasche ist so platziert, dass die Flamme möglichst mittig unter dem Arbeitsvolumen ist.



Abbildung 80: Feuerzeug vorne



Abbildung 81: Feuerzeug seitlich

Das Fundament ist in Abbildung 82 und Abbildung 83 ersichtlich.

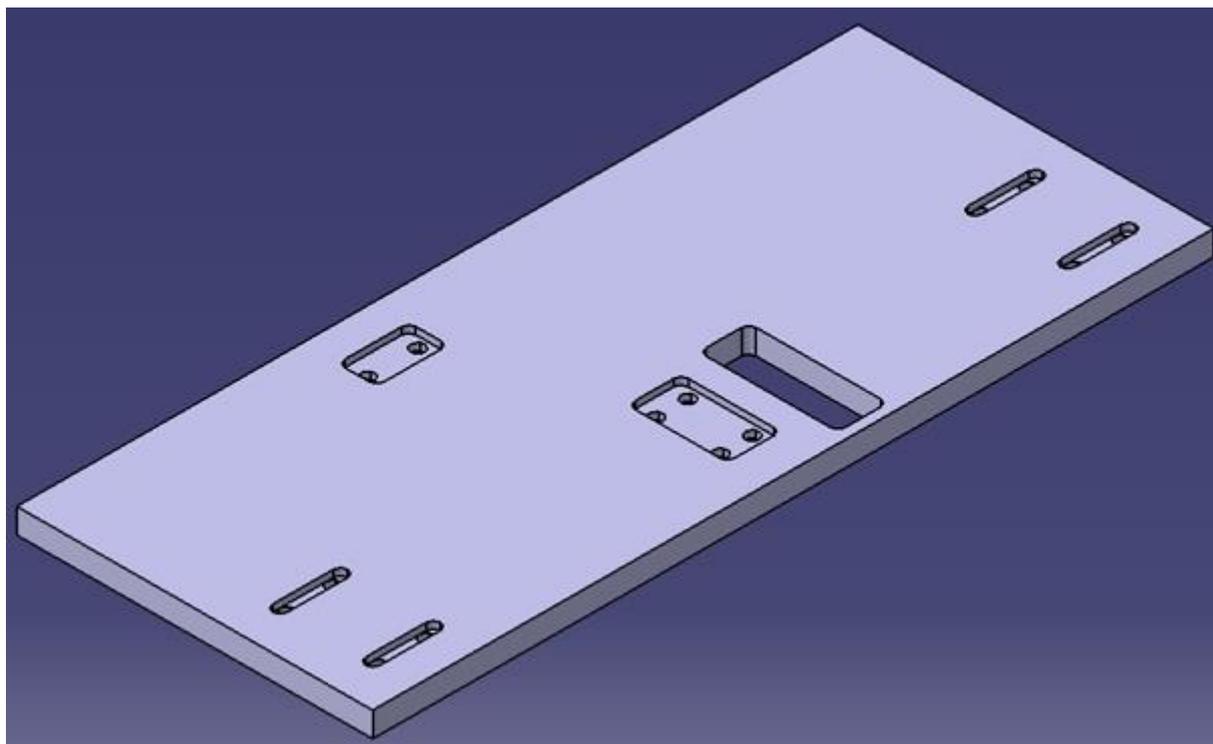


Abbildung 82: Fundament Oberseite

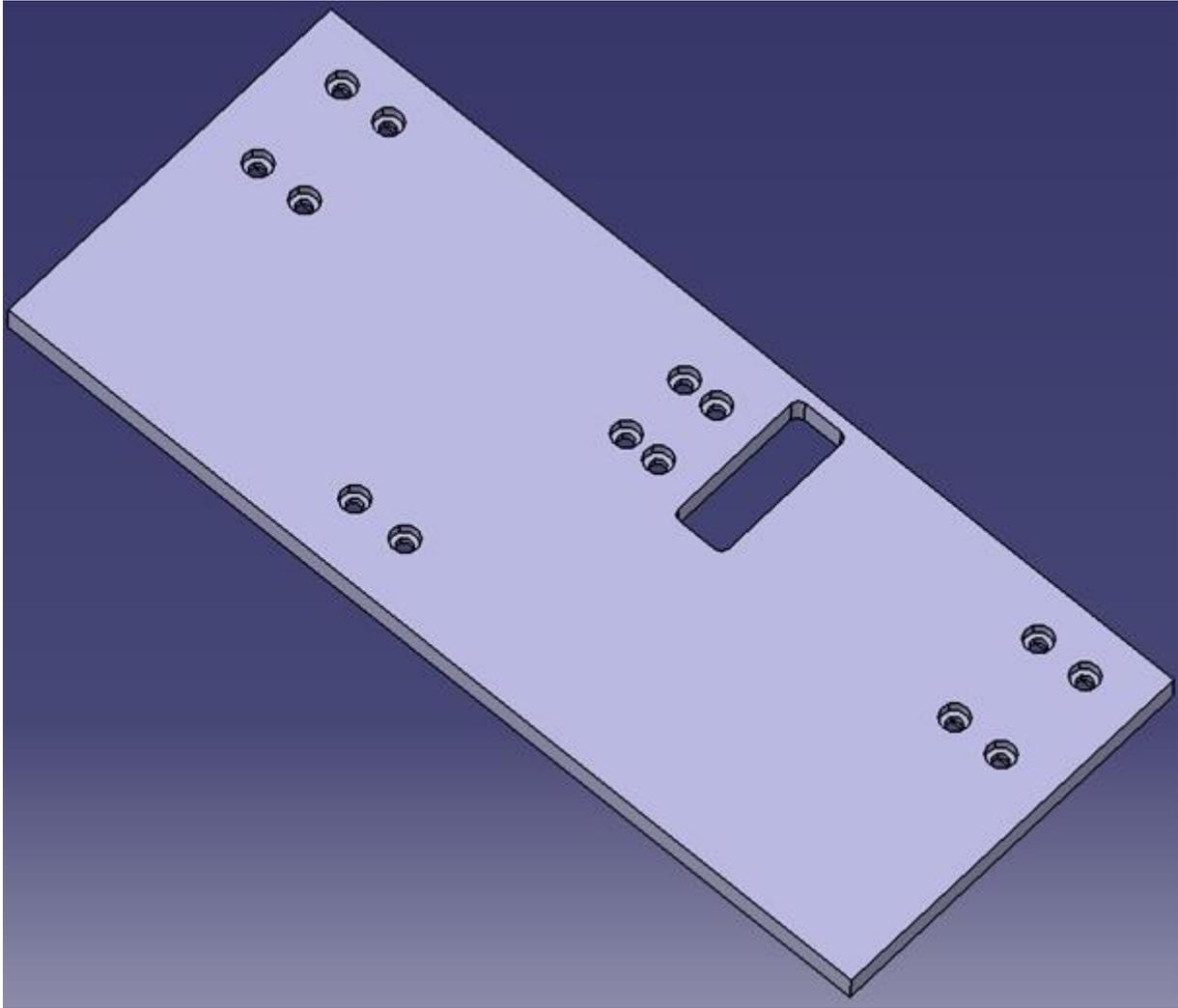


Abbildung 83: Fundament Unterseite

### 3.2.14 Gesamtmodell

In den folgenden Screenshots ist die fertige Baugruppe abgebildet. Der große Block unter einem der Zylinder soll das Feuerzeug darstellen.

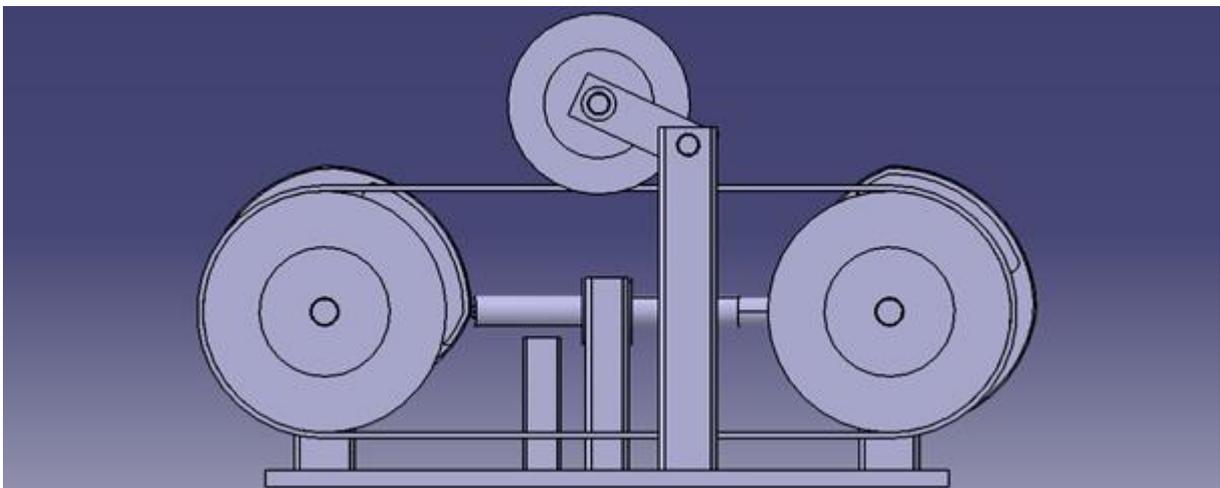


Abbildung 84: Gesamtmodell vorne

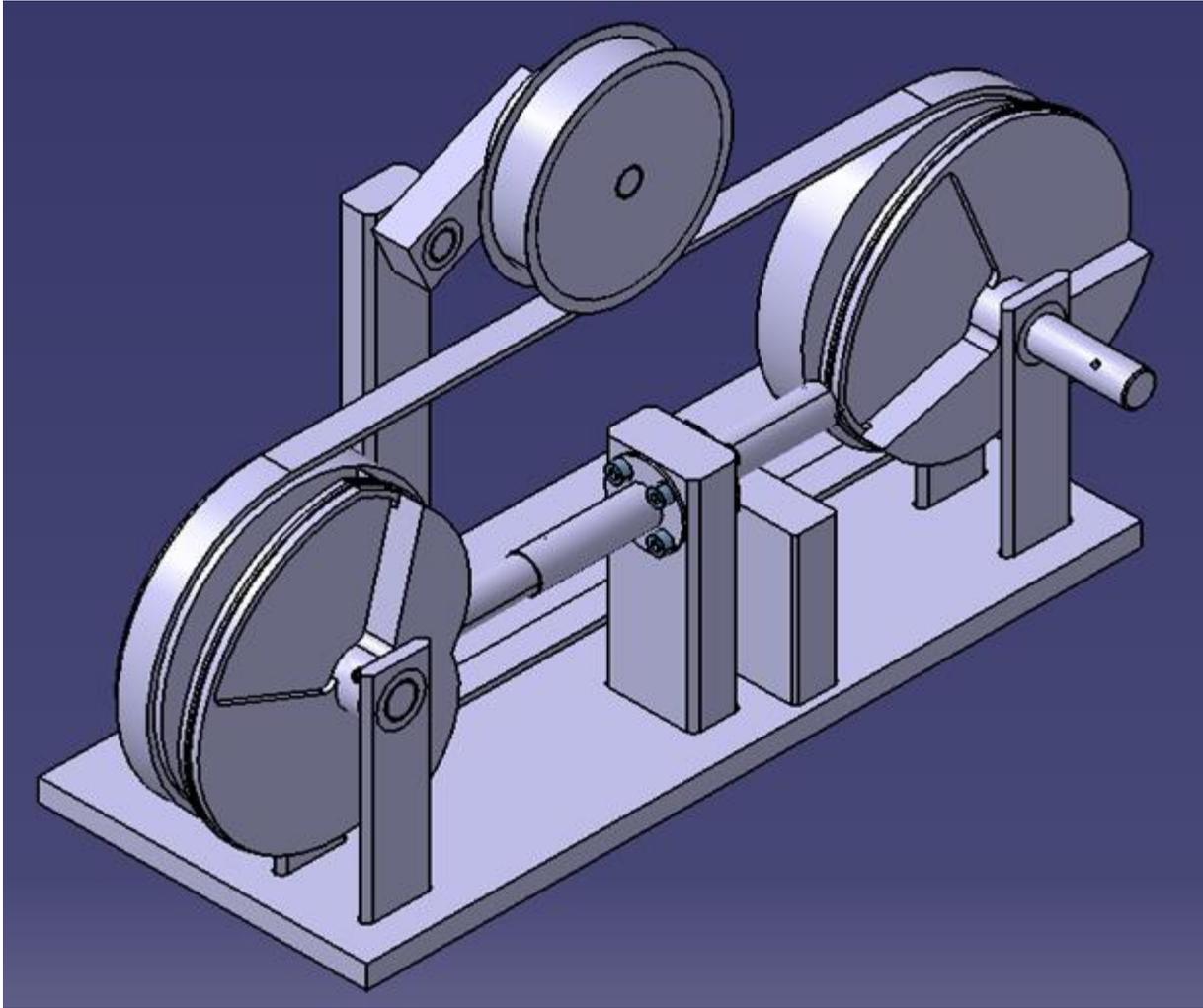


Abbildung 85: Gesamtmodell schräg hinten

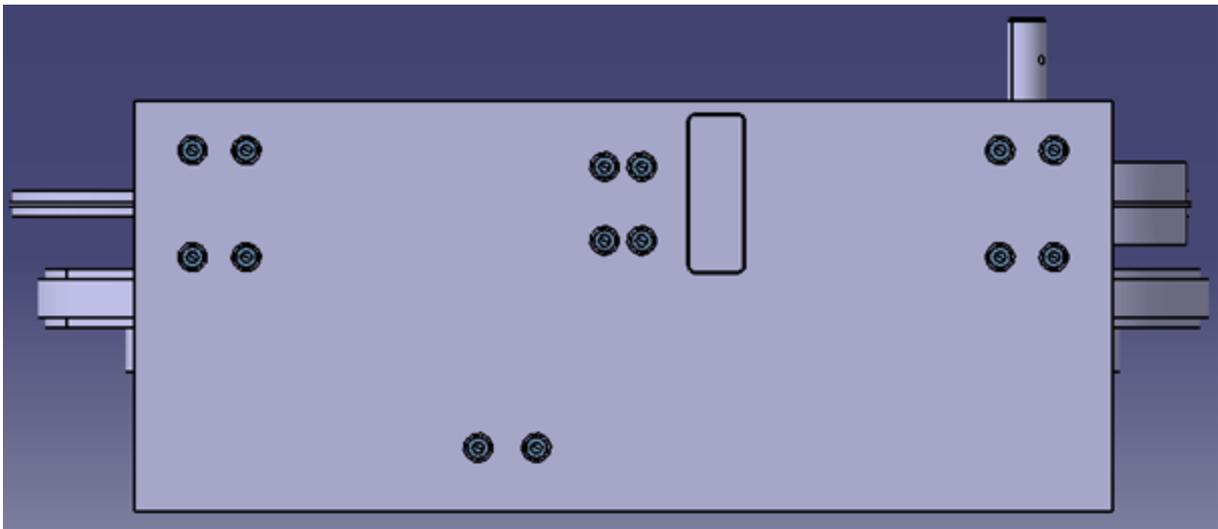


Abbildung 86: Gesamtmodell unten

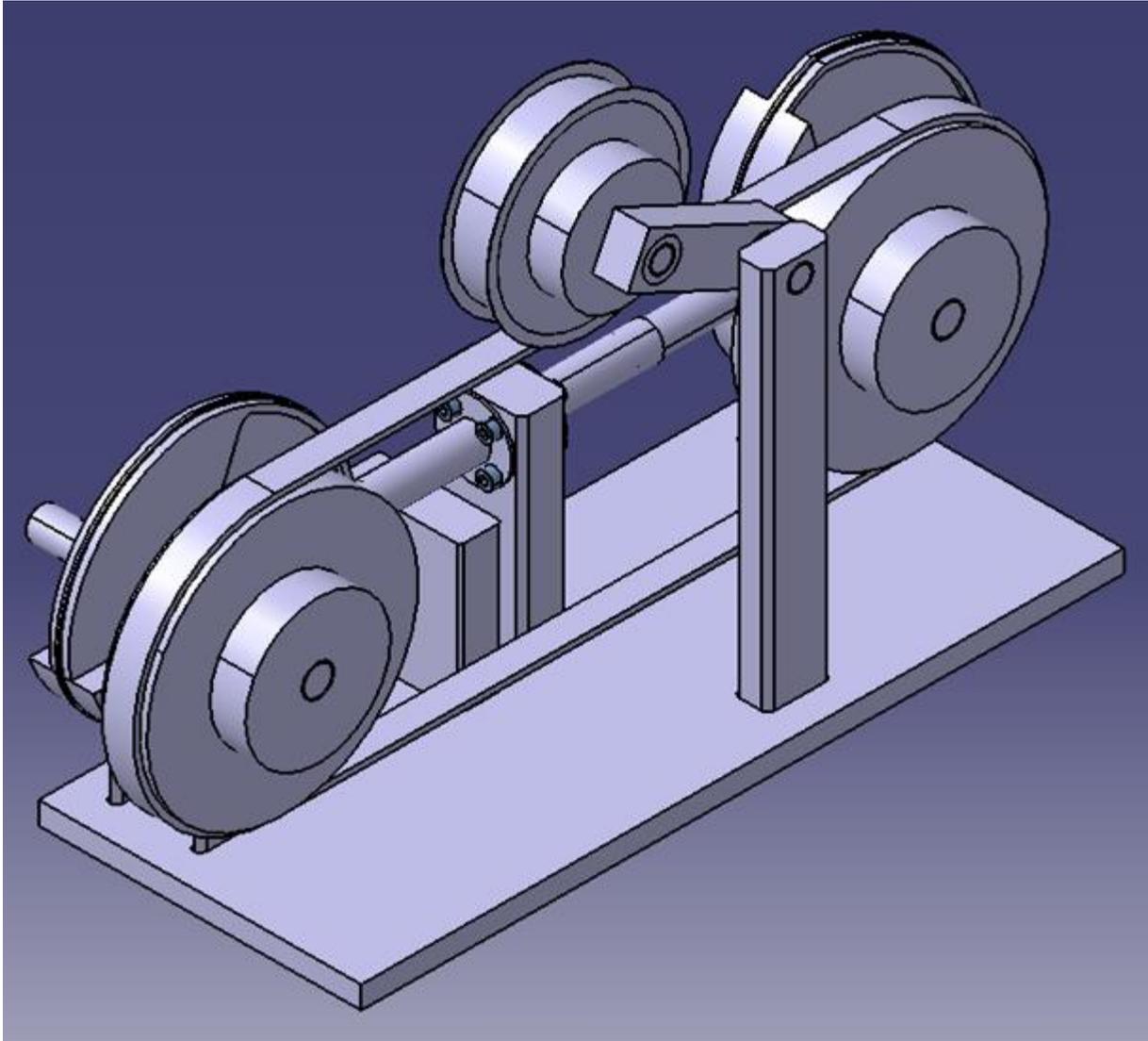


Abbildung 87: Gesamtmodell schräg vorne

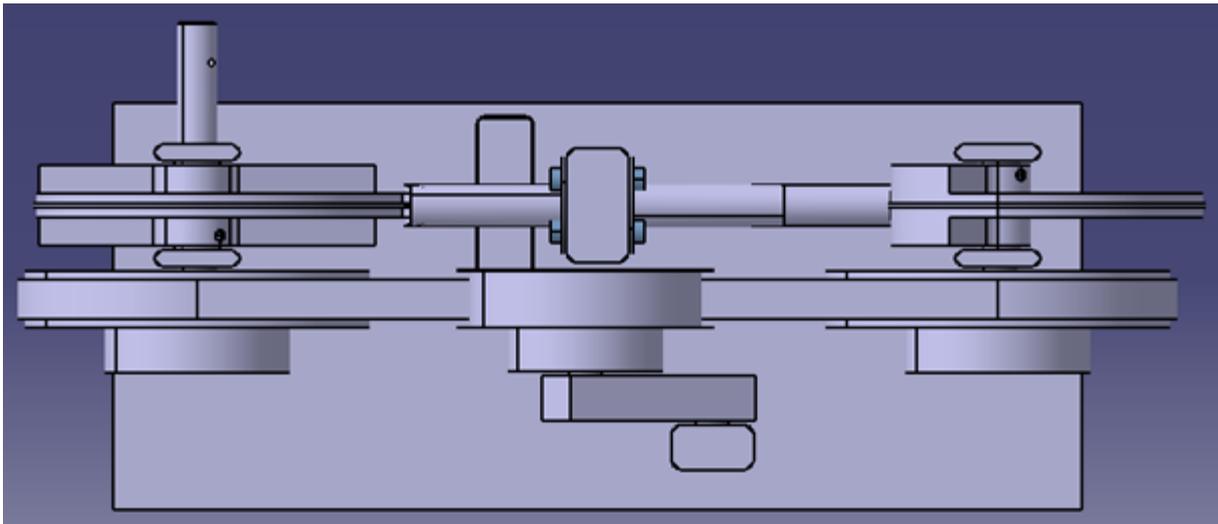


Abbildung 88: Gesamtmodel oben

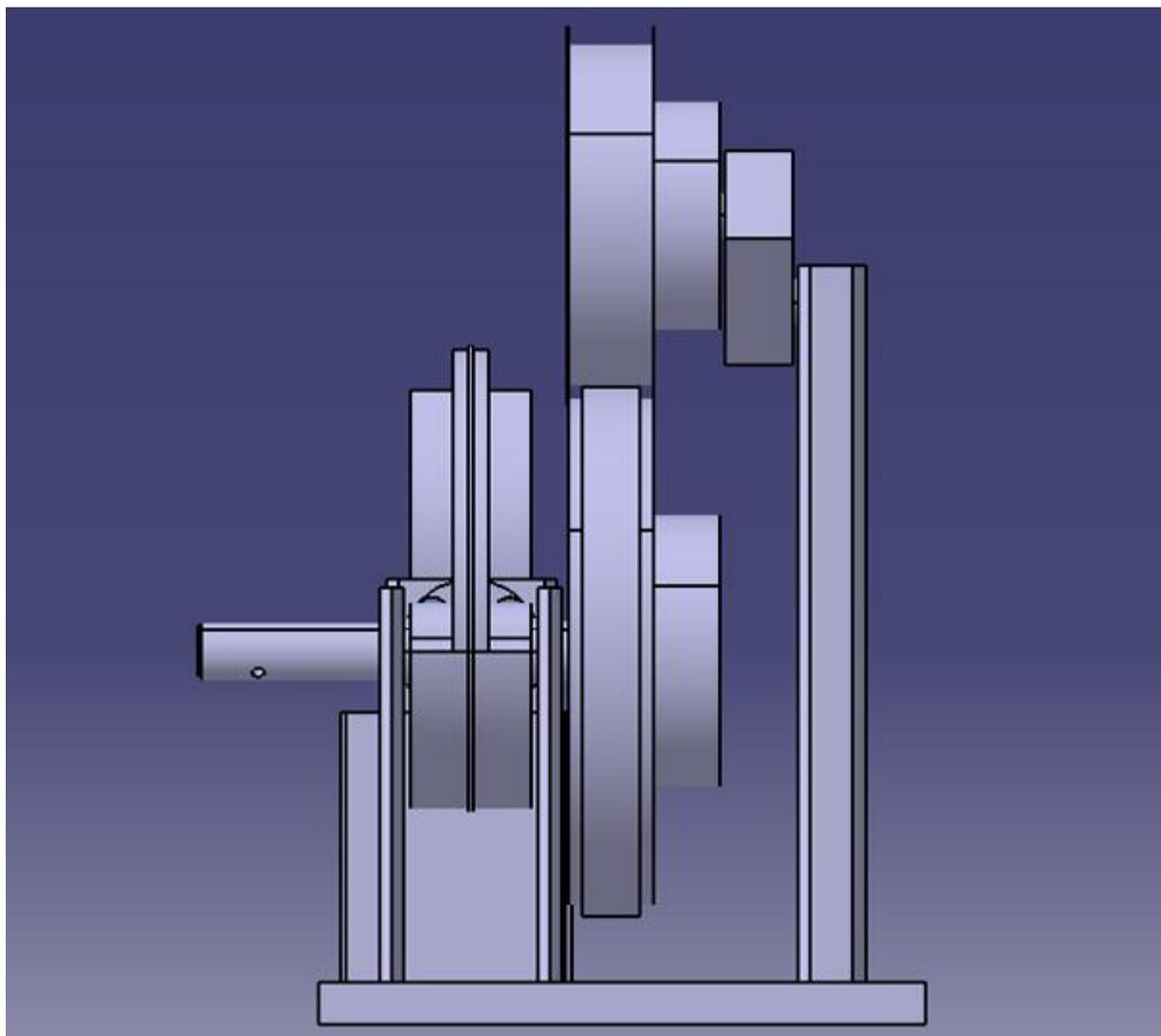


Abbildung 89: Gesamtmodell seitlich



misches Modell der Maschine erstellt werden. Für das Anschauungsmodell werden diese Wärmeflüsse vernachlässigt.

Der Wärmefluss zwischen Zylinderflansch und Regenerator kann vermindert werden, indem ein Wärmeisolator dazwischen eingesetzt wird. Diese Idee wird jedoch aus Gründen der Einfachheit und aus Kostengründen nicht weiter verfolgt.

Die hier konstruierte Stirlingmaschine ist bei den Kolben nicht zusätzlich abgedichtet. Die Kolben werden mit Bremspaste geschmiert und dadurch soll das radiale Spiel abgedichtet werden. Beim Prototyp soll untersucht werden, ob die Maschine so tatsächlich auch funktioniert. Als Anschauungsmodell wird die Maschine nicht stundenlang im Betrieb sein und es genügt, wenn sie rund eine Viertel Stunde laufen kann, bevor zu viel Fluid entwichen ist. Falls die Bremspaste zum Abdichten nicht ausreicht, müssen zusätzliche Dichtungselemente berücksichtigt werden.

Bei den Dichtungselementen müssen einige Punkte beachtet werden. Bei hohen Temperaturunterschieden, funktioniert das Abdichten besonders schlecht. Die Dichtungen sollen daher in einen „kühlere“ Bereich gelegt werden. Der kühlere Bereich können mit Kühlrippen versehen werden. Die nächste Frage ist, ob der Kolben Dichtflächen haben soll oder lediglich Kolbenringe. Es können lange hohle Kolben mit dünnen Wandstärken verwendet werden, um den Wärmetransport gering zu halten. Da unser Kolben größeren Querkräften ausgesetzt ist, ist der Abstand der Dichtungen zueinander für die mechanische Stabilität ausschlaggebend. Bei einem zu kurzen Abstand könnte sich der Kolben im Zylinder verkanten.

## 4 Beschaffung

### 4.1 Stückliste

Es wird eine Stückliste erstellt, um zu ermitteln welche Teile und wie viele davon für eine Stirlingmaschine benötigt werden. Die Stückliste ist in Tabelle 13 ersichtlich.

Tabelle 13: Stückliste

Teilnummer	Bezeichnung	Menge	Werkstoff	Bemerkung
1	Fundament	1	S235	Eigenfertigung
2	Nocke	2	S235	Eigenfertigung
3	Kugellager, Innen-Ø 10 mm, Außen-Ø 15 mm	4	Chromstahl [39]	Zukaufteil
4	Lagerbock für die Nocken	4	S235	Eigenfertigung
5	Welle kalte Seite (56 mm lang)	1	115CrV3 [22]	Eigenfertigung
6	Welle heiße Seite (86 mm lang)	1	115CrV3 [22]	Eigenfertigung
7	Zahnriemenscheibe 52 Zähne	2	Aluminium [30]	Zukaufteil
8	Regenerator	1	S235	Eigenfertigung
9	Zylinder	2	CW004A	Eigenfertigung
10	Kolben mit Pleuel	2	S235	Eigenfertigung
11	Achse Pleuel (10 mm lang)	2	115CrV3 [22]	Eigenfertigung
12	Kugellager, Innen-Ø 2 mm, Außen-Ø 5 mm	4	Edelstahl [34]	Zukaufteil
13	Zahnriemenscheibe 35 Zähne	1	Aluminium [30]	Zukaufteil
14	Riemenspanner Fundament	1	S235	Eigenfertigung
15	Riemenspanner Tragarm	1	S235	Eigenfertigung
16	Kugellager, Innen-Ø 8 mm, Außen-Ø 12 mm	4	Chromstahl [42]	Zukaufteil
17	Achse Befestigung Tragarm (23 mm lang)	1	115CrV3 [22]	Eigenfertigung
18	Achse Tragarm Scheibe (37 mm lang)	1	115CrV3 [22]	Eigenfertigung
19	Zylinderschraube DIN 912 – M3 x 6	14	Edelstahl A2 [43]	Zukaufteil
20	Zylinderschraube ISO 4762 – M3 x 5	8	Edelstahl A2 [44]	Zukaufteil
21	Gewindestift ISO 4029 – M4 x 3	2	Edelstahl [41]	Zukaufteil
22	Zahnriemen	1	-	Zukaufteil
23	Gewebelage, l <sub>mw</sub> 1 mm, d <sub>dm</sub> 0,5 mm, Ø 10 mm	15	1.4301 [14]	Eigenfertigung
24	Bremsen-Paste	1	-	Zukaufteil
25	Auspuffpaste	1	-	Zukaufteil
26	flüssige Schraubensicherung	1	-	Zukaufteil

In Tabelle 13 sind alle benötigten Bauteile mit den dazugehörigen Mengen- und Werkstoffangaben aufgelistet. Zusätzlich ist angegeben, ob das Teil selber gefertigt wird oder ein Zukaufteil ist.

### 4.2 Bedarf

Das Rohmaterial der Wellen und Achsen wird als Stangenware angeboten und kann daher für die Beschaffung teilweise zusammengefasst werden. Beispielsweise wird das Rohmaterial der Welle für die kalte und heiße Seite (Teil 5 und 6) als eine 500 mm lange Stange mit 10 mm Durchmesser angeboten [22]. Teil 5 und 6 können aus einer Stange gefertigt werden

und deshalb sollen diese zwei Teile in der Bedarfsliste zusammengefasst werden.

Dasselbe gilt auch für die Gewebelagen (Teil 23). Das Maschengewebe hat eine Drahtdicke von 0,5 mm [14] und eine Gewebelage ist daher 1 mm dick. Unser Regenerator ist 15 mm lang und deshalb brauchen wir 15 Gewebelagen. 13 Gewebelagen sollen einen Durchmesser von 10 mm haben und zwei einen Durchmesser von 12 mm. Letztere dienen zur formschlüssigen Sicherung der Lagen. Vom Anbieter wird ein großes Gewebestück gekauft, woraus dann einzelne Scheiben rausgestanzt beziehungsweise -geschnitten werden.

Um die benötigte Gewebefläche zu ermitteln, wird pro Gewebescheibe mit 3 mm Verschnitt am Rand gerechnet. Eine Gewebelage wird vereinfacht als ein Quadrat mit einer Seitenlänge von 10 mm beziehungsweise 12 mm betrachtet. Das heißt, dass für eine Gewebelage mit Verschnitt ein Quadrat mit einer Seitenlänge von 16 mm beziehungsweise 18 mm notwendig ist. In Abbildung 91 ist ersichtlich, dass ein Gewebestück mit 64 mm (4 mal 16 mm) mal 66 mm (3 mal 16 mm plus 18 mm) ausreicht.

18 mm x 18 mm	18 mm x 18 mm	16 mm x 16 mm	
16 mm x 16 mm	16 mm x 16 mm	16 mm x 16 mm	16 mm x 16 mm
16 mm x 16 mm	16 mm x 16 mm	16 mm x 16 mm	16 mm x 16 mm
16 mm x 16 mm	16 mm x 16 mm	16 mm x 16 mm	16 mm x 16 mm

Abbildung 91: Gewebeschnittmuster

Die Bedarfsliste ist in Tabelle 14 ersichtlich.

Tabelle 14: Bedarfsliste

Teilnummer	Bezeichnung	Menge	Werkstoff	Bemerkung
1	Fundament	1	S235	Eigenfertigung
2	Nocke	2	S235	Eigenfertigung
3	Kugellager, Innen-Ø 10 mm, Außen-Ø 15 mm	4	Chromstahl [39]	Zukaufteil
4	Lagerbock für die Nocken	4	S235	Eigenfertigung
5, 6	Welle Ø 10 mm (142 mm lang)	1	115CrV3 [22]	Zukaufteil
7	Zahnriemenscheibe 52 Zähne	2	Aluminium [30]	Zukaufteil
8	Regenerator	1	S235	Eigenfertigung
9	Zylinder	2	CW004A	Eigenfertigung
10	Kolben mit Pleuel	2	S235	Eigenfertigung
11	Welle Ø 2 mm (20 mm lang)	1	115CrV3 [22]	Zukaufteil
12	Kugellager, Innen-Ø 2 mm, Außen-Ø 5 mm	4	Edelstahl [34]	Zukaufteil
13	Zahnriemenscheibe 35 Zähne	1	Aluminium [30]	Zukaufteil
14	Riemenspanner Fundament	1	S235	Eigenfertigung

15	Riemenspanner Tragarm	1	S235	Eigenfertigung
16	Kugellager, Innen-Ø 8 mm, Außen-Ø 12 mm	4	Chromstahl [42]	Zukaufteil
17, 18	Welle Ø 8 mm (60 mm lang)	1	115CrV3 [22]	Zukaufteil
19	Zylinderschraube DIN 912 – M3 x 6	14	Edelstahl A2 [43]	Zukaufteil
20	Zylinderschraube ISO 4762 – M3 x 5	8	Edelstahl A2 [44]	Zukaufteil
21	Gewindestift ISO 4029 – M4 x 3	2	Edelstahl [41]	Zukaufteil
22	Zahnriemen	1	-	Zukaufteil
23	Gewebe, lmw 1 mm, ddm 0,5 mm, 64 x 66 mm	1	1.4301 [14]	Zukaufteil
24	Bremsen-Paste	1	-	Zukaufteil
25	Auspuffpaste	1	-	Zukaufteil
26	flüssige Schraubensicherung	1	-	Zukaufteil

### 4.3 Rapid Prototyping

Die Wellen, die Achsen und das Maschengewebe sind in der Stückliste, Tabelle 13, als Eigenfertigung und in der Bedarfsliste, Tabelle 14, als Zukaufteil gelistet. Die Wellen und Achsen werden als Stangenware und das Maschengewebe als ein großes Stück zugekauft. Die Verarbeitung dieser „Rohlinge“ ist im Vergleich zu den restlichen Teilen einfach und soll daher entweder selber oder in Kooperation mit der Technischen Universität Wien durchgeführt werden. Die Wellen müssen nur gekürzt, angefast, gefräst und teilweise gebohrt werden. Das Maschengewebe muss nur zugeschnitten oder gestanzt werden.

Die Fertigung der restlichen Bauteile ist schwieriger und wird daher in Auftrag gegeben. Aus Zeitgründen werden Rapid Prototyping-Unternehmen angefragt. Beim deutschen Unternehmen „Proto Labs GmbH“ in Feldkirchen [45] und beim österreichischen Unternehmen „1zu1 Prototypen GmbH & Co KG“ in Dornbirn [46] wurden Angebote eingeholt, siehe Tabelle 15. Alle angeführten Preise sind ohne Umsatzsteuer und die vollständigen Angebote sind im Anhang unter „7.5 Angebote“ zu finden.

Tabelle 15: Angebotsliste, Preise ohne Umsatzsteuer und in EUR

Teilnummer	Bezeichnung	Menge	Preis Proto Labs	Preis 1zu1
1	Fundament	1	556,83	600,00
2	Nocke	2	753,36	1 140,00
4	Lagerbock für die Nocken	4	807,52	630,00
8	Regenerator	1	388,00	380,00
9	Zylinder	2	-	390,00
10	Kolben mit Pleuel	2	327,46	340,00
14	Riemenspanner Fundament	1	313,83	255,00
15	Riemenspanner Tragarm	1	208,53	205,00

Beide Unternehmen benötigen keine Zeichnungen zum Fertigen der Teile und deshalb werden auch keine erstellt. Es genügt, wenn die Bauteile auf deren Homepage als STEP-Dateien hochgeladen werden [47, 48].

Proto Labs kann die Teile innerhalb von 3 Werktagen versenden und liefert alle Teile FCA (Free Carrier [49]) auf das Gelände des Verkäufers. Daher kommen hier noch Liefergebühren hinzu. 1zu1 hat eine Durchlaufzeit von 15 bis 18 Arbeitstagen und stellt CPT (Carriage Paid to [50]) an die Lieferadresse zu.

Es wurden für manche Teile mehrere Angebote eingeholt, weil manche Bauteile nach der ersten

Anfrage überarbeitet worden sind. Die angeführten Informationen und Preise beziehen sich größtenteils auf die Angebote, die im Rahmen der Erstfassung dieser Arbeit eingeholt worden sind. Bei der Überarbeitung dieser Arbeit wurden auch einige Bauteile überarbeitet. Für die überarbeiteten Teile wurden keine neuen Angebote mehr eingeholt, weil bereits in der Erstfassung entschieden wurde, dass die Maschine aus Kostengründen nicht gebaut wird, siehe weiter unten. Die überarbeiteten Teile hätten sich höchstwahrscheinlich im selben Preisrahmen bewegt oder wären sogar teurer (größere Bauteile) gewesen.

Tabelle 16: Bemerkungen in den Angeboten

Teilnummer	Bezeichnung	Bemerkung Proto Labs	Bemerkung 1zu1
1	Fundament	S275	S235JR; Aufgrund der Geometrie, muss mit Verzug gerechnet werden
2	Nocke	S275	S235JR
4	Lagerbock für die Nocken	S275; 2 M3-Gewinde	S235JR; Aufgrund der Geometrie, muss mit Verzug gerechnet werden
8	Regenerator	S275; 12 M3-Gewinde	S235JR
9	Zylinder	zu dünn	CW004A; Aufgrund der dünnen Wandstärke, muss mit Vibrationsspuren gerechnet werden.
10	Kolben mit Pleuel	S275	S235JR
14	Riemenspanner Fundament	S275; 2 M3-Gewinde	S235JR
15	Riemenspanner Tragarm	S275	S235JR

Ein großer Unterschied zwischen beiden Unternehmen ist, dass Proto Labs ebenfalls Gewinde fertigt beziehungsweise können diese im Angebot ausgewählt werden. Bei 1zu1 wurde diese Möglichkeit nicht gefunden. Daher können Bauteile mit Gewinde nur bei Proto Labs bestellt werden, siehe Tabelle 16.

Proto Labs verarbeitet nicht den Werkstoff S235, aber den Werkstoff S275 [51]. Alle Bauteile werden bei Proto Labs daher mit S275 angeboten. 1zu1 verarbeitet S235JR und alle Bauteile bis auf die Zylinder werden damit angeboten [52].

Unter „2.1.1 Stirlingmotor“ wurde ursprünglich ein Händler für CW004A herausgesucht. Da beide Rapid Prototyping-Unternehmen diesen Werkstoff anbieten, wird der Händler nicht mehr benötigt [51, 52]. Proto Labs kann den Zylinder (Teil 9) nicht herstellen, weil das Bauteil aufgrund der dünnen Wandstärke nicht mit deren Fertigungsprozess kompatibel ist. Dieses Bauteil kann daher nur bei 1zu1 bestellt werden.

In Tabelle 16 ist auffallend, dass nur 1zu1 Bemerkungen hinsichtlich der Fertigung gemacht hat, zum Beispiel „Aufgrund der Geometrie, muss mit Verzug gerechnet werden“. Das ist bei Proto Labs in der Art im Angebot nicht zu finden (ausgenommen beim Zylinder), aber es wird ein Link per E-Mail zugesandt. Wird der Link aufgerufen, ist das digitale Angebot im Browser ersichtlich. Das Angebot enthält unter anderem eine „Design-Analyse“. Dort wird unter dem Reiter „bearbeiteter Zustand“ das Bauteil in einem 3D-Viewer mit farbigen Flächen dargestellt, siehe Abbildung 92. Diese Flächen deuten an, dass diese Bereiche nicht gefertigt werden können. In der genannten Abbildung wäre das zum Beispiel die Bohrung für den Gewindestift der Nocke (Teil 2) und diverse Radien beim Fräsen [53]. Mangels Alternative sollen die Nocken deshalb ebenfalls mit einer stoffschlüssigen Verbindung gesichert werden. Andere Bauteile haben keine größeren Abweichungen, lediglich die Radien beim Fräsen, wie in Abbildung 92, und das spitze Ende der Sacklochbohrungen können nicht gefertigt werden. Beim Fräsen sind diese Radien immer zu

erwarten, aber im Modell wurden sie nicht berücksichtigt. Das spitze Ende der Bohrungen hat keine Funktion. Daher werden diese „kleinen“ Abweichungen akzeptiert.

Diese Ansicht zeigt Ihnen, wie Ihr fertiges Teil - einschließlich Abweichungen von Ihrem 3D-Modell – nach dem Fräsen aussehen wird. Bitte beachten Sie, dass die farblichen Indikatoren repräsentativ sind und möglicherweise nicht alle Bearbeitungsartefakte angezeigt werden können.

■ Grüne Flächen verweisen auf Bereiche, die nicht vollständig bearbeitet werden können und dadurch Material verbleibt. Diese Features werden nicht abgebildet.

Der Einsatz des Transparenz-Schiebereglers vereinfacht die Suche nach ■ grünen Bereichen, die in unserem Herstellungsverfahren nicht bearbeitet werden.

Falls Sie die Farbe an oder in Ihrem Teiledesign sehen, werden die Merkmale des markierten Bereichs beim fertigen Teil nicht vorhanden sein.

Bitte zoomen und drehen Sie das Bild, um alle farbliche Indikatoren zu überprüfen, da sie unter Umständen sehr klein sein können.

Prüfen Sie die Registerkarten „Dünne Bereiche“ und „Gewindezuordnung“.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter

Abbildung 92: Proto Labs – Design-Analyse – "bearbeiteter Zustand" [53]

Darüber hinaus beinhaltet die „Design-Analyse“ einen Reiter „dünne Bereiche“, siehe Abbildung 93. Hier werden die dünnen Bereiche der Bauteile angezeigt, die in der Fertigung eventuell Probleme bereiten könnten [53]. In der genannten Abbildung ist die Nocke (Teil 2) dargestellt und das ist auch das einzige Bauteil, das dünne Bereiche hat. Die gelb unterlegten Elemente dienen lediglich als Abstandhalter zu den Lagern und falls diese dünner ausfallen oder leicht verformt sind, ist die Auswirkung vernachlässigbar. Daher werden diese Elemente nicht überarbeitet.

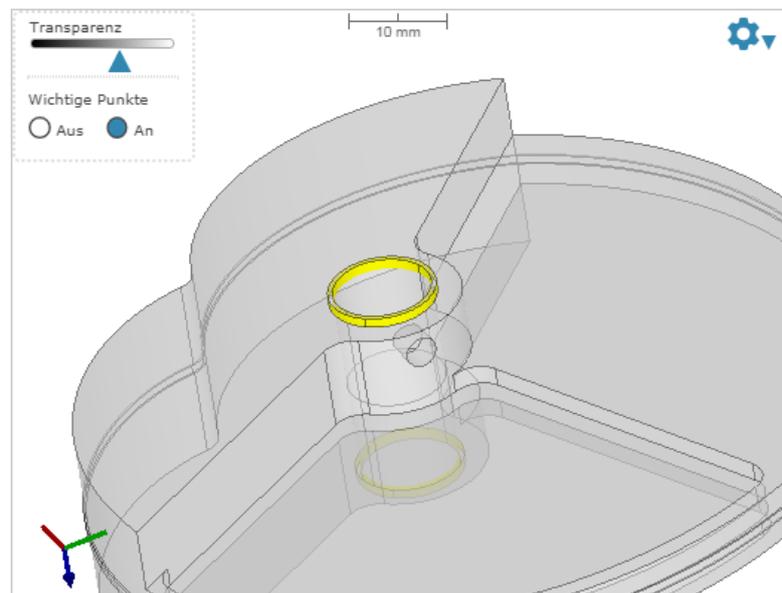
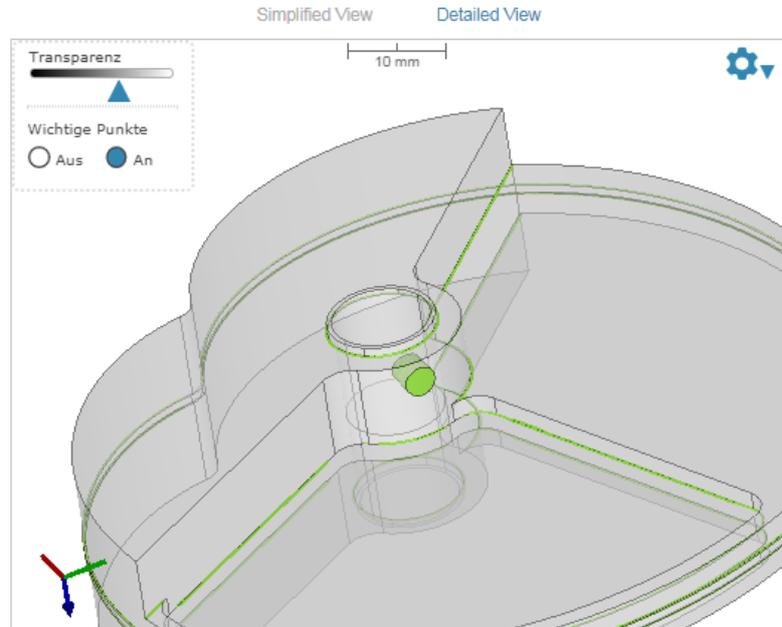
In dieser Ansicht sind alle dünnen Bereiche gekennzeichnet, die in Ihrem Modell festgestellt wurden. Dünne Bereiche können eventuell dünner als konzipiert gefräst werden und können abbrechen, ausbrechen und sich verbiegen oder verformen.

Wir haben in diesem Teil dünne Bereiche festgestellt. Die Bereiche, die gelb ■ unterlegt sind, sind dünner als 0,5 mm. Bitte drehen Sie Ihr Teil, um alle Bereiche sehen zu können.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter [customerservice@protolabs.de](mailto:customerservice@protolabs.de) oder +49 (0) 6261 6436 947

Abbildung 93: Proto Labs – Design Analyse – "dünne Bereiche" [53]



Erwähnenswert ist auch der Reiter „Gewindezuordnung“ unter „Design-Analyse“. Hier können Gewinde zu diversen Bohrungen zugeordnet werden, sofern diese vom Proto Labs-Programm erkannt werden, siehe Abbildung 94 [53]. In der Abbildung ist beispielhaft die Wellenbohrung der Nocke (Teil 2) zu sehen, dem theoretisch ein Gewinde zugeordnet werden kann. Das wird selbstverständlich nicht gemacht, weil dort keines benötigt wird.

Wir können die Bohrungen in Ihrem Teil mit Gewinde versehen. Nähere Einzelheiten finden Sie auf unserer Seite "Gewindebohrungen". Für jede Bohrung aus der Dropdown-Liste einen Gewindetyp (oder auch 'kein' Gewinde) auswählen. Über das Schnellzuordnungs-Menü können Sie allen Bohrungen, die mit Gewinde versehen werden sollen, die gleiche Gewindegruppe (oder kein Gewinde) zuordnen. Die Gewindeauswahl wird in Ihrer Auftragsbestätigung angezeigt und sollte auf ihre Richtigkeit geprüft werden.

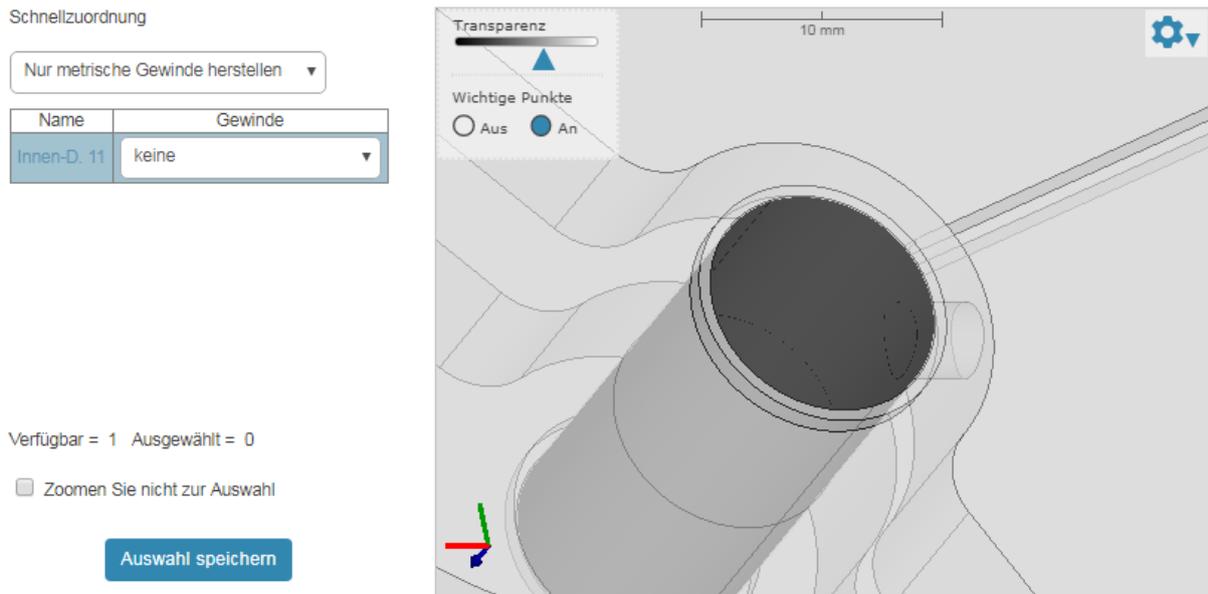


Abbildung 94: Proto Labs – Design-Analyse – "Gewindezuordnung" [53]

Vorerst werden die Liefergebühren nicht betrachtet. Die Teile 1, 2 und 10 sollen von Proto Labs bestellt werden, weil sie dort günstiger sind. Das Teil 15 soll bei 1zu1 bestellt werden, weil sie das günstigere Angebot haben. Wie oben erwähnt, werden die Teile 4, 8 und 14 aufgrund des Gewindes bei Proto Labs bestellt. Das Teil 9 wird bei 1 zu 1 geordert, denn wie oben erläutert, können nur sie es fertigen. Eine Übersicht ist in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Bezugsquellenübersicht für die Teile, Preise ohne Umsatzsteuer und in EUR

Teilnummer	Bezeichnung	Preis	Anbieter
1	Fundament	556,83	Proto Labs
2	Nocke	753,36	Proto Labs
4	Lagerbock für die Nocken	807,52	Proto Labs
8	Regenerator	388,00	Proto Labs
9	Zylinder	390,00	1zu1
10	Kolben mit Pleuel	327,46	Proto Labs
14	Riemenspanner Fundament	313,83	Proto Labs
15	Riemenspanner Tragarm	205,00	1zu1
	Summe	3 742,00	

In Tabelle 17 ist ersichtlich, dass für die in Auftrag gegebenen Teile 3 742,00 EUR netto fällig sind. Wird die österreichische Umsatzsteuer (20 %) dazugerechnet, wären das 4 490,40 EUR brutto.

Ein Budget wurde für diese Diplomarbeit nie explizit festgelegt, aber es waren maximal 1.000,00 EUR angedacht. Das Budget kommt vollständig aus eigenen Ersparnissen und lässt sich, vor allem als Student, schwer erweitern. Als Anhaltspunkt für das Budget wurde der Preis des Modells in Abbildung 3 gewählt. Das Modell kostet inklusive Umsatzsteuer 185,00 EUR zuzüglich Versandkosten [4]. Die Kosten sind selbstverständlich nicht mit unseren vergleichbar, weil unsere Maschine eine Einzelanfertigung ist. Unser Budget beträgt jedoch mehr als das Fünffache des Modellpreises und deshalb wurde es ursprünglich als ausreichend angenommen.

Alleine die zu fertigenden Teile machen mehr als das Vierfache des Budgets aus. Selbst wenn das Budget erhöht wird, reichen die verfügbaren Eigenmittel trotzdem nicht aus, um die Teile zu bestellen. Neben den Fertigungskosten würden noch die Kosten der Zukaufteile und die eventuell anfallenden Bearbeitungskosten der Wellen und des Maschengewebes hinzukommen. Zusätzlich besteht immer das Risiko, dass die Maschine nicht funktioniert und in dem Fall werden mehrere tausend Euro für ein paar (nutzlose) Metallklötze ausgegeben. Das Risiko mit den damit verbundenen Kosten wird nach gründlicher Überlegung und mangels Alternative nicht eingegangen. Die Maschine wird daher nicht gebaut.

Eine Fertigung in Kooperation mit der Technischen Universität Wien oder bei gewöhnlichen Lohnfertigern ist ebenfalls eine Option. Diese Möglichkeit ist vermutlich günstiger, aber die Fertigung wird auch höchstwahrscheinlich länger dauern als bei Rapid Prototyping. Aus Zeigründen ist diese Option jedoch nicht umsetzbar und wird deshalb verworfen.

Hinsichtlich der Vollständigkeit werden trotzdem die restlichen Kosten so gut wie möglich ermittelt.

#### 4.4 Zukaufteile

Die benötigten Zukaufteile sind in Tabelle 18 ersichtlich. Alle Zukaufteile bis auf Teil 24, 25 und 26 können beim Elektronik-Händler „Conrad“ beschafft werden. Die erwähnten Teile können in den Baumärkten „OBI“ und „HORNBACH“ erworben werden.

Alles kann sofort oder nach Bestellung aus einer Filiale abgeholt werden und deshalb fallen keine Versandkosten an. Eine Ausnahme bildet das Maschengewebe. Es wurde kein Angebot für das Gewebe eingeholt, weil die Maschine nicht mehr gebaut wird. Deshalb sind auch keine Lieferkonditionen bekannt. Im Datenblatt des Gewebes steht, dass der Mindestfaktorenwert 115,00 EUR beträgt. Es steht nicht explizit dabei, dass der Betrag ohne Umsatzsteuer ist, aber davon ist auszugehen [14]. Es wird angenommen, dass die von uns benötigte Menge nicht teurer als der Mindestfaktorenwert sein wird, weil das benötigte Gewebe mit rund 7 cm mal 7 cm sehr klein ausfällt. Deshalb wurde der Mindestfaktorenwert zuzüglich Umsatzsteuer für das Gewebe in die Tabelle eingetragen.

Die Verfügbarkeit der Teile wurde am 17. Juli 2019 überprüft. Falls die Quellenangabe bei einem Zukaufteil mit einem älteren Abrufdatum im Literaturverzeichnis hinterlegt ist, bezieht sich das Datum auf die erstmalige Verwendung der Quelle. Die Verfügbarkeit wurde für alle Zukaufteile am 17. Juli explizit noch einmal kontrolliert.

Im Rahmen der Überarbeitung dieser Arbeit wurden größere Zylinderschrauben (Teil 19 und 20) gewählt. Deshalb wurde die Verfügbarkeit der genannten Zylinderschrauben am 10. September 2019 überprüft.

Tabelle 18: Übersicht der Zukaufteile, Preise inklusive Umsatzsteuer und in EUR, Stand: 17. Juli 2019

Teilnummer	Bezeichnung	Mengeinheit	benötigte Menge	Menge pro Verkaufseinheit	benötigte Verkaufseinheiten	Preis pro Verkaufseinheit	Gesamtpreis	Verfügbarkeit
3	Kugellager, Innen-Ø 10 mm, Außen-Ø 15 mm	Stück	4	1	4	2,99	11,96	in einer Filiale in Wien oder Umgebung lagernd [39]
5, 6	Welle Ø 10 mm	mm	142	500	1	7,99	7,99	in einer Filiale in Wien oder Umgebung lagernd [54]
7	Zahnriemenscheibe 52 Zähne	Stück	2	1	2	19,99	39,98	innerhalb von 6 Tagen in einer Filiale in Wien oder Umgebung abholbar [55]
11	Welle Ø 2 mm	mm	20	500	1	2,99	2,99	in einer Filiale in Wien oder Umgebung lagernd [56]
12	Kugellager, Innen-Ø 2 mm, Außen-Ø 5 mm	Stück	4	1	4	2,49	9,96	innerhalb von 6 Tagen in einer Filiale in Wien oder Umgebung abholbar [34]
13	Zahnriemenscheibe 35 Zähne	Stück	1	1	1	16,99	16,99	in einer Filiale in Wien oder Umgebung lagernd [57]
16	Kugellager, Innen-Ø 8 mm, Außen-Ø 12 mm	Stück	4	1	4	2,99	11,96	in einer Filiale in Wien oder Umgebung lagernd [42]
17, 18	Welle Ø 8 mm	mm	60	500	1	5,99	5,99	in einer Filiale in Wien oder Umgebung lagernd [58]
19	Zylinderschraube DIN 912 – M3 x 6	Stück	14	1	14	0,15	2,10	innerhalb von 7 Tagen in einer Filiale in Wien oder Umgebung abholbar [43]
20	Zylinderschraube ISO 4762 – M3 x 5	Stück	8	100	1	8,49	8,49	innerhalb von 8 Tagen in einer Filiale in Wien oder Umgebung abholbar [44]
21	Gewindestift ISO 4029 – M4 x 3	Stück	2	50	1	3,49	3,49	innerhalb von 7 Tagen in einer Filiale in Wien oder Umgebung abholbar [41]
22	Zahnriemen	Stück	1	1	1	3,99	3,99	in einer Filiale in Wien oder Umgebung lagernd [27]
23	Gewebe, lmw 1 mm, ddm 0,5 mm	mm x mm	64 x 66	?	1	138,00	138,00	nicht angefragt, Mindestfakturenwert 115,00 EUR (keine Angabe, netto angenommen) [14]
24	Bremsen-Paste	Packung	1	1	1	8,49	8,49	in einer Filiale in Wien oder Umgebung lagernd [59]
25	Auspuffpaste	Packung	1	1	1	4,99	4,99	in einer Filiale in Wien oder Umgebung lagernd [60]
26	flüssige Schraubensicherung	Packung	1	1	1	9,95	9,95	in einer Filiale in Wien oder Umgebung lagernd [61]
						<b>Summe</b>	<b>287,32</b>	

Laut Tabelle 18 kosten die Zukaufteile in Summe 287,32 EUR inklusive Umsatzsteuer. Sie machen im Vergleich zu den lohngefertigten Teilen nur einen kleinen Teil der Kosten aus.

In Tabelle 19 werden die Gesamtkosten aus Lohnfertigung und Zukaufteile berechnet. In Summe müsste 4 777,72 EUR inklusive Umsatzsteuer für die Maschine aufgebracht werden.

Tabelle 19: Gesamtkosten inklusive Umsatzsteuer

Lohnfertigung	4 490,40
Zukaufteile	287,32
<b>Summe</b>	<b>4 777,72</b>

Die Kosten für die Bearbeitung der Wellen und des Maschengewebes sind als einzige nicht berücksichtigt worden. Es wurden keine Angebote dafür eingeholt, weil sie nicht mehr benötigt werden. Für die Bearbeitung der Wellen und des Maschengewebes wären eventuell Zeichnungen notwendig gewesen. Die Zeichnungen wurden nicht mehr erstellt, weil die Bearbeitung nicht stattfinden wird.

Die Teile von 1zu1 brauchen mit einer Durchlaufzeit von 15 bis 18 Arbeitstagen am längsten. Unter Berücksichtigung aller Lieferfristen und zum Stand vom 17. Juli 2019 wären alle Teile in rund 18 Arbeitstagen geliefert oder abgeholt. Für die Montage wird ein Tag eingeplant. Die Anzahl der Teile ist überschaubar und die Bauteile müssen lediglich montiert, geschraubt oder geklebt werden.

## 5 Schlussfolgerungen

### 5.1 Verbesserungsmöglichkeiten

Während der Ausarbeitung sind einige Punkte aufgefallen, die Verbesserungspotential bieten. Diese werden nachfolgend genannt und sind in den Gruppen Algorithmus, Konstruktion, Thermodynamik und Vorgehensweise unterteilt.

Die folgenden Verbesserungsmöglichkeiten wurden nicht mehr umgesetzt, weil die Entscheidung getroffen wurde, dass die Maschine aus Budgetgründen nicht gebaut wird. Die Umsetzung wurde zwar verworfen, aber die verschiedenen Ideen sollen als Grundlage für die zukünftige Entwicklung dienen.

#### 5.1.1 Algorithmus

##### 5.1.1.1 Diskretisierung

Es ist zu hinterfragen, ob die räumliche Diskretisierung sinnvoll gewählt worden ist. Im Algorithmus wird der Regenerator in Längsrichtung in mehrere Elemente unterteilt, aber die heiße und kalte Kammer wird als ein homogenes Volumenelement betrachtet. Der Regenerator hat eine Länge von 15 mm und der Hub in den Kammern beträgt das Doppelte mit 30 mm.

Das Volumen in den Kammern sollte daher ebenfalls unterteilt werden, um ein genaueres Rechenergebnis zu erzielen. Wenn das Kammervolumen unterteilt wird, sollte die Zylinderwand ebenfalls unterteilt werden. Der Zylinder ist derzeit ebenfalls als ein Element mit homogenen Eigenschaften modelliert.

##### 5.1.1.2 Zylinderwandmodellierung

Die verwendeten Gleichungen für den Wärmedurchgang durch die Zylinderwand gelten für den stationären Fall. In Abbildung 34 ist ersichtlich, dass die Fluidtemperatur im heißen Zylinder während einer Periode um rund 150 K schwankt und das bei einer mittleren Temperatur von rund 960 K. Eine stationäre Modellierung ist hier unrealistisch, weil die Zylinderwandtemperatur diesen Temperaturänderungen nicht unmittelbar folgen kann.

Um das Verhalten der Zylinderwand besser zu beschreiben, muss eine Energiebilanz für die Zylinderwand aufgestellt werden. Die Wärmeleitung in der Zylinderwand und der Wärmeübergang innen und außen müssen dabei berücksichtigt werden. Eine geeignete räumliche Diskretisierung in radialer und axialer Richtung muss gewählt werden.

##### 5.1.1.3 Regeneratormodellierung

Der Regenerator ist derzeit so modelliert, dass er keine Masse speichern kann. Der Massenstrom fließt zwar durch und gibt Wärme an das Maschengewebe ab und umgekehrt, aber im Regenerator verbleibt zu jedem Zeitpunkt keine Masse. Das heißt, dass der Massenstrom pro Rechenschritt durch alle Regeneratorelemente gleich groß ist. Inwiefern diese Modellierung plausibel ist, ist zu hinterfragen.

Damit der Regenerator Masse aufnehmen kann, müssen zusätzlich zu den Energiebilanzen auch Massenbilanzen für die Regeneratorelemente eingeführt werden. Zwischen den Regeneratorelementen findet Massenaustausch statt und der muss mit Druckverlustgleichungen

beschrieben werden. Dadurch können die Massenströme zwischen den Regeneratorelementen ungleich groß ausfallen, weil Masse gespeichert und abgegeben werden kann.

## 5.1.2 Konstruktion

### 5.1.2.1 Parameterauswahl

Wird unser Modell, siehe Abbildung 85, mit dem Modell mit Kurbeltrieb, siehe Abbildung 3, verglichen, fällt auf, dass unser Modell relativ große Bauteile im Vergleich zu den Zylindern hat. Die anderen Bauteile dominieren das Aussehen des Modells. Im Gegensatz dazu sind beim Modell mit Kurbeltrieb die Zylinder viel präsenter.

Wir haben eine Länge über alles von 283 mm, eine Breite über alles von rund 120 mm und eine Höhe über alles von 111 mm. Obwohl wir nur einen Hub von 30 mm und eine Bohrung von 10 mm haben, ist die resultierende Maschine relativ groß.

Die Maschine wurde als „Langhuber“ ausgelegt, weil dadurch ein besseres Oberfläche-Volumen-Verhältnis erreicht werden kann. Das ist jedoch hinsichtlich der Nockengröße unvorteilhaft, weil die Nocke mit einem größeren Hub auch größer wird. Es müsste ein Kompromiss eingegangen werden, wenn die Maschine kleiner werden soll. Eine Möglichkeit wäre, wenn der Hub und die Bohrung gleich groß ausgelegt werden.

### 5.1.2.2 Pleueführung

Die Nocke kann nur drücken aber nicht ziehen. Um auch ein Ziehen zu gewährleisten, kann statt einer Nocke eine kreisrunde Scheibe verwendet werden. Die Seitenfläche der Scheibe erhält eine Nut, die in Form der Nockenkontur gefräst wird, siehe Abbildung 95 links.



Abbildung 95: kreisrunde Scheibe mit gefräster Nockenkontur

Diese Lösung hätte zusätzlich weniger Unwucht, die sich durch Zusatzbohrungen an der Scheibe eliminieren ließe.

In Abbildung 95 links stellt die schwarze Kurve die gefräste Nockenkontur dar. Das Pleuel könnte einen Stift oder ähnliches erhalten, der in der Kontur geführt wird, siehe Abbildung 95 rechts. Die rechte Abbildung stellt eine Schnittansicht dar. Das dunkelgraue Objekt ist ein Teil der Kreisscheibe und das hellgraue Objekt ist ein Pleuel mit Führungsstift. Dadurch ist sowohl ein Drücken als auch ein Ziehen des Pleuels möglich.

Es können auch zwei Scheiben nebeneinander mit einem Pleuel dazwischen verwendet werden. Beide Scheiben erhalten die gefräste Nockenkontur und das Pleuel einen Stift für jede Scheibe, siehe Abbildung 96. Durch diese Konstellation ist eine bessere Führung des Pleuels gewährleistet.



Abbildung 96: beidseitige Pleueführung

### 5.1.2.3 Werkstoffauswahl

Alle zu fertigenden Bauteile bis auf die Zylinder werden aus Baustahl hergestellt, siehe Tabelle 16. Die Wahl des Werkstoffes sollte überdacht werden, weil Baustahl korrosionsanfällig ist. Durch Korrosion wird unter anderem die Lebensdauer des Anschauungsmodells verkürzt.

Es sollten korrosionsbeständige Werkstoffe wie zum Beispiel Edelstahl verwendet werden. Dafür müssen neue Angebote für die Bauteile eingeholt werden, weil die Alten dann obsolet sind.

### 5.1.2.4 Schwungscheibe

Während der angenäherten isothermen Kompression muss Energie aufgewendet werden, siehe Abbildung 35 erstes Viertel. Die benötigte Energie beträgt 0,3460 J und die Schwungscheiben sollen diese bereitstellen. Eine Nocke hat ein Massenträgheitsmoment um die Drehachse von  $2,723 \cdot 10^{-4}$  (kg m<sup>2</sup>), wenn eine Dichte von 7 850 kg/m<sup>3</sup> angenommen wird [32]. Bei einer Drehzahl von 2 Hz lässt sich die kinetische Energie von zwei Schwungscheiben mit der Gleichung (5.1) bestimmen.

$$\begin{aligned} \text{kinetische Energie} &= \frac{\text{Massenträgheitsmoment} \cdot \text{Winkelgeschwindigkeit}^2}{2} \cdot 2 \\ \text{kinetische Energie} &= \frac{2,723 \cdot 10^{-4} \text{ (kg m}^2\text{)} \cdot (2 \pi 2 \text{ Hz})^2}{2} \cdot 2 = 0,04230 \text{ J} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Die kinetische Energie der Schwungscheiben bei Nenndrehzahl beträgt rund 12,23 % der benötigten Energie. Zur kinetischen Energie der Gesamtsystems müssten noch die Energien der Wellen, Zahnriemenscheiben und Zahnriemen hinzu gerechnet werden. Es wird davon ausgegangen, dass die kinetische Energie des Gesamtsystems nicht um ein Vielfaches größer ist als die der Nocken. Daher wird die Maschine entweder sehr unruhig laufen oder gar nicht funktionieren.

Damit die Maschine ruhiger läuft oder funktioniert, müssten die vorhandenen Schwungscheiben modifiziert oder zusätzliche Schwungscheiben konstruktiv berücksichtigt werden.

## 5.1.3 Thermodynamik

### 5.1.3.1 Feuerzeugflamme

Die in Abbildung 5 dargestellte Verbrennung ist unvorteilhaft. Das „Leuchten“ einer sichtbaren Flamme bedeutet, dass im leuchtenden Bereich die Verbrennung noch unvollständig ist. Die Verbrennungsreaktion ist erst oberhalb der Flammenspitze abgeschlossen. Die unvollständige Verbrennung führt zu Rußbildung und die Rußablagerungen bilden eine Wärmedämmschicht.

Der Zylinder der heißen Seite sollte daher über der Flammenspitze platziert werden. Dementsprechend müssen auch andere Bauteile wie Zylinder der kalten Seite, Regenerator und

Nocken höher platziert werden. Durch die gute Wärmeleitfähigkeit des Kupfers zusammen mit dem schlechten Wärmeübergang zwischen Kupfer und dem Fluid im Zylinder kann davon ausgegangen werden, dass die Wärme einigermaßen gleichmäßig über den Umfang eingebracht wird.

### **5.1.3.2 Wärmeabfuhr**

Der Wärmeübergang außerhalb des Zylinders ist auf der heißen Seite (Flammenstrahlung und Konvektion) wesentlich besser als auf der kalten Seite (natürliche Konvektion). Dadurch wird die Maschine bei höheren Temperaturen arbeiten, was grundsätzlich nachteilig ist. Das führt zu Problemen wie höhere Verlustwärmeströme und thermische und mechanische Belastungen.

Der Wärmeübergang auf der kalten Seite sollte daher verbessert werden. Eine Oberflächenvergrößerung ist eine einfache Möglichkeit, um den Wärmeübergang zu verbessern. Die Oberfläche kann beispielsweise mit Kühlrippen auf dem Zylinder vergrößert werden.

### **5.1.3.3 Werkstoffauswahl**

Der Regenerator und die Kolben werden aus Baustahl hergestellt, siehe Tabelle 16. Die Wärme, die durch den Regenerator und die Kolben fließt, kann nicht genutzt werden und dadurch vermindert sich der Wirkungsgrad. Beim Regenerator kann die Wärme auch durch das Regeneratorgehäuse von der heißen zur kalten Seite fließen. In dem Fall fließt die Wärme am Maschengewebe vorbei, was sich ebenfalls auf den Wirkungsgrad auswirkt.

Diese Bauteile sollten aus möglichst schlecht wärmeleitenden Materialien hergestellt werden. Dafür müssen neue Angebote für die Bauteile eingeholt werden, weil die Alten dann obsolet sind.

### **5.1.3.4 Regenerator**

Wie in „5.1.3.3 Werkstoffauswahl“ erwähnt, kann die Wärme beim Regenerator von der heißen zur kalten Seiten durch das Regeneratorgehäuse fließen.

Um diesen Wärmefluss zu verringern, sollte einerseits, wie bereits erwähnt, ein schlecht wärmeleitendes Material für das Regeneratorgehäuse gewählt werden und andererseits kann die Regeneratorwand- gegenüber der Regeneratorquerschnittsfläche gering gehalten werden.

## **5.1.4 Vorgehensweise**

### **5.1.4.1 Zeitmanagement**

Hinsichtlich der Vorgehensweise ist ein entscheidender Aspekt zu erwähnen. Das Zeitmanagement gehört verbessert und es wird mehr Zeit benötigt, damit die Teile bei langsameren Herstellern gefertigt werden können. Sie sind zwar langsamer als Rapid Prototyping-Unternehmen, aber höchstwahrscheinlich auch günstiger. Eine Kooperation mit der Technischen Universität Wien zur Fertigung der Teile ist ebenfalls eine Option.

Dafür hätte die Diplomarbeit schneller ausgearbeitet werden müssen, damit mehr Zeitreserven übrig bleiben, oder eine längere Anfertigungszeit der Diplomarbeit wird in Kauf genommen.

### 5.1.4.2 Budget

Die Einschätzung des benötigten Budgets war leider sehr mangelhaft.

Bereits in früheren Stadien der Diplomarbeit oder vor Beginn der Ausarbeitung hätten grobe Kostenaufstellungen erstellt werden können, damit das benötigte Budget besser abgeschätzt werden kann. Zu dem Zeitpunkt gab es noch mehr Handlungsmöglichkeiten. Zum Beispiel die finanziellen Ressourcen hätten aufgetrieben oder das Thema der Diplomarbeit hätte anders definiert werden können.

## 5.2 Fazit

Betrachtet man nur die Berechnungsergebnisse, kann der Stirlingprozess mit einer Nocke deutlich besser als mit einem Kurbeltrieb angenähert werden, siehe „2.4 Vergleich der Maschinen“. Unser Modell mit der Nocke kann rund 58 % vom Carnotwirkungsgrad erreichen und das Modell mit dem Kurbeltrieb nur rund 25 %.

Das resultierende p,v-Diagramm ist mit der Nocke zwar besser als mit dem Kurbeltrieb, aber sie entspricht immer noch nicht dem eines idealen Stirlingprozesses. Der Grund ist, dass im Algorithmus auch Verluste, vor allem im Regenerator, berücksichtigt werden. Die Verluste im Regenerator sind stark von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Würde die Nocke einen idealen Stirlingprozess nachfahren, dann wären die Strömungsgeschwindigkeiten hoch und die Verluste dementsprechend auch. Das ist einer der Gründe, weshalb der iterativ ermittelte Prozess vom idealen Stirlingprozess abweicht.

Der verwendete Algorithmus und die Konstruktion sind solide und plausibel, aber dennoch ausbau- und verbesserungsfähig, siehe „5.1 Verbesserungsmöglichkeiten“. Durch die genannten Verbesserungen kann ein genaueres und besseres Modell berechnet und konstruiert werden. Ein interessanter Punkt ist, dass eine Konstruktion mit Nockentrieb höchstwahrscheinlich mehr Bauraum benötigt als eine ähnliche Konstruktion mit Kurbeltrieb.

Aus finanziellen Gründen kann die Maschine leider nicht gebaut werden und deshalb können die Berechnungsergebnisse leider auch nicht verifiziert werden.

## 6 Verzeichnisse

### 6.1 Literaturverzeichnis

- [1] M. Werdich, K. Kübler, *Stirling-Maschinen. Grundlagen – Technik – Anwendungen*, 9. Auflage, Staufen bei Freiburg, ökobuch Verlag, 2003, S. 31.
- [2] N. Andersson et al., „Numerical Simulation of Stirling Engines Using an Unsteady Quasi-One-Dimensional Approach,“ *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 137(5), 2015, S. “051104-1”-“051104-9”.
- [3] Z. P. Du, „Konzept für einen Stirlingmotor mit Nockentrieb,“ unpublizierte Projektarbeit, Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik – Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften – Technische Universität Wien, 2019.
- [4] Klaus Krick Modelltechnik, „Stirlingmotor Gold montiert,“ o. J. [Online] Available: <https://www.krickshop.de/HOG-Stirling-Motor-vergoldet.htm?a=article&ProdNr=22100&p=113> (Abrufdatum: 9. März 2019)
- [5] Fix Metall GmbH, „Kupfer Stab Rund,“ o. J. [Online] Available: [http://www.fixmetall.at/dt\\_portfolio/kupfer-stab-rund/](http://www.fixmetall.at/dt_portfolio/kupfer-stab-rund/) (Abrufdatum: 11. April 2019)
- [6] R. van Basshuysen, F. Schäfer, *Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*, 8. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2017, S. 445-446.
- [7] *Nahtlose Stahlrohre für öl- und wasserhydraulische Anlagen – Berechnungsgrundlage für Rohre und Rohrbögen bei schwellender Beanspruchung*, E DIN 2413:2018-01, 2018.
- [8] *Kupfer und Kupferlegierungen – Stangen und Drähte aus Kupfer für die allgemeine Anwendung in der Elektrotechnik*, DIN EN 13601:2013-09, 2013.
- [9] Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V., „Kupfer,“ 2019. [Online] Available: <https://www.kupferinstitut.de/de/werkstoffe/eigenschaften/kupfer.html> (Abrufdatum: 28. März 2019)
- [10] Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V., „Cu-ETP,“ 2005. [Online] Available: <http://www.abmkupral.hu/letoltes/certec/Cu-ETP.pdf> (Abrufdatum: 21. Mai 2019)
- [11] *Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen; Begriffe und Werte*, DIN 1343:1990-01, 1990.
- [12] *Heizungssysteme in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast für Gebäude mit einem mittleren U -Wert  $\geq 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$* , ÖNORM H 7500-1:2015, 2015.
- [13] „Berechnung der thermodynamischen Zustandsgrößen von Luft,“ *peace software*, o. J. [Online] Available: <http://www.peacesoftware.de/einigewerte/luft.html> (Abrufdatum: 14. März 2019)
- [14] Hutter & Schrantz Technische Gewebe Gesellschaft m.b.H., „Gewebe und Gewebezuschneide,“ o. J. [Online] Available: <http://www.hs-tg.at/technische-gewebe/HSGewebeundZuschneide.pdf> (Abrufdatum: 13. April 2019)
- [15] ThyssenKrupp Materials Europe GmbH, „Nichtrostender Austenitischer Stahl TK 1.4301,“ 2006. [Online] Available: <http://www.thyssenkrupp.at/files/rohre/Werkstoffdatenblaetter/1.4301.pdf> (Abrufdatum: 13. April 2019)
- [16] F. Steimle et al., *Stirling-Maschinen-Technik. Grundlagen, Konzepte und Chancen*, Heidelberg, C.F. Müller Verlag, 1996, S. 107-113.
- [17] HAVER & BOECKER, „DRAHTGEWEBE – TECHNISCHE LISTE. 0,025 MM BIS 50 MM MASCHENWEITE,“ 2014. [Online] Available: [https://www.haverboecker.com/fileadmin/01\\_Haver\\_Boecker/HB\\_Dokumente/P\\_56\\_D\\_Drahtgewebe\\_Technische\\_Liste\\_05\\_2014\\_02.pdf](https://www.haverboecker.com/fileadmin/01_Haver_Boecker/HB_Dokumente/P_56_D_Drahtgewebe_Technische_Liste_05_2014_02.pdf) (Abrufdatum: 13. April 2019)
- [18] Sturmfeuerzeug, „Benzinfeuerzeuge, Gasfeuerzeuge & Zubehör,“ o. J. [Online] Available: <https://sturmfeuerzeug.info/> (Abrufdatum: 7. Mai 2019)
- [19] N. Hannoschöck, *Wärmeleitung und -transport. Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragung*, Berlin, Springer Vieweg, 2018, S. 423-492.
- [20] *VDI-Wärmeatlas*, 11. bearbeitete und erweiterte Auflage, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Düsseldorf, 2013, S. 23-764.
- [21] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Technischer Modellbau,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/c/technischer-modellbau-14780.html> (Abrufdatum: 28. Juni 2019)

- [22] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Technisches Datenblatt,“ o. J. [Online] Available: [https://produktinfo.conrad.com/datenblaetter/225000-249999/237051-da-01-de-SILBERSTAHL\\_WELLE\\_3\\_X\\_500\\_MM.pdf](https://produktinfo.conrad.com/datenblaetter/225000-249999/237051-da-01-de-SILBERSTAHL_WELLE_3_X_500_MM.pdf) (Abrufdatum: 28. Juni 2019)
- [23] H. Wittel et al., *Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung*, 23. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2017.
- [24] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Kettenräder mit einseitiger Nabe,“ o. J. [Online] Available: [https://produktinfo.conrad.com/datenblaetter/225000-249999/237149-da-01-de-Kettenrad\\_25Z.pdf](https://produktinfo.conrad.com/datenblaetter/225000-249999/237149-da-01-de-Kettenrad_25Z.pdf) (Abrufdatum: 29. Juni 2019)
- [25] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Kegelräder,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/o/kegelraeder-1210096.html> (Abrufdatum: 29. Juni 2019)
- [26] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Zahnriemen-Scheiben, Keilriemen-Scheiben,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/o/zahnriemen-scheiben-keilriemen-scheiben-1210042.html> (Abrufdatum: 29. Juni 2019)
- [27] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Reely Zahnflachriemen Äußerer Umfang: 660.4 mm Anzahl Zähne: 130,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/p/reely-zahnflachriemen-aeusserer-umfang-660-4-mm-anzahl-zaehne-130-226096.html> (Abrufdatum: 29. Juni 2019)
- [28] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Reely Zahnflachriemen Äußerer Umfang: 584.2 mm Anzahl Zähne: 115,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/p/reely-zahnflachriemen-aeusserer-umfang-584-2-mm-anzahl-zaehne-115-226095.html> (Abrufdatum: 29. Juni 2019)
- [29] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Reely Zahnflachriemen Äußerer Umfang: 711.2 mm Anzahl Zähne: 140,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/p/reely-zahnflachriemen-aeusserer-umfang-711-2-mm-anzahl-zaehne-140-226097.html> (Abrufdatum: 29. Juni 2019)
- [30] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Zahnriemenscheiben,“ o. J. [Online] Available: [https://produktinfo.conrad.com/datenblaetter/225000-249999/226044-in-01-de-Zahnriemenscheiben\\_52\\_Zaehne.pdf](https://produktinfo.conrad.com/datenblaetter/225000-249999/226044-in-01-de-Zahnriemenscheiben_52_Zaehne.pdf) (Abrufdatum: 29. Juni 2019)
- [31] thyssenkrupp Materials Services GmbH, „Werkstoffdatenblatt S235Jxx,“ 2017. [Online] Available: [https://de.materials4me.com/media/pdf/e7/7d/30/Werkstoffdatenblatt\\_zum\\_Werkstoff\\_S235JR.pdf](https://de.materials4me.com/media/pdf/e7/7d/30/Werkstoffdatenblatt_zum_Werkstoff_S235JR.pdf) (Abrufdatum: 1. Juli 2019)
- [32] Schachermayer-Großhandels-gesellschaft m.b.H., „Werkstoffdatenblatt S 235 JRG2,“ o. J. [Online] Available: [https://webshop.schachermayer.com/cdn/medias/docus/53/sdat\\_Datenblatt\\_S235JR.pdf](https://webshop.schachermayer.com/cdn/medias/docus/53/sdat_Datenblatt_S235JR.pdf) (Abrufdatum: 3. Juli 2019)
- [33] LIQUI MOLY GmbH, „Bremsen-Anti-Quietsch-Paste,“ 2018. [Online] Available: <https://pim.liquimoly.de/pidoc/P000411/3078-Bremsen-Anti-Quietsch-Paste-22.0-de.pdf> (Abrufdatum: 6. September 2019)
- [34] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Reely Kugellager radial Edelstahl Innen-Durchmesser: 2 mm Außen-Durchmesser: 5 mm Drehzahl (max.): 100000 U/min,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/p/reely-kugellager-radial-edelstahl-innen-durchmesser-2-mm-aussen-durchmesser-5-mm-drehzahl-max-100000-u-min-1359925.html> (Abrufdatum: 3. Juli 2019)
- [35] SKF Gruppe, „Wälzlager,“ 2014. [Online] Available: [https://www.skf.com/binary/78-121486/0901d1968035fe76-Waelzlager---10000\\_2-DE.pdf](https://www.skf.com/binary/78-121486/0901d1968035fe76-Waelzlager---10000_2-DE.pdf) (Abrufdatum: 3. Juli 2019)
- [36] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Reely Kugellager radial Edelstahl Innen-Durchmesser: 1 mm Außen-Durchmesser: 3 mm Drehzahl (max.): 150000 U/min,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/p/reely-kugellager-radial-edelstahl-innen-durchmesser-1-mm-aussen-durchmesser-3-mm-drehzahl-max-150000-u-min-1359923.html> (Abrufdatum: 3. Juli 2019)
- [37] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Radial-Kugellager,“ o. J. [Online] Available: [https://www.conrad.at/de/o/radial-kugellager-1210023.html?f0\\_ATT\\_INNER\\_DIAMETER=2%20mm](https://www.conrad.at/de/o/radial-kugellager-1210023.html?f0_ATT_INNER_DIAMETER=2%20mm) (Abrufdatum: 3. Juli 2019)
- [38] Maschinenbau-Wissen.de, „Der Reibungskoeffizient,“ o. J. [Online] Available: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/kinetik/289-reibungskoeffizient> (Abrufdatum: 5. Juli 2019)
- [39] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Reely RC-Car Kugellager Chromstahl Innen-Durchmesser: 10 mm Außen-Durchmesser: 15 mm Drehzahl (max.): 15000 U/min,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/p/reely-rc-car-kugellager-chromstahl-innen-durchmesser-10-mm-aussen-durchmesser-15-mm-drehzahl-max-15000-u-min-295655.html> (Abrufdatum: 7. Juli 2019)

- [40] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Radial-Kugellager,“ o. J. [Online] Available: [https://www.conrad.at/de/o/radial-kugellager-1210023.html?f0\\_ATT\\_INNER\\_DIAMETER=10%20mm](https://www.conrad.at/de/o/radial-kugellager-1210023.html?f0_ATT_INNER_DIAMETER=10%20mm) (Abrufdatum: 13. Juli 2019)
- [41] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „TOOLCRAFT TO-5371002 Gewindestift M4 3 mm Edelstahl A1, A2 50 St.,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/p/toolcraft-to-5371002-gewindestift-m4-3-mm-edelstahl-a1-a2-50-st-1790334.html> (Abrufdatum: 15. Juli 2019)
- [42] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Reely RC-Car Kugellager Chromstahl Innen-Durchmesser: 8 mm Außen-Durchmesser: 12 mm Drehzahl (max.): 40000 U/min,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/p/reely-rc-car-kugellager-chromstahl-innen-durchmesser-8-mm-aussen-durchmesser-12-mm-drehzahl-max-40000-u-min-295639.html> (Abrufdatum: 12. Juli 2019)
- [43] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „TOOLCRAFT 888735 Zylinderschrauben M3 6 mm Innensechskant DIN 912 Edelstahl A2 1 St.,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/p/toolcraft-888735-zylinderschrauben-m3-6-mm-innensechskant-din-912-edelstahl-a2-1-st-888735.html> (Abrufdatum: 10. September 2019)
- [44] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „TOOLCRAFT TO-5371947 Zylinderschrauben M3 5 mm Innensechskant ISO 4762 Edelstahl A2 100 St.,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/p/toolcraft-to-5371947-zylinderschrauben-m3-5-mm-innensechskant-iso-4762-edelstahl-a2-100-st-1790649.html> (Abrufdatum: 10. September 2019)
- [45] Proto Labs GmbH, „Rapid Prototyping, Spritzguss, 3D Druck, CNC-Bearbeitung,“ o. J. [Online] Available: <https://www.protolabs.de> (Abrufdatum: 16. Juli 2019)
- [46] 1zu1 Prototypen GmbH & Co KG, „1zu1 Prototypen – Kontakt,“ o. J. [Online] Available: <https://www.1zu1prototypen.com/kontakt.htm> (Abrufdatum: 16. Juli 2019)
- [47] Proto Labs GmbH, „Protolabs Part Upload,“ o. J. [Online] Available: <https://uploads.protolabs.co.uk/de/PartUpload-MultiPart.aspx?LinkFrom=FC> (Abrufdatum: 16. Juli 2019)
- [48] 1zu1 Prototypen GmbH & Co KG, „Neuteil – 1zu1direkt,“ o. J. [Online] Available: <https://direkt.1zu1.eu/cgi-bin/WebObjects/1zu1Direkt.woa/wa/newPartWithConfig> (Abrufdatum: 16. Juli 2019)
- [49] WKO.at, „FCA (Free Carrier),“ 2013. [Online] Available: <https://www.wko.at/service/aussenwirtschaft/FCA-Free-Carrier.html> (Abrufdatum: 16. Juli 2019)
- [50] WKO.at, „CPT (Carriage Paid To),“ 2013. [Online] Available: <https://www.wko.at/service/aussenwirtschaft/CPT-Carriage-Paid-To.html> (Abrufdatum: 16. Juli 2019)
- [51] Proto Labs GmbH, „Vergleich der Materialien in der Lohnfertigung,“ o. J. [Online] Available: <https://www.protolabs.de/werkstoffe/material-vergleich/> (Abrufdatum: 16. Juli 2019)
- [52] 1zu1 Prototypen GmbH & Co KG, „Mechanische Fertigung: Drehen und Fräsen in höchster Perfektion,“ o. J. [Online] Available: <https://www.1zu1prototypen.com/mechanische-fertigung.htm> (Abrufdatum: 16. Juli 2019)
- [53] Proto Labs GmbH, „ProtoQuote – 411397,“ 2019. [Online] Available: <http://www.firstcut.eu/de/FirstQuote.aspx?p=65465395i7> (Available: 16. Juli 2019)
- [54] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Silberstahl-Welle Reely (Ø x L) 10 mm x 500 mm,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/p/silberstahl-welle-reely-x-l-10-mm-x-500-mm-237210.html> (Abrufdatum: 17. Juli 2019)
- [55] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Aluminium Zahnriemenscheibe Reely Bohrungs-Ø: 10 mm Durchmesser: 84 mm Anzahl Zähne: 52,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/p/aluminium-zahnriemenscheibe-reely-bohrungs-10-mm-durchmesser-84-mm-anzahl-zaehne-52-226044.html> (Abrufdatum: 17. Juli 2019)
- [56] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Silberstahl-Welle Reely (Ø x L) 2 mm x 500 mm,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/p/silberstahl-welle-reely-x-l-2-mm-x-500-mm-237213.html> (Abrufdatum: 17. Juli 2019)
- [57] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Aluminium Zahnriemenscheibe Reely Bohrungs-Ø: 8 mm Durchmesser: 57 mm Anzahl Zähne: 35,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/p/aluminium-zahnriemenscheibe-reely-bohrungs-8-mm-durchmesser-57-mm-anzahl-zaehne-35-226042.html> (Abrufdatum: 17. Juli 2019)

- [58] Conrad Electronic GmbH & Co KG, „Silberstahl-Welle Reely ( $\varnothing \times L$ ) 8 mm x 500 mm,“ o. J. [Online] Available: <https://www.conrad.at/de/p/silberstahl-welle-reely-x-l-8-mm-x-500-mm-237205.html> (Abrufdatum: 17. Juli 2019)
- [59] OBI Bau-und Heimwerkermärkte Systemzentrale GmbH, „Liqui Moly Bremsen-Anti-Quietsch-Paste 100 g,“ o. J. [Online] Available: <https://www.obi.at/lackreparatur-karosseriereparatur/liqui-moly-bremsen-anti-quietsch-paste-100-g/p/4895660> (Abrufdatum: 17. Juli 2019)
- [60] OBI Bau-und Heimwerkermärkte Systemzentrale GmbH, „Presto Auspuff-Montagepaste 170 g,“ o. J. [Online] Available: <https://www.obi.at/lackreparatur-karosseriereparatur/presto-auspuff-montagepaste-170-g/p/1602929> (Abrufdatum: 17. Juli 2019)
- [61] HORNBACH Baumarkt GmbH, „Loctite Spezialkleber Schraubensicherung 5 ml,“ o. J. [Online] Available: <https://www.hornbach.at/shop/Loctite-Spezialkleber-Schraubensicherung-5-ml/7663487/artikel.html> (Abrufdatum: 17. Juli 2019)

## 6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Auswirkung der Bewegungsarten auf den Kreisprozess im p,v-Diagramm, links: sinusförmige Bewegung; rechts: diskontinuierliche Bewegung [1, S. 31] – bearbeitet .....	1
Abbildung 2: Schema eines $\alpha$ -Stirlingmotors [2, S. 051104-2] .....	1
Abbildung 3: Modell eines Stirlingmotors [4] .....	2
Abbildung 4: Flamme eines Benzinfeuerzeugs .....	3
Abbildung 5: Sechskant Stecknuss (SW 8 mm) in der Flamme .....	3
Abbildung 6: Verlauf der Volumensumme von heißer und kalter Kammer [3, S. 22] .....	8
Abbildung 7: Verlauf der Gastemperatur in der heißen ( $T_H$ ) und kalten ( $T_K$ ) Kammer [3, S. 24] .....	9
Abbildung 8: Volumenverlauf von heißer ( $V_H$ ) und kalter ( $V_K$ ) Kammer [3, S. 22] .....	9
Abbildung 9: Volumenverlauf von heißer ( $V_H$ ) und kalter ( $V_K$ ) Kammer in einem ungünstigen Fall .....	9
Abbildung 10: Nockenform der kalten Kammer in einem ungünstigen Fall .....	9
Abbildung 11: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Maschenweite und Drahtdicke bei einer Volumenänderung von $1,9278 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	14
Abbildung 12: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Maschenweite beziehungsweise Drahtdicke bei einer Volumenänderung von $1,9278 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	15
Abbildung 13: Massenstrom bei einer Maschenweite von 8 mm, Drahtdicke von 1 mm und einer Volumenänderung von $1,0710 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	15
Abbildung 14: Vergleich der Arbeit pro Periode in Abhängigkeit von der Länge des Regenerators und der Totraumbestimmung bei einer Volumenänderung von $1,9278 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	17
Abbildung 15: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Länge des Regenerators bei einer Volumenänderung von $1,2852 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	18
Abbildung 16: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Maschenweite und Drahtdicke bei einer Volumenänderung von $1,2852 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	19
Abbildung 17: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Maschenweite beziehungsweise Drahtdicke bei einer Volumenänderung von $1,2852 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	19
Abbildung 18: Totraumanteil bei einer Volumenänderung von $1,2852 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	19
Abbildung 19: geplante Anordnung des Stirlingmotors [3, S. 1] .....	20
Abbildung 20: Darstellung des Einschwingvorgangs mit der Hilfsgröße .....	20
Abbildung 21: Druckverlauf des Systems im eingeschwungenen Zustand .....	21
Abbildung 22: Temperaturverlauf der heißen und kalten Kammer im eingeschwungenen Zustand .....	21

Abbildung 23: Zylinderaußentemperatur der kalten Kammer im eingeschwungenen Zustand .....	21
Abbildung 24: mittlere Temperatur des Systems .....	23
Abbildung 25: mittlerer Druck des Systems .....	23
Abbildung 26: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Volumenänderung im Bereich von null bis $V_Z$ .....	24
Abbildung 27: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Volumenänderung im Bereich von $1,0710 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ bis $1,7136 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	25
Abbildung 28: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Volumenänderung im Bereich von $1,0710 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ bis $1,7136 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ mit aktualisierten Parametern.....	26
Abbildung 29: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Volumenänderung im Bereich von $1,3631 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ bis $1,5383 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	28
Abbildung 30: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Volumenänderung im Bereich von $1,4268 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ bis $1,4746 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	29
Abbildung 31: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Volumenänderung im Bereich von $1,4268 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ bis $1,4746 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ mit aktualisierten Parametern .....	30
Abbildung 32: Einschwingvorgang mit endgültiger Volumenänderung.....	31
Abbildung 33: Volumenverlauf mit endgültiger Volumenänderung.....	31
Abbildung 34: Fluidtemperaturverlauf mit endgültiger Volumenänderung .....	31
Abbildung 35: Verlauf der Volumenänderungsarbeit mit der endgültigen Volumenänderung.....	32
Abbildung 36: Bestimmung der Nockenform [3, S. 13] – bearbeitet.....	32
Abbildung 37: Nocke der heißen Seite (links) und der kalten Seite (rechts).....	33
Abbildung 38: Nocke mit den kleinstmöglichen Werten der Parameter $d_A$ und $d_P$ .....	34
Abbildung 39: Nocke der heißen und kalten Seite übereinander dargestellt .....	34
Abbildung 40: Form der Nocke kann nicht ideal nachgefahren werden .....	35
Abbildung 41: p,v-Diagramm vom System mit Nockentrieb (links) und vom System mit Kurbeltrieb (rechts).....	36
Abbildung 42: Volumenverlauf der Kammern mit einem Kurbeltrieb .....	36
Abbildung 43: Volumensumme des Systems mit Nockentrieb (links) und des Systems mit Kurbeltrieb (rechts).....	37
Abbildung 44: Einschwingvorgangs vom System mit Kurbeltrieb .....	37
Abbildung 45: Volumenverlauf der Kammern mit dem ursprünglichen Algorithmus .....	38
Abbildung 46: p,v-Diagramm mit dem ursprünglichen Algorithmus .....	38
Abbildung 47: Temperaturverlauf der Kammern mit dem ursprünglichen Algorithmus .....	39
Abbildung 48: Volumenänderungsarbeit der jeweiligen Kammern .....	40
Abbildung 49: Druckverlauf der Kammern im eingeschwungenen Zustand .....	41
Abbildung 50: Versetzt ausgerichtete Gewindestiftbohrungsachse einer Zahnriemenscheibe, Abbildung ist nicht maßstabsgetreu.....	44
Abbildung 51: abgerundeter Zylinder.....	45
Abbildung 52: Form des Pleuels ohne Wälzlager .....	48
Abbildung 53: unvorteilhafte Pleuelstellung .....	48
Abbildung 54: Führung des Pleuels durch eine Nut .....	48
Abbildung 55: Führung des Pleuels mit Wälzlager durch einen Vorsprung .....	48
Abbildung 56: Leistungsverbrauch über Gleitreibung .....	49
Abbildung 57: Leistungsverbrauch über das Heben einer Masse .....	50
Abbildung 58: Riemen durch Eigengewicht der Scheibe gespannt .....	51

Abbildung 59: auf die Welle wirkenden Kräfte, Skizze ist nicht maßstabsgetreu .....	52
Abbildung 60: Lagerkräfte heiße Seite .....	53
Abbildung 61: Lagerkräfte kalte Seite .....	53
Abbildung 62: konstruierte Nocke .....	55
Abbildung 63: Lagerbock für die Nocken .....	55
Abbildung 64: Welle für die Nocke der heißen Seite .....	56
Abbildung 65: Welle für die Nocke der kalten Seite .....	56
Abbildung 66: Regenerator .....	57
Abbildung 67: Zylinder .....	57
Abbildung 68: Abrundung des Zylinders .....	57
Abbildung 69: Kolben mit Pleuel .....	58
Abbildung 70: Kräfte auf den Kolben .....	58
Abbildung 71: Verlauf der Kraft $F_N$ der heißen Seite (links) und der kalten Seite (rechts) .....	59
Abbildung 72: Achse für das Pleuel .....	59
Abbildung 73: Bauraumanalyse der Zahnriemenscheiben .....	59
Abbildung 74: Welle der heißen Seite .....	60
Abbildung 75: Tragarm .....	60
Abbildung 76: Befestigung des Tragarms .....	61
Abbildung 77: Achse zwischen Befestigung und Tragarm .....	62
Abbildung 78: Achse zwischen Tragarm und Scheibe .....	62
Abbildung 79: Riemen .....	62
Abbildung 80: Feuerzeug vorne .....	63
Abbildung 81: Feuerzeit seitlich .....	63
Abbildung 82: Fundament Oberseite .....	64
Abbildung 83: Fundament Unterseite .....	65
Abbildung 84: Gesamtmodell vorne .....	65
Abbildung 85: Gesamtmodell schräg hinten .....	66
Abbildung 86: Gesamtmodell unten .....	66
Abbildung 87: Gesamtmodell schräg vorne .....	67
Abbildung 88: Gesamtmodell oben .....	67
Abbildung 89: Gesamtmodell seitlich .....	68
Abbildung 90: Schnittansicht – vertikaler Schnitt durch die Kolbenachse .....	69
Abbildung 91: Gewebeschnittmuster .....	72
Abbildung 92: Proto Labs – Design-Analyse – "bearbeiteter Zustand" [53] .....	75
Abbildung 93: Proto Labs – Design-Analyse – "dünne Bereiche" [53] .....	75
Abbildung 94: Proto Labs – Design-Analyse – "Gewindeführung" [53] .....	76
Abbildung 95: kreisrunde Scheibe mit gefräster Nockenkontur .....	81
Abbildung 96: beidseitige Pleueführung .....	82

### 6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Maschenweite und Drahtdicke mit einer Volumenänderung von $1,9278 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	14
--	----

Tabelle 2: Arbeit pro Periode bei verschiedenen Längen des Regenerators, fixem Totraum und einer Volumenänderung von $1,9278 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	16
Tabelle 3: Arbeit pro Periode bei verschiedenen Längen des Regenerators, individuell berechnetem Totraum und einer Volumenänderung von $1,9278 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	16
Tabelle 4: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Länge des Regenerators bei einer Volumenänderung von $1,2852 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	17
Tabelle 5: Arbeit pro Periode in Abhängigkeit der Maschenweite und Drahtdicke mit einer Volumenänderung von $1,2852 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	18
Tabelle 6: Suche nach der optimalen Volumenänderung im Bereich von null bis $V_Z$ .....	24
Tabelle 7: Suche nach der optimalen Volumenänderung im Bereich von $1,0710 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ bis $1,7136 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	25
Tabelle 8: Suche nach der optimalen Volumenänderung im Bereich von $1,0710 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ bis $1,7136 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ mit aktualisierten Parametern .....	26
Tabelle 9: Suche nach der optimalen Volumenänderung im Bereich von $1,3631 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ bis $1,5383 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	27
Tabelle 10: Suche nach der optimalen Volumenänderung im Bereich von $1,4268 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ bis $1,4746 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .....	28
Tabelle 11: Suche nach der optimalen Volumenänderung im Bereich von $1,4268 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ bis $1,4746 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ mit aktualisierten Parametern .....	29
Tabelle 12: Vergleich der Maschine mit Nockentrieb und der Maschine mit Kurbeltrieb .....	37
Tabelle 13: Stückliste .....	71
Tabelle 14: Bedarfsliste .....	72
Tabelle 15: Angebotsliste, Preise ohne Umsatzsteuer und in EUR.....	73
Tabelle 16: Bemerkungen in den Angeboten.....	74
Tabelle 17: Bezugsquellenübersicht für die Teile, Preise ohne Umsatzsteuer und in EUR...76	
Tabelle 18: Übersicht der Zukaufteile, Preise inklusive Umsatzsteuer und in EUR, Stand: 17. Juli 2019.....	78
Tabelle 19: Gesamtkosten inklusive Umsatzsteuer .....	79
Tabelle 20: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,125 mm und einer Drahtdicke von 0,08 mm .....	114
Tabelle 21: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,16 mm und einer Drahtdicke von 0,11 mm .....	115
Tabelle 22: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,2 mm und einer Drahtdicke von 0,12 mm .....	115
Tabelle 23: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,25 mm und einer Drahtdicke von 0,16 mm .....	115
Tabelle 24: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,32 mm und einer Drahtdicke von 0,16 mm .....	116
Tabelle 25: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,4 mm und einer Drahtdicke von 0,25 mm .....	116
Tabelle 26: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,5 mm und einer Drahtdicke von 0,23 mm .....	117
Tabelle 27: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,63 mm und einer Drahtdicke von 0,25 mm .....	117
Tabelle 28: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,71 mm und einer Drahtdicke von 0,3 mm .....	117
Tabelle 29: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,8 mm und einer Drahtdicke von 0,32 mm .....	118

Tabelle 30: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1 mm und einer Drahtdicke von 0,3 mm	118
Tabelle 31: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1 mm und einer Drahtdicke von 0,36 mm	118
Tabelle 32: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1 mm und einer Drahtdicke von 0,5 mm	119
Tabelle 33: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1,25 mm und einer Drahtdicke von 0,4 mm	119
Tabelle 34: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1,4 mm und einer Drahtdicke von 0,25 mm	120
Tabelle 35: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1,6 mm und einer Drahtdicke von 0,5 mm	120
Tabelle 36: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 2 mm und einer Drahtdicke von 0,56 mm	120
Tabelle 37: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 2,5 mm und einer Drahtdicke von 0,71 mm	121
Tabelle 38: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 3,15 mm und einer Drahtdicke von 0,8 mm	121
Tabelle 39: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 4 mm und einer Drahtdicke von 1 mm	121
Tabelle 40: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 5 mm und einer Drahtdicke von 1 mm	122
Tabelle 41: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 5 mm und einer Drahtdicke von 1,25 mm	122
Tabelle 42: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 8 mm und einer Drahtdicke von 1 mm	123
Tabelle 43: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 10 mm und einer Drahtdicke von 1,5 mm	123
Tabelle 44: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 0,5 cm	123
Tabelle 45: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 1 cm	124
Tabelle 46: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 1,5 cm	124
Tabelle 47: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 2 cm	124
Tabelle 48: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 2,5 cm	125
Tabelle 49: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 3 cm	125
Tabelle 50: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 3,5 cm	126
Tabelle 51: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 4 cm	126
Tabelle 52: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 4,5 cm	126
Tabelle 53: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 5 cm	127
Tabelle 54: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,8 mm und einer Drahtdicke von 0,32 mm	127
Tabelle 55: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1 mm und einer Drahtdicke von 0,3 mm	127
Tabelle 56: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1 mm und einer Drahtdicke von 0,36 mm	128
Tabelle 57: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1 mm und einer Drahtdicke von 0,5 mm	128
Tabelle 58: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1,25 mm und einer Drahtdicke von 0,4 mm	129

Tabelle 59: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1,4 mm und einer Drahtdicke von 0,25 mm .....	129
Tabelle 60: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1,6 mm und einer Drahtdicke von 0,5 mm .....	129
Tabelle 61: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 2 mm und einer Drahtdicke von 0,56 mm .....	130
Tabelle 62: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 2,5 mm und einer Drahtdicke von 0,71 mm .....	130

## 6.4 Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
Ao.Univ.Prof.	Außerordentlicher Universitätsprofessor
CAD	Computer-Aided Design
CPT	Carriage Paid To
DI	Diplom-Ingenieur
DIN	Deutsches Institut für Normung
Dipl.-Ing.	Diplom-Ingenieur
div.	divergiert
Dr.techn.	Doctor technicae
EUR	Euro
FCA	Free Carrier
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GmbH & Co KG	Gesellschaft mit beschränkter Haftung & Compagnie Kommanditgesellschaft
ISO	International Organization for Standardization
S.	Seite
SI	Système international d'unités
sing.	singulär

## 6.5 Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
a	Abstand a	m
A	Lager A	1
A <sub>K</sub>	Wärmeübertragungsfläche des kalten Zylinders	m <sup>2</sup>
A <sub>Quer</sub>	Querschnittsfläche des Regenerators	m <sup>2</sup>
a <sub>Tot</sub>	angenommener Totraumanteil	1
b	Abstand b	m
B	Lager B	1
c <sub>p</sub>	spezifische isobare Wärmekapazität des Fluids	J/(kg K)
c <sub>R</sub>	spezifische Wärmekapazität des Regenerators	J/(kg K)
d	Bohrung	m
d <sub>A</sub>	Abstand von der Drehachse der Nocke bis zum oberen Totpunkt des Zylinders	m

Verzeichnisse

$d_{\text{Achse}}$	Durchmesser der Achse	m
$d_P$	Pleuellänge inklusive Kolbenhöhe	m
$d_{\text{Scheibe}}$	Durchmesser der Scheibe	m
$d_{\text{Welle}}$	Wellendurchmesser	m oder mm
$ddm$	Drahtdurchmesser	mm
$E$	Elastizitätsmodul Stahl	N/mm <sup>2</sup>
$f$	Drehzahl	Hz
$f_3$	Funktion	1
$f_m$	maximale Durchbiegung	mm
$F_A$	Kraft auf das Lager A	N
$F_B$	Kraft auf das Lager B	N
$F_M$	Kraft aufgrund des Moments inklusive Riemenspannkraft	N
$F_{\text{max}}$	maximale Kraft des Kolbens	N
$F_N$	Nockenkraft auf die Welle	N
$F_{NH}$	Nockenkraft auf die Welle der heißen Seite	N
$F_{NK}$	Nockenkraft auf die Welle der kalten Seite	N
$g$	Erdbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
$G$	Schubmodul Stahl	N/mm <sup>2</sup>
$i_k$	Größe $i$ zum Rechenschritt $k$	1
$I$	Flächenmoment 2. Grades	mm <sup>4</sup>
$I_t$	polares Flächenmoment 2. Grades	mm <sup>4</sup>
$j_{\text{max}}$	Unterteilungen des Regenerators	1
$k_H$	Wärmedurchgangskoeffizient des heißen Zylinders	W/(m <sup>2</sup> K)
$k_K$	Wärmedurchgangskoeffizient des kalten Zylinders	W/(m <sup>2</sup> K)
$l$	Hub	m
$l_{\text{Reg}}$	Länge des Regenerators	m
$l_{\text{Welle}}$	Wellenlänge	mm
$l_{\text{mw}}$	lichte Maschenweite	mm
$L$	charakteristische Länge	m
$L_{10h}$	nominale Lebensdauer bei 90 % Erlebenswahrscheinlichkeit	h
$m$	Masse	kg
$m_H$	Masse des heißen Zylinders	kg
$m_{H,1}$	Masse des Gases im heißen Zylinder im ersten Rechenschritt	kg
$m_K$	Masse des kalten Zylinders	kg
$m_{K,1}$	Masse des Gases im kalten Zylinder im ersten Rechenschritt	kg
$mpf$	Maschen pro Fläche	1/cm <sup>2</sup>
$\dot{m}_S$	Massenstrom in den Zylinder	kg/s
$M_A$	Momente um den Punkt A	Nm
$M_B$	Momente um den Punkt B	Nm
$M_M$	das von der Welle übertragene Moment	Nm
$M_{\text{max}}$	maximales Moment	Nm
$Nu$	Nusselt-Zahl	1

Verzeichnisse

O	Oberfläche beziehungsweise Mantelfläche	m <sup>2</sup>
p	(Betriebs-)Druck	Pa
p <sub>H,1</sub>	Druck in der heißen Kammer im ersten Rechenschritt	Pa
p <sub>K,1</sub>	Druck in der kalten Kammer im ersten Rechenschritt	Pa
p <sub>m</sub>	mittlerer Druck des Systems	Pa
p <sub>max</sub>	maximaler Druck im System	Pa
P	Leistung	W
P <sub>max</sub>	maximale Leistung	W
Pr <sub>U</sub>	Prandtl-Zahl der Umgebung	1
Q̇ <sub>K</sub>	Wärmestrom in den kalten Zylinder	W
r	Radius der Nocke	m
r <sub>Scheibe</sub>	Radius der Scheibe	m
R	spezifische Gaskonstante des Fluids	J/(kg K)
Ra	Rayleigh-Zahl	1
s	Wanddicke	m
T <sub>H</sub>	Temperatur im heißen Zylinder	K
T <sub>H,1</sub>	Temperatur im heißen Zylinder im ersten Rechenschritt	K
T <sub>H,a</sub>	Temperatur außerhalb des heißen Zylinders	K
T <sub>K</sub>	Temperatur im kalten Zylinder	K
T <sub>K,1</sub>	Temperatur im kalten Zylinder im ersten Rechenschritt	K
T <sub>K,a</sub>	Temperatur außerhalb des kalten Zylinders	K
T <sub>K,z</sub>	Zylinderaußentemperatur der kalten Seite	K
T <sub>K,z,m</sub>	mittlere Zylinderaußentemperatur der kalten Seite	K
T <sub>m</sub>	mittlere Temperatur des Systems	K
T <sub>R,1</sub> <sup>1</sup>	Temperatur im ersten Regeneratorelement im ersten Rechenschritt	K
T <sub>R,1</sub> <sup>jmax</sup>	Temperatur im letzten Regeneratorelement im ersten Rechenschritt	K
v	spezifisches Volumen	m <sup>3</sup> /kg
V	Volumen	m <sup>3</sup>
V <sub>H</sub>	Volumen des heißen Zylinders	m <sup>3</sup>
V <sub>H,1</sub>	Volumen des heißen Zylinders im ersten Rechenschritt	m <sup>3</sup>
V <sub>K</sub>	Volumen des kalten Zylinders	m <sup>3</sup>
V <sub>K,1</sub>	Volumen des kalten Zylinders im ersten Rechenschritt	m <sup>3</sup>
V <sub>max</sub>	maximales Volumen eines Zylinders	m <sup>3</sup>
V <sub>min</sub>	minimales Volumen eines Zylinders	m <sup>3</sup>
V <sub>Tot</sub>	Totolumen pro Zylinder	m <sup>3</sup>
V <sub>Z</sub>	Zylindervolumen	m <sup>3</sup>
w <sub>ein,max,H</sub>	maximale Gaseintrittsgeschwindigkeit in den heißen Zylinder	m/s
w <sub>ein,max,K</sub>	maximale Gaseintrittsgeschwindigkeit in den kalten Zylinder	m/s
w <sub>m</sub>	mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Fluids	m/s
w <sub>max</sub>	maximale Strömungsgeschwindigkeit des Fluids	m/s
W	Volumenänderungsarbeit	J

## Verzeichnisse

$W_H$	Volumenänderungsarbeit der heißen Kammer	J
$W_K$	Volumenänderungsarbeit der kalten Kammer	J
$W_{\max}$	maximale Arbeit pro Rechenschritt	J
$\alpha_H$	Wärmeübergangskoeffizient im heißen Zylinder	W/(m <sup>2</sup> K)
$\alpha_K$	Wärmeübergangskoeffizient im kalten Zylinder	W/(m <sup>2</sup> K)
$\alpha_{K,a}$	Wärmeübergangskoeffizient außerhalb des kalten Zylinders	W/(m <sup>2</sup> K)
$\beta$	isobarer Wärmeausdehnungskoeffizient	1/K
$\Delta t$	Zeitintervall pro Rechenschritt	s
$\eta_C$	Carnot-Wirkungsgrad	1
$\kappa_U$	Temperaturleitfähigkeit der Umgebung	m <sup>2</sup> /s
$\lambda_{\text{Gas}}$	Wärmeleitfähigkeit des Fluids	W/(m K)
$\lambda_U$	Wärmeleitfähigkeit der Umgebung	W/(m K)
$\lambda_{Z,H}$	Wärmeleitfähigkeit des heißen Zylinders	W/(m K)
$\lambda_{Z,K}$	Wärmeleitfähigkeit des kalten Zylinders	W/(m K)
$\mu$	dynamische Viskosität des Fluids	(Pa s)
$\mu_G$	Gleitreibungskoeffizient	1
$\nu_U$	kinematische Viskosität der Umgebung	m <sup>2</sup> /s
$\rho_m$	mittlere Dichte des Fluids	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{m,H}$	mittlere Dichte des Fluids im heißen Zylinder	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{m,K}$	mittlere Dichte des Fluids im kalten Zylinder	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_R$	Dichte des Regeneratormaterials	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma_{\text{zul}}$	zulässige Dehngrenze	Pa
$\varphi$	Verdrehwinkel	°
$\Psi$	Hohlraumanteil	1
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	rad/s

## 7 Anhang

### 7.1 MATLAB-Skript

```

1  %% Initialisieren
2
3  close all; clc; clear all;
4
5  %% Variablen definieren
6
7  % Stirlingdaten
8  f = 2; % Arbeitsfrequenz der Stirlingmaschine in Hz
9  d = 0.01; % Bohrung des Zylinders in m
10 l = 0.03; % Hub des Zylinders in m
11 s = 0.5*10^-3; % Wanddicke des Zylinders in m
12 lambda_ZH = 377; % Waermeleitfaehigkeit des heissen Zylinders in W/(m K)
13 lambda_ZK = 381.6; % Waermeleitfaehigkeit des kalten Zylinders in W/(m K)
14
15 A_Quer = d^2 / 4 * pi; % Querschnittsflaeche des Zylinders und Regenerators
    in m^2
16 A_Z = (d + 2*s) * pi * l; % Waermeuebertragungsflaeche des Zylinders (Zylin-
    derausenflaeche) in m^2
17 V_Z = A_Quer * l; % Volumen des Zylinders in m^3
18
19 % Fluideigenschaften Luft
20 R = 287.22; % spezifische Gaskonstante des Fluids in J/(kg K)
21 c_p = 1067.7; % spezifische isobare Waermekapazitaet des Fluids in J/(kg K)
22 mu = 33.076*10^-6; % dynamische Viskositaet des Fluids in (Pa s)
23 lambda_Gas = 0.049530; % waermeleitfaehigkeit des Arbeitsgases in W/(m K)
24 nu_U = 15.329*10^-6; % kinematische Viskositaet der Umgebung in m^2/s
25 lambda_U = 25.684*10^-3; % waermeleitfaehigkeit der Umgebung in W/(m K)
26 Pr_U = 0.71486; % Prandtl-Zahl der Umgebung in 1
27 kappa_U = 214.86*10^-7; % Temperaturleitfaehigkeit der Umgebung in m^2/s
28
29 c_v = c_p - R; % spezifische isochore Waermekapazitaet des Fluids in J/(kg K)
30
31 % Regeneratoreigenschaften
32 c_R = 500; % spezifische Waermekapazitaet des des Regenerators in J/(kg K)
33 rho_R = 7900; % Dichte des Regenerators in kg/m^3
34 l_mw = 1; % lichte Maschenweite in mm
35 d_dm = 0.5; % Drahtdurchmesser in mm
36 mpf = ( 10 / ( l_mw + d_dm ) )^2; % Maschen pro Flaeche in 1/cm^2
37 l_Reg = 0.015; % Laenge des gesamten Regenerators in m
38
39 l_s = l_mw + d_dm; % Maschenweite in mm
40 syms phi; % definiere symbolische variable phi
41 phi = eval( vpasolve( 2 * d_dm - l_s * sin(phi) - d_dm * cos(phi) == 0, phi) /
    pi * 180 ); % halber Biegewinkel in °
42 l_w = 4 * d_dm * pi * phi / 360 + ( l_s - 2 * d_dm *
    sin(phi/180*pi) )/cos(phi/180*pi); % wahre Laenge des Drahtes ueber eine Ma-
    sche in mm
43 kappa = l_w/l_s; % Verhaeltnis von wahrer Laenge und Maschenweite in 1
44 d_h = ( 400 / ( pi * kappa * l_s * mpf ) - d_dm )/1000; % hydraulischer Durch-
    messer in m
45 A_RQuer_h = d_h^2 / 4 * pi; % Querschnittsflaeche des Regenerators mit hyd-
    raulischem Durchmesser in m^2
46 chi = 0.02 * mpf * d_dm * pi * kappa * l_s; % spezifische waermeuebertragungs-
    flaeche in 1
47 n_Gewebe = l_Reg/( 0.002 * d_dm ); % Anzahl der Gewebelagen im Regenerator in
    1
48 A_R = A_Quer * n_Gewebe * chi; % waermeuebertragungsflaeche im Regenerator in
    m^2
49 Psi = 1 - 1/400 * mpf * d_dm * l_s * kappa * pi; % Hohlraumanteil in 1
50 V_Tot = Psi * A_Quer * l_Reg / 2; % Hohlraumvolumen/Totraumvolumen pro Zylinder
    in m^3
51 V_max = V_Z + V_Tot; % Maximalvolumen eines Zylinders in m^3
52 V_Draht = (1 - Psi) * A_Quer * l_Reg; % Drahtvolumen in m^3
53 m_R = V_Draht * rho_R; % Drahtmasse/Masse des Regenerators in kg
54
55 % Diskretisierung
56 Delta_t = 5*10^-6; % zeitintervall pro Rechenschritt in s
57 j_max = 10; % Anzahl der Regeneratorelemente in 1
58 Periode_Anzahl = 1; % Anzahl der zu berechnenden Perioden in 1
59 Epoche_Anzahl_min = 0; % Anzahl der minimalen Epochen in 1
60 Epoche_Anzahl_max = 1000; % Anzahl der maximalen Epochen in 1

```

```

61 Abbruchkriterium_Arbeit = 0.0; % Abbruch, wenn Summe der Arbeit kleiner als
62 gegebener Prozentsatz der zugeführten Waerme in 1
63 Delta_V_Unterteilung = 0; % Unterteilungen des Untersuchungsintervalls in 1
64 tau = 1/f; % Periodendauer in s
65 k_Periode = tau / Delta_t; % Rechenschritte pro Periode in 1
66 k_max = round( k_Periode * Periode_Anzahl ); % Anzahl an Rechenschritten in 1
67 n_max = j_max + 1; % Anzahl der Rechenpunkte in 1
68 k1_Endperiode = round( k_max - k_Periode + 1 ); % Laufvariable ab letzte Pe-
69 riode in 1
70 Iterationen = Delta_V_Unterteilung + 1; % Anzahl der zu berechnenden Iterati-
71 onen in 1
72 % Startwerte
73 T_U = 273.15 + 20; % Umgebungstemperatur in K
74 p_U = 1*10^5; % Umgebungsdruck in Pa
75 T_H1 = T_U; % Temperatur des Fluids im heissen Zylinder in K
76 T_K1 = T_U; % Temperatur des Fluids im kalten Zylinder in K
77 T_R11 = T_U; % Temperatur des Regenerators im ersten Rechenpunkt in K
78 T_Rj_max1 = T_U; % Temperatur des Regenerators im letzten Rechenpunkt in K
79 p_H1 = p_U; % Druck im heissen Zylinder in Pa
80 p_K1 = p_U; % Druck im kalten Zylinder in Pa
81 V_H1 = V_Tot; % Volumen im heissen Zylinder in m^3
82 V_K1 = V_Z + V_Tot; % Volumen im kalten Zylinder in m^3
83 % Widerstandsbeiwert
84 rho_m = 1; % mittlere Dichte des Fluids in kg/m^3
85 w_max = 1; % maximale Stroemungsgeschwindigkeit des Fluids in m/s
86
87 Re_h = rho_m * w_max * d_h / mu; % Reynoldszahl in 1
88 zeta_1 = 1.6 + 175/Re_h; % Widerstandsbeiwert in 1
89
90 % Waermeuebertragungswerte
91 T_Ha = 273.15 + 800; % Temperatur ausserhalb des heissen Zylinders in K
92 T_Ka = T_U; % Temperatur ausserhalb des kalten Zylinders in K
93 T_KZm = T_U; % mittlere Zylinderausstentemperatur der kalten Seite in K
94 w_m = 1; % mittlere Stroemungsgeschwindigkeit des Fluids in m/s
95 w_ein_max_H = 1; % maximale Gaseintrittsgeschwindigkeit in den heissen Zyl-
96 nder in m/s
97 w_ein_max_K = 1; % maximale Gaseintrittsgeschwindigkeit in den kalten Zyl-
98 nder in m/s
99 rho_m_H = 1; % mittlere Dichte des Arbeitsgases im heissen Zylinder in kg/m^3
100 rho_m_K = 1; % mittlere Dichte des Arbeitsgases im kalten Zylinder in kg/m^3
101 g = 9.81; % Erdbeschleunigung in m/s^2
102
103 L = pi/2 * ( d + 2 * s ); % charakteristische Laenge in m
104 beta = 1/T_Ka; % isobarer Waermeausdehnungskoeffizient in 1/K
105 f_3 = ( 1 + ( 0.559 / Pr_U )^( 9/16 ) )^( -16/9 ); % Funktion in 1
106
107 Re_h_m = rho_m * w_m * d_h / mu; % Reynoldszahl in 1
108 k_R1 = 0.33 * Re_h_m^0.67 * lambda_Gas / d_h; % Waermedurchgangskoeffizient
109 im Regenerator in W/(m^2 K)
110 Re_ein_H = rho_m_H * w_ein_max_H * d / mu; % Reynoldszahl in 1, kinematische
111 Viskositaet durch dynamische ausgetauscht
112 delta_dh_H = min( 16.5 * Re_ein_H^-0.73, 0.25 ); % Rechenvariable in 1
113 Pe_omega_H = 2 * pi * f * d^2 / ( 4 * lambda_Gas / ( rho_m_H * c_p ) ); %
114 Rechenvariable in 1
115 z_H = ( 1 + 1i ) * sqrt( 2 * Pe_omega_H ); % Rechenvariable in 1
116 Nu_c_H = z_H * ( 1 - exp( -2 * delta_dh_H * z_H ) + z_H * ( 1/4 - delta_dh_H )
117 * ( 1 + exp( -2 * delta_dh_H * z_H ) ) ) / ...
118 ( ( 1 - exp( -2 * delta_dh_H * z_H ) )^2 + z_H * ( 1/4 - delta_dh_H ) *
119 ( 1 - exp( -2 * delta_dh_H * z_H ) ) ); % komplexe Nusseltzahl in 1
120 alpha_H = real( Nu_c_H ) * lambda_Gas / d; % waermeuebergangskoeffizient des
121 heissen Zylinders in W/(m^2 K)
122 k_H1 = 1 / ( ( d + 2 * s ) / ( 2 * lambda_ZH ) * log( ( d + 2 * s ) / d ) +
123 ( d + 2 * s ) / ( d * alpha_H ) ); % waermedurchgangskoeffizient des heissen
124 Zylinders in W/(m^2 K)
125 Re_ein_K = rho_m_K * w_ein_max_K * d / mu; % Reynoldszahl in 1, kinematische
126 Viskositaet durch dynamische ausgetauscht
127 delta_dh_K = min( 16.5 * Re_ein_K^-0.73, 0.25 ); % Rechenvariable in 1
128 Pe_omega_K = 2 * pi * f * d^2 / ( 4 * lambda_Gas / ( rho_m_K * c_p ) ); %
129 Rechenvariable in 1
130 z_K = ( 1 + 1i ) * sqrt( 2 * Pe_omega_K ); % Rechenvariable in 1
131 Nu_c_K = z_K * ( 1 - exp( -2 * delta_dh_K * z_K ) + z_K * ( 1/4 - delta_dh_K )
132 * ( 1 + exp( -2 * delta_dh_K * z_K ) ) ) / ...
133 ( ( 1 - exp( -2 * delta_dh_K * z_K ) )^2 + z_K * ( 1/4 - delta_dh_K ) *
134 ( 1 - exp( -2 * delta_dh_K * z_K ) ) ); % komplexe Nusseltzahl in 1
135 alpha_K = real( Nu_c_K ) * lambda_Gas / d; % waermeuebergangskoeffizient des
136 kalten Zylinders in W/(m^2 K)

```

```

122 Ra = ( beta * g * abs( T_KZm - T_Ka ) * L^3 ) / ( ny_U * kappa_U ); % Ra-
yleigh-Zahl in 1
123 alpha_Ka1 = lambda_U / L * ( 0.752 + 0.387 * ( Ra * f_3 )^( 1/6 ) )^2; %
waermeuebergangskoeffizient ausserhalb des kalten Zylinders in W/(m^2 K)
124 k_K1 = 1 / ( 1 / alpha_Ka1 + ( d + 2 * s ) / ( 2 * lambda_ZK ) * log( ( d + 2
* s ) / d ) + ( d + 2 * s ) / ( d * alpha_K ) ); % waermedurchgangskoeffizient
des kalten Zylinders in W/(m^2 K)
125
126 % Konstanten
127 Delta_V_von =
1.452887361345296466164154873534908318788438919000327587127685546875e-06; %
Beginn der Volumendifferenz-Iteration in m^3
128 Delta_V_bis =
1.452887361345296466164154873534908318788438919000327587127685546875e-06; %
Ende der Volumendifferenz-Iteration in m^3
129
130 Aj_R = A_R / j_max; % waermeuebertragungsflaeche pro Element im Regenerator
in m^2
131 mj_R = m_R / j_max; % Drahtmasse/Masse des Regenerators pro Element in kg
132
133 %% Berechnung
134
135 % Vektoren und Matrizen initialisieren
136 a_Tot_ = zeros(Iterationen, k_max);
137 Energie_Waerme_ = zeros(Iterationen, Epoche_Anzahl_max);
138 Delta_p_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
139 Ergebnis_Delta_V = zeros(Iterationen, 7);
140 k_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
141 max_Fehler_H = zeros(Iterationen, 1);
142 max_Fehler_K = zeros(Iterationen, 1);
143 max_Fehler_R_E = zeros(Iterationen, 1);
144 max_Fehler_R_WUE = zeros(Iterationen, 1);
145 m_H_ = zeros(Iterationen, k_max + 2);
146 m_K_ = zeros(Iterationen, k_max + 2);
147 m_S_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
148 p_H_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
149 p_K_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
150 p_m_ = zeros(Iterationen, k_max);
151 Periode_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
152 Q_H_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
153 Q_He_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
154 Q_K_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
155 Q_Ke_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
156 rho_m_ = zeros(Iterationen, 1);
157 rho_m_H_ = zeros(Iterationen, 1);
158 rho_m_K_ = zeros(Iterationen, 1);
159 T_H_ = zeros(Iterationen, k_max + 2);
160 T_K_ = zeros(Iterationen, k_max + 2);
161 T_KZ_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
162 T_m_ = zeros(Iterationen, k_max);
163 T_R_ = zeros(j_max, k_max + 2, Iterationen);
164 T_S_ = zeros(n_max, k_max + 1, Iterationen);
165 v_ = zeros(Iterationen, k_max);
166 V_g_ = zeros(Iterationen, k_max + 2);
167 V_H_ = zeros(Iterationen, k_max + 2);
168 V_K_ = zeros(Iterationen, k_max + 2);
169 W_g_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
170 W_H_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
171 W_K_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
172 w_SH_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
173 w_SK_ = zeros(Iterationen, k_max + 1);
174
175 for Schleife = 1 : Iterationen
176
177     if Delta_V_Unterteilung > 0
178
179         Delta_V = Delta_V_von + ( Schleife - 1 ) * ( Delta_V_bis - Del-
ta_V_von ) / Delta_V_Unterteilung;
180
181     else
182
183         Delta_V = Delta_V_von;
184
185     end
186
187     % temporaere Vektoren und Matrizen initialisieren
188     a_Tot = zeros(1, k_max);
189     Delta_p = zeros(1, k_max + 1);
190     dU_dm_H = zeros(1, k_max);

```

```

191     dU_dm_K = zeros(1, k_max);
192     dU_dT_H = zeros(1, k_max);
193     dU_dT_K = zeros(1, k_max);
194     dU_R = zeros(j_max, k_max);
195     Energie_waerme = zeros(1, Epoche_Anzahl_max);
196     H_mS_H = zeros(1, k_max);
197     H_mS_K = zeros(1, k_max);
198     H_mS_R = zeros(j_max, k_max);
199     k = zeros(1, k_max + 1);
200     m_H = zeros(1, k_max + 2);
201     m_K = zeros(1, k_max + 2);
202     m_S = zeros(1, k_max + 1);
203     p_H = zeros(1, k_max + 1);
204     p_K = zeros(1, k_max + 1);
205     p_m = zeros(1, k_max);
206     Periode = zeros(1, k_max + 1);
207     Periode_Integer = zeros(1, k_max + 1);
208     Q_H = zeros(1, k_max + 1);
209     Q_Ha = zeros(1, k_max + 1);
210     Q_He = zeros(1, k_max + 1);
211     Q_K = zeros(1, k_max + 1);
212     Q_Ka = zeros(1, k_max + 1);
213     Q_Ke = zeros(1, k_max + 1);
214     Q_R = zeros(j_max, k_max);
215     rho = zeros(1, k_max + 1);
216     T_H = zeros(1, k_max + 2);
217     T_K = zeros(1, k_max + 2);
218     T_KZ = zeros(1, k_max + 1);
219     T_m = zeros(1, k_max);
220     T_R = zeros(j_max, k_max + 2);
221     T_S = zeros(n_max, k_max + 1);
222     v = zeros(1, k_max);
223     V_H = zeros(1, k_max + 2);
224     V_K = zeros(1, k_max + 2);
225     W_H = zeros(1, k_max + 1);
226     W_K = zeros(1, k_max + 1);
227     w_SH = zeros(1, k_max + 1);
228     w_SK = zeros(1, k_max + 1);
229     Zustandsaenderung = zeros(1, round( k_Periode ) );
230
231     % Startwerte
232     T_H(1) = T_H1; % Temperatur des Fluids im heissen Zylinder in K
233     T_K(1) = T_K1; % Temperatur des Fluids im kalten Zylinder in K
234     T_R(1, 1) = T_R11; % Temperatur des Regenerators im ersten Rechenpunkt in
K
235     T_R(j_max, 1) = T_Rj_max1; % Temperatur des Regenerators im letzten Re-
chenpunkt in K
236     p_H(1) = p_H1; % Druck im heissen Zylinder in Pa
237     p_K(1) = p_K1; % Druck im kalten Zylinder in Pa
238     V_H(1) = V_H1; % Volumen im heissen Zylinder in m^3
239     V_K(1) = V_K1; % Volumen im kalten Zylinder in m^3
240     m_H(1) = V_H(1) * p_H(1) / ( R * T_H(1) ); % Masses im heissen Zylinder
in kg
241     m_K(1) = V_K(1) * p_K(1) / ( R * T_K(1) ); % Masses im kalten Zylinder in
kg
242     % lineare Temperaturverteilung im Regenerator
243     Delta_T_R = ( T_R(j_max, 1) - T_R(1, 1) ) / ( j_max - 1 );
244     for j = 2 : j_max - 1
245
246         T_R(j, 1) = T_R(j - 1, 1) + Delta_T_R;
247
248     end
249
250     % widerstandsbeiwert
251     zeta = zeta_1; % widerstandsbeiwert in 1
252
253     % waermeuebertragungswerte
254     k_R = k_R1; % waermedurchgangskoeffizient im Regenerator in W/(m^2 K)
255     k_H = k_H1; % waermedurchgangskoeffizient des heissen Zylinders in W/(m^2
K)
256     k_K = k_K1; % waermedurchgangskoeffizient des kalten Zylinders in W/(m^2
K)
257     alpha_Ka = alpha_Ka1; % waermeuebergangskoeffizient ausserhalb des kalten
Zylinders in W/(m^2 K)
258
259     Delta_V_12_g = Delta_V; % Volumendifferenz bei Zustandsaenderung 12 ge-
samt in m^3
260     Delta_V_23_g = -V_Z; % Volumendifferenz bei Zustandsaenderung 23 gesamt
in m^3

```

```

261 Delta_V_34_g = Delta_V_12_g; % Volumendifferenz bei Zustandsaenderung 34
    gesamt in m^3
262 Delta_V_41_g = V_Z - Delta_V_34_g; % Volumendifferenz bei Zustandsaende-
    rung 41 gesamt in m^3
263
264 Delta_V_12 = Delta_V_12_g / k_Periode * 4; % Volumendifferenz bei Zu-
    standsaenderung 12 pro Rechenschritt in m^3
265 Delta_V_23 = Delta_V_23_g / k_Periode * 4; % Volumendifferenz bei Zu-
    standsaenderung 23 pro Rechenschritt in m^3
266 Delta_V_34 = Delta_V_34_g / k_Periode * 4; % Volumendifferenz bei Zu-
    standsaenderung 34 pro Rechenschritt in m^3
267 Delta_V_41 = Delta_V_41_g / k_Periode * 4; % Volumendifferenz bei Zu-
    standsaenderung 41 pro Rechenschritt in m^3
268
269 % Hilfwerte
270 Epoche = 1;
271 Delta_I_R = ( Schleife - 1 ) * j_max; % Indexverschiebung Regenerator in
    1
272 Delta_I_S = ( Schleife - 1 ) * n_max; % Indexverschiebung Massenstrom in
    1
273
274 while Epoche < Epoche_Anzahl_max + 1
275     if Epoche > 1
276         rho_m_H = zeros( 1, k_max - k1_Endperiode + 1 );
277         rho_m_K = zeros( 1, k_max - k1_Endperiode + 1 );
278
279         for Laufvariable = k1_Endperiode : k_max
280             rho_m_H( round( Laufvariable - k_Periode * ( Periode_Anzahl -
281                 1 ) ) ) = m_H(Laufvariable) / V_H(Laufvariable);
282             rho_m_K( round( Laufvariable - k_Periode * ( Periode_Anzahl -
283                 1 ) ) ) = m_K(Laufvariable) / V_K(Laufvariable);
284
285         end
286
287         % Startwerte
288         T_H(1) = T_H( k_max + 1 ); % Temperatur des Fluids im heissen
289         Zylinder in K
290         T_K(1) = T_K( k_max + 1 ); % Temperatur des Fluids im kalten Zy-
291         linder in K
292         T_R(1, 1) = T_R(1, k_max + 1 ); % Temperatur des Regenerators im
293         ersten Rechenpunkt in K
294         T_R(j_max, 1) = T_R(j_max, k_max + 1 ); % Temperatur des Regene-
295         rators im letzten Rechenpunkt in K
296         p_H(1) = p_H( k_max + 1 ); % Druck im heissen zylinder in Pa
297         p_K(1) = p_K( k_max + 1 ); % Druck im kalten Zylinder in Pa
298         m_H(1) = V_H(1) * p_H(1) / ( R * T_H(1) ); % Masses im heissen
299         Zylinder in kg
300         m_K(1) = V_K(1) * p_K(1) / ( R * T_K(1) ); % Masses im kalten
301         Zylinder in kg
302         % lineare Temperaturverteilung im Regenerator
303         Delta_T_R = ( T_R(j_max, 1) - T_R(1, 1) ) / ( j_max - 1 );
304         for j = 2 : j_max - 1
305             T_R(j, 1) = T_R(j - 1, 1) + Delta_T_R;
306         end
307
308         % widerstandsbeiwert
309         rho_m = mean( rho( k1_Endperiode : k_max ) ); % mittlere Dichte
310         des Fluids in kg/m^3
311         w_max = max( abs( [w_SK( k1_Endperiode : k_max ),
312             w_SH( k1_Endperiode : k_max )] ) ); % maximale Stroemungsge-
313         schwindigkeit des Fluids in m/s
314         T_Kzm = mean( T_KZ( k1_Endperiode : k_max ) ); % mittlere zylin-
315         deraussentemperatur der kalten Seite in K
316
317         Re_h = rho_m * w_max * d_h / my; % Reynoldszahl in 1
318         zeta = 1.6 + 175/Re_h; % Widerstandsbeiwert in 1
319
320         % waermeuebertragungswerte
321         w_m = mean( abs( [w_SK( k1_Endperiode : k_max ),
322             w_SH( k1_Endperiode : k_max )] ) ); % mittlere Stroemungsge-
323         schwindigkeit des Fluids in m/s
324         w_ein_max_H = max( w_SH( k1_Endperiode : k_max ) ) * A_Rquer_h /
325         A_Quer; % maximale Gaseintrittsgeschwindigkeit in den heissen Zy-
326         linder in m/s

```

```

316 w_ein_max_K = -min( w_SK( k1_Endperiode : k_max ) ) * A_RQuer_h /
A_Quer; % maximale Gaseintrittsgeschwindigkeit in den kalten Zy-
317 linder in m/s
rho_m_H = mean( rho_m_H ); % mittlere Dichte des Arbeitsgases im
heissen Zylinder in kg/m^3
318 rho_m_K = mean( rho_m_K ); % mittlere Dichte des Arbeitsgases im
kalten Zylinder in kg/m^3
319
320 Re_h_m = rho_m * w_m * d_h / mu; % Reynoldszahl in 1
321 k_R = 0.33 * Re_h_m^0.67 * lambda_Gas / d_h; % waermedurchgangs-
koeffizient im Regenerator in W/(m^2 K)
322 Re_ein_H = rho_m_H * w_ein_max_H * d / mu; % Reynoldszahl in 1,
kinematische Viskositaet durch dynamische ausgetauscht
323 delta_dh_H = min( 16.5 * Re_ein_H^-0.73, 0.25 ); % Rechenvariable
in 1
324 Pe_omega_H = 2 * pi * f * d^2 / ( 4 * lambda_Gas / ( rho_m_H *
c_p ) ); % Rechenvariable in 1
325 z_H = ( 1 + i ) * sqrt( 2 * Pe_omega_H ); % Rechenvariable in 1
326 Nu_c_H = z_H * ( 1 - exp( -2 * delta_dh_H * z_H ) + z_H * ( 1/4 -
delta_dh_H ) * ( 1 + exp( -2 * delta_dh_H * z_H ) ) ) / ...
327 ( ( 1 - exp( -2 * delta_dh_H * z_H ) )^2 + z_H * ( 1/4 - del-
ta_dh_H ) * ( 1 - exp( -2 * delta_dh_H * z_H ) ) ); % komplexe
Nusseltzahl in 1
328 alpha_H = real( Nu_c_H ) * lambda_Gas / d; % waermeuebergangsko-
effizient des heissen Zylinders in W/(m^2 K)
329 k_H = 1 / ( ( d + 2 * s ) / ( 2 * lambda_ZH ) * log( ( d + 2 * s )
/ d ) + ( d + 2 * s ) / ( d * alpha_H ) ); % waermedurchgangskoeff-
fizient des heissen Zylinders in W/(m^2 K)
330 Re_ein_K = rho_m_K * w_ein_max_K * d / mu; % Reynoldszahl in 1,
kinematische Viskositaet durch dynamische ausgetauscht
331 delta_dh_K = min( 16.5 * Re_ein_K^-0.73, 0.25 ); % Rechenvariable
in 1
332 Pe_omega_K = 2 * pi * f * d^2 / ( 4 * lambda_Gas / ( rho_m_K *
c_p ) ); % Rechenvariable in 1
333 z_K = ( 1 + i ) * sqrt( 2 * Pe_omega_K ); % Rechenvariable in 1
334 Nu_c_K = z_K * ( 1 - exp( -2 * delta_dh_K * z_K ) + z_K * ( 1/4 -
delta_dh_K ) * ( 1 + exp( -2 * delta_dh_K * z_K ) ) ) / ...
335 ( ( 1 - exp( -2 * delta_dh_K * z_K ) )^2 + z_K * ( 1/4 - del-
ta_dh_K ) * ( 1 - exp( -2 * delta_dh_K * z_K ) ) ); % komplexe
Nusseltzahl in 1
336 alpha_K = real( Nu_c_K ) * lambda_Gas / d; % waermeuebergangsko-
effizient des kalten Zylinders in W/(m^2 K)
337 Ra = ( beta * g * abs( T_KZm - T_Ka ) * L^3 ) / ( ny_U * kap-
pa_U ); % Rayleigh-Zahl in 1
338 alpha_Ka = lambda_U / L * ( 0.752 + 0.387 * ( Ra *
f_3 )^( 1/6 ) )^2; % waermeuebergangskoeffizient ausserhalb des
kalten Zylinders in W/(m^2 K)
339 k_K = 1 / ( ( 1 / alpha_Ka + ( d + 2 * s ) / ( 2 * lambda_ZK ) *
log( ( d + 2 * s ) / d ) + ( d + 2 * s ) / ( d * alpha_K ) ); %
waermedurchgangskoeffizient des kalten Zylinders in W/(m^2 K)
340
341 end
342
343 for Laufvariable = 1 : k_max + 1
344
345 k(Laufvariable) = Laufvariable - 1;
346 Periode(Laufvariable) = k(Laufvariable)/k_Periode + 1;
347 Periode_Integer(Laufvariable) = floor( Periode(Laufvariable) );
348
349 Q_H(Laufvariable) = k_H * A_Z * ( T_Ha - T_H(Laufvariable) );
350 Q_K(Laufvariable) = k_K * A_Z * ( T_Ka - T_K(Laufvariable) );
351
352 if Laufvariable ~= 1
353
354 p_H(Laufvariable) = m_H(Laufvariable) * R * T_H(Laufvariable)
/ V_H(Laufvariable);
355 p_K(Laufvariable) = m_K(Laufvariable) * R * T_K(Laufvariable)
/ V_K(Laufvariable);
356
357 end
358
359 Delta_p(Laufvariable) = p_H(Laufvariable) - p_K(Laufvariable);
360
361 if Delta_p(Laufvariable) >= 0
362
363 rho(Laufvariable) = m_H(Laufvariable)/V_H(Laufvariable);
364
365 else
366

```

```

367         rho(Laufvariable) = m_K(Laufvariable)/V_K(Laufvariable);
368
369     end
370
371     m_S(Laufvariable) = -sqrt( rho(Laufvariable) * abs( Delta_p(Laufvariable) ) / (8 * zeta * l_Reg) ) * pi * d_h^(5/2) *
372     sign( Delta_p(Laufvariable) );
373     m_H(Laufvariable + 1) = m_H(Laufvariable) + m_S(Laufvariable) *
Delta_t;
374     m_K(Laufvariable + 1) = m_K(Laufvariable) - m_S(Laufvariable) *
Delta_t;
375
376     if m_S(Laufvariable) >= 0
377         T_S(n_max, Laufvariable) = T_K(Laufvariable);
378
379         for n = n_max - 1 : -1 : 1
380
381             j = n;
382             T_S(n, Laufvariable) = ( 2 * k_R * Aj_R * T_R(j, Laufvar-
iable) + T_S(n + 1, Laufvariable) * ( 2 *
abs( m_S(Laufvariable) ) * c_p - k_R * Aj_R ) ) / ...
( 2 * abs( m_S(Laufvariable) ) * c_p + k_R * Aj_R );
383
384         end
385     else
386
387     T_S(1, Laufvariable) = T_H(Laufvariable);
388
389     for n = 1 : n_max - 1
390
391         j = n;
392         T_S(n + 1, Laufvariable) = ( 2 * k_R * Aj_R * T_R(j,
Laufvariable) + T_S(n, Laufvariable) * ( 2 *
abs( m_S(Laufvariable) ) * c_p - k_R * Aj_R ) ) / ...
( 2 * abs( m_S(Laufvariable) ) * c_p + k_R * Aj_R );
393
394     end
395
396     end
397
398     for j = 1 : j_max
399
400         n = j;
401         T_R(j, Laufvariable + 1) = Delta_t * m_S(Laufvariable) * c_p
/ ( m_j_R * c_R ) * ( T_S(n + 1, Laufvariable) - T_S(n,
Laufvariable) ) + T_R(j, Laufvariable);
402
403     end
404
405     if Periode_Integer(Laufvariable) == 1
406
407         Zwischenwert_Zustandsaenderung = Periode(Laufvariable) - Pe-
riode_Integer(Laufvariable);
408
409         if Zwischenwert_Zustandsaenderung < 0.25
410
411             Zustandsaenderung(Laufvariable) = 34;
412
413             V_H(Laufvariable + 1) = V_H(Laufvariable);
414             V_K(Laufvariable + 1) = V_K(Laufvariable) - Delta_V_34;
415
416         elseif Zwischenwert_Zustandsaenderung < 0.5
417
418             Zustandsaenderung(Laufvariable) = 41;
419
420             V_H(Laufvariable + 1) = V_H(Laufvariable) + Delta_V_41;
421             V_K(Laufvariable + 1) = V_K(Laufvariable) - Delta_V_41;
422
423         elseif Zwischenwert_Zustandsaenderung < 0.75
424
425             Zustandsaenderung(Laufvariable) = 12;
426
427             V_H(Laufvariable + 1) = V_H(Laufvariable) + Delta_V_12;
428             V_K(Laufvariable + 1) = V_K(Laufvariable);
429
430         else
431
432
433
434

```

```

435         Zustandsaenderung(Laufvariable) = 23;
436
437         V_H(Laufvariable + 1) = V_H(Laufvariable) + Delta_V_23;
438         V_K(Laufvariable + 1) = V_K(Laufvariable) - Delta_V_23;
439
440     end
441
442     if V_H(Laufvariable + 1) > V_max
443         V_H(Laufvariable + 1) = V_max;
444
445     elseif V_H(Laufvariable + 1) < V_Tot
446         V_H(Laufvariable + 1) = V_Tot;
447
448     end
449
450     if V_K(Laufvariable + 1) > V_max
451         V_K(Laufvariable + 1) = V_max;
452
453     elseif V_K(Laufvariable + 1) < V_Tot
454         V_K(Laufvariable + 1) = V_Tot;
455
456     end
457
458     else
459         V_H(Laufvariable + 1) = V_H( Laufvariable + 1 -
460         round( k_Periode * ( Periode_Integer(Laufvariable) - 1 ) ) );
461         V_K(Laufvariable + 1) = V_K( Laufvariable + 1 -
462         round( k_Periode * ( Periode_Integer(Laufvariable) - 1 ) ) );
463
464     end
465
466     T_H(Laufvariable + 1) = T_H(Laufvariable)/c_v * ( c_v - R *
467     ( V_H(Laufvariable + 1) - V_H(Laufvariable) ) /
468     V_H(Laufvariable) ...
469     + m_S(Laufvariable)/m_H(Laufvariable) * ( c_p * T_S(1,
470     Laufvariable) / T_H(Laufvariable) - c_v ) * Delta_t ...
471     + Q_H(Laufvariable) / ( T_H(Laufvariable) *
472     m_H(Laufvariable) ) * ( V_H(Laufvariable) - V_Tot ) / ( V_max
473     - V_Tot ) * Delta_t );
474     T_K(Laufvariable + 1) = T_K(Laufvariable)/c_v * ( c_v - R *
475     ( V_K(Laufvariable + 1) - V_K(Laufvariable) ) /
476     V_K(Laufvariable) ...
477     - m_S(Laufvariable)/m_K(Laufvariable) * ( c_p * T_S(n_max,
478     Laufvariable) / T_K(Laufvariable) - c_v ) * Delta_t ...
479     + Q_K(Laufvariable) / ( T_K(Laufvariable) *
480     m_K(Laufvariable) ) * ( V_K(Laufvariable) - V_Tot ) / ( V_max
481     - V_Tot ) * Delta_t );
482     T_KZ(Laufvariable) = T_Ka * ( 1 - k_K / alpha_Ka ) + k_K / al-
483     pha_Ka * T_K(Laufvariable);
484
485     % Kontrollgroessen
486     w_H(Laufvariable) = -p_H(Laufvariable) * ( V_H(Laufvariable + 1)
487     - V_H(Laufvariable) );
488     w_K(Laufvariable) = -p_K(Laufvariable) * ( V_K(Laufvariable + 1)
489     - V_K(Laufvariable) );
490
491     % effektiv aufgenommen Waermestrom
492     Q_He(Laufvariable) = Q_H(Laufvariable) * ( V_H(Laufvariable) -
493     V_Tot ) / ( V_max - V_Tot );
494     Q_Ke(Laufvariable) = Q_K(Laufvariable) * ( V_K(Laufvariable) -
495     V_Tot ) / ( V_max - V_Tot );
496
497     % effektiv aufgenommene Waerme
498     Q_Ha(Laufvariable) = Q_He(Laufvariable) * Delta_t;
499     Q_Ka(Laufvariable) = Q_Ke(Laufvariable) * Delta_t;
500
501     % Geschwindigkeit Massenstrom
502     w_SH(Laufvariable) = m_S(Laufvariable) * R * T_S(1, Laufvariable)
503     / ( p_H(Laufvariable) * A_Rquer_h );
504     w_SK(Laufvariable) = m_S(Laufvariable) * R * T_S(n_max, Laufvari-
505     able) / ( p_K(Laufvariable) * A_Rquer_h );
506
507 end

```

```

495
496     W_g = W_H + W_K;
497     W = sum( W_g( k1_Endperiode : k_max ) );
498     Q_H_p = sum( Q_Ha( k1_Endperiode : k_max ) );
499     Q_K_p = sum( Q_Ka( k1_Endperiode : k_max ) );
500
501     Energiesumme = W + Q_H_p + Q_K_p;
502     Energie_waerme(Epoche) = Energiesumme / Q_H_p;
503
504     if ( abs( Energiesumme ) < Abbruchkriterium_Arbeit * Q_H_p ) &&
        ( Epoche >= Epoche_Anzahl_min )
505
506         break
507
508     end
509
510     Epoche = Epoche + 1;
511
512 end
513
514 V_g = V_H + V_K;
515
516 for Laufvariable = 1 : k_max
517
518     % Kontrollgroessen
519     du_dm_H(Laufvariable) = c_v * m_H(Laufvariable) * ( T_H(Laufvariable
        + 1) - T_H(Laufvariable) );
520     du_dm_K(Laufvariable) = c_v * m_K(Laufvariable) * ( T_K(Laufvariable
        + 1) - T_K(Laufvariable) );
521
522     du_dT_H(Laufvariable) = c_v * T_H(Laufvariable) * m_S(Laufvariable) *
        Delta_t;
523     du_dT_K(Laufvariable) = c_v * T_K(Laufvariable) * -m_S(Laufvariable)
        * Delta_t;
524
525     H_mS_H(Laufvariable) = m_S(Laufvariable) * c_p * T_S(1, Laufvariable)
        * Delta_t;
526     H_mS_K(Laufvariable) = -m_S(Laufvariable) * c_p * T_S(n_max, Laufvar-
        iable) * Delta_t;
527
528     for j = 1 : j_max
529
530         n = j;
531         du_R(j, Laufvariable) = c_R * m_j_R * ( T_R(j, Laufvariable + 1) -
            T_R(j, Laufvariable) );
532         H_mS_R(j, Laufvariable) = c_p * m_S(Laufvariable) * ( T_S(n + 1,
            Laufvariable) - T_S(n, Laufvariable) ) * Delta_t;
533         Q_R(j, Laufvariable) = -A_j_R * k_R * ( T_R(j, Laufvariable) -
            ( T_S(n + 1, Laufvariable) + T_S(n, Laufvariable) ) / 2 ) * Del-
            ta_t;
534
535     end
536
537     % p,v-Diagramm
538     v(Laufvariable) = ( v_H(Laufvariable) + v_K(Laufvariable) ) /
        ( m_H(Laufvariable) + m_K(Laufvariable) );
539     T_m(Laufvariable) = ( m_H(Laufvariable) * T_H(Laufvariable) +
        m_K(Laufvariable) * T_K(Laufvariable) ) / ( m_H(Laufvariable) +
        m_K(Laufvariable) );
540     p_m(Laufvariable) = ( m_H(Laufvariable) + m_K(Laufvariable) ) * R *
        T_m(Laufvariable) / ( v_H(Laufvariable) + v_K(Laufvariable) );
541
542     % Totraum
543     a_Tot(Laufvariable) = 2 * v_Tot / ( v_H(Laufvariable) +
        v_K(Laufvariable) );
544
545 end
546
547 % werte abspeichern
548 a_Tot_Schleife(:) = a_Tot;
549 Delta_p_Schleife(:) = Delta_p;
550 Energie_waerme_Schleife(:) = Energie_waerme;
551 Ergebnis_Delta_v_Schleife(:) = [Delta_v, W, Q_H_p, Q_K_p, Energiesumme,
        W/Q_H_p, Epoche - 1];
552 k_Schleife(:) = k;
553 max_Fehler_H_Schleife = max( abs( du_dm_H + du_dT_H - ( W_H( 1 : k_max )
        + H_mS_H + Q_Ha( 1 : k_max ) ) ) );
554 max_Fehler_K_Schleife = max( abs( du_dm_K + du_dT_K - ( W_K( 1 : k_max )
        + H_mS_K + Q_Ka( 1 : k_max ) ) ) );

```

```

555     max_Fehler_R_E(Schleife) = max( max( abs( dU_R - H_mS_R ) ) );
556     max_Fehler_R_WUE(Schleife) = max( max( abs( H_mS_R - Q_R ) ) );
557     m_H_(Schleife, :) = m_H;
558     m_K_(Schleife, :) = m_K;
559     m_S_(Schleife, :) = m_S;
560     p_H_(Schleife, :) = p_H;
561     p_K_(Schleife, :) = p_K;
562     p_m_(Schleife, :) = p_m;
563     Periode_(Schleife, :) = Periode;
564     Q_H_(Schleife, :) = Q_H;
565     Q_He_(Schleife, :) = Q_He;
566     Q_K_(Schleife, :) = Q_K;
567     Q_Ke_(Schleife, :) = Q_Ke;
568     rho_m_(Schleife) = rho_m;
569     rho_m_H_(Schleife) = rho_m_H;
570     rho_m_K_(Schleife) = rho_m_K;
571     T_H_(Schleife, :) = T_H;
572     T_K_(Schleife, :) = T_K;
573     T_KZ_(Schleife, :) = T_KZ;
574     T_m_(Schleife, :) = T_m;
575     T_R_( :, :, Schleife ) = T_R;
576     T_S_( :, :, Schleife ) = T_S;
577     v_(Schleife, :) = v;
578     V_g_(Schleife, :) = V_g;
579     V_H_(Schleife, :) = V_H;
580     V_K_(Schleife, :) = V_K;
581     w_g_(Schleife, :) = w_g;
582     w_H_(Schleife, :) = w_H;
583     w_K_(Schleife, :) = w_K;
584     w_SH_(Schleife, :) = w_SH;
585     w_SK_(Schleife, :) = w_SK;
586
587     end
588
589     %% Plots
590
591     close all; clc;
592
593     Plot_von = 1;
594     Plot_bis = k_max;
595     Schleife_anz = Iterationen;
596
597     figure('Name', 'Druck', 'NumberTitle', 'off');
598     plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), p_H_( Schleife_anz, Plot_von :
599     Plot_bis ) );
600     hold on;
601     plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), p_K_( Schleife_anz, Plot_von :
602     Plot_bis ) );
603     legend('p_H', 'p_K');
604     xlabel('Rechenschritt in 1');
605     ylabel('Druck in Pa');
606     ax = gca;
607     ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
608     ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
609     grid;
610     grid minor;
611
612     figure('Name', 'Volumen', 'NumberTitle', 'off');
613     plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), V_H_( Schleife_anz, Plot_von :
614     Plot_bis ) );
615     hold on;
616     plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), V_K_( Schleife_anz, Plot_von :
617     Plot_bis ) );
618     legend('V_H', 'V_K', 'V_m_a_x', 'V_m_i_n');
619     xlabel('Rechenschritt in 1');
620     ylabel('Volumen in m^3');
621     ax = gca;
622     ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
623     ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
624     grid;
625     grid minor;
626
627     figure('Name', 'Summe volumen', 'NumberTitle', 'off');
628     plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), V_g_( Schleife_anz, Plot_von :
629     Plot_bis ) );

```

```

629 legend('Summe Volumen');
630 xlabel('Rechenschritt in 1');
631 ylabel('Volumen in m^3');
632 ax = gca;
633 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
634 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
635 grid;
636 grid minor;
637
638 figure('Name', 'Masse', 'NumberTitle', 'off');
639 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), m_H_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
640 hold on;
641 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), m_K_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
642 legend('m_H', 'm_K');
643 xlabel('Rechenschritt in 1');
644 ylabel('Masse in kg');
645 ax = gca;
646 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
647 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
648 grid;
649 grid minor;
650
651 figure('Name', 'Temperatur', 'NumberTitle', 'off');
652 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), T_H_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
653 hold on;
654 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), T_K_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
655 legend('T_H', 'T_K');
656 xlabel('Rechenschritt in 1');
657 ylabel('Temperatur in K');
658 ax = gca;
659 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
660 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
661 grid;
662 grid minor;
663
664 figure('Name', 'Zylinderaussentemperatur der kalten Seite', 'NumberTitle',
'off');
665 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), T_KZ_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
666 hold on;
667 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), T_K_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
668 legend('T_K_Z', 'T_K');
669 xlabel('Rechenschritt in 1');
670 ylabel('Temperatur in K');
671 ax = gca;
672 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
673 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
674 grid;
675 grid minor;
676
677 figure('Name', 'waermestrom', 'NumberTitle', 'off');
678 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), Q_H_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
679 hold on;
680 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), Q_K_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
681 legend('Q_H', 'Q_K');
682 xlabel('Rechenschritt in 1');
683 ylabel('waermestrom in W');
684 ax = gca;
685 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
686 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
687 grid;
688 grid minor;
689
690 figure('Name', 'waermestrom effektiv (aufgenommener Anteil)', 'NumberTitle',
'off');
691 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), Q_He_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
692 hold on;
693 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), Q_Ke_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
694 legend('Q_He', 'Q_Ke');
695 xlabel('Rechenschritt in 1');

```

```

696 ylabel('waermestrom in w');
697 ax = gca;
698 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
699 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
700 grid;
701 grid minor;
702
703 figure('Name', 'waermestrom Vergleich', 'NumberTitle', 'off');
704 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), Q_H_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
705 hold on;
706 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), Q_K_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
707 hold on;
708 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), Q_He_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
709 hold on;
710 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), Q_Ke_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
711 legend('Q_H', 'Q_K', 'Q_He', 'Q_Ke');
712 xlabel('Rechenschritt in 1');
713 ylabel('waermestrom in w');
714 ax = gca;
715 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
716 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
717 grid;
718 grid minor;
719
720 figure('Name', 'Druckdifferenz', 'NumberTitle', 'off');
721 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), Delta_p_( Schleife_anz,
Plot_von : Plot_bis ) );
722 legend('Delta p');
723 xlabel('Rechenschritt in 1');
724 ylabel('Druckdifferenz in Pa');
725 ax = gca;
726 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
727 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
728 grid;
729 grid minor;
730
731 figure('Name', 'Massenstrom', 'NumberTitle', 'off');
732 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), m_S_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
733 legend('m_S');
734 xlabel('Rechenschritt in 1');
735 ylabel('Massenstrom in kg/s');
736 ax = gca;
737 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
738 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
739 grid;
740 grid minor;
741
742 figure('Name', 'Geschwindigkeit Massenstrom', 'NumberTitle', 'off');
743 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), w_SH_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
744 hold on;
745 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), w_SK_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
746 legend('w_S_H', 'w_S_K');
747 xlabel('Rechenschritt in 1');
748 ylabel('Geschwindigkeit in m/s');
749 ax = gca;
750 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
751 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
752 grid;
753 grid minor;
754
755 figure('Name', 'Temperatur Massenstrom erste Periode', 'NumberTitle', 'off');
756 plot( 1 : n_max, T_S_( :, 1 + round( k_Periode / 8 ), Schleife_anz ) );
757 hold on;
758 plot( 1 : n_max, T_S_( :, 1 + round( 3 * k_Periode / 8 ), Schleife_anz ) );
759 hold on;
760 plot( 1 : n_max, T_S_( :, 1 + round( 5 * k_Periode / 8 ), Schleife_anz ) );
761 hold on;
762 plot( 1 : n_max, T_S_( :, 1 + round( 7 * k_Periode / 8 ), Schleife_anz ) );
763 legend('T_S(n, k_P_e_r_i_o_d_e / 8)', 'T_S(n, 3 * k_P_e_r_i_o_d_e / 8)',
'T_S(n, 5 * k_P_e_r_i_o_d_e / 8)', 'T_S(n, 7 * k_P_e_r_i_o_d_e / 8)');
764 xlabel('Element in 1');
765 ylabel('Temperatur in K');

```

```

766 grid;
767
768 figure('Name', 'Temperatur Massenstrom letzte Periode', 'NumberTitle', 'off');
769 plot( 1 : n_max, T_S( :, round( 1 + k_Periode / 8 + ( Periode_Anzahl - 1 ) *
k_Periode ), Schleife_anz ) );
770 hold on;
771 plot( 1 : n_max, T_S( :, round( 1 + 3 * k_Periode / 8 + ( Periode_Anzahl -
1 ) * k_Periode ), Schleife_anz ) );
772 hold on;
773 plot( 1 : n_max, T_S( :, round( 1 + 5 * k_Periode / 8 + ( Periode_Anzahl -
1 ) * k_Periode ), Schleife_anz ) );
774 hold on;
775 plot( 1 : n_max, T_S( :, round( 1 + 7 * k_Periode / 8 + ( Periode_Anzahl -
1 ) * k_Periode ), Schleife_anz ) );
776 legend('T_S(n, k_P_e_r_i_o_d_e / 8)', 'T_S(n, 3 * k_P_e_r_i_o_d_e / 8)',
'T_S(n, 5 * k_P_e_r_i_o_d_e / 8)', 'T_S(n, 7 * k_P_e_r_i_o_d_e / 8)');
777 xlabel('Element in 1');
778 ylabel('Temperatur in K');
779 grid;
780
781 figure('Name', 'Temperatur Regenerator erste Periode', 'NumberTitle', 'off');
782 plot( 1 : j_max, T_R( :, 1 + round( k_Periode / 8 ), Schleife_anz ) );
783 hold on;
784 plot( 1 : j_max, T_R( :, 1 + round( 3 * k_Periode / 8 ), Schleife_anz ) );
785 hold on;
786 plot( 1 : j_max, T_R( :, 1 + round( 5 * k_Periode / 8 ), Schleife_anz ) );
787 hold on;
788 plot( 1 : j_max, T_R( :, 1 + round( 7 * k_Periode / 8 ), Schleife_anz ) );
789 legend('T_R(j, k_P_e_r_i_o_d_e / 8)', 'T_R(j, 3 * k_P_e_r_i_o_d_e / 8)',
'T_R(j, 5 * k_P_e_r_i_o_d_e / 8)', 'T_R(j, 7 * k_P_e_r_i_o_d_e / 8)');
790 xlabel('Element in 1');
791 ylabel('Temperatur in K');
792 grid;
793
794 figure('Name', 'Temperatur Regenerator letzte Periode', 'NumberTitle', 'off');
795 plot( 1 : j_max, T_R( :, round( 1 + k_Periode / 8 + ( Periode_Anzahl - 1 ) *
k_Periode ), Schleife_anz ) );
796 hold on;
797 plot( 1 : j_max, T_R( :, round( 1 + 3 * k_Periode / 8 + ( Periode_Anzahl -
1 ) * k_Periode ), Schleife_anz ) );
798 hold on;
799 plot( 1 : j_max, T_R( :, round( 1 + 3 * k_Periode / 8 + ( Periode_Anzahl -
1 ) * k_Periode ), Schleife_anz ) );
800 hold on;
801 plot( 1 : j_max, T_R( :, round( 1 + 3 * k_Periode / 8 + ( Periode_Anzahl -
1 ) * k_Periode ), Schleife_anz ) );
802 legend('T_R(j, k_P_e_r_i_o_d_e / 8)', 'T_R(j, 3 * k_P_e_r_i_o_d_e / 8)',
'T_R(j, 5 * k_P_e_r_i_o_d_e / 8)', 'T_R(j, 7 * k_P_e_r_i_o_d_e / 8)');
803 xlabel('Element in 1');
804 ylabel('Temperatur in K');
805 grid;
806
807 figure('Name', 'Temperatur Massenstrom und Regenerator letzte Periode', 'Num-
berTitle', 'off');
808 plot( 1 : n_max, T_S( :, round( 1 + k_Periode / 8 + ( Periode_Anzahl - 1 ) *
k_Periode ), Schleife_anz ), 'b');
809 hold on;
810 plot( 1 : n_max, T_S( :, round( 1 + 3 * k_Periode / 8 + ( Periode_Anzahl -
1 ) * k_Periode ), Schleife_anz ), 'c');
811 hold on;
812 plot( 1 : n_max, T_S( :, round( 1 + 5 * k_Periode / 8 + ( Periode_Anzahl -
1 ) * k_Periode ), Schleife_anz ), 'r');
813 hold on;
814 plot( 1 : n_max, T_S( :, round( 1 + 7 * k_Periode / 8 + ( Periode_Anzahl -
1 ) * k_Periode ), Schleife_anz ), 'g');
815 hold on;
816 plot( ( 1 : j_max ) + 0.5, T_R( :, round( 1 + k_Periode / 8 + ( Perio-
de_Anzahl - 1 ) * k_Periode ), Schleife_anz ), '--b' );
817 hold on;
818 plot( ( 1 : j_max ) + 0.5, T_R( :, round( 1 + 3 * k_Periode / 8 + ( Peri-
ode_Anzahl - 1 ) * k_Periode ), Schleife_anz ), '--c' );
819 hold on;
820 plot( ( 1 : j_max ) + 0.5, T_R( :, round( 1 + 3 * k_Periode / 8 + ( Peri-
ode_Anzahl - 1 ) * k_Periode ), Schleife_anz ), '--r' );
821 hold on;
822 plot( ( 1 : j_max ) + 0.5, T_R( :, round( 1 + 3 * k_Periode / 8 + ( Peri-
ode_Anzahl - 1 ) * k_Periode ), Schleife_anz ), '--g' );
823 legend('T_S(n, k_P_e_r_i_o_d_e / 8)', 'T_S(n, 3 * k_P_e_r_i_o_d_e / 8)',
'T_S(n, 5 * k_P_e_r_i_o_d_e / 8)', 'T_S(n, 7 * k_P_e_r_i_o_d_e / 8)', ...

```

```

824     'T_R(j, k_Periode / 8)', 'T_R(j, 3 * k_Periode / 8)', 'T_R(j,
825     5 * k_Periode / 8)', 'T_R(j, 7 * k_Periode / 8)');
826 xlabel('Element n in 1');
827 ylabel('Temperatur in K');
828 grid;
829 figure('Name', 'Volumenaenderungsarbeit', 'NumberTitle', 'off');
830 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), w_H_( Schleife_anz, Plot_von :
831     Plot_bis ) );
832 hold on;
833 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), w_K_( Schleife_anz, Plot_von :
834     Plot_bis ) );
835 legend('w_H', 'w_K');
836 xlabel('Rechenschritt in 1');
837 ylabel('Volumenaenderungsarbeit in J');
838 ax = gca;
839 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
840 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
841 grid;
842 grid minor;
843 figure('Name', 'Summe Volumenaenderungsarbeit', 'NumberTitle', 'off');
844 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), w_g_( Schleife_anz, Plot_von :
845     Plot_bis ) );
846 legend('Summe w');
847 xlabel('Rechenschritt in 1');
848 ylabel('Volumenaenderungsarbeit in J');
849 ax = gca;
850 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
851 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
852 grid;
853 grid minor;
854 figure('Name', 'Energiesumme/zugefuehrte waerme', 'NumberTitle', 'off');
855 plot( 1 : Epoche_Anzahl_max, Energie_waerme_( Schleife_anz, : ) );
856 hold on;
857 plot( [ 1, Epoche_Anzahl_max ], [1, 1] * Abbruchkriterium_Arbeit, '-.' );
858 legend('Energiesumme/zugefuehrte waerme', 'Abbruchkriterium Arbeit');
859 xlabel('Epoche in 1');
860 ylabel('Verhaeltnis in 1');
861 ylim([ min( Energie_waerme_( Schleife_anz, : ) ) * 0.5, max( Ener-
862     gie_waerme_( Schleife_anz, : ) ) * 1.5 ]);
863 set(gca, 'YScale', 'log');
864 grid;
865 grid minor;
866 figure('Name', 'p,v-Diagramm', 'NumberTitle', 'off');
867 Plot_ber_Dia = plot( v_( Schleife_anz, : ), p_m_( Schleife_anz, : ), 'b' );
868 hold on;
869 Plot_ide_Dia = plot( v_( Schleife_anz, : ), R * T_Ha ./ v_( Schleife_anz, : ),
870     'g-' );
871 hold on;
872 plot( v_( Schleife_anz, : ), R * T_Ka ./ v_( Schleife_anz, : ), 'g-' );
873 hold on;
874 plot( [1, 1] * min( v_( Schleife_anz, : ) ), [ T_Ka, T_Ha ] * R /
875     min( v_( Schleife_anz, : ) ), 'g-' );
876 hold on;
877 plot( [1, 1] * max( v_( Schleife_anz, : ) ), [ T_Ka, T_Ha ] * R /
878     max( v_( Schleife_anz, : ) ), 'g-' );
879 hold on;
880 Plot_Iso = plot( v_( Schleife_anz, : ), R * max( T_m_( Schleife_anz, : ) ) ./
881     v_( Schleife_anz, : ), 'r:' );
882 hold on;
883 plot( v_( Schleife_anz, : ), R * min( T_m_( Schleife_anz, : ) ) ./
884     v_( Schleife_anz, : ), 'r:' );
885 legend( [Plot_ber_Dia, Plot_ide_Dia, Plot_Iso], {'berechnetes Diagramm',
886     'ideales Diagramm', 'Isothermen'} );
887 xlabel('spezifisches Volumen in m^3/kg');
888 ylabel('gewichteter Druck in Pa');
889 grid;
890 grid minor;
891 figure('Name', 'Totraumanteil', 'NumberTitle', 'off');
892 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), a_Tot_( Schleife_anz,
893     Plot_von : Plot_bis ) );
894 legend('Totraumanteil');
895 xlabel('Rechenschritt in 1');
896 ylabel('Totraumanteil in 1');
897 ax = gca;

```

```

891 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
892 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
893 grid;
894 grid minor;
895
896 figure('Name', 'gewichteter Druck', 'NumberTitle', 'off');
897 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), p_H_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
898 hold on;
899 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), p_K_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
900 hold on;
901 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), p_m_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
902 legend('p_H', 'p_K', 'p_m');
903 xlabel('Rechenschritt in 1');
904 ylabel('Druck in Pa');
905 ax = gca;
906 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
907 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
908 grid;
909 grid minor;
910
911 figure('Name', 'gewichtete Temperatur', 'NumberTitle', 'off');
912 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), T_H_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
913 hold on;
914 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), T_K_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
915 hold on;
916 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), T_m_( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
917 legend('T_H', 'T_K', 'T_m');
918 xlabel('Rechenschritt in 1');
919 ylabel('Temperatur in K');
920 ax = gca;
921 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
922 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
923 grid;
924 grid minor;
925
926 %% Iterationsinformationen
927
928 clc;
929
930 Schleife_anz = Iterationen;
931
932 disp( 'Betrag maximaler Fehler pro Rechenschritt Energiebilanz heisse Seite: '
+ string( max_Fehler_H(Schleife_anz) ) );
933 disp( 'Betrag maximaler Fehler pro Rechenschritt Energiebilanz kalte Seite: '
+ string( max_Fehler_K(Schleife_anz) ) );
934 disp( 'Betrag maximaler Fehler pro Rechenschritt Energiebilanz Regenerator: '
+ string( max_Fehler_R_E(Schleife_anz) ) );
935 disp( 'Betrag maximaler Fehler pro Rechenschritt Energiebi-
lanz/waermeuebergang Regenerator: ' +
string( max_Fehler_R_WUE(Schleife_anz) ) );
936
937 disp( ' ' );
938 disp( 'werte letzte Periode' );
939 disp( ' ' );
940
941 disp( 'mittlere Volumenaenderungsleistung: ' + string( Ergeb-
nis_Delta_V(Schleife_anz, 2) / tau ) + ' W' );
942 disp( 'mittlerer waermestrom heisse Seite: ' + string( Ergeb-
nis_Delta_V(Schleife_anz, 3) / tau ) + ' W' );
943 disp( 'mittlerer waermestrom kalte Seite: ' + string( Ergeb-
nis_Delta_V(Schleife_anz, 4) / tau ) + ' W' );
944 disp( 'Summe Leistung: ' + string( Ergebnis_Delta_V(Schleife_anz, 5) / tau )
+ ' W' );
945 disp( 'Epochen: ' + string( Ergebnis_Delta_V(Schleife_anz, 7) ) );
946
947 disp( ' ' );
948 disp( 'T_H am Anfang der Periode: ' + string( T_H_( Schleife_anz,
k1_Endperiode ) ) + ' K' );
949 disp( 'T_K am Anfang der Periode: ' + string( T_K_( Schleife_anz,
k1_Endperiode ) ) + ' K' );
950 disp( 'T1_R am Anfang der Periode: ' + string( T_R_( 1, k1_Endperiode,
Schleife_anz ) ) + ' K' );

```

```

951 disp( 'Tjmax_R am Anfang der Periode: ' + string( T_R_( j_max, k1_Endperiode,
Schleife_anz ) ) + ' K' );
952 disp( 'mittlere Dichte im Regenerator: ' + string( rho_m_(Schleife_anz) ) + '
kg/m^3' );
953 disp( 'Betrag maximale Geschwindigkeit im Regenerator: ' +
string( max( abs( [ w_SK_(Schleife_anz, k1_Endperiode : k_max ),
w_SH_(Schleife_anz, k1_Endperiode : k_max ) ] ) ) ) + ' m/s' );
954 disp( 'Betrag mittlere Geschwindigkeit im Regenerator: ' +
string( mean( abs( [ w_SK_(Schleife_anz, k1_Endperiode : k_max ),
w_SH_(Schleife_anz, k1_Endperiode : k_max ) ] ) ) ) + ' m/s' );
955 disp( 'Betrag maximale Gaseintrittsgeschwindigkeit im heissen Zylinder: ' +
string( max( w_SH_(Schleife_anz, k1_Endperiode : k_max ) ) * A_RQuer_h /
A_Quer ) + ' m/s' );
956 disp( 'Betrag maximale Gaseintrittsgeschwindigkeit im kalten Zylinder: ' +
string( -min( w_SK_(Schleife_anz, k1_Endperiode : k_max ) ) * A_RQuer_h /
A_Quer ) + ' m/s' );
957 disp( 'mittlere Dichte im heissen Zylinder: ' +
string( rho_m_H_(Schleife_anz) ) + ' kg/m^3' );
958 disp( 'mittlere Dichte im kalten Zylinder: ' +
string( rho_m_K_(Schleife_anz) ) + ' kg/m^3' );
959 disp( 'p_H am Anfang der Periode: ' + string( p_H_( Schleife_anz,
k1_Endperiode ) ) + ' Pa' );
960 disp( 'p_K am Anfang der Periode: ' + string( p_K_( Schleife_anz,
k1_Endperiode ) ) + ' Pa' );
961 disp( 'mittlerer Totraumanteil vom Regenerator: ' +
string( mean( a_Tot_( Schleife_anz, k1_Endperiode : k_max ) ) ) );
962 disp( 'mittlerer gewichteter Druck: ' + string( mean( p_m_( Schleife_anz,
k1_Endperiode : k_max ) ) ) + ' Pa' );
963 disp( 'mittlere gewichtete Temperatur: ' + string( mean( T_m_( Schleife_anz,
k1_Endperiode : k_max ) ) ) + ' K' );
964 disp( 'mittlere Temperatur im heissen Zylinder: ' +
string( mean( T_H_( Schleife_anz, k1_Endperiode : k_max ) ) ) + ' K' );
965 disp( 'mittlere Temperatur der kalten Zylinderwand: ' +
string( mean( [ T_K_( Schleife_anz, k1_Endperiode : k_max ),
T_KZ_( Schleife_anz, k1_Endperiode : k_max ) ] ) ) + ' K' );
966 disp( 'maximaler Druck: ' + string( max( [ p_H_( Schleife_anz, k1_Endperiode :
k_max ), p_K_( Schleife_anz, k1_Endperiode : k_max ) ] ) ) + ' Pa' );
967
968 disp( ' ' );
969 disp( 'werte optimalstes Delta_V:' );
970 disp( ' ' );
971 array2table(Ergebnis_Delta_V(Schleife_anz, :), 'VariableNames', {'Delta_V',
'w', 'Q_H_p', 'Q_K_p', 'Energiesumme', 'w_Q_H_p', 'Epoche'})
972
973 %% Nocke
974
975 d_A = 0.09; % Abstand vom Mittelpunkt der Nocke bis zum oberen Totpunkt des
Zylinders in m
976 d_P = 0.04; % Pleuellaenge inklusive Kolbenhoehe in m
977
978 Schleife_anz = Iterationen;
979 r_H = zeros(1, round( k_Periode ));
980 r_K = zeros(1, round( k_Periode ));
981 x_H = zeros(1, round( k_Periode ));
982 y_H = zeros(1, round( k_Periode ));
983 x_K = zeros(1, round( k_Periode ));
984 y_K = zeros(1, round( k_Periode ));
985
986 for Laufvariable = round( k_max - k_Periode + 1 ) : k_max
987
988     Index = round( Laufvariable - ( Periode_Anzahl - 1 ) * k_Periode );
989     beta_k = ( Periode_(Schleife_anz, Laufvariable) - Periode_Anzahl ) * 2 *
pi;
990
991     r_H(Index) = d_A - d_P - ( V_H_(Schleife_anz, Laufvariable) - V_Tot ) /
A_Quer;
992     r_K(Index) = d_A - d_P - ( V_K_(Schleife_anz, Laufvariable) - V_Tot ) /
A_Quer;
993
994     x_H(Index) = r_H(Index) * cos(beta_k);
995     y_H(Index) = r_H(Index) * sin(beta_k);
996
997     x_K(Index) = r_K(Index) * cos(beta_k);
998     y_K(Index) = r_K(Index) * sin(beta_k);
999
1000 end
1001
1002 Achse_H = max( abs( [x_H, y_H] ) ) * 1.05;
1003

```

```

1004 figure('Name', 'Nocke heisse Seite', 'NumberTitle', 'off', 'Position', [0, 0,
600, 600]);
1005 plot(x_H, y_H);
1006 hold on;
1007 plot(0, 0, '+k', 'MarkerSize', 10);
1008 xlabel('Laenge in m');
1009 ylabel('Laenge in m');
1010 xlim([-Achse_H, Achse_H]);
1011 ylim([-Achse_H, Achse_H]);
1012 grid;
1013 grid minor;
1014
1015 Achse_K = max( abs( [x_K, y_K] ) ) * 1.05;
1016
1017 figure('Name', 'Nocke kalte Seite', 'NumberTitle', 'off', 'Position', [0, 0,
600, 600]);
1018 plot(x_K, y_K);
1019 hold on;
1020 plot(0, 0, '+k', 'MarkerSize', 10);
1021 xlabel('Laenge in m');
1022 ylabel('Laenge in m');
1023 xlim([-Achse_K, Achse_K]);
1024 ylim([-Achse_K, Achse_K]);
1025 grid;
1026 grid minor;
1027
1028 Achse_V = max( Achse_K, Achse_H ) * 1.05;
1029
1030 figure('Name', 'Nocke vergleich', 'NumberTitle', 'off', 'Position', [0, 0,
600, 600]);
1031 plot(-y_K, -x_K);
1032 hold on;
1033 plot(x_H, y_H);
1034 hold on;
1035 plot(0, 0, '+k', 'MarkerSize', 10);
1036 legend('Nocke kalt', 'Nocke heiss');
1037 xlabel('Laenge in m');
1038 ylabel('Laenge in m');
1039 xlim([-Achse_V, Achse_V]);
1040 ylim([-Achse_V, Achse_V]);
1041 grid;
1042 grid minor;
1043
1044 %% Kraefte
1045
1046 r_Scheibe = 0.042; % Durchmesser der Scheibe in m
1047 a = 0.013; % Abstand a in m
1048 b = 0.01; % Abstand b in m
1049
1050 F_MH = ( abs( w_H_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ) ) +
max( abs( w_H_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ) ) ) / 10 ) / ( Delta_t *
r_Scheibe * 2 * pi * f );
1051 F_MK = ( abs( w_K_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ) ) +
max( abs( w_K_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ) ) ) / 10 ) / ( Delta_t *
r_Scheibe * 2 * pi * f );
1052 F_NH = p_H_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ) * A_Quer;
1053 F_NK = p_K_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ) * A_Quer;
1054
1055 figure('Name', 'Lagerkraefte heisse Seite', 'NumberTitle', 'off');
1056 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), F_NH / 2 - F_MH * ( 1 + b /
( 2 * a ) ) );
1057 hold on;
1058 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), F_MH * b / ( 2 * a ) + F_NH /
2 );
1059 legend('F_A', 'F_B');
1060 xlabel('Rechenschritt in 1');
1061 ylabel('Kraft in N'); ylim( [-5, 30] );
1062 ax = gca;
1063 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
1064 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
1065 grid;
1066 grid minor;
1067
1068 figure('Name', 'Lagerkraefte kalte Seite', 'NumberTitle', 'off');
1069 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), F_NK / 2 - F_MK * ( 1 + b /
( 2 * a ) ) );
1070 hold on;
1071 plot( k_( Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), F_MK * b / ( 2 * a ) + F_NK /
2 );

```

```

1072 legend('F_A', 'F_B');
1073 xlabel('Rechenschritt in 1');
1074 ylabel('Kraft in N'); ylim( [-5, 30] );
1075 ax = gca;
1076 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
1077 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
1078 grid;
1079 grid minor;
1080
1081 disp( 'maximale Lagerkraft: ' + string( max( abs( [ F_NH / 2 - F_MH * ( 1 + b
/ ( 2 * a ) ), F_MH * b / ( 2 * a ) + F_NH / 2, F_NK / 2 - F_MK * ( 1 + b / ( 2
* a ) ), F_MK * b / ( 2 * a ) + F_NK / 2 ] ) ) ) + ' N' );
1082
1083 %% Kolbenkrafte
1084
1085 r_H__ = zeros(size(p_H)); % Beschleunigung heisser Kolben
1086 r_K__ = zeros(size(p_H)); % Beschleunigung kalter Kolben
1087
1088 for Laufvariable = round( k_max - k_Periode + 1 ) + 1 : k_max - 1
1089
1090 r_H__(Laufvariable) = ( r_H(Laufvariable + 1) - 2 * r_H(Laufvariable) +
r_H(Laufvariable - 1) ) / Delta_t^2;
1091 r_K__(Laufvariable) = ( r_K(Laufvariable + 1) - 2 * r_K(Laufvariable) +
r_K(Laufvariable - 1) ) / Delta_t^2;
1092
1093 end
1094
1095 F_NH = p_H * A_Quer + 0.022 * r_H__;
1096 F_NK = p_K * A_Quer + 0.022 * r_K__;
1097
1098 figure('Name', 'Kraft des Kolbens auf die Nocke der heißen Seite', 'Number-
Title', 'off');
1099 plot( k_(Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), F_NH( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
1100 legend('F_N_H');
1101 xlabel('Rechenschritt in 1');
1102 ylabel('Kraft in N'); ylim([0, 45]);
1103 ax = gca;
1104 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
1105 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
1106 grid;
1107 grid minor;
1108
1109 figure('Name', 'Kraft des Kolbens auf die Nocke der kalten Seite', 'Number-
Title', 'off');
1110 plot( k_(Schleife_anz, Plot_von : Plot_bis ), F_NK( Schleife_anz, Plot_von :
Plot_bis ) );
1111 legend('F_N_K');
1112 xlabel('Rechenschritt in 1');
1113 ylabel('Kraft in N'); ylim([0, 45]);
1114 ax = gca;
1115 ax.XTick = Plot_von - 1 : k_Periode : Plot_bis - 1;
1116 ax.XAxis.MinorTickValues = Plot_von - 1 : k_Periode / 4 : Plot_bis - 1;
1117 grid;
1118 grid minor;

```

## 7.2 Ergebnisse Maschengewebe

Tabelle 20: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,125 mm und einer Drahtdicke von 0,08 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,12275	-0,094124	-0,027517	0,0011099	-1,3041
2,1420E-07	0,11604	-0,088647	-0,026305	0,0010855	-1,309
4,2840E-07	0,10958	-0,083417	-0,025109	0,0010594	-1,3137
6,4260E-07	0,10347	-0,078499	-0,023939	0,0010324	-1,3181
8,5680E-07	0,09784	-0,07401	-0,022823	0,0010068	-1,322
1,0710E-06	0,09249	-0,069802	-0,021708	0,00097934	-1,325
1,2852E-06	0,087398	-0,065865	-0,020583	0,00094962	-1,3269

1,4994E-06	0,082516	-0,06217	-0,019428	0,00091739	-1,3273
1,7136E-06	0,077765	-0,058666	-0,018216	0,00088262	-1,3255
1,9278E-06	0,073033	-0,055286	-0,016901	0,00084647	-1,321
2,1420E-06	0,068244	-0,052026	-0,015402	0,00081704	-1,3117
2,3562E-06	0,063307	-0,048914	-0,013568	0,00082619	-1,2943

Tabelle 21: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,16 mm und einer Drahtdicke von 0,11 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,21684	-0,16375	-0,048088	0,0050034	-1,3242
2,1420E-07	0,20517	-0,1541	-0,046159	0,0049093	-1,3314
4,2840E-07	0,1937	-0,14467	-0,044217	0,0048089	-1,3389
6,4260E-07	0,18243	-0,13548	-0,042253	0,0047009	-1,3466
8,5680E-07	0,17139	-0,12655	-0,040255	0,0045839	-1,3543
1,0710E-06	0,16089	-0,11813	-0,038292	0,0044696	-1,362
1,2852E-06	0,15074	-0,1101	-0,036298	0,0043489	-1,3692
1,4994E-06	0,14086	-0,10242	-0,034222	0,0042161	-1,3753
1,7136E-06	0,13125	-0,095163	-0,03202	0,0040691	-1,3792
1,9278E-06	0,12196	-0,088425	-0,029623	0,003908	-1,3792
2,1420E-06	0,11322	-0,082582	-0,026889	0,0037482	-1,371
2,3562E-06	0,10678	-0,079715	-0,02314	0,0039261	-1,3395

Tabelle 22: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,2 mm und einer Drahtdicke von 0,12 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,36662	-0,2695	-0,079875	0,017242	-1,3604
2,1420E-07	0,34653	-0,25216	-0,07742	0,016942	-1,3742
4,2840E-07	0,32648	-0,23492	-0,074933	0,016624	-1,3897
6,4260E-07	0,30651	-0,21783	-0,072405	0,016284	-1,4072
8,5680E-07	0,28666	-0,20092	-0,069819	0,015918	-1,4267
1,0710E-06	0,26695	-0,18427	-0,067157	0,015518	-1,4486
1,2852E-06	0,24747	-0,16799	-0,064397	0,015078	-1,4731
1,4994E-06	0,2288	-0,15246	-0,061698	0,014637	-1,5007
1,7136E-06	0,21058	-0,13758	-0,058862	0,014138	-1,5306
1,9278E-06	0,1931	-0,12374	-0,055805	0,013556	-1,5606
2,1420E-06	0,17716	-0,11196	-0,052345	0,012851	-1,5823
2,3562E-06	0,16806	-0,10847	-0,047055	0,012542	-1,5495

Tabelle 23: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,25 mm und einer Drahtdicke von 0,16 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,54082	-0,38746	-0,11641	0,036941	-1,3958
2,1420E-07	0,50867	-0,35788	-0,11443	0,036358	-1,4214
4,2840E-07	0,47645	-0,3282	-0,11248	0,035762	-1,4517

Anhang

6,4260E-07	0,44423	-0,29852	-0,11056	0,035149	-1,4881
8,5680E-07	0,41213	-0,26894	-0,10867	0,034518	-1,5324
1,0710E-06	0,38028	-0,23961	-0,1068	0,033863	-1,5871
1,2852E-06	0,34888	-0,21076	-0,10495	0,033173	-1,6554
1,4994E-06	0,31855	-0,18277	-0,10331	0,032474	-1,7429
1,7136E-06	0,28975	-0,15614	-0,10188	0,03174	-1,8558
1,9278E-06	0,26365	-0,13211	-0,10064	0,030907	-1,9957
2,1420E-06	0,24478	-0,11485	-0,099646	0,030286	-2,1313
2,3562E-06	0,24185	-0,11452	-0,096043	0,031287	-2,1119

Tabelle 24: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,32 mm und einer Drahtdicke von 0,16 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,60163	-0,4369	-0,14893	0,015802	-1,3771
2,1420E-07	0,55842	-0,39223	-0,15043	0,015767	-1,4237
4,2840E-07	0,51565	-0,34756	-0,15231	0,015781	-1,4836
6,4260E-07	0,47374	-0,3032	-0,15468	0,01586	-1,5625
8,5680E-07	0,4332	-0,25949	-0,15768	0,016025	-1,6694
1,0710E-06	0,39444	-0,21678	-0,16137	0,016289	-1,8196
1,2852E-06	0,35777	-0,17522	-0,16575	0,016795	-2,0418
1,4994E-06	0,32681	-0,13748	-0,17184	0,017482	-2,3771
1,7136E-06	0,30399	-0,10536	-0,18029	0,01834	-2,8853
1,9278E-06	0,29247	-0,081192	-0,19192	0,019358	-3,6022
2,1420E-06	0,2966	-0,068442	-0,20772	0,020434	-4,3335
2,3562E-06	0,32104	-0,071386	-0,22895	0,02071	-4,4973

Tabelle 25: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,4 mm und einer Drahtdicke von 0,25 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,4205	-0,30847	-0,10842	0,0036136	-1,3632
2,1420E-07	0,38176	-0,26427	-0,11356	0,0039329	-1,4446
4,2840E-07	0,34492	-0,22115	-0,11954	0,0042256	-1,5597
6,4260E-07	0,31057	-0,17949	-0,12654	0,0045449	-1,7303
8,5680E-07	0,27943	-0,13976	-0,13475	0,0049182	-1,9993
1,0710E-06	0,25241	-0,10257	-0,14448	0,0053608	-2,4608
1,2852E-06	0,22971	-0,067968	-0,15589	0,0058519	-3,3797
1,4994E-06	0,2134	-0,037317	-0,16966	0,0064203	-5,7184
1,7136E-06	0,20531	-0,011805	-0,18645	0,0070597	-17,391
1,9278E-06	0,20743	0,0073108	-0,207	0,0077388	28,373
2,1420E-06	0,22167	0,018662	-0,2319	0,0084277	11,878
2,3562E-06	0,24952	0,020669	-0,26146	0,0087299	12,072

Tabelle 26: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,5 mm und einer Drahtdicke von 0,23 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,22066	-0,15921	-0,061416	3,84E-05	-1,386
2,1420E-07	0,19051	-0,1223	-0,068149	6,85E-05	-1,5578
4,2840E-07	0,16298	-0,086684	-0,076205	8,91E-05	-1,8801
6,4260E-07	0,13803	-0,052654	-0,085262	0,00011417	-2,6214
8,5680E-07	0,11575	-0,020222	-0,095384	0,00014484	-5,724
1,0710E-06	0,096775	0,010193	-0,10679	0,0001825	9,4945
1,2852E-06	0,081878	0,038071	-0,11972	0,00022913	2,1506
1,4994E-06	0,07173	0,062946	-0,13439	0,00028661	1,1396
1,7136E-06	0,067051	0,084243	-0,15094	0,0003572	0,79593
1,9278E-06	0,06851	0,10125	-0,16931	0,00044416	0,67667
2,1420E-06	0,076497	0,11304	-0,18898	0,00055407	0,67672
2,3562E-06	0,091099	0,11839	-0,20884	0,00064803	0,76949

Tabelle 27: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,63 mm und einer Drahtdicke von 0,25 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,092746	-0,057808	-0,03476	0,00017786	-1,6044
2,1420E-07	0,068462	-0,02703	-0,041294	0,00013813	-2,5329
4,2840E-07	0,046431	0,0032691	-0,049565	0,00013584	14,203
6,4260E-07	0,026225	0,032429	-0,058521	0,00013403	0,80868
8,5680E-07	0,0083579	0,060088	-0,068314	0,00013178	0,13909
1,0710E-06	-0,0068541	0,086021	-0,079038	0,00012854	-0,079679
1,2852E-06	-0,01905	0,10995	-0,090778	0,00012399	-0,17326
1,4994E-06	-0,027838	0,13153	-0,10357	0,00011848	-0,21165
1,7136E-06	-0,032828	0,1503	-0,11735	0,00011357	-0,21842
1,9278E-06	-0,03373	0,16563	-0,13179	0,00011258	-0,20364
2,1420E-06	-0,030535	0,17669	-0,14603	0,0001205	-0,17282
2,3562E-06	-0,023409	0,18246	-0,1589	0,0001452	-0,1283

Tabelle 28: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,71 mm und einer Drahtdicke von 0,3 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,055538	-0,025649	-0,02938	0,00050843	-2,1653
2,1420E-07	0,033073	0,0028596	-0,035552	0,00038076	11,566
4,2840E-07	0,012473	0,031575	-0,043687	0,00036111	0,39503
6,4260E-07	-0,0063137	0,059118	-0,052462	0,00034256	-0,1068
8,5680E-07	-0,022989	0,085278	-0,061964	0,00032369	-0,26958
1,0710E-06	-0,037269	0,10984	-0,072273	0,00030327	-0,33928
1,2852E-06	-0,048826	0,13256	-0,083453	0,00028055	-0,36833
1,4994E-06	-0,057308	0,15309	-0,095524	0,00025601	-0,37435
1,7136E-06	-0,062374	0,17099	-0,10839	0,00023243	-0,36478

1,9278E-06	-0,06379	0,18568	-0,12167	0,00021586	-0,34355
2,1420E-06	-0,061607	0,1963	-0,13448	0,00021411	-0,31384
2,3562E-06	-0,056038	0,20195	-0,14567	0,00024306	-0,27748

Tabelle 29: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,8 mm und einer Drahtdicke von 0,32 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,032098	-0,0030898	-0,027859	0,0011493	-10,388
2,1420E-07	0,010831	0,023629	-0,033602	0,00085838	0,45836
4,2840E-07	-0,0087711	0,051164	-0,041596	0,00079702	-0,17143
6,4260E-07	-0,026649	0,077565	-0,050178	0,00073825	-0,34357
8,5680E-07	-0,042567	0,10266	-0,059418	0,00068013	-0,41462
1,0710E-06	-0,056251	0,12626	-0,06939	0,0006207	-0,44551
1,2852E-06	-0,06739	0,1481	-0,080157	0,00055861	-0,45501
1,4994E-06	-0,075646	0,16788	-0,091736	0,00049453	-0,4506
1,7136E-06	-0,080697	0,18516	-0,10403	0,00043337	-0,43583
1,9278E-06	-0,082332	0,19937	-0,11665	0,00038661	-0,41296
2,1420E-06	-0,080637	0,20966	-0,12866	0,00036835	-0,3846
2,3562E-06	-0,075884	0,21519	-0,13891	0,00039748	-0,35263

Tabelle 30: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1 mm und einer Drahtdicke von 0,3 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,01113	0,026678	-0,03423	0,0035784	0,41719
2,1420E-07	-0,0089587	0,048861	-0,037342	0,0025606	-0,18335
4,2840E-07	-0,027498	0,074857	-0,04505	0,0023099	-0,36734
6,4260E-07	-0,044446	0,099799	-0,053282	0,0020718	-0,44535
8,5680E-07	-0,05957	0,12353	-0,062116	0,0018458	-0,48223
1,0710E-06	-0,0726	0,14587	-0,071637	0,001629	-0,49771
1,2852E-06	-0,083226	0,16657	-0,081927	0,0014176	-0,49964
1,4994E-06	-0,091112	0,18535	-0,093026	0,0012109	-0,49157
1,7136E-06	-0,095937	0,20182	-0,10486	0,0010218	-0,47536
1,9278E-06	-0,097496	0,21544	-0,11705	0,0008949	-0,45254
2,1420E-06	-0,095924	0,22538	-0,12855	0,00090428	-0,42561
2,3562E-06	-0,091701	0,23082	-0,1381	0,0010173	-0,39728

Tabelle 31: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1 mm und einer Drahtdicke von 0,36 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,011152	0,027969	-0,035383	0,0037381	0,3987
2,1420E-07	-0,0089375	0,049606	-0,038039	0,0026295	-0,18017
4,2840E-07	-0,027464	0,075547	-0,045727	0,0023562	-0,36353
6,4260E-07	-0,044399	0,10043	-0,053938	0,0020979	-0,44207
8,5680E-07	-0,059509	0,12411	-0,062751	0,0018544	-0,47947

1,0710E-06	-0,072523	0,1464	-0,072254	0,0016233	-0,49537
1,2852E-06	-0,083131	0,16706	-0,082531	0,001401	-0,4976
1,4994E-06	-0,090997	0,18581	-0,093626	0,0011873	-0,48973
1,7136E-06	-0,095796	0,20226	-0,10547	0,00099694	-0,47363
1,9278E-06	-0,097321	0,21588	-0,11768	0,0008796	-0,45082
2,1420E-06	-0,095713	0,22583	-0,1292	0,00091714	-0,42383
2,3562E-06	-0,091469	0,23126	-0,13873	0,0010596	-0,39552

Tabelle 32: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1 mm und einer Drahtdicke von 0,5 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,011471	0,030254	-0,037679	0,004046	0,37915
2,1420E-07	-0,0086311	0,050933	-0,039512	0,0027892	-0,16946
4,2840E-07	-0,027144	0,076776	-0,047159	0,0024737	-0,35354
6,4260E-07	-0,044061	0,10157	-0,055327	0,0021775	-0,43382
8,5680E-07	-0,05915	0,12515	-0,0641	0,0019013	-0,47263
1,0710E-06	-0,072139	0,14735	-0,073568	0,0016434	-0,48957
1,2852E-06	-0,082716	0,16794	-0,083821	0,0014007	-0,49254
1,4994E-06	-0,090541	0,18663	-0,09491	0,001174	-0,48515
1,7136E-06	-0,095287	0,20304	-0,10677	0,00098264	-0,46931
1,9278E-06	-0,096745	0,21665	-0,11902	0,00088892	-0,44655
2,1420E-06	-0,095062	0,22662	-0,13056	0,00099745	-0,41947
2,3562E-06	-0,090761	0,23204	-0,14005	0,0012358	-0,39113

Tabelle 33: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1,25 mm und einer Drahtdicke von 0,4 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0038008	0,057168	-0,054239	0,0067297	0,066484
2,1420E-07	-0,015519	0,072791	-0,052164	0,005108	-0,2132
4,2840E-07	-0,033401	0,097178	-0,059316	0,0044609	-0,34371
6,4260E-07	-0,049735	0,12059	-0,066982	0,0038715	-0,41243
8,5680E-07	-0,06428	0,14289	-0,075263	0,0033468	-0,44986
1,0710E-06	-0,076759	0,16391	-0,084276	0,0028773	-0,46829
1,2852E-06	-0,086853	0,18344	-0,094146	0,0024395	-0,47347
1,4994E-06	-0,094211	0,20119	-0,10497	0,0020107	-0,46827
1,7136E-06	-0,098486	0,21682	-0,11672	0,0016134	-0,45423
1,9278E-06	-0,099449	0,2299	-0,12904	0,0014143	-0,43257
2,1420E-06	-0,097281	0,23976	-0,14066	0,0018176	-0,40574
2,3562E-06	-0,09303	0,24489	-0,14965	0,0022172	-0,37988

Tabelle 34: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1,4 mm und einer Drahtdicke von 0,25 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0022274	0,065524	-0,060292	0,0074595	0,033994
2,1420E-07	-0,016723	0,08556	-0,062485	0,0063526	-0,19545
4,2840E-07	-0,034428	0,10666	-0,066871	0,0053578	-0,32279
6,4260E-07	-0,050524	0,12945	-0,074235	0,0046869	-0,39031
8,5680E-07	-0,064836	0,15118	-0,082238	0,0041051	-0,42887
1,0710E-06	-0,077083	0,17168	-0,091005	0,0035894	-0,449
1,2852E-06	-0,086942	0,19071	-0,10068	0,0030954	-0,45588
1,4994E-06	-0,094058	0,208	-0,11136	0,002579	-0,4522
1,7136E-06	-0,098078	0,2232	-0,12307	0,0020553	-0,43941
1,9278E-06	-0,098763	0,23593	-0,13543	0,0017386	-0,41861
2,1420E-06	-0,0963	0,24564	-0,1471	0,0022382	-0,39204
2,3562E-06	-0,091898	0,25003	-0,15594	0,002189	-0,36755

Tabelle 35: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1,6 mm und einer Drahtdicke von 0,5 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0011434	0,09567	-0,088186	0,0086273	0,011951
2,1420E-07	-0,017043	0,11912	-0,093817	0,0082642	-0,14307
4,2840E-07	-0,034207	0,13354	-0,092598	0,006737	-0,25615
6,4260E-07	-0,049814	0,15263	-0,097064	0,0057564	-0,32636
8,5680E-07	-0,063535	0,17279	-0,10408	0,0051771	-0,3677
1,0710E-06	-0,075176	0,19184	-0,11201	0,0046514	-0,39188
1,2852E-06	-0,084404	0,20951	-0,12103	0,0040773	-0,40286
1,4994E-06	-0,090849	0,22553	-0,1313	0,0033763	-0,40282
1,7136E-06	-0,094137	0,23956	-0,14286	0,0025722	-0,39295
1,9278E-06	-0,094009	0,2513	-0,15529	0,0020023	-0,37409
2,1420E-06	-0,090676	0,26054	-0,16695	0,0029116	-0,34803
2,3562E-06	-0,084983	0,25992	-0,17671	-0,0017764	-0,32696

Tabelle 36: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 2 mm und einer Drahtdicke von 0,56 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,000394	0,14968	-0,14113	0,008942	0,0026323
2,1420E-07	-0,016592	0,1687	-0,14452	0,0075944	-0,098351
4,2840E-07	-0,032198	0,18801	-0,14893	0,0068778	-0,17126
6,4260E-07	-0,046615	0,20289	-0,14676	0,0095091	-0,22976
8,5680E-07	-0,058959	0,21939	-0,15246	0,0079659	-0,26875
1,0710E-06	-0,069894	0,23101	-0,15346	0,0076573	-0,30256
1,2852E-06	-0,077963	0,24538	-0,16085	0,0065632	-0,31773
1,4994E-06	-0,083198	0,25835	-0,16999	0,0051673	-0,32203
1,7136E-06	-0,085238	0,26957	-0,18067	0,0036568	-0,3162

1,9278E-06	-0,08384	0,27872	-0,19242	0,0024556	-0,30081
2,1420E-06	-0,078297	0,27888	-0,20854	-0,0079619	-0,28076
2,3562E-06	-0,068451	0,27	-0,22272	-0,021172	-0,25352

Tabelle 37: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 2,5 mm und einer Drahtdicke von 0,71 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,000139	0,23908	-0,2289	0,010313	0,00058141
2,1420E-07	-0,014795	0,25333	-0,234	0,0045372	-0,058404
4,2840E-07	-0,02824	0,26691	-0,23946	-0,00079259	-0,1058
6,4260E-07	-0,039962	0,27951	-0,24517	-0,0056268	-0,14297
8,5680E-07	-0,049719	0,29075	-0,25102	-0,0099913	-0,171
1,0710E-06	-0,057272	0,30017	-0,25685	-0,013959	-0,1908
1,2852E-06	-0,062421	0,3073	-0,26235	-0,017473	-0,20313
1,4994E-06	-0,065755	0,31127	-0,26316	-0,017643	-0,21125
1,7136E-06	-0,065899	0,3166	-0,26287	-0,012168	-0,20815
1,9278E-06	-0,058783	0,32489	-0,27542	-0,0093118	-0,18093
2,1420E-06	-0,048825	0,33381	-0,27936	0,0056248	-0,14627
2,3562E-06	-0,034283	0,33983	-0,28083	0,024713	-0,10089

Tabelle 38: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 3,15 mm und einer Drahtdicke von 0,8 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	4,63E-05	0,46177	-0,45609	0,0057308	0,00010035
2,1420E-07	-0,010093	0,4728	-0,45487	0,00783	-0,021346
4,2840E-07	-0,018497	0,48229	-0,45334	0,010453	-0,038354
6,4260E-07	-0,0242	0,49658	-0,46134	0,011039	-0,048733
8,5680E-07	-0,025233	0,51161	-0,49066	-0,0042791	-0,049321
1,0710E-06	-0,025983	0,51616	-0,4893	0,00087534	-0,05034
1,2852E-06	-0,024331	0,51535	-0,48437	0,0066502	-0,047212
1,4994E-06	-0,020034	0,51096	-0,47567	0,015258	-0,039208
1,7136E-06	-0,012818	0,50455	-0,463	0,028726	-0,025405
1,9278E-06	-0,0023425	0,49905	-0,44781	0,048893	-0,004694
2,1420E-06	0,011577	0,49362	-0,42775	0,077446	0,023453
2,3562E-06	0,029047	0,48949	-0,40346	0,11508	0,059341

Tabelle 39: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 4 mm und einer Drahtdicke von 1 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,00010861	0,97675	-0,98098	-0,0041274	0,00011119
2,1420E-07	-0,0052067	0,95878	-0,96039	-0,0068141	-0,0054305
4,2840E-07	-0,0092926	0,93835	-0,93737	-0,0083122	-0,0099032
6,4260E-07	-0,01205	0,91627	-0,91282	-0,0085994	-0,013152
8,5680E-07	-0,013373	0,89233	-0,88636	-0,0074041	-0,014987

1,0710E-06	-0,013147	0,86657	-0,85795	-0,0045207	-0,015171
1,2852E-06	-0,011149	0,83745	-0,82607	0,00023762	-0,013313
1,4994E-06	-0,0074135	0,80801	-0,79351	0,0070816	-0,009175
1,7136E-06	-0,00176	0,77797	-0,76014	0,016074	-0,0022623
1,9278E-06	0,0054975	0,75395	-0,73266	0,026784	0,0072917
2,1420E-06	0,014775	0,7287	-0,70369	0,039789	0,020275
2,3562E-06	0,026339	0,7	-0,67105	0,055291	0,037627

Tabelle 40: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 5 mm und einer Drahtdicke von 1 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,00012607	1,6072	-1,6505	-0,043182	7,84E-05
2,1420E-07	-0,004444	1,5623	-1,6054	-0,047576	-0,0028445
4,2840E-07	-0,0080338	1,515	-1,5591	-0,05208	-0,0053028
6,4260E-07	-0,010575	1,4647	-1,511	-0,056846	-0,0072197
8,5680E-07	-0,012028	1,4133	-1,4632	-0,061926	-0,0085107
1,0710E-06	-0,012345	1,3606	-1,4157	-0,067481	-0,009073
1,2852E-06	-0,01142	1,304	-1,3664	-0,07382	-0,0087573
1,4994E-06	-0,009166	1,243	-1,3151	-0,081284	-0,0073743
1,7136E-06	-0,00552	1,1783	-1,2632	-0,090457	-0,0046847
1,9278E-06	-0,00041719	1,11	-1,2116	-0,10211	-0,00037587
2,1420E-06	0,0063044	1,0338	-1,1573	-0,11722	0,0060983
2,3562E-06	0,014759	0,94798	-1,1002	-0,13749	0,015569

Tabelle 41: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 5 mm und einer Drahtdicke von 1,25 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0001262	1,6141	-1,6582	-0,043924	7,82E-05
2,1420E-07	-0,0045085	1,569	-1,6128	-0,048377	-0,0028736
4,2840E-07	-0,0081533	1,5214	-1,5662	-0,05297	-0,0053591
6,4260E-07	-0,010737	1,4708	-1,5179	-0,057861	-0,0073005
8,5680E-07	-0,012221	1,4191	-1,47	-0,0631	-0,008612
1,0710E-06	-0,012552	1,3661	-1,4224	-0,06886	-0,009188
1,2852E-06	-0,01162	1,309	-1,3729	-0,075458	-0,0088766
1,4994E-06	-0,0093362	1,2475	-1,3214	-0,083249	-0,0074841
1,7136E-06	-0,0056337	1,1822	-1,2694	-0,092835	-0,0047655
1,9278E-06	-0,000444	1,1131	-1,2177	-0,10502	-0,00039888
2,1420E-06	0,0064015	1,036	-1,1633	-0,12083	0,0061788
2,3562E-06	0,015023	0,94904	-1,1061	-0,14203	0,01583

Tabelle 42: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 8 mm und einer Drahtdicke von 1 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0.00016991+0i	-7.5067+0i	-4.1239+0i	-11.63+0i	-2.2635e-05+0i
2,1420E-07	0.0035716+0i	-8.8904+0i	-4.0923+0i	-12.979+0i	-0.00040174+0i
4,2840E-07	0.009377+0i	-10.715+0i	-4.0853+0i	-14.791+0i	-0.00087515+0i
6,4260E-07	0.018667+0i	-13.282+0i	-4.1207+0i	-17.384+0i	-0.0014054+0i
8,5680E-07	0.033813+0i	-17.312+0i	-4.2402+0i	-21.519+0i	-0.0019531+0i
1,0710E-06	0.062465+0i	-25.327+0i	-4.5874+0i	-29.852+0i	-0.0024663+0i
1,2852E-06	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
1,4994E-06	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
1,7136E-06	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
1,9278E-06	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
2,1420E-06	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
2,3562E-06	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.

Tabelle 43: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 10 mm und einer Drahtdicke von 1,5 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
2,1420E-07	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
4,2840E-07	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
6,4260E-07	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
8,5680E-07	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
1,0710E-06	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
1,2852E-06	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
1,4994E-06	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
1,7136E-06	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
1,9278E-06	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
2,1420E-06	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.
2,3562E-06	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.	sing./div.

### 7.3 Ergebnisse Regeneratorlänge

Tabelle 44: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 0,5 cm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0012191	0,20687	-0,18145	0,026637	0,0058932
2,1420E-07	-0,037476	0,26016	-0,20242	0,020271	-0,14405
4,2840E-07	-0,072816	0,31482	-0,22743	0,01458	-0,23129
6,4260E-07	-0,10293	0,37081	-0,25807	0,0098113	-0,27758
8,5680E-07	-0,12485	0,42803	-0,29687	0,0063068	-0,29169
1,0710E-06	-0,13367	0,48616	-0,34796	0,004534	-0,27494
1,2852E-06	-0,12066	0,54437	-0,41862	0,0050908	-0,22164

1,4994E-06	-0,069173	0,60019	-0,52255	0,0084656	-0,11525
1,7136E-06	0,05379	0,64621	-0,68458	0,015428	0,083239
1,9278E-06	0,20012	0,69748	-0,76664	0,13096	0,28692
2,1420E-06	0,36188	0,76794	-0,75263	0,3772	0,47124
2,3562E-06	0,53319	0,92096	-0,62185	0,83231	0,57895

Tabelle 45: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 1 cm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0023708	0,13009	-0,10272	0,029742	0,018224
2,1420E-07	-0,03627	0,18073	-0,12071	0,02375	-0,20069
4,2840E-07	-0,072244	0,23235	-0,14167	0,018436	-0,31093
6,4260E-07	-0,1042	0,28482	-0,1668	0,013821	-0,36583
8,5680E-07	-0,13001	0,33809	-0,19798	0,010104	-0,38453
1,0710E-06	-0,14664	0,39033	-0,23674	0,0069452	-0,37569
1,2852E-06	-0,14775	0,44278	-0,29113	0,0038991	-0,3337
1,4994E-06	-0,12261	0,49586	-0,36887	0,0043842	-0,24726
1,7136E-06	-0,051467	0,54672	-0,48785	0,0073986	-0,094139
1,9278E-06	0,10445	0,59064	-0,68173	0,013364	0,17685
2,1420E-06	0,34853	0,60093	-0,90995	0,03951	0,57999
2,3562E-06	0,57666	0,63154	-0,93875	0,26945	0,9131

Tabelle 46: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 1,5 cm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0034224	0,094906	-0,07453	0,023798	0,036061
2,1420E-07	-0,032697	0,14348	-0,090838	0,019942	-0,22789
4,2840E-07	-0,066574	0,18996	-0,10706	0,016322	-0,35046
6,4260E-07	-0,097003	0,23803	-0,12868	0,012346	-0,40753
8,5680E-07	-0,12231	0,28665	-0,15566	0,0086795	-0,42668
1,0710E-06	-0,14084	0,33362	-0,18759	0,0051838	-0,42216
1,2852E-06	-0,1482	0,38126	-0,23016	0,0029085	-0,3887
1,4994E-06	-0,13854	0,42766	-0,28755	0,0015754	-0,32394
1,7136E-06	-0,10192	0,4711	-0,36816	0,0010182	-0,21635
1,9278E-06	-0,02329	0,5086	-0,48409	0,0012228	-0,045792
2,1420E-06	0,1036	0,53596	-0,63329	0,0062701	0,19331
2,3562E-06	0,25809	0,5128	-0,75561	0,015282	0,5033

Tabelle 47: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 2 cm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0043919	0,072462	-0,059386	0,017469	0,060609
2,1420E-07	-0,02915	0,1151	-0,071687	0,01426	-0,25327
4,2840E-07	-0,060528	0,15999	-0,08789	0,011577	-0,37831

Anhang

6,4260E-07	-0,089126	0,20353	-0,10572	0,0086782	-0,43791
8,5680E-07	-0,11345	0,24829	-0,1285	0,0063393	-0,45694
1,0710E-06	-0,13203	0,29226	-0,15601	0,0042283	-0,45174
1,2852E-06	-0,14241	0,33503	-0,19019	0,0024331	-0,42506
1,4994E-06	-0,14091	0,37586	-0,23398	0,00097267	-0,3749
1,7136E-06	-0,1221	0,41349	-0,29161	-0,00022903	-0,2953
1,9278E-06	-0,079351	0,44584	-0,36742	-0,00092751	-0,17798
2,1420E-06	-0,013021	0,47036	-0,45516	0,0021764	-0,027684
2,3562E-06	0,050446	0,46711	-0,51087	0,006684	0,108

Tabelle 48: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 2,5 cm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0053047	0,057014	-0,04968	0,012639	0,093043
2,1420E-07	-0,025814	0,096164	-0,060301	0,010049	-0,26844
4,2840E-07	-0,055021	0,13686	-0,073816	0,0080239	-0,40202
6,4260E-07	-0,081518	0,17865	-0,09071	0,0064231	-0,4563
8,5680E-07	-0,10451	0,21968	-0,1103	0,0048738	-0,47575
1,0710E-06	-0,1228	0,25966	-0,13344	0,0034217	-0,47291
1,2852E-06	-0,13467	0,29816	-0,1614	0,0021005	-0,45165
1,4994E-06	-0,13772	0,33452	-0,19589	0,00091384	-0,41169
1,7136E-06	-0,12876	0,3677	-0,23907	-0,0001411	-0,35019
1,9278E-06	-0,1045	0,39609	-0,29234	-0,00075908	-0,26384
2,1420E-06	-0,06237	0,41744	-0,3502	0,0010108	-0,15867
2,3562E-06	-0,032544	0,42143	-0,38324	0,0056453	-0,077223

Tabelle 49: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 3 cm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0061776	0,045791	-0,042832	0,0091359	0,13491
2,1420E-07	-0,022772	0,082467	-0,052505	0,0071899	-0,27613
4,2840E-07	-0,049927	0,12026	-0,064568	0,0057631	-0,41517
6,4260E-07	-0,074642	0,15888	-0,079519	0,0047218	-0,46979
8,5680E-07	-0,096301	0,19659	-0,09659	0,0037034	-0,48985
1,0710E-06	-0,11399	0,2331	-0,11639	0,0027276	-0,489
1,2852E-06	-0,12646	0,268	-0,13972	0,0018081	-0,47189
1,4994E-06	-0,13209	0,30069	-0,16764	0,00095116	-0,4393
1,7136E-06	-0,12885	0,33028	-0,20124	0,00018961	-0,39012
1,9278E-06	-0,11495	0,35547	-0,24074	-0,00022424	-0,32338
2,1420E-06	-0,091553	0,37416	-0,28185	0,00075722	-0,24469
2,3562E-06	-0,069673	0,37987	-0,3066	0,0035946	-0,18341

Tabelle 50: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 3,5 cm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,007021	0,0373	-0,037695	0,0066261	0,18823
2,1420E-07	-0,020089	0,070327	-0,045406	0,0048322	-0,28565
4,2840E-07	-0,045369	0,10694	-0,057415	0,0041511	-0,42427
6,4260E-07	-0,068481	0,14274	-0,070788	0,0034736	-0,47975
8,5680E-07	-0,088875	0,17753	-0,08585	0,0028089	-0,50061
1,0710E-06	-0,10583	0,21103	-0,10303	0,0021657	-0,50152
1,2852E-06	-0,11843	0,24284	-0,12286	0,0015511	-0,48769
1,4994E-06	-0,1255	0,27245	-0,14598	0,00097661	-0,46063
1,7136E-06	-0,12569	0,29909	-0,17291	0,00048698	-0,42025
1,9278E-06	-0,11796	0,32163	-0,20339	0,0002709	-0,36677
2,1420E-06	-0,10317	0,33819	-0,23413	0,0008917	-0,30508
2,3562E-06	-0,087766	0,34434	-0,254	0,002568	-0,25488

Tabelle 51: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 4 cm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0078463	0,03083	-0,033788	0,0048882	0,2545
2,1420E-07	-0,017594	0,061788	-0,04072	0,003474	-0,28475
4,2840E-07	-0,041281	0,095983	-0,051673	0,0030286	-0,43009
6,4260E-07	-0,062962	0,1293	-0,063745	0,0025904	-0,48695
8,5680E-07	-0,082185	0,16152	-0,077176	0,0021632	-0,50881
1,0710E-06	-0,098379	0,1924	-0,092266	0,001752	-0,51133
1,2852E-06	-0,11083	0,22157	-0,10937	0,0013636	-0,50021
1,4994E-06	-0,11867	0,24856	-0,12887	0,0010147	-0,47745
1,7136E-06	-0,12098	0,27271	-0,15097	0,00075437	-0,44362
1,9278E-06	-0,11708	0,29302	-0,17522	0,00072637	-0,39956
2,1420E-06	-0,10761	0,30789	-0,19903	0,001252	-0,3495
2,3562E-06	-0,096377	0,31412	-0,21533	0,0024142	-0,30682

Tabelle 52: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 4,5 cm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0086583	0,025726	-0,03068	0,0037042	0,33655
2,1420E-07	-0,015317	0,054761	-0,036869	0,0025755	-0,27971
4,2840E-07	-0,037596	0,086812	-0,046927	0,0022885	-0,43307
6,4260E-07	-0,058	0,11792	-0,05791	0,0020136	-0,49184
8,5680E-07	-0,076152	0,1479	-0,069993	0,0017528	-0,5149
1,0710E-06	-0,091589	0,17649	-0,083386	0,0015108	-0,51896
1,2852E-06	-0,10375	0,20337	-0,098323	0,001297	-0,51015
1,4994E-06	-0,11197	0,22812	-0,11501	0,0011334	-0,49085
1,7136E-06	-0,11558	0,25014	-0,13348	0,0010719	-0,46208

1,9278E-06	-0,11415	0,26858	-0,15321	0,0012286	-0,42501
2,1420E-06	-0,10811	0,28205	-0,17214	0,0018035	-0,38329
2,3562E-06	-0,099777	0,28822	-0,18563	0,0028161	-0,34619

Tabelle 53: Ergebnisse mit einer Regeneratorlänge von 5 cm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0094474	0,021298	-0,027849	0,0028959	0,44358
2,1420E-07	-0,013224	0,048884	-0,033611	0,0020489	-0,27052
4,2840E-07	-0,034253	0,079029	-0,042902	0,0018744	-0,43342
6,4260E-07	-0,053516	0,10819	-0,052957	0,0017201	-0,49464
8,5680E-07	-0,070695	0,13619	-0,063905	0,0015861	-0,51911
1,0710E-06	-0,085406	0,16278	-0,07589	0,0014787	-0,52469
1,2852E-06	-0,097197	0,18767	-0,08906	0,0014108	-0,51792
1,4994E-06	-0,10556	0,21048	-0,10351	0,0014097	-0,50151
1,7136E-06	-0,10998	0,23068	-0,11917	0,0015289	-0,47677
1,9278E-06	-0,11016	0,24752	-0,13549	0,0018669	-0,44507
2,1420E-06	-0,10642	0,2598	-0,15082	0,0025598	-0,40961
2,3562E-06	-0,10017	0,26582	-0,16206	0,0035919	-0,37683

## 7.4 Ergebnisse Maschengewebe 2. Iteration

Tabelle 54: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 0,8 mm und einer Drahtdicke von 0,32 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,030834	0,026581	-0,048741	0,0086735	1,16
2,1420E-07	-0,0096251	0,078679	-0,063002	0,0060525	-0,12233
4,2840E-07	-0,047292	0,13508	-0,082792	0,0049992	-0,35009
6,4260E-07	-0,081245	0,19164	-0,1065	0,0038935	-0,42394
8,5680E-07	-0,10982	0,24821	-0,13564	0,0027574	-0,44244
1,0710E-06	-0,13041	0,30459	-0,17255	0,0016282	-0,42815
1,2852E-06	-0,13875	0,36044	-0,22112	0,0005638	-0,38496
1,4994E-06	-0,12757	0,41516	-0,28795	-0,00035832	-0,30728
1,7136E-06	-0,084173	0,46745	-0,38433	-0,0010573	-0,18007
1,9278E-06	0,011434	0,5144	-0,52718	-0,0013504	0,022228
2,1420E-06	0,17238	0,55036	-0,72231	0,00043409	0,31322
2,3562E-06	0,32181	0,56253	-0,87362	0,010711	0,57207

Tabelle 55: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1 mm und einer Drahtdicke von 0,3 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,010292	0,059281	-0,05341	0,016163	0,17362
2,1420E-07	-0,02746	0,10763	-0,067551	0,012621	-0,25513
4,2840E-07	-0,062764	0,15925	-0,086326	0,010157	-0,39413
6,4260E-07	-0,094696	0,21064	-0,10832	0,0076319	-0,44956

8,5680E-07	-0,12153	0,26276	-0,13585	0,005377	-0,46252
1,0710E-06	-0,141	0,31452	-0,17027	0,0032456	-0,44832
1,2852E-06	-0,14935	0,36557	-0,21486	0,0013634	-0,40854
1,4994E-06	-0,14031	0,41527	-0,2751	-0,00014549	-0,33787
1,7136E-06	-0,10332	0,46223	-0,36014	-0,001226	-0,22352
1,9278E-06	-0,022452	0,50367	-0,4829	-0,0016739	-0,044576
2,1420E-06	0,10983	0,53518	-0,64336	0,0016448	0,20522
2,3562E-06	0,23099	0,53956	-0,75485	0,015691	0,4281

Tabelle 56: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1 mm und einer Drahtdicke von 0,36 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,010345	0,061261	-0,05468	0,016927	0,16887
2,1420E-07	-0,027785	0,10998	-0,068985	0,013209	-0,25264
4,2840E-07	-0,063386	0,16256	-0,088441	0,010729	-0,38993
6,4260E-07	-0,095658	0,214	-0,11043	0,0079198	-0,44699
8,5680E-07	-0,12266	0,26671	-0,13852	0,0055327	-0,4599
1,0710E-06	-0,14209	0,31913	-0,17375	0,003291	-0,44524
1,2852E-06	-0,14998	0,37092	-0,2196	0,0013363	-0,40436
1,4994E-06	-0,13969	0,42144	-0,28194	-0,00018879	-0,33146
1,7136E-06	-0,099804	0,46931	-0,37073	-0,0012198	-0,21266
1,9278E-06	-0,012639	0,51163	-0,50054	-0,0015494	-0,024703
2,1420E-06	0,13157	0,54377	-0,67309	0,0022611	0,24196
2,3562E-06	0,26335	0,54704	-0,7929	0,01749	0,48142

Tabelle 57: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1 mm und einer Drahtdicke von 0,5 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,010727	0,065257	-0,057417	0,018566	0,16438
2,1420E-07	-0,028249	0,11482	-0,072085	0,014487	-0,24603
4,2840E-07	-0,064613	0,1686	-0,092272	0,011716	-0,38323
6,4260E-07	-0,097537	0,22113	-0,11503	0,0085569	-0,44109
8,5680E-07	-0,12491	0,27516	-0,14437	0,005883	-0,45394
1,0710E-06	-0,14421	0,32906	-0,18145	0,0034007	-0,43825
1,2852E-06	-0,15104	0,38251	-0,23019	0,0012892	-0,39485
1,4994E-06	-0,13778	0,43493	-0,29741	-0,00026259	-0,31679
1,7136E-06	-0,090935	0,48489	-0,39511	-0,0011606	-0,18754
1,9278E-06	0,011732	0,5292	-0,54212	-0,0011885	0,022169
2,1420E-06	0,18634	0,56264	-0,74523	0,0037556	0,33119
2,3562E-06	0,34559	0,56339	-0,88718	0,021801	0,61341

Tabelle 58: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1,25 mm und einer Drahtdicke von 0,4 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0034224	0,094906	-0,07453	0,023798	0,036061
2,1420E-07	-0,032697	0,14348	-0,090838	0,019942	-0,22789
4,2840E-07	-0,066574	0,18996	-0,10706	0,016322	-0,35046
6,4260E-07	-0,097003	0,23803	-0,12868	0,012346	-0,40753
8,5680E-07	-0,12231	0,28665	-0,15566	0,0086795	-0,42668
1,0710E-06	-0,14084	0,33362	-0,18759	0,0051838	-0,42216
1,2852E-06	-0,1482	0,38126	-0,23016	0,0029085	-0,3887
1,4994E-06	-0,13854	0,42766	-0,28755	0,0015754	-0,32394
1,7136E-06	-0,10192	0,4711	-0,36816	0,0010182	-0,21635
1,9278E-06	-0,02329	0,5086	-0,48409	0,0012228	-0,045792
2,1420E-06	0,1036	0,53596	-0,63329	0,0062701	0,19331
2,3562E-06	0,25809	0,5128	-0,75561	0,015282	0,5033

Tabelle 59: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1,4 mm und einer Drahtdicke von 0,25 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0019809	0,10673	-0,085028	0,02368	0,018561
2,1420E-07	-0,032491	0,15253	-0,10041	0,019625	-0,21301
4,2840E-07	-0,064613	0,19903	-0,11803	0,016381	-0,32464
6,4260E-07	-0,0937	0,24341	-0,13594	0,013766	-0,38495
8,5680E-07	-0,11804	0,28828	-0,16036	0,0098869	-0,40946
1,0710E-06	-0,1354	0,33335	-0,19115	0,0068089	-0,40617
1,2852E-06	-0,14337	0,37652	-0,22878	0,0043735	-0,38077
1,4994E-06	-0,13666	0,41861	-0,27903	0,002923	-0,32645
1,7136E-06	-0,10677	0,45812	-0,34886	0,002483	-0,23306
1,9278E-06	-0,043066	0,49165	-0,446	0,0025899	-0,087594
2,1420E-06	0,056612	0,51553	-0,56535	0,0067884	0,10981
2,3562E-06	0,1906	0,49509	-0,65322	0,032461	0,38498

Tabelle 60: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 1,6 mm und einer Drahtdicke von 0,5 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,0010059	0,14259	-0,11908	0,02451	0,0070548
2,1420E-07	-0,032653	0,18616	-0,13454	0,018967	-0,17541
4,2840E-07	-0,063918	0,2302	-0,1522	0,014075	-0,27767
6,4260E-07	-0,091775	0,27444	-0,17287	0,0097879	-0,33441
8,5680E-07	-0,11476	0,3186	-0,19765	0,0061957	-0,36019
1,0710E-06	-0,13069	0,3625	-0,22809	0,0037253	-0,36051
1,2852E-06	-0,13668	0,40383	-0,26502	0,0021211	-0,33847
1,4994E-06	-0,12659	0,44435	-0,31534	0,0024178	-0,2849
1,7136E-06	-0,091962	0,48252	-0,38491	0,0056475	-0,19059

1,9278E-06	-0,021204	0,51392	-0,48385	0,0088654	-0,04126
2,1420E-06	0,078353	0,52176	-0,55819	0,041929	0,15017
2,3562E-06	0,22092	0,55838	-0,58685	0,19245	0,39564

Tabelle 61: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 2 mm und einer Drahtdicke von 0,56 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,00033515	0,21737	-0,19622	0,021487	0,0015418
2,1420E-07	-0,029532	0,25818	-0,21291	0,015733	-0,11439
4,2840E-07	-0,056617	0,29911	-0,23188	0,01061	-0,18928
6,4260E-07	-0,079839	0,3399	-0,25382	0,0062351	-0,23489
8,5680E-07	-0,097672	0,3802	-0,27978	0,0027453	-0,2569
1,0710E-06	-0,10802	0,41917	-0,31094	0,00021559	-0,25769
1,2852E-06	-0,10787	0,45565	-0,34919	-0,0014134	-0,23674
1,4994E-06	-0,092557	0,48955	-0,39711	-0,00011034	-0,18906
1,7136E-06	-0,053748	0,53522	-0,44185	0,039624	-0,10042
1,9278E-06	0,0035511	0,57334	-0,47456	0,10233	0,0061938
2,1420E-06	0,079392	0,6107	-0,48111	0,20898	0,13
2,3562E-06	0,17416	0,65186	-0,44982	0,37621	0,26718

Tabelle 62: Ergebnisse mit einer Maschenweite von 2,5 mm und einer Drahtdicke von 0,71 mm

Volumenänderung in m <sup>3</sup>	Arbeit pro Periode in J	zugeführte Wärme pro Periode in J	abgeführte Wärme pro Periode in J	Energiesumme pro Periode in J	Arbeit/zugeführte Wärme in 1
0,0000E+00	0,00011474	0,47565	-0,45523	0,020542	0,00024123
2,1420E-07	-0,019293	0,50524	-0,47282	0,01313	-0,038185
4,2840E-07	-0,035093	0,53244	-0,49281	0,0045362	-0,06591
6,4260E-07	-0,045003	0,55613	-0,51636	-0,0052403	-0,080923
8,5680E-07	-0,046561	0,57032	-0,56704	-0,043282	-0,08164
1,0710E-06	-0,044886	0,58709	-0,58266	-0,040458	-0,076455
1,2852E-06	-0,037088	0,59802	-0,59348	-0,032554	-0,062017
1,4994E-06	-0,022848	0,60517	-0,59854	-0,016215	-0,037754
1,7136E-06	-0,0022827	0,6119	-0,59755	0,012059	-0,0037305
1,9278E-06	0,023264	0,62666	-0,59848	0,05145	0,037124
2,1420E-06	0,053752	0,64908	-0,60209	0,10074	0,082813
2,3562E-06	0,088698	0,68003	-0,61256	0,15617	0,13043

## 7.5 Angebote

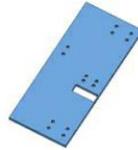
### 7.5.1 Proto Labs – Fundament (Teil 1)



#### ProtoQuote®

##### Angebot für CNC-Bearbeitung

Erstellt für: Zhang Peng Du  
 Angebotsnummer: 411657  
 Angebot vom: 13-Jul-2019  
 Bezeichnung des Teils: Fundament (rev: 2)  
 Abmessungen: 236 mm x 99.85 mm x 6 mm



Wir danken Ihnen für die Gelegenheit, Ihnen ein Angebot für Ihre Teile erstellen zu dürfen. Wir freuen uns darauf, mit Ihnen an diesem Projekt zu arbeiten.

Bei Fragen stehen wir Ihnen unter +49 (0) 6261 6436 947 gerne zur Verfügung.

#### 1 Spezifikationen bestätigen oder ändern und Neuberechnung

Material:	<input type="button" value="Info"/> Baustahl - Mild Steel - silberfarben (S275)
Fertigungsmethode:	<input checked="" type="radio"/> Fräsmaschine <input type="radio"/> Drehmaschine <small>Aufgrund der Teilegeometrie ist eine Drehbearbeitung nicht möglich.</small>
Menge:	<input type="text" value="1"/> 1 Teil(e) zu € 556,83 p. Stück € 556,83
Oberfläche:	<input type="text" value="Gegratete Kanten und leicht perlgestrahlt"/>
Produktionszeit:	<input type="button" value="Info"/> Versand der Teile in 3 Werktagen (Standardpreis)

**Sie benötigen Ihre Teile bis 18 Juli?**  
 Wählen Sie eine Herstellungszeit von 1 Tagen aus und schließen Sie die Bestellung durch Auswahl der Übernachtzustellung innerhalb von 17 Std. 53 Min. ab.

**Gesamtsumme EUR:** € 556,83

#### 2 Design-Analyse

Ansicht „Bearbeiteter Zustand“

Diese Ansicht zeigt Ihnen, wie Ihr fertiges Teil - einschließlich Abweichungen von Ihrem 3D-Modell – nach dem Fräsen aussehen wird. Bitte beachten Sie, dass die farblichen Indikatoren repräsentativ sind und möglicherweise nicht alle Bearbeitungsartefakte angezeigt werden können.

Farbige Bereiche zeigen an, wo Material am Teil verbleibt. Die Farben unter der Ansicht zeigen jeweils den Fräsradius an, der diese Bereiche am ehesten erreicht. ■ Schwarze Flächen verweisen auf Bereiche die nicht vollständig gefräst werden können und dadurch Material verbleibt. Diese Features werden nicht abgebildet.

Der Einsatz des Transparenz-Schiebereglers vereinfacht die Suche nach farbigen Bereichen, die in unserem Herstellungsverfahren nicht bearbeitet werden.

Bitte zoomen und drehen Sie das Bild, um alle farbliche Indikatoren zu überprüfen, da sie unter Umständen sehr klein sein können.

Prüfen Sie die Registerkarten „Dünne Bereiche“ und „Gewindezuordnung“.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter [customerservice@protolabs.de](mailto:customerservice@protolabs.de) oder +49 (0) 6261 6436 947

Wenn Ihr Merkmal verdeckt/farbig überzogen ist, wird es nicht gefräst.

Fräsradius:

■ = R 0.197 in / R 5.0 mm ■ = R 0.118 in / R 3.0 mm ■ = R 0.059 in / R 1.5 mm ■ = R 0.039 in / R 1.0 mm

Dünne Bereiche

In dieser Ansicht sind alle dünnen Bereiche gekennzeichnet, die in Ihrem Modell festgestellt wurden. Dünne Bereiche können eventuell dünner als konzipiert gefräst werden und können abbrechen, ausbrechen und sich verbiegen oder verformen.

Es wurden keine dünnen Bereiche gefunden.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter [customerservice@protolabs.de](mailto:customerservice@protolabs.de) oder +49 (0) 6261 6436 947

Gewindezuordnung

Wir können die Bohrungen in Ihrem Teil mit Gewinde versehen. Nähere Einzelheiten finden Sie auf unserer Seite "Gewindebohrungen". Für jede Bohrung aus der Dropdown-Liste einen Gewindetyp (oder auch 'kein' Gewinde) auswählen. Über das Schnellzuordnungsmenü können Sie allen Bohrungen, die mit Gewinde versehen werden sollen, die gleiche Gewindegruppe (oder kein Gewinde) zuordnen. Die Gewindeauswahl wird in Ihrer Auftragsbestätigung angezeigt und sollte auf ihre Richtigkeit geprüft werden.

Name	Gewinde
Bohrung 1	keine
Bohrung 2	keine

Bohrung 3	keine
Bohrung 4	keine
Bohrung 5	keine
Bohrung 6	keine
Bohrung 7	keine
Bohrung 8	keine
Bohrung 9	keine
Bohrung 10	keine
Bohrung 11	keine
Bohrung 12	keine
Bohrung 13	keine
Bohrung 14	keine

Nachbearbeitungen werden zu diesem Zeitpunkt nicht unterstützt.

Ursprüngliches Teil

Diese Ansicht zeigt Ihr Teilmodell, wie wir es erhalten haben.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter customerservice@protolabs.de oder +49 (0) 6261 6436 947

### 3 Zusammenfassung

#### Auftragspreis

##### Ausgewählte Spezifikationen

Menge:	1	1 Teil(e) zu € 556,83 p. Stück	€ 556,83
Produktionszeit:	Versand der Teile in 3 Werktagen (Standardpreis)		
Werkstoff:	Baustahl - Mild Steel - silberfarben (S275)		
Fertigungsmethode	Fräsmaschine		

**⚠ Sie können erst aus diesem Angebot bestellen, wenn Sie auf die Registerkarte "Gewinazuordnung" in der Anzeige oben geklickt haben.**

[Neues Modell hochladen](#)

**Gesamtsumme EUR:**

#### Hinweise

- Der Kunde ist dafür verantwortlich, dass die Eigenschaften und das Verhalten des gewählten Materials den Anforderungen seiner Anwendung entspricht.
- Toleranzen von +/- 0,1mm sind zu erwarten und werden in der Regel eingehalten.
- Die geschätzte Herstellungszeit ist der bestmögliche Schätzwert, der für das Teil am Ende des Angebots vorliegt. Die tatsächliche Herstellungszeit hängt von der Komplexität der Teile, der Anzahl an unterschiedlichen Teilen, der Menge, der Materialverfügbarkeit, der Auslastung zum Zeitpunkt der Beauftragung und anderen Faktoren ab. Wir werden uns bemühen, innerhalb der geschätzten Herstellungszeit oder so zeitnah wie möglich zu liefern; dennoch besteht keine Gewähr, dass die geschätzten Herstellungszeit eingehalten werden.
- Sofern nicht anders gewünscht, werden die Teile am nächsten Werktag mit UPS geliefert. Die Lieferkosten sind im Voraus zu zahlen und werden dem Rechnungsbetrag hinzugerechnet.

#### Allgemeine Geschäftsbedingungen – ProtoQuote interaktives Angebot

Allgemeine Verkaufs- und Lieferbedingungen der Proto Labs GmbH

##### § 1 Anwendbarkeit der Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen

Die Proto Labs GmbH (nachfolgend: „Proto Labs“) fertigt für ihre Kunden mit Hilfe innovativer 3D-Druck-, CNC-Bearbeitungs- und Spritzguss-Techniken anhand eines vom Kunden übermittelten 3D CAD-Modells individuelle, kundenspezifische Prototypen und Produktionsteile in kleinen bis mittelgroßen Serien (nachfolgend: „Produkte“) an.

Diese Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen finden auf alle Verträge Anwendung, die Proto Labs mit ihren Kunden über die Herstellung und Lieferung der Produkte schließt. Sie gelten auch für alle zukünftigen Lieferungen, Leistungen oder Angebote an den Kunden, selbst wenn sie nicht nochmals gesondert vereinbart werden. Proto Labs erkennt entgegenstehende oder abweichende Geschäftsbedingungen des Kunden nicht an, es sei denn, Proto Labs hat ihre Geltung ausdrücklich schriftlich vereinbart.

Diese Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen gelten auch für den Fall, dass Proto Labs in Kenntnis entgegenstehender oder abweichender Bedingungen des Kunden vorbehaltlos eine Bestellung annimmt oder eine Lieferung ausführen sollte.

##### § 2 Vertragsschluss und Gegenstand der Lieferung

Alle Angebote von Proto Labs sind freibleibend und unverbindlich, soweit sie nicht ausdrücklich als verbindlich gekennzeichnet sind oder eine bestimmte Annahmefrist enthalten. Ein verbindlicher Vertrag kommt erst durch eine Auftragsbestätigung von Proto Labs zustande. Dabei ist der Kunde an seine Bestellung für einen Zeitraum von 30 Tagen gebunden.

Für den Umfang der Lieferung ist die Auftragsbestätigung von Proto Labs maßgebend.

Der Kunde ist alleine verantwortlich für die Erstellung des 3D CAD Modells; die hierfür notwendige Software wird nicht von Proto Labs zur Verfügung gestellt.

Konstruktions- und Formänderungen des Produkts bleiben vorbehalten, sofern diese nicht die mit dem Kunden verbindlich vereinbarte Sollbeschaffenheit des Produkts betreffen und die Änderungen für den Kunden zumutbar sind.

Soweit mit dem Kunden die Sollbeschaffenheit des Produkts verbindlich vereinbart wurde, bleiben Änderungen durch Proto Labs zulässig, soweit sie aufgrund zwingender rechtlicher Vorschriften erfolgen und dem Kunden zumutbar sind. Im Falle der Unzumutbarkeit steht dem Kunden ein Recht zum Rücktritt vom Vertrag zu. Weitergehende Ansprüche sind ausgeschlossen.

### § 3 Kein gesetzliches Widerrufsrecht

Proto Labs fertigt die von dem Kunden bestellten Produkte individuell nach dessen Wünschen und Vorgaben. Ein gesetzliches Widerrufsrecht für Verbraucher im Sinne des § 13 BGB besteht daher nicht.

### § 4 Preise; Zahlungsbedingungen

Die zwischen Proto Labs und dem Kunden vereinbarten Preise gelten nur für den in der jeweiligen Auftragsbestätigung aufgeführten Leistungs- und Lieferumfang. Etwaige Mehr- oder Sonderleistungen werden gesondert berechnet.

Soweit nicht ausdrücklich anders vereinbart, verstehen sich die Preise für die Produkte in Euro ab Werk ohne gesetzliche Mehrwertsteuer, Verpackung und Transport. In diesem Fall werden diese Kosten wie auch etwaige Zölle, Steuern, Gebühren oder ähnliche Abgaben, soweit Proto Labs diese zu tragen hat, gesondert berechnet und in der Rechnung gesondert ausgewiesen.

Soweit nicht ausdrücklich anders vereinbart, erfolgen Zahlungen des Kunden per Kreditkarte oder Vorkasse. Ein längeres Zahlungsziel kann – soweit eine positiv ausgefallene Bonitätsprüfung zugrunde gelegt werden kann - mit 30 (dreißig) Tagen netto gewährt werden. Für die Rechtzeitigkeit der Zahlung ist der Eingang der Zahlung bei Proto Labs maßgebend.

Leistet der Kunde bei Fälligkeit nicht, und ist der Kunde ein Kaufmann im Sinne des HGB, so sind die ausstehenden Beträge ab dem Tag der Fälligkeit mit 5% p.a. zu verzinsen. Kommt der Kunde mit seiner Zahlungspflicht ganz oder teilweise in Verzug, so hat er, unbeschadet der weiteren Rechte von Proto Labs, Verzugszinsen in Höhe von jährlich 5 Prozentpunkten über dem Basiszinssatz auf die fälligen Zahlungsansprüche zu zahlen. Ist der Kunde Unternehmer im Sinne des § 14 BGB, betragen die Verzugszinsen hiervon abweichend 9 Prozentpunkte über dem Basiszinssatz.

Das Recht zur Aufrechnung steht dem Kunden nur zu, wenn seine Gegenansprüche rechtskräftig festgestellt, unbestritten oder von Proto Labs anerkannt sind. Außerdem ist er zur Ausübung eines Zurückbehaltungsrechts nur insoweit befugt, als sein Gegenanspruch fällig ist und auf dem gleichen Vertragsverhältnis beruht.

Proto Labs ist berechtigt, noch ausstehende Lieferungen nur gegen Vorauszahlung oder Sicherheitsleistung auszuführen, wenn Umstände bekannt werden, welche die Kreditwürdigkeit des Kunden wesentlich zu mindern geeignet sind und durch welche die Bezahlung der offenen, fälligen Forderungen von Proto Labs durch den Kunden aus dem jeweiligen Vertragsverhältnis, einschließlich derjenigen aus anderen Einzelaufträgen, soweit diese auf demselben rechtlichen Verhältnis beruhen, nach Proto Labs pflichtgemäßem Ermessen gefährdet wird.

Soweit mit dem Kunden nicht ausdrücklich schriftlich anders vereinbart, sind sämtliche Zahlungen in € (Euro) und ausschließlich an Proto Labs zu leisten.

### § 5 Lieferung und Lieferzeit

Der Beginn der Lieferzeit setzt die endgültige Klärung aller technischen Fragen mit dem Kunden sowie die Beibringung aller vom Kunden etwaig zu beschaffenden Unterlagen, Genehmigungen, Freigaben bzw. beizustellenden Materialien in der erforderlichen Qualität und Menge voraus.

Für die Lieferfristen ist die Auftragsbestätigung von Proto Labs maßgebend. Darin enthaltene Fristen oder Termine für Lieferungen und Leistungen sind nur dann verbindlich, soweit dort ausdrücklich eine feste Frist oder ein fester Termin zugesagt oder vereinbart ist oder Proto Labs eine Frist oder einen Termin gesondert schriftlich oder per E-Mail als ausdrücklich verbindlich bestätigt hat. Von Proto Labs ansonsten in Aussicht gestellte Fristen und Termine sind unverbindlich.

Alle Teile werden FCA (Incoterms 2010) auf dem Gelände des Verkäufers geliefert. Der Eigentumsübergang erfolgt an den Käufer zum Zeitpunkt der Lieferung an den Spediteur.

Soweit der Kunde Unternehmer im Sinne des § 14 BGB ist, ist die Lieferfrist eingehalten, wenn Proto Labs das jeweilige Produkt bis zu ihrem Ablauf am betreffenden Produktionsstandort an die Transportperson übergeben hat und die Verladung erfolgt ist.

Proto Labs ist dazu berechtigt, die Übergabe an die Transportperson abzulehnen, wenn eine Ladungssicherung gemäß der jeweils einschlägigen VDI-Richtlinien zur Ladungssicherheit aufgrund des Zustandes des von der Transportperson bereitgestellten Transportfahrzeugs nicht gewährleistet werden kann oder wenn das Transportfahrzeug nach dem pflichtgemäßem Ermessen von Proto Labs nicht den Anforderungen genügt, die nach der STVZO bzw. den jeweils einschlägigen, nationalen Vorschriften erfüllt sein müssen, damit das Fahrzeug im Straßenverkehr betrieben werden darf. Lehnt Proto Labs die Übergabe an die Transportperson aus den vorgenannten Gründen ab, gelten die Regelungen des § 6 Abs. 2 und 3 dieser Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen entsprechend.

Angemessene Teillieferungen in zumutbarem Umfang sind zulässig, wenn und soweit die Teillieferung für den Kunden im Rahmen des vertraglichen Bestimmungszwecks verwendbar ist, die Lieferung des übrigen Teils sichergestellt ist und dem Kunden hierdurch keine zusätzlichen Kosten oder erheblicher Mehraufwand entstehen.

Sofern Proto Labs mit einer Lieferung oder Leistung in Verzug gerät oder Proto Labs eine Lieferung bzw. Leistung unmöglich wird, ist der Kunde nach Maßgabe der gesetzlichen Bestimmungen berechtigt, vom Vertrag zurückzutreten. Auf Schadensersatz haftet Proto Labs im Falle des Verzuges oder der Unmöglichkeit nur nach Maßgabe der Regelungen in § 9 dieser Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen.

Ereignisse höherer Gewalt berechtigen Proto Labs, die Lieferung oder Leistung um die Dauer der Behinderung und einer angemessenen Anlaufzeit hinauszuschieben, oder wegen des noch nicht erfüllten Teils vom Vertrag ganz oder teilweise zurückzutreten. Der höheren Gewalt stehen Naturkatastrophen, Streik, Aussperrung, politische Unruhen oder andere unvorhergesehene Umstände gleich, die Proto Labs die rechtzeitige Lieferung oder Leistung trotz zumutbarer Anstrengungen unmöglich machen. Dies gilt auch dann, wenn die vorgenannten Behinderungen bei einem Unterlieferanten oder Dienstleister von Proto Labs eintreten. Dies gilt auch dann, wenn sich Proto Labs zu diesem Zeitpunkt in Verzug befindet. Proto Labs wird den Kunden unverzüglich benachrichtigen, wenn ein Fall höherer Gewalt im Sinne dieses § 5 Abs. 7 auftritt. Der Kunde kann Proto Labs auffordern, innerhalb von 6 (sechs) Wochen zu erklären, ob Proto Labs im Hinblick auf den noch nicht erfüllten Teil des Vertrages ganz oder teilweise vom Vertrag zurücktreten oder innerhalb einer angemessenen Nachfrist liefern wird. Erklärt sich Proto Labs innerhalb der vom Kunden gesetzten Frist nicht, kann der Kunde vom nicht erfüllten Teil des Vertrages zurücktreten.

### § 6 Verpackung, Versand, Gefahrübergang und Entgegennahme der Ware durch den Kunden

Sofern nicht ausdrücklich anders schriftlich vereinbart, wählt Proto Labs die Art der Verpackung nach freiem Ermessen.

Ist der Kunde Unternehmer im Sinne des § 14 BGB, geht die Gefahr des zufälligen Unterganges und der zufälligen Verschlechterung spätestens mit der Auslieferung des jeweiligen Produkts an den Spediteur, den Frachtführer oder der zur Ausführung durch den Kunden bestimmten Person auf den Kunden über. Dies gilt auch im Falle von Teillieferungen. Ist der Kunde Verbraucher im Sinne des § 13 BGB, geht die Gefahr des zufälligen Unterganges und der zufälligen Verschlechterung spätestens mit dem Erhalt des jeweiligen Produkts durch den Kunden auf diesen über.

Ist der Kunde Unternehmer im Sinne des § 14 BGB, kommt er darüber hinaus in Annahmeverzug, wenn Proto Labs ihm die Versandbereitschaft mitgeteilt hat, der Kunde aber eine Übernahme des jeweiligen Produkts zum genannten Termin ablehnt oder die Ware zum genannten Termin nicht abholt bzw. nicht von einer Transportperson abholen lässt.

Kommt der Kunde in Annahmeverzug oder verletzt er sonstige Mitwirkungspflichten, so ist Proto Labs berechtigt, den Proto Labs hierdurch entstandenen Schaden einschließlich etwaiger Mehraufwendungen von ihm ersetzt zu verlangen. In diesem Fall geht auch die Gefahr eines zufälligen Unterganges oder einer zufälligen Verschlechterung der Kaufsache auf den Kunden über. Nach Setzung und fruchtlosem Ablauf einer angemessenen

Frist ist Proto Labs zudem berechtigt, anderweitig über das Produkt zu verfügen und den Kunden mit angemessener verlängerter Frist zu beliefern.

Die Produkte werden nur auf ausdrücklichen Wunsch des Kunden und auf seine Kosten gegen Diebstahl-, Bruch-, Transport-, Feuer- und Wasserschäden oder sonstige versicherbare Risiken versichert.

## § 7 Nutzungsrechte

Proto Labs behält sämtliche Rechte, insbesondere das Eigentum und Urheberrecht, an allen dem Kunden ggf. zur Verfügung gestellten Unterlagen, Zeichnungen, Illustrationen, Abbildungen, Spezifikationen, Mustern etc. Der Kunde darf diese ausschließlich im Rahmen des vertraglich vorhergesehenen Zwecks verwenden. Sie sind streng vertraulich zu behandeln und dürfen Dritten ohne vorherige schriftliche Einverständniserklärung von Proto Labs nicht zugänglich gemacht werden.

Proto Labs behält darüber hinaus alle Rechte, insbesondere das Eigentum, an der/den im Rahmen der Herstellung des vertragsgegenständlichen Produkts eingesetzten Software, Werkzeugen, Formteilen, Technologien, Fertigungstechniken, Prozessen sowie sonstigen Arbeitsweisen, einschließlich des hierfür erforderlichen Know-Hows. Dies gilt insbesondere auch für solche Werkzeuge, Formteile, Technologien, etc., die speziell zur Erfüllung eines bestimmten Kundenauftrags entwickelt oder adaptiert worden sind. Der Kunde erwirbt an diesen Werkzeugen, Formteilen, Technologien, etc. keine Rechte. Dies gilt auch dann, wenn der Kunde die Kosten für die Herstellung der Werkzeuge übernimmt. Proto Labs wird speziell zur Erfüllung eines bestimmten Kundenauftrags entwickelte oder adaptierte Werkzeuge, Formteile, Technologien etc. allerdings nicht ohne die ausdrückliche Zustimmung des Kunden zur Erfüllung von Aufträgen anderer Kunden einsetzen.

Der Kunde behält alle Rechte an dem von ihm übermittelten 3D CAD Modell. Proto Labs wird dieses ausschließlich zur Herstellung des vertragsgegenständlichen Produkts verwenden. Unberührt bleibt das Recht von Proto Labs, ähnliche Produkte für andere Kunden nach Maßgabe der jeweiligen 3D CAD Modelle bzw. sonstigen Vorgaben dieser Kunden zu entwickeln.

## § 8 Gewährleistung

Soweit der Kunde Kaufmann im Sinne des HGB ist, setzen seine Mängelansprüche voraus, dass dieser den ihm gesetzlich obliegenden Untersuchungs- und Rügepflichten ordnungsgemäß nachgekommen ist. In diesem Fall muss der Kunde jedwede Mängelrüge Proto Labs gegenüber schriftlich unter genauer Angabe von Art und Umfang des Mangels erklären, damit Proto Labs eine Prüfung der Berechtigung der Mängelrüge möglich ist. Insbesondere hat der Kunde hierzu die gelieferte Ware unmittelbar nach Eintreffen auf Transportschäden zu untersuchen und hierbei festgestellte Schäden schriftlich auf dem Frachtbrief zu vermerken, diese Rüge von der Transportperson gegenzeichnen zu lassen sowie Proto Labs hierüber schriftlich zu informieren.

Proto Labs übernimmt keine Verantwortung für das Design oder die Geeignetheit des von dem Kunden gewünschten Produkts zu einem bestimmten Zweck. Die Designverantwortung wie auch das Verwendungsrisiko liegen ausschließlich beim Kunden. Insbesondere ist Proto Labs nicht dazu verpflichtet, die von dem Kunden übermittelten 3D CAD-Modelle oder sonstigen Daten und Angaben des Kunden im Hinblick auf das zu fertigende Produkt auf Vollständigkeit oder Richtigkeit zu prüfen. Dasselbe gilt im Hinblick auf die Geeignetheit der von dem Kunden ausgewählten Materialien für das Produkt.

Proto Labs übernimmt des Weiteren keine Verantwortung für die Mangelfreiheit und Geeignetheit von seitens des Kunden beigestellter Materialien für die Herstellung des gewünschten Produkts. Insbesondere ist Proto Labs nicht dazu verpflichtet, vom Kunden beigestellte Materialien auf etwaige Mangelhaftigkeit zu untersuchen.

Proto Labs übernimmt darüber hinaus keine Verantwortung dafür, dass das Produkt in der von dem Kunden gewünschten Form, einschließlich dessen Material, etwaige, im Einzelfall einschlägige regulatorische Anforderungen erfüllt bzw. marktfähig ist.

Proto Labs übernimmt schließlich ebenfalls keine Verantwortung dafür, dass das nach dem 3D CAD Modell bzw. sonstigen Vorgaben des Kunden hergestellte Produkt Rechte Dritter, insbesondere geistigen Eigentumsrechte wie Urheber-, Patent-, Gebrauchs- oder Geschmacksmusterrechte sowie sonstige gewerbliche Schutzrechte verletzt.

Soweit ein Mangel des Produkts vorliegt, ist Proto Labs nach eigener Wahl – für den Fall, dass der Kunde Verbraucher im Sinne des § 13 BGB ist: nach Wahl des Kunden – zur Mangelbeseitigung oder Ersatzlieferung berechtigt. Dabei hat Proto Labs die zum Zwecke der Nacherfüllung erforderlichen Aufwendungen nach Maßgabe des Gesetzes zu tragen.

Ist der Kunde Unternehmer im Sinne des § 14 BGB und macht der Kunde im Zusammenhang mit der Nacherfüllung berechtigterweise Kosten gegen Proto Labs geltend, die ihm aus dem Einsatz eigener Mitarbeiter oder eigener Gegenstände entstanden sind, so sind die Erstattungsansprüche des Kunden insoweit auf seine Selbstkosten begrenzt. Ist der Kunde Unternehmer im Sinne des § 14 BGB und erhöhen sich die zum Zwecke der Nacherfüllung erforderlichen Aufwendungen dadurch, dass das jeweilige Produkt auf Veranlassung des Kunden an einen anderen als den vereinbarten Lieferort gebracht wurde, so sind die hierdurch zusätzlich entstehenden Kosten vom Kunden zu tragen.

Eine Ersatzlieferung durch Proto Labs setzt schließlich voraus, dass der Käufer das mangelhafte Produkt Zug-um-Zug an Proto Labs zurückgibt und – soweit der Kunde Unternehmer im Sinne des § 14 BGB ist – Wertersatz für gezogene Nutzungen leistet.

Ist Proto Labs zur Mangelbeseitigung oder Ersatzlieferung nicht bereit oder in der Lage, verweigert Proto Labs diese oder verzögert sie sich über angemessene Fristen hinaus aus Gründen, die Proto Labs zu vertreten hat, oder schlägt die Mangelbeseitigung aus sonstigen Gründen endgültig fehl, so ist der Kunde nach seiner Wahl berechtigt, vom Vertrag zurückzutreten oder eine angemessene Herabsetzung des Kaufpreises zu verlangen. Im Falle eines Rücktritts ist Proto Labs zur Rückzahlung des geleisteten Kaufpreises nur Zug-um-Zug gegen Rückgewähr des mangelhaften Produkts und Zahlung von Wertersatz für gezogene Nutzungen seitens des Kunden verpflichtet.

Das Rücktrittsrecht des Kunden bei Mängeln der Ware ist ausgeschlossen in den Fällen, in denen der Kunde zur Rückgewähr der empfangenen Leistung außerstande ist und dies nicht darauf beruht, dass die Rückgewähr nach der Natur der empfangenen Leistung nicht möglich ist, von Proto Labs zu vertreten ist oder ein Mangel sich erst bei einer Verarbeitung oder Umgestaltung der Ware gezeigt hat. Der Kunde ist bei Lieferung mangelhafter Produkte oder bei Teillieferungen zum Rücktritt vom ganzen Vertrag oder zum Schadensersatz statt der ganzen Leistung nach Maßgabe der Regelungen im nachfolgenden § 9 nur dann berechtigt, wenn er an der erbrachten Leistung unter Anlegung eines objektiven Maßstabes kein Interesse hat.

Ist der Kunde Unternehmer im Sinne des § 14 BGB und hat der Kunde das Produkt an einen Verbraucher im Sinne von § 13 BGB weiterverkauft („Verbrauchsgüterkauf“), gilt abweichend von den vorstehenden Regelungen Folgendes: Musste der Kunde das Produkt aufgrund eines Mangels, der bereits bei Gefahrübergang von Proto Labs auf den Kunden vorgelegen hat, vom Verbraucher zurücknehmen oder hat der Verbraucher infolge dessen den Kaufpreis gemindert, so kann der Kunde nach seiner Wahl Mangelbeseitigung oder Ersatzlieferung verlangen, vom Vertrag zurücktreten oder den Kaufpreis mindern. In diesem Fall bedarf es der für die Mängelansprüche des Kunden wegen des vom Verbraucher geltend gemachten Mangels einer sonst erforderlichen Fristsetzung nicht. Im Übrigen gelten in diesem Fall die gesetzlichen Bestimmungen.

Schadensersatzansprüche stehen dem Kunden allein nach Maßgabe des nachfolgenden § 9 zu.

Die Gewährleistung entfällt, wenn der Kunde das Produkt nach Lieferung modifiziert oder durch Dritte modifizieren lässt und die Mangelbeseitigung hierdurch unmöglich oder unzumutbar erschwert wird. In jedem Fall hat der Kunde die durch die Modifizierung entstehenden Mehrkosten der Mangelbeseitigung zu tragen. Es wird insbesondere keine Haftung übernommen für Schäden, die aus nachfolgenden Gründen entstanden sind:

- unsachgemäße Behandlung oder Verwendung, nicht bestimmungsgemäßer Gebrauch;
- ungeeignete Betriebsbedingungen;
- fehlerhafte Installation, Inbetriebnahme oder Nutzung durch den Kunden oder Dritte.

Ist der Kunde Unternehmer im Sinne des § 14 BGB, beträgt die Verjährungsfrist für Ansprüche auf Nacherfüllung, Rücktritt und Minderung wegen Mängeln des Produkts ein Jahr ab Gefahrübergang. Ist der Kunde Verbraucher im Sinne des § 13 BGB, beträgt die Verjährungsfrist für Ansprüche auf Nacherfüllung, Rücktritt und Minderung wegen Mängeln des Produkts hiervon abweichend zwei Jahre ab Gefahrübergang.

Ist der Kunde Unternehmer im Sinne des § 14 BGB und hat er das Produkt an einen Verbraucher im Sinne von § 13 BGB weiterverkauft („Verbrauchsgüterkauf“), richtet sich die Verjährung der vorgenannten Ansprüche des Kunden, welcher von dem Verbraucher wegen eines Mangels des Produkts in Anspruch genommen wird, der bereits bei Gefahrübergang von Proto Labs auf den Kunden vorgelegen hat, einschließlich des Anspruchs auf Aufwendungsersatz gemäß § 478 Abs. 2 BGB, nach den gesetzlichen Vorschriften des Verbrauchsgüterkaufs.

Für die Verjährung von Schadensersatzansprüchen, die auf Mängeln des Produkts beruhen, gilt die nachfolgende Regelung des § 9 Abs. 11.

### § 9 Schadensersatz

Proto Labs haftet auf Schadensersatz, gleich aus welchem Rechtsgrunde, insbesondere aus Unmöglichkeit, Verzug, mangelhafter oder falscher Lieferung, Vertragsverletzung, Verletzung von Pflichten bei Vertragsverhandlungen oder aus unerlaubter Handlung ausschließlich nach Maßgabe dieses § 9. Im Übrigen ist jegliche Haftung auf Schadensersatz ausgeschlossen.

Proto Labs haftet im Rahmen der gesetzlichen Bestimmungen wegen vorsätzlichen oder grob fahrlässigen Verhaltens ihrer gesetzlichen Vertreter oder leitenden Angestellten, wegen Verletzung von Leib, Leben und Gesundheit sowie für garantierte Beschaffenheitsmerkmale und nach den Vorschriften des Produkthaftungsgesetzes.

Darüber hinaus haftet Proto Labs

- für Schäden aus einer leicht fahrlässigen Verletzung von wesentlichen Vertragspflichten durch ihre gesetzlichen Vertreter, leitenden Angestellten und sonstigen Erfüllungsgehilfen;
- für Schäden, die von ihren einfachen Erfüllungsgehilfen grob fahrlässig oder vorsätzlich ohne Verletzung von vertragswesentlichen Pflichten verursacht wurden.

Vertragswesentlich sind diejenigen Pflichten, deren Erfüllung die ordnungsgemäße Durchführung des Vertrages überhaupt erst ermöglicht und auf deren Einhaltung der Kunde regelmäßig vertraut und vertrauen darf.

Die Haftung von Proto Labs auf Schadensersatz nach dem vorstehenden Abs. 3 dieses § 9 ist auf die Höhe des vertragstypischen, vorhersehbaren Schadens begrenzt.

Soweit der Kunde kein Endkunde ist, ist die Haftung von Proto Labs nach dem vorstehenden Abs. 3 dieses § 9 ausgeschlossen, soweit der Kunde seinerseits die Haftung gegenüber seinem Abnehmer wirksam beschränkt hat. Dabei wird der Kunde nach besten Kräften bemüht sein, mit seinen Abnehmern selbst Haftungsbeschränkungen soweit rechtlich zulässig – auch zu Gunsten von Proto Labs – zu vereinbaren.

Im Rahmen der Haftung nach dem vorstehenden Abs. 3 dieses § 9 sind außerdem mittelbare Schäden und Folgeschäden, die Folge von Mängeln des Produkts sind, nur dann ersatzfähig, soweit solche Schäden bei bestimmungsgemäßer Verwendung des Produkts typischerweise zu erwarten sind.

Schadensersatzansprüche wegen entgangenen Gewinns sind in jedem Falle ausgeschlossen.

Soweit Proto Labs technische Auskünfte gibt oder beratend tätig wird und diese Auskünfte oder Beratung nicht ausdrücklich zu dem von Proto Labs geschuldeten, vertraglich vereinbarten Leistungsumfang gehören, geschieht dies unentgeltlich und unter Ausschluss jeglicher Haftung.

Der Kunde wird Proto Labs, falls er Proto Labs nach den vorstehenden Regelungen in Anspruch nehmen will, unverzüglich und umfassend informieren und konsultieren. Der Kunde hat Proto Labs Gelegenheit zur Untersuchung des Schadenfalls zu geben.

Die Regelung zum Ausschluss der Gewährleistung in § 8 Abs. 2 und 8 dieser Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen gilt entsprechend.

Die Verjährungsfrist für Schadensersatzansprüche wegen mangelhafter Lieferung beträgt ein Jahr ab Gefahrübergang. Die Verjährungsfrist für Schadensersatzansprüche wegen der Verletzung sonstiger Vertragspflichten beträgt ein Jahr ab dem Schluss des Jahres, in dem der Anspruch entstanden ist und der Kunde von den anspruchsbegründenden Umständen und der Person des Schuldners Kenntnis erlangt oder ohne grobe Fahrlässigkeit erlangen musste.

Im Falle der Verletzung von Leben, Leib oder Gesundheit, für Schäden nach dem Produkthaftungsgesetz sowie für solche, die durch arglistiges Verhalten, durch Vorsatz, grobe Fahrlässigkeit oder durch fahrlässige Verletzung vertragswesentlicher Pflichten im Sinne des Abs. 3 dieses § 9 der gesetzlichen Vertreter, leitenden Angestellten oder Erfüllungsgehilfen von Proto Labs verursacht wurden, gilt abweichend hiervon die gesetzliche Verjährungsfrist.

### § 10 Freistellung

Sollten Dritte aufgrund der Nutzung des Produkts durch den Kunden Ansprüche wegen der Verletzung von gewerblichen Schutzrechten oder sonstigen geistigen Eigentumsrechten gegenüber Proto Labs geltend machen, ist der Kunde verpflichtet, Proto Labs von allen hieraus resultierenden Ansprüchen, Schadensersatzforderungen und sonstigen Kosten und Aufwendungen freizustellen und Proto Labs bei der Abwehr solcher Ansprüche tatkräftig zu unterstützen. Zudem ist Proto Labs berechtigt, von dem Kunden Erstattung des Proto Labs insoweit entstandenen Schadens inklusive angemessener Rechtsverfolgungskosten zu verlangen.

### § 11 Vom Kunden beigestellte Materialien

Vom Kunden vereinbarungsgemäß für die Herstellung des Produkts beizustellende Materialien hat der Kunde rechtzeitig und kostenfrei in der erforderlichen Qualität und Menge (unter Berücksichtigung hinreichender Toleranzen für Ausschüsse und Abfälle, die im Rahmen des Fertigungsprozesses anfallen können) an Proto Labs zu liefern. Proto Labs ist nicht dazu verpflichtet, Ausschüsse bzw. Abfälle gleich welcher Art des von dem Kunden beigestellten Materials an diesen zurückzugeben. Dasselbe gilt für Kleinstmengen nicht aufgebrauchten Materials des Kunden.

Nimmt der Kunde Restmengen des von ihm beigestellten Materials trotz Aufforderung von Proto Labs nicht innerhalb einer angemessenen Frist zurück, ist Proto Labs berechtigt, die Restmengen im eigenen Ermessen zu vernichten.

### § 12 Verbotene Zwecke

Der Kunde bestätigt und versichert, dass die von ihm in Auftrag gegebenen Produkte nicht dazu gedacht sind bzw. dazu dienen sollen, zu verbotenen Zwecken verwendet zu werden. Der Kunde bestätigt und versichert insbesondere, dass die von ihm übermittelten 3D CAD Modelle keine Produkte hervorbringen, die unter ein Waffengesetz fallen bzw. als Waffe oder Teile zur Herstellung von Waffen geeignet sind.

### § 13 Eigentumsvorbehalt

Das jeweilige Produkt bleibt bis zur vollständigen Bezahlung sämtlicher Forderungen aus der Geschäftsverbindung, einschließlich der künftig entstehenden Forderungen, auch aus gleichzeitig oder später abgeschlossenen Verträgen, das Eigentum von Proto Labs. Dies gilt auch dann, wenn einzelne oder sämtliche der Forderungen von Proto Labs in eine laufende Rechnung aufgenommen wurden und der Saldo gezogen und anerkannt ist.

### § 14 Datenschutz

Proto Labs erhebt, verarbeitet und nutzt personenbezogene Daten des Kunden zum Zwecke des Vertragsabschlusses und der Vertragsdurchführung. Nähere Informationen über Art, Umfang und Zweck der Erhebung, Verarbeitung und Nutzung der personenbezogenen Daten von Kunden enthält unsere Datenschutzerklärung.

### § 15 Gerichtsstand; Erfüllungsort

Soweit der Kunde Kaufmann im Sinne des HGB ist, ist der Gerichtsstand und Erfüllungsort der Sitz von Proto Labs. Proto Labs ist jedoch berechtigt, den Kunden auch an dessen Wohnsitz bzw. Geschäftssitz zu verklagen.

## Anhang

### § 16 Anwendbares Recht

Es gilt das Recht der Bundesrepublik Deutschland unter Ausschluss des UN-Abkommens über den Internationalen Warenkauf (CISG).

### § 17 Schlussbestimmungen

Soweit diese Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen bestimmen, dass Willenserklärungen bzw. Mitteilungen schriftlich zu erfolgen haben, wird die Schriftform auch durch Verwendung der Textform, d.h. per Telefax oder per E-Mail, gewahrt.

Die Inhalte des jeweiligen Vertrags werden von Proto Labs gespeichert und können vom Kunden jederzeit in dessen Kunden-Account eingesehen werden.

Die Vertragssprache ist Deutsch.

Sollte eine Bestimmung dieser Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen unwirksam sein oder werden, so wird dadurch die Gültigkeit der übrigen Bestimmungen dieser Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen nicht berührt. In diesem Falle werden die Parteien die unwirksame Bestimmung in gemeinsamer Abstimmung durch eine wirksame Regelung ersetzen, die dem am nächsten kommt, was die Parteien bei Vertragsschluss gewollt haben. Entsprechendes gilt für den Fall einer Vertragslücke.

*Proto Labs Rev 09-2016*

Bei allen folgenden Angeboten von Proto Labs werden die allgemeinen Geschäftsbedingungen ausgelassen.

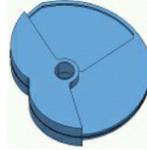
## 7.5.2 Proto Labs – Nocke (Teil 2)



### ProtoQuote®

#### Angebot für CNC-Bearbeitung

Erstellt für: **Zhang Peng Du**  
 Angebotsnummer: **411397**  
 Angebot vom: **12-Jul-2019**  
 Bezeichnung des Teils: **Nocke (rev: 2)**  
 Abmessungen: **89.582 mm x 76.403 mm x 22 mm**



Wir danken Ihnen für die Gelegenheit, Ihnen ein Angebot für Ihre Teile erstellen zu dürfen. Wir freuen uns darauf, mit Ihnen an diesem Projekt zu arbeiten.

Bei Fragen stehen wir Ihnen unter +49 (0) 6261 6436 947 gerne zur Verfügung.

#### 1 Spezifikationen bestätigen oder ändern und Neuberechnung

Material:	<input type="text" value="Baustahl - Mild Steel - silberfarben (S275)"/>
Fertigungsmethode:	<input checked="" type="radio"/> Fräsmaschine <input type="radio"/> Drehmaschine <small>Aufgrund der Teilegeometrie ist eine Drehbearbeitung nicht möglich.</small>
Menge:	<input type="text" value="2"/> 2 Teil(e) zu € 376,68 p. Stück € 753,36
Oberfläche:	<input type="text" value="Gegratete Kanten (Werkzeugspuren si"/>
Produktionszeit:	<input type="text" value="Versand der Teile in 3 Werktagen (Standardpreis)"/>

**Sie benötigen Ihre Teile bis 19 Juli?**  
 Wählen Sie eine Herstellungszeit von 2 Tagen aus und schließen Sie die Bestellung durch Auswahl der Übernachtzustellung innerhalb von 17 Std. 49 Min. ab.

**Gesamtsumme EUR: € 753,36**

#### 2 Design-Analyse

Ansicht „Bearbeiteter Zustand“

Diese Ansicht zeigt Ihnen, wie Ihr fertiges Teil - einschließlich Abweichungen von Ihrem 3D-Modell – nach dem Fräsen aussehen wird. Bitte beachten Sie, dass die farblichen Indikatoren repräsentativ sind und möglicherweise nicht alle Bearbeitungsartefakte angezeigt werden können.

Farbige Bereiche zeigen an, wo Material am Teil verbleibt. Die Farben unter der Ansicht zeigen jeweils den Fräsradius an, der diese Bereiche am ehesten erreicht. ■ Schwarze Flächen verweisen auf Bereiche die nicht vollständig gefräst werden können und dadurch Material verbleibt. Diese Features werden nicht abgebildet.

Der Einsatz des Transparenz-Schiebereglers vereinfacht die Suche nach farbigen Bereichen, die in unserem Herstellungsverfahren nicht bearbeitet werden. .

Bitte zoomen und drehen Sie das Bild, um alle farbliche Indikatoren zu überprüfen, da sie unter Umständen sehr klein sein können.

Prüfen Sie die Registerkarten „Dünne Bereiche“ und „Gewindefestlegung“.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter [customerservice@protolabs.de](mailto:customerservice@protolabs.de) oder +49 (0) 6261 6436 947

Wenn Ihr Merkmal verdeckt/farbig überzogen ist, wird es nicht gefräst.

Fräsradius:

■ = R 0.197 in / R 5.0 mm ■ = R 0.118 in / R 3.0 mm ■ = R 0.059 in / R 1.5 mm ■ = R 0.039 in / R 1.0 mm  
 ■ = R 0.030 in / R 0.75 mm

#### Dünne Bereiche

In dieser Ansicht sind alle dünnen Bereiche gekennzeichnet, die in Ihrem Modell festgestellt wurden. Dünne Bereiche können eventuell dünner als konzipiert gefräst werden und können abbrechen, ausbrechen und sich verbiegen oder verformen.

Wir haben in diesem Teil dünne Bereiche festgestellt. Die Bereiche, die gelb ■ unterlegt sind, sind dünner als 0,5 mm. Bitte drehen Sie Ihr Teil, um alle Bereiche sehen zu können.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter [customerservice@protolabs.de](mailto:customerservice@protolabs.de) oder +49 (0) 6261 6436 947

#### Gewindefestlegung

Wir können die Bohrungen in Ihrem Teil mit Gewinde versehen. Nähere Einzelheiten finden Sie auf unserer Seite "Gewindebohrungen". Für jede Bohrung aus der Dropdown-Liste einen Gewindetyp (oder auch 'kein' Gewinde) auswählen. Über das Schnellzuordnungsmenü können Sie allen Bohrungen, die mit Gewinde versehen werden sollen, die gleiche Gewindegruppe (oder kein Gewinde) zuordnen. Die Gewindefestlegung wird in Ihrer Auftragsbestätigung angezeigt und sollte auf ihre Richtigkeit geprüft werden.

Name	Gewinde
------	---------

Bohrung 11	keine
------------	-------

Nachbearbeitungen werden zu diesem Zeitpunkt nicht unterstützt.

Ursprüngliches Teil

**Diese Ansicht zeigt Ihr Teilmodell, wie wir es erhalten haben.**

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter customerservice@protolabs.de oder +49 (0) 6261 6436 947

### 3 Zusammenfassung

<b>Auftragspreis</b>			
Ausgewählte Spezifikationen			
Menge:	2	2 Teil(e) zu € 376,68 p. Stück	€ 753,36
Produktionszeit:	Versand der Teile in 3 Werktagen (Standardpreis)		
Werkstoff:	Baustahl - Mild Steel - silberfarben (S275)		
Fertigungsmethode	Fräsmaschine		

**⚠ Sie können erst aus diesem Angebot bestellen, wenn Sie auf die Registerkarte "Gewinazuordnung" in der Anzeige oben geklickt haben.**

[Neues Modell hochladen](#)

**Gesamtsumme EUR:** € 753,36

- Hinweise**
- Der Kunde ist dafür verantwortlich, dass die Eigenschaften und das Verhalten des gewählten Materials den Anforderungen seiner Anwendung entspricht.
  - Toleranzen von +/- 0,1mm sind zu erwarten und werden in der Regel eingehalten.
  - Die geschätzte Herstellungszeit ist der bestmögliche Schätzwert, der für das Teil am Ende des Angebots vorliegt. Die tatsächliche Herstellungszeit hängt von der Komplexität der Teile, der Anzahl an unterschiedlichen Teilen, der Menge, der Materialverfügbarkeit, der Auslastung zum Zeitpunkt der Beauftragung und anderen Faktoren ab. Wir werden uns bemühen, innerhalb der geschätzten Herstellungszeit oder so zeitnah wie möglich zu liefern; dennoch besteht keine Gewähr, dass die geschätzten Herstellungszeit eingehalten werden.
  - Sofern nicht anders gewünscht, werden die Teile am nächsten Werktag mit UPS geliefert. Die Lieferkosten sind im Voraus zu zahlen und werden dem Rechnungsbetrag hinzugerechnet.

**Allgemeine Geschäftsbedingungen – ProtoQuote interaktives Angebot**

Allgemeine Verkaufs- und Lieferbedingungen der Proto Labs GmbH

**§ 1 Anwendbarkeit der Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen**

Die Proto Labs GmbH (nachfolgend: „Proto Labs“) fertigt für ihre Kunden mit Hilfe innovativer 3D-Druck-, CNC-Bearbeitungs- und Spritzguss-Techniken anhand eines vom Kunden übermittelten 3D CAD-Modells individuelle, kundenspezifische Prototypen und Produktionsteile in kleinen bis mittelgroßen Serien (nachfolgend: „Produkte“) an.

Diese Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen finden auf alle Verträge Anwendung, die Proto Labs mit ihren Kunden über die Herstellung und Lieferung der Produkte schließt. Sie gelten auch für alle zukünftigen Lieferungen, Leistungen oder Angebote an den Kunden, selbst wenn sie nicht nochmals gesondert vereinbart werden. Proto Labs erkennt entgegenstehende oder abweichende Geschäftsbedingungen des Kunden nicht an, es sei denn, Proto Labs hat ihre Geltung ausdrücklich schriftlich vereinbart.

Diese Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen gelten auch für den Fall, dass Proto Labs in Kenntnis entgegenstehender oder abweichender Bedingungen des Kunden vorbehaltlos eine Bestellung annimmt oder eine Lieferung ausführen sollte.

**§ 2 Vertragsschluss und Gegenstand der Lieferung**

Alle Angebote von Proto Labs sind freibleibend und unverbindlich, soweit sie nicht ausdrücklich als verbindlich gekennzeichnet sind oder eine bestimmte Annahmefrist enthalten. Ein verbindlicher Vertrag kommt erst durch eine Auftragsbestätigung von Proto Labs zustande. Dabei ist der Kunde an seine Bestellung für einen Zeitraum von 30 Tagen gebunden.

Für den Umfang der Lieferung ist die Auftragsbestätigung von Proto Labs maßgebend.

Der Kunde ist alleine verantwortlich für die Erstellung des 3D CAD Modells; die hierfür notwendige Software wird nicht von Proto Labs zur Verfügung gestellt.

Konstruktions- und Formänderungen des Produkts bleiben vorbehalten, sofern diese nicht die mit dem Kunden verbindlich vereinbarte Sollbeschaffenheit des Produkts betreffen und die Änderungen für den Kunden zumutbar sind.

Soweit mit dem Kunden die Sollbeschaffenheit des Produkts verbindlich vereinbart wurde, bleiben Änderungen durch Proto Labs zulässig, soweit sie aufgrund zwingender rechtlicher Vorschriften erfolgen und dem Kunden zumutbar sind. Im Falle der Unzumutbarkeit steht dem Kunden ein Recht zum Rücktritt vom Vertrag zu. Weitergehende Ansprüche sind ausgeschlossen.

**§ 3 Kein gesetzliches Widerrufsrecht**

Proto Labs fertigt die von dem Kunden bestellten Produkte individuell nach dessen Wünschen und Vorgaben. Ein gesetzliches Widerrufsrecht für Verbraucher im Sinne des § 13 BGB besteht daher nicht.

**§ 4 Preise; Zahlungsbedingungen**

Die zwischen Proto Labs und dem Kunden vereinbarten Preise gelten nur für den in der jeweiligen Auftragsbestätigung aufgeführten Leistungs- und Lieferumfang. Etwaige Mehr- oder Sonderleistungen werden gesondert berechnet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 7.5.3 Proto Labs – Lagerbock für die Nocken (Teil 4)



### ProtoQuote®

#### Angebot für CNC-Bearbeitung

Erstellt für: **Zhang Peng Du**  
 Angebotsnummer: **411463**  
 Angebot vom: **12-Jul-2019**  
 Bezeichnung des Teils: **Lagerbock\_Nocke**  
 Abmessungen: **21 mm x 4 mm x 67.5 mm**



Wir danken Ihnen für die Gelegenheit, Ihnen ein Angebot für Ihre Teile erstellen zu dürfen. Wir freuen uns darauf, mit Ihnen an diesem Projekt zu arbeiten.

Bei Fragen stehen wir Ihnen unter +49 (0) 6261 6436 947 gerne zur Verfügung.

#### 1 Spezifikationen bestätigen oder ändern und Neuberechnung

Material:	<input type="text" value="Baustahl - Mild Steel - silberfarben (S275)"/>
Fertigungsmethode:	<input checked="" type="radio"/> Fräsmaschine <input type="radio"/> Drehmaschine <small>Aufgrund der Teilegeometrie ist eine Drehbearbeitung nicht möglich.</small>
Menge:	<input type="text" value="4"/> 4 Teil(e) zu € 201,88 p. Stück € 807,52
Oberfläche:	<input type="text" value="Gegratete Kanten und leicht perigestraht"/>
Produktionszeit:	<input type="text" value="Versand der Teile in 3 Werktagen (Standardpreis)"/>

**Sie benötigen Ihre Teile bis 19 Juli?**  
 Wählen Sie eine Herstellungszeit von 2 Tagen aus und schließen Sie die Bestellung durch Auswahl der Übernachtzustellung innerhalb von 17 Std. 53 Min. ab.

**Gesamtsumme EUR: € 807,52**

#### 2 Design-Analyse

Ansicht „Bearbeiteter Zustand“

Diese Ansicht zeigt Ihnen, wie Ihr fertiges Teil - einschließlich Abweichungen von Ihrem 3D-Modell – nach dem Fräsen aussehen wird. Bitte beachten Sie, dass die farblichen Indikatoren repräsentativ sind und möglicherweise nicht alle Bearbeitungsartefakte angezeigt werden können.

Farbige Bereiche zeigen an, wo Material am Teil verbleibt. Die Farben unter der Ansicht zeigen jeweils den Fräsradius an, der diese Bereiche am ehesten erreicht. ■ Schwarze Flächen verweisen auf Bereiche die nicht vollständig gefräst werden können und dadurch Material verbleibt. Diese Features werden nicht abgebildet.

Der Einsatz des Transparenz-Schiebereglers vereinfacht die Suche nach farbigen Bereichen, die in unserem Herstellungsverfahren nicht bearbeitet werden.

Bitte zoomen und drehen Sie das Bild, um alle farbliche Indikatoren zu überprüfen, da sie unter Umständen sehr klein sein können.

Prüfen Sie die Registerkarten „Dünne Bereiche“ und „Gewindefestlegung“.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter [customerservice@protolabs.de](mailto:customerservice@protolabs.de) oder +49 (0) 6261 6436 947

Wenn Ihr Merkmal verdeckt/farbig überzogen ist, wird es nicht gefräst.

Fräserradius:  
 = R 0.031 in / R 0.8 mm

#### Dünne Bereiche

In dieser Ansicht sind alle dünnen Bereiche gekennzeichnet, die in Ihrem Modell festgestellt wurden. Dünne Bereiche können eventuell dünner als konzipiert gefräst werden und können abbrechen, ausbrechen und sich verbiegen oder verformen.

Es wurden keine dünnen Bereiche gefunden.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter [customerservice@protolabs.de](mailto:customerservice@protolabs.de) oder +49 (0) 6261 6436 947

#### Gewindefestlegung

Wir können die Bohrungen in Ihrem Teil mit Gewinde versehen. Nähere Einzelheiten finden Sie auf unserer Seite "Gewindebohrungen". Für jede Bohrung aus der Dropdown-Liste einen Gewindetyp (oder auch 'kein' Gewinde) auswählen. Über das Schnellzuordnungsmenü können Sie allen Bohrungen, die mit Gewinde versehen werden sollen, die gleiche Gewindegruppe (oder kein Gewinde) zuordnen. Die Gewindefestlegung wird in Ihrer Auftragsbestätigung angezeigt und sollte auf ihre Richtigkeit geprüft werden.

Name	Gewinde
Bohrung 1	METRIC M2 x 0.4
Bohrung 2	METRIC M2 x 0.4

Nachbearbeitungen werden zu diesem Zeitpunkt nicht unterstützt.

Ursprüngliches Teil

Diese Ansicht zeigt Ihr Teilmodell, wie wir es erhalten haben.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter customerservice@protolabs.de oder +49 (0) 6261 6436 947

### 3 Zusammenfassung

#### Auftragspreis

##### Ausgewählte Spezifikationen

Menge:	4	4 Teil(e) zu € 201,88 p. Stück	€ 807,52
Produktionszeit:	Versand der Teile in 3 Werktagen (Standardpreis)		
Werkstoff:	Baustahl - Mild Steel - silberfarben (S275)		
Fertigungsmethode	Fräsmaschine		

**⚠ Sie können erst aus diesem Angebot bestellen, wenn Sie auf die Registerkarte "Gewinzuordnung" in der Anzeige oben geklickt haben.**

[Neues Modell hochladen](#)

**Gesamtsumme EUR: € 807,52**

#### Hinweise

- Der Kunde ist dafür verantwortlich, dass die Eigenschaften und das Verhalten des gewählten Materials den Anforderungen seiner Anwendung entspricht.
- Toleranzen von +/- 0,1mm sind zu erwarten und werden in der Regel eingehalten.
- Die geschätzte Herstellungszeit ist der bestmögliche Schätzwert, der für das Teil am Ende des Angebots vorliegt. Die tatsächliche Herstellungszeit hängt von der Komplexität der Teile, der Anzahl an unterschiedlichen Teilen, der Menge, der Materialverfügbarkeit, der Auslastung zum Zeitpunkt der Beauftragung und anderen Faktoren ab. Wir werden uns bemühen, innerhalb der geschätzten Herstellungszeit oder so zeitnah wie möglich zu liefern; dennoch besteht keine Gewähr, dass die geschätzten Herstellungszeit eingehalten werden.
- Sofern nicht anders gewünscht, werden die Teile am nächsten Werktag mit UPS geliefert. Die Lieferkosten sind im Voraus zu zahlen und werden dem Rechnungsbetrag hinzugerechnet.

#### Allgemeine Geschäftsbedingungen – ProtoQuote interaktives Angebot

##### Allgemeine Verkaufs- und Lieferbedingungen der Proto Labs GmbH

#### § 1 Anwendbarkeit der Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen

Die Proto Labs GmbH (nachfolgend: „Proto Labs“) fertigt für ihre Kunden mit Hilfe innovativer 3D-Druck-, CNC-Bearbeitungs- und Spritzguss-Techniken anhand eines vom Kunden übermittelten 3D CAD-Modells individuelle, kundenspezifische Prototypen und Produktionsteile in kleinen bis mittelgroßen Serien (nachfolgend: „Produkte“) an.

Diese Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen finden auf alle Verträge Anwendung, die Proto Labs mit ihren Kunden über die Herstellung und Lieferung der Produkte schließt. Sie gelten auch für alle zukünftigen Lieferungen, Leistungen oder Angebote an den Kunden, selbst wenn sie nicht nochmals gesondert vereinbart werden. Proto Labs erkennt entgegenstehende oder abweichende Geschäftsbedingungen des Kunden nicht an, es sei denn, Proto Labs hat ihre Geltung ausdrücklich schriftlich vereinbart.

Diese Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen gelten auch für den Fall, dass Proto Labs in Kenntnis entgegenstehender oder abweichender Bedingungen des Kunden vorbehaltlos eine Bestellung annimmt oder eine Lieferung ausführen sollte.

#### § 2 Vertragsschluss und Gegenstand der Lieferung

Alle Angebote von Proto Labs sind freibleibend und unverbindlich, soweit sie nicht ausdrücklich als verbindlich gekennzeichnet sind oder eine bestimmte Annahmefrist enthalten. Ein verbindlicher Vertrag kommt erst durch eine Auftragsbestätigung von Proto Labs zustande. Dabei ist der Kunde an seine Bestellung für einen Zeitraum von 30 Tagen gebunden.

Für den Umfang der Lieferung ist die Auftragsbestätigung von Proto Labs maßgebend.

Der Kunde ist alleine verantwortlich für die Erstellung des 3D CAD Modells; die hierfür notwendige Software wird nicht von Proto Labs zur Verfügung gestellt.

Konstruktions- und Formänderungen des Produkts bleiben vorbehalten, sofern diese nicht die mit dem Kunden verbindlich vereinbarte Sollbeschaffenheit des Produkts betreffen und die Änderungen für den Kunden zumutbar sind.

Soweit mit dem Kunden die Sollbeschaffenheit des Produkts verbindlich vereinbart wurde, bleiben Änderungen durch Proto Labs zulässig, soweit sie aufgrund zwingender rechtlicher Vorschriften erfolgen und dem Kunden zumutbar sind. Im Falle der Unzumutbarkeit steht dem Kunden ein Recht zum Rücktritt vom Vertrag zu. Weitergehende Ansprüche sind ausgeschlossen.

#### § 3 Kein gesetzliches Widerrufsrecht

Proto Labs fertigt die von dem Kunden bestellten Produkte individuell nach dessen Wünschen und Vorgaben. Ein gesetzliches Widerrufsrecht für Verbraucher im Sinne des § 13 BGB besteht daher nicht.

#### § 4 Preise; Zahlungsbedingungen

Die zwischen Proto Labs und dem Kunden vereinbarten Preise gelten nur für den in der jeweiligen Auftragsbestätigung aufgeführten Leistungs- und Lieferumfang. Etwaige Mehr- oder Sonderleistungen werden gesondert berechnet.

Soweit nicht ausdrücklich anders vereinbart, verstehen sich die Preise für die Produkte in Euro ab Werk ohne gesetzliche Mehrwertsteuer, Verpackung und Transport. In diesem Fall werden diese Kosten wie auch etwaige Zölle, Steuern, Gebühren oder ähnliche Abgaben, soweit Proto Labs diese zu

## 7.5.4 Proto Labs – Regenerator (Teil 8)



## ProtoQuote®

## Angebot für CNC-Bearbeitung

Erstellt für: Zhang Peng Du  
 Angebotsnummer: 411463  
 Angebot vom: 12-Jul-2019  
 Bezeichnung des Teils: Regenerator  
 Abmessungen: 24 mm x 15 mm x 69 mm



Wir danken Ihnen für die Gelegenheit, Ihnen ein Angebot für Ihre Teile erstellen zu dürfen. Wir freuen uns darauf, mit Ihnen an diesem Projekt zu arbeiten.

Bei Fragen stehen wir Ihnen unter +49 (0) 6261 6436 947 gerne zur Verfügung.

## 1 Spezifikationen bestätigen oder ändern und Neuberechnung

Material:	<input type="button" value="i"/> Baustahl - Mild Steel - silberfarben (S275)
Fertigungsmethode:	<input checked="" type="radio"/> Fräsmaschine <input type="radio"/> Drehmaschine
Menge:	1 <input type="button" value="v"/> 1 Teil(e) zu € 388,00 p. Stück € 388,00
Oberfläche:	<input type="button" value="v"/> Gegratete Kanten und leicht perigestraf
Produktionszeit:	<input type="button" value="i"/> Versand der Teile in 3 Werktagen (Standardpreis)

**Sie benötigen Ihre Teile bis 18 Juli?**  
 Wählen Sie eine Herstellungszeit von 1 Tagen aus und schließen Sie die Bestellung durch Auswahl der Übernachtzustellung innerhalb von 17 Std. 51 Min. ab.

Gesamtsumme EUR:

## 2 Design-Analyse

Ansicht „Bearbeiteter Zustand“

Diese Ansicht zeigt Ihnen, wie Ihr fertiges Teil - einschließlich Abweichungen von Ihrem 3D-Modell - nach dem Fräsen aussehen wird. Bitte beachten Sie, dass die farblichen Indikatoren repräsentativ sind und möglicherweise nicht alle Bearbeitungsartefakte angezeigt werden können.

Farbige Bereiche zeigen an, wo Material am Teil verbleibt. Die Farben unter der Ansicht zeigen jeweils den Fräsradius an, der diese Bereiche am ehesten erreicht. ■ Schwarze Flächen verweisen auf Bereiche die nicht vollständig gefräst werden können und dadurch Material verbleibt. Diese Features werden nicht abgebildet.

Der Einsatz des Transparenz-Schiebereglers vereinfacht die Suche nach farbigen Bereichen, die in unserem Herstellungsverfahren nicht bearbeitet werden.

Bitte zoomen und drehen Sie das Bild, um alle farbliche Indikatoren zu überprüfen, da sie unter Umständen sehr klein sein können.

Prüfen Sie die Registerkarten „Dünne Bereiche“ und „Gewindefestlegung“.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter customerservice@protolabs.de oder +49 (0) 6261 6436 947

Wenn Ihr Merkmal verdeckt/farbig überzogen ist, wird es nicht gefräst.

Fräserradius:  
 = R 0.118 in / R 3.0 mm  = R 0.031 in / R 0.8 mm

Dünne Bereiche

In dieser Ansicht sind alle dünnen Bereiche gekennzeichnet, die in Ihrem Modell festgestellt wurden. Dünne Bereiche können eventuell dünner als konzipiert gefräst werden und können abbrechen, ausbrechen und sich verbiegen oder verformen.

Es wurden keine dünnen Bereiche gefunden.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter customerservice@protolabs.de oder +49 (0) 6261 6436 947

Gewindefestlegung

Wir können die Bohrungen in Ihrem Teil mit Gewinde versehen. Nähere Einzelheiten finden Sie auf unserer Seite "Gewindebohrungen". Für jede Bohrung aus der Dropdown-Liste einen Gewindetyp (oder auch 'kein' Gewinde) auswählen. Über das Schnellzuordnungsmenü können Sie allen Bohrungen, die mit Gewinde versehen werden sollen, die gleiche Gewindefestlegung (oder kein Gewinde) zuordnen. Die Gewindefestlegung wird in Ihrer Auftragsbestätigung angezeigt und sollte auf ihre Richtigkeit geprüft werden.

Name	Gewinde
Bohrung 1	METRIC M2 x 0.4
Bohrung 2	METRIC M2 x 0.4

Bohrung 3	METRIC M2 x 0.4
Bohrung 4	METRIC M2 x 0.4
Bohrung 5	METRIC M2 x 0.4
Bohrung 6	METRIC M2 x 0.4
Bohrung 7	METRIC M2 x 0.4
Bohrung 8	METRIC M2 x 0.4
Bohrung 9	METRIC M2 x 0.4
Bohrung 10	METRIC M2 x 0.4
Bohrung 11	METRIC M2 x 0.4
Bohrung 12	METRIC M2 x 0.4
Bohrung 13	keine

Nachbearbeitungen werden zu diesem Zeitpunkt nicht unterstützt.

Ursprüngliches Teil

**Diese Ansicht zeigt Ihr Teilmodell, wie wir es erhalten haben.**

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter customerservice@protolabs.de oder +49 (0) 6261 6436 947

### 3 Zusammenfassung

#### Auftragspreis

##### Ausgewählte Spezifikationen

Menge:	1	1 Teil(e) zu € 388,00 p. Stück	€ 388,00
Produktionszeit:	Versand der Teile in 3 Werktagen (Standardpreis)		
Werkstoff:	Baustahl - Mild Steel - silberfarben (S275)		
Fertigungsmethode	Fräsmaschine		

**⚠ Sie können erst aus diesem Angebot bestellen, wenn Sie auf die Registerkarte "Gewinazuordnung" in der Anzeige oben geklickt haben.**

[Neues Modell hochladen](#)

**Gesamtsumme EUR: € 388,00**

#### Hinweise

- Der Kunde ist dafür verantwortlich, dass die Eigenschaften und das Verhalten des gewählten Materials den Anforderungen seiner Anwendung entspricht.
- Toleranzen von +/- 0,1mm sind zu erwarten und werden in der Regel eingehalten.
- Die geschätzte Herstellungszeit ist der bestmögliche Schätzwert, der für das Teil am Ende des Angebots vorliegt. Die tatsächliche Herstellungszeit hängt von der Komplexität der Teile, der Anzahl an unterschiedlichen Teilen, der Menge, der Materialverfügbarkeit, der Auslastung zum Zeitpunkt der Beauftragung und anderen Faktoren ab. Wir werden uns bemühen, innerhalb der geschätzten Herstellungszeit oder so zeitnah wie möglich zu liefern; dennoch besteht keine Gewähr, dass die geschätzten Herstellungszeit eingehalten werden.
- Sofern nicht anders gewünscht, werden die Teile am nächsten Werktag mit UPS geliefert. Die Lieferkosten sind im Voraus zu zahlen und werden dem Rechnungsbetrag hinzugerechnet.

#### Allgemeine Geschäftsbedingungen – ProtoQuote interaktives Angebot

##### Allgemeine Verkaufs- und Lieferbedingungen der Proto Labs GmbH

#### § 1 Anwendbarkeit der Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen

Die Proto Labs GmbH (nachfolgend: „Proto Labs“) fertigt für ihre Kunden mit Hilfe innovativer 3D-Druck-, CNC-Bearbeitungs- und Spritzguss-Techniken anhand eines vom Kunden übermittelten 3D CAD-Modells individuelle, kundenspezifische Prototypen und Produktionsteile in kleinen bis mittelgroßen Serien (nachfolgend: „Produkte“) an.

Diese Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen finden auf alle Verträge Anwendung, die Proto Labs mit ihren Kunden über die Herstellung und Lieferung der Produkte schließt. Sie gelten auch für alle zukünftigen Lieferungen, Leistungen oder Angebote an den Kunden, selbst wenn sie nicht nochmals gesondert vereinbart werden. Proto Labs erkennt entgegenstehende oder abweichende Geschäftsbedingungen des Kunden nicht an, es sei denn, Proto Labs hat ihre Geltung ausdrücklich schriftlich vereinbart.

Diese Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen gelten auch für den Fall, dass Proto Labs in Kenntnis entgegenstehender oder abweichender Bedingungen des Kunden vorbehaltlos eine Bestellung annimmt oder eine Lieferung ausführen sollte.

#### § 2 Vertragsschluss und Gegenstand der Lieferung

Alle Angebote von Proto Labs sind freibleibend und unverbindlich, soweit sie nicht ausdrücklich als verbindlich gekennzeichnet sind oder eine bestimmte Annahmefrist enthalten. Ein verbindlicher Vertrag kommt erst durch eine Auftragsbestätigung von Proto Labs zustande. Dabei ist der Kunde an seine Bestellung für einen Zeitraum von 30 Tagen gebunden.

Für den Umfang der Lieferung ist die Auftragsbestätigung von Proto Labs maßgebend.

Der Kunde ist alleine verantwortlich für die Erstellung des 3D CAD Modells; die hierfür notwendige Software wird nicht von Proto Labs zur Verfügung gestellt.

Konstruktions- und Formänderungen des Produkts bleiben vorbehalten, sofern diese nicht die mit dem Kunden verbindlich vereinbarte

## 7.5.5 Proto Labs – Zylinder (Teil 9)

15.7.2019

Gmail - CNC-Bearbeitung – Angebot 411464: Zhang Peng Du



Zhang Peng Du [REDACTED]

### CNC-Bearbeitung – Angebot 411464: Zhang Peng Du

1 Nachricht

Matthias Eberl, Proto Labs <Matthias.Eberl@protolabs.de>

12. Juli 2019 um 11:03

An: [REDACTED]

Sehr geehrte/r Zhang Peng Du:

vielen Dank für die Zusendung Ihres Teils zur Angebotserstellung.

Aufgrund der geringen Wandstärke ist dieses Teil leider nicht mit unserem Firstcut –Fertigungsprozess kompatibel. Falls die Wandstärken auf mindestens 1,016 mm erhöht werden können, senden Sie uns bitte eine überarbeitete 3D-Datei zu. Wir werden dann so schnell wie möglich ein Angebot für Sie erstellen.

Bei Fragen stehe ich Ihnen gerne zur Verfügung.

Zylinder  
Datei: Zylinder(4).stp

Firstcut

Matthias Eberl  
Account Manager

+49 (0) 89 905002 51 : Direct  
+49 (0) 89 905002 0 : Phone  
+49 (0) 89 905002 5292 : Fax

[www.protolabs.co.uk](http://www.protolabs.co.uk)

## 7.5.6 Proto Labs – Kolben mit Pleuel (Teil 10)



### ProtoQuote®

#### Angebot für CNC-Bearbeitung

Erstellt für: **Zhang Peng Du**  
 Angebotsnummer: **411397**  
 Angebot vom: **12-Jul-2019**  
 Bezeichnung des Teils: **Kolben\_mit\_Pleuel**  
 Abmessungen: **39.5 mm x 10 mm x 10 mm**



Wir danken Ihnen für die Gelegenheit, Ihnen ein Angebot für Ihre Teile erstellen zu dürfen. Wir freuen uns darauf, mit Ihnen an diesem Projekt zu arbeiten.

Bei Fragen stehen wir Ihnen unter +49 (0) 6261 6436 947 gerne zur Verfügung.

#### 1 Spezifikationen bestätigen oder ändern und Neuberechnung

Material:	<input type="text" value="Baustahl - Mild Steel - silberfarben (S275)"/>
Fertigungsmethode:	<input type="radio"/> Fräsmaschine <input checked="" type="radio"/> Drehmaschine
Menge:	<input type="text" value="2"/> 2 Teil(e) zu € 163,73 p. Stück € 327,46
Oberfläche:	<input type="text" value="Gegratete Kanten (Werkzeugspuren si"/>
Produktionszeit:	<input type="text" value="Versand der Teile in 3 Werktagen (Standardpreis)"/>

**Sie benötigen Ihre Teile bis 17 Juli?**  
 Wählen Sie eine Herstellungszeit von same Tagen aus und schließen Sie die Bestellung durch Auswahl der Übernachtzustellung innerhalb von **14 Std. 35 Min.** ab.

Gesamtsumme EUR:

#### 2 Design-Analyse

Ansicht „Bearbeiteter Zustand“

Diese Ansicht zeigt Ihnen, wie Ihr fertiges Teil – einschließlich Abweichungen von Ihrem 3D-Modell – nach dem Fräsen aussehen wird. Bitte beachten Sie, dass die farblichen Indikatoren repräsentativ sind und möglicherweise nicht alle Bearbeitungsartefakte angezeigt werden können.

Farbige Bereiche zeigen an, wo Material am Teil verbleibt. Die Farben unter der Ansicht zeigen jeweils den Fräsradius an, der diese Bereiche am ehesten erreicht. ■ Schwarze Flächen verweisen auf Bereiche die nicht vollständig gefräst werden können und dadurch Material verbleibt. Diese Features werden nicht abgebildet.

Der Einsatz des Transparenz-Schiebereglers vereinfacht die Suche nach farbigen Bereichen, die in unserem Herstellungsverfahren nicht bearbeitet werden. .

Bitte zoomen und drehen Sie das Bild, um alle farbliche Indikatoren zu überprüfen, da sie unter Umständen sehr klein sein können.

Prüfen Sie die Registerkarten „Dünne Bereiche“ und „Gewindefestlegung“.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter customerservice@protolabs.de oder +49 (0) 6261 6436 947

Wenn Ihr Merkmal verdeckt/farbig überzogen ist, wird es nicht gefräst.

Fräsradius:  
 = R 0.059 in / R 1.5 mm  = R 0.030 in / R 0.75 mm

Dünne Bereiche

In dieser Ansicht sind alle dünnen Bereiche gekennzeichnet, die in Ihrem Modell festgestellt wurden. Dünne Bereiche können eventuell dünner als konzipiert gefräst werden und können abbrechen, ausbrechen und sich verbiegen oder verformen.

Es wurden keine dünnen Bereiche gefunden.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter customerservice@protolabs.de oder +49 (0) 6261 6436 947

Gewindefestlegung

Wir können die Bohrungen in Ihrem Teil mit Gewinde versehen. Nähere Einzelheiten finden Sie auf unserer Seite "Gewindebohrungen". Für jede Bohrung aus der Dropdown-Liste einen Gewindetyp (oder auch 'kein' Gewinde) auswählen. Über das Schnellzuordnungs-Menü können Sie allen Bohrungen, die mit Gewinde versehen werden sollen, die gleiche Gewindegruppe (oder kein Gewinde) zuordnen. Die Gewindefestlegung wird in Ihrer Auftragsbestätigung angezeigt und sollte auf ihre Richtigkeit geprüft werden.

Name	Gewinde
Bohrung 1	keine

Bohrung 16	keine
------------	-------

Nachbearbeitungen werden zu diesem Zeitpunkt nicht unterstützt.

Ursprüngliches Teil

**Diese Ansicht zeigt Ihr Teilmodell, wie wir es erhalten haben.**

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter customerservice@protolabs.de oder +49 (0) 6261 6436 947

### 3 Zusammenfassung

Auftragspreis			
Ausgewählte Spezifikationen			
Menge:	2	2 Teil(e) zu € 163,73 p. Stück	€ 327,46
Produktionszeit:	Versand der Teile in 3 Werktagen (Standardpreis)		
Werkstoff:	Baustahl - Mild Steel - silberfarben (S275)		
Fertigungsmethode	Drehmaschine		

**⚠ Sie können erst aus diesem Angebot bestellen, wenn Sie auf die Registerkarte "Gewinazuordnung" in der Anzeige oben geklickt haben.**

[Neues Modell hochladen](#)

**Gesamtsumme EUR:** € 327,46

#### Hinweise

- Der Kunde ist dafür verantwortlich, dass die Eigenschaften und das Verhalten des gewählten Materials den Anforderungen seiner Anwendung entspricht.
- Toleranzen von +/- 0,1mm sind zu erwarten und werden in der Regel eingehalten.
- Die geschätzte Herstellungszeit ist der bestmögliche Schätzwert, der für das Teil am Ende des Angebots vorliegt. Die tatsächliche Herstellungszeit hängt von der Komplexität der Teile, der Anzahl an unterschiedlichen Teilen, der Menge, der Materialverfügbarkeit, der Auslastung zum Zeitpunkt der Beauftragung und anderen Faktoren ab. Wir werden uns bemühen, innerhalb der geschätzten Herstellungszeit oder so zeitnah wie möglich zu liefern; dennoch besteht keine Gewähr, dass die geschätzten Herstellungszeit eingehalten werden.
- Sofern nicht anders gewünscht, werden die Teile am nächsten Werktag mit UPS geliefert. Die Lieferkosten sind im Voraus zu zahlen und werden dem Rechnungsbetrag hinzugerechnet.

#### Allgemeine Geschäftsbedingungen – ProtoQuote interaktives Angebot

Allgemeine Verkaufs- und Lieferbedingungen der Proto Labs GmbH

##### § 1 Anwendbarkeit der Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen

Die Proto Labs GmbH (nachfolgend: „Proto Labs“) fertigt für ihre Kunden mit Hilfe innovativer 3D-Druck-, CNC-Bearbeitungs- und Spritzguss-Techniken anhand eines vom Kunden übermittelten 3D CAD-Modells individuelle, kundenspezifische Prototypen und Produktionsteile in kleinen bis mittelgroßen Serien (nachfolgend: „Produkte“) an.

Diese Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen finden auf alle Verträge Anwendung, die Proto Labs mit ihren Kunden über die Herstellung und Lieferung der Produkte schließt. Sie gelten auch für alle zukünftigen Lieferungen, Leistungen oder Angebote an den Kunden, selbst wenn sie nicht nochmals gesondert vereinbart werden. Proto Labs erkennt entgegenstehende oder abweichende Geschäftsbedingungen des Kunden nicht an, es sei denn, Proto Labs hat ihre Geltung ausdrücklich schriftlich vereinbart.

Diese Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen gelten auch für den Fall, dass Proto Labs in Kenntnis entgegenstehender oder abweichender Bedingungen des Kunden vorbehaltlos eine Bestellung annimmt oder eine Lieferung ausführen sollte.

##### § 2 Vertragsschluss und Gegenstand der Lieferung

Alle Angebote von Proto Labs sind freibleibend und unverbindlich, soweit sie nicht ausdrücklich als verbindlich gekennzeichnet sind oder eine bestimmte Annahmefrist enthalten. Ein verbindlicher Vertrag kommt erst durch eine Auftragsbestätigung von Proto Labs zustande. Dabei ist der Kunde an seine Bestellung für einen Zeitraum von 30 Tagen gebunden.

Für den Umfang der Lieferung ist die Auftragsbestätigung von Proto Labs maßgebend.

Der Kunde ist alleine verantwortlich für die Erstellung des 3D CAD Modells; die hierfür notwendige Software wird nicht von Proto Labs zur Verfügung gestellt.

Konstruktions- und Formänderungen des Produkts bleiben vorbehalten, sofern diese nicht die mit dem Kunden verbindlich vereinbarte Sollbeschaffenheit des Produkts betreffen und die Änderungen für den Kunden zumutbar sind.

Soweit mit dem Kunden die Sollbeschaffenheit des Produkts verbindlich vereinbart wurde, bleiben Änderungen durch Proto Labs zulässig, soweit sie aufgrund zwingender rechtlicher Vorschriften erfolgen und dem Kunden zumutbar sind. Im Falle der Unzumutbarkeit steht dem Kunden ein Recht zum Rücktritt vom Vertrag zu. Weitergehende Ansprüche sind ausgeschlossen.

##### § 3 Kein gesetzliches Widerrufsrecht

Proto Labs fertigt die von dem Kunden bestellten Produkte individuell nach dessen Wünschen und Vorgaben. Ein gesetzliches Widerrufsrecht für Verbraucher im Sinne des § 13 BGB besteht daher nicht.

##### § 4 Preise; Zahlungsbedingungen

Die zwischen Proto Labs und dem Kunden vereinbarten Preise gelten nur für den in der jeweiligen Auftragsbestätigung aufgeführten Leistungs- und Lieferumfang. Etwaige Mehr- oder Sonderleistungen werden gesondert berechnet.

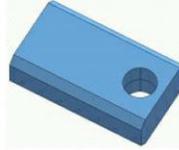
## 7.5.7 Proto Labs – Riemenspanner Fundament (Teil 14)



### ProtoQuote®

#### Angebot für CNC-Bearbeitung

Erstellt für: **Zhang Peng Du**  
 Angebotsnummer: **411463**  
 Angebot vom: **12-Jul-2019**  
 Bezeichnung des Teils: **Riemenspanner\_Fundament**  
 Abmessungen: **20 mm x 11 mm x 35 mm**



Wir danken Ihnen für die Gelegenheit, Ihnen ein Angebot für Ihre Teile erstellen zu dürfen. Wir freuen uns darauf, mit Ihnen an diesem Projekt zu arbeiten.

Bei Fragen stehen wir Ihnen unter +49 (0) 6261 6436 947 gerne zur Verfügung.

#### 1 Spezifikationen bestätigen oder ändern und Neuberechnung

Material:	<input type="button" value="i"/> Baustahl - Mild Steel - silberfarben (S275)
Fertigungsmethode:	<input checked="" type="radio"/> Fräsmaschine <input type="radio"/> Drehmaschine
Menge:	<input type="text" value="1"/> 1 Teil(e) zu € 313,83 p. Stück € 313,83
Oberfläche:	<input type="text" value="Gegratete Kanten und leicht perigestraf"/>
Produktionszeit:	<input type="button" value="i"/> Versand der Teile in 3 Werktagen (Standardpreis)

**Sie benötigen Ihre Teile bis 18 Juli?**  
 Wählen Sie eine Herstellungszeit von 1 Tagen aus und schließen Sie die Bestellung durch Auswahl der Übernachtzustellung innerhalb von 17 Std. 51 Min. ab.

Gesamtsumme EUR:

#### 2 Design-Analyse

Ansicht „Bearbeiteter Zustand“

Diese Ansicht zeigt Ihnen, wie Ihr fertiges Teil - einschließlich Abweichungen von Ihrem 3D-Modell - nach dem Fräsen aussehen wird. Bitte beachten Sie, dass die farblichen Indikatoren repräsentativ sind und möglicherweise nicht alle Bearbeitungsartefakte angezeigt werden können.

Farbige Bereiche zeigen an, wo Material am Teil verbleibt. Die Farben unter der Ansicht zeigen jeweils den Fräsradius an, der diese Bereiche am ehesten erreicht. ■ Schwarze Flächen verweisen auf Bereiche die nicht vollständig gefräst werden können und dadurch Material verbleibt. Diese Features werden nicht abgebildet.

Der Einsatz des Transparenz-Schiebereglers vereinfacht die Suche nach farbigen Bereichen, die in unserem Herstellungsverfahren nicht bearbeitet werden.

Bitte zoomen und drehen Sie das Bild, um alle farbliche Indikatoren zu überprüfen, da sie unter Umständen sehr klein sein können.

Prüfen Sie die Registerkarten „Dünne Bereiche“ und „Gewindefestlegung“.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter customerservice@protolabs.de oder +49 (0) 6261 6436 947

Wenn Ihr Merkmal verdeckt/farbig überzogen ist, wird es nicht gefräst.

Fräserradius:  
 = R 0.031 in / R 0.8 mm

Dünne Bereiche

In dieser Ansicht sind alle dünnen Bereiche gekennzeichnet, die in Ihrem Modell festgestellt wurden. Dünne Bereiche können eventuell dünner als konzipiert gefräst werden und können abbrechen, ausbrechen und sich verbiegen oder verformen.

Es wurden keine dünnen Bereiche gefunden.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter customerservice@protolabs.de oder +49 (0) 6261 6436 947

Gewindefestlegung

Wir können die Bohrungen in Ihrem Teil mit Gewinde versehen. Nähere Einzelheiten finden Sie auf unserer Seite "Gewindebohrungen". Für jede Bohrung aus der Dropdown-Liste einen Gewindetyp (oder auch 'kein' Gewinde) auswählen. Über das Schnellzuordnungsmenü können Sie allen Bohrungen, die mit Gewinde versehen werden sollen, die gleiche Gewindefestlegung (oder kein Gewinde) zuordnen. Die Gewindefestlegung wird in Ihrer Auftragsbestätigung angezeigt und sollte auf ihre Richtigkeit geprüft werden.

Name	Gewinde
Bohrung 1	METRIC M2 x 0.4
Bohrung 2	METRIC M2 x 0.4

Bohrung 3 | keine

Nachbearbeitungen werden zu diesem Zeitpunkt nicht unterstützt.

Ursprüngliches Teil

**Diese Ansicht zeigt Ihr Teilmodell, wie wir es erhalten haben.**

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter customerservice@protolabs.de oder +49 (0) 6261 6436 947

**3 Zusammenfassung****Auftragspreis****Ausgewählte Spezifikationen**

Menge:	1	1 Teil(e) zu € 313,83 p. Stück	€ 313,83
Produktionszeit:	Versand der Teile in 3 Werktagen (Standardpreis)		
Werkstoff:	Baustahl - Mild Steel - silberfarben (S275)		
Fertigungsmethode	Fräsmaschine		

**⚠ Sie können erst aus diesem Angebot bestellen, wenn Sie auf die Registerkarte "Gewinazuordnung" in der Anzeige oben geklickt haben.**

[Neues Modell hochladen](#)**Gesamtsumme EUR: € 313,83****Hinweise**

- Der Kunde ist dafür verantwortlich, dass die Eigenschaften und das Verhalten des gewählten Materials den Anforderungen seiner Anwendung entspricht.
- Toleranzen von +/- 0,1mm sind zu erwarten und werden in der Regel eingehalten.
- Die geschätzte Herstellungszeit ist der bestmögliche Schätzwert, der für das Teil am Ende des Angebots vorliegt. Die tatsächliche Herstellungszeit hängt von der Komplexität der Teile, der Anzahl an unterschiedlichen Teilen, der Menge, der Materialverfügbarkeit, der Auslastung zum Zeitpunkt der Beauftragung und anderen Faktoren ab. Wir werden uns bemühen, innerhalb der geschätzten Herstellungszeit oder so zeitnah wie möglich zu liefern; dennoch besteht keine Gewähr, dass die geschätzten Herstellungszeit eingehalten werden.
- Sofern nicht anders gewünscht, werden die Teile am nächsten Werktag mit UPS geliefert. Die Lieferkosten sind im Voraus zu zahlen und werden dem Rechnungsbetrag hinzugerechnet.

**Allgemeine Geschäftsbedingungen – ProtoQuote interaktives Angebot****Allgemeine Verkaufs- und Lieferbedingungen der Proto Labs GmbH****§ 1 Anwendbarkeit der Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen**

Die Proto Labs GmbH (nachfolgend: „Proto Labs“) fertigt für ihre Kunden mit Hilfe innovativer 3D-Druck-, CNC-Bearbeitungs- und Spritzguss-Techniken anhand eines vom Kunden übermittelten 3D CAD-Modells individuelle, kundenspezifische Prototypen und Produktionsteile in kleinen bis mittelgroßen Serien (nachfolgend: „Produkte“) an.

Diese Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen finden auf alle Verträge Anwendung, die Proto Labs mit ihren Kunden über die Herstellung und Lieferung der Produkte schließt. Sie gelten auch für alle zukünftigen Lieferungen, Leistungen oder Angebote an den Kunden, selbst wenn sie nicht nochmals gesondert vereinbart werden. Proto Labs erkennt entgegenstehende oder abweichende Geschäftsbedingungen des Kunden nicht an, es sei denn, Proto Labs hat ihre Geltung ausdrücklich schriftlich vereinbart.

Diese Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen gelten auch für den Fall, dass Proto Labs in Kenntnis entgegenstehender oder abweichender Bedingungen des Kunden vorbehaltlos eine Bestellung annimmt oder eine Lieferung ausführen sollte.

**§ 2 Vertragsschluss und Gegenstand der Lieferung**

Alle Angebote von Proto Labs sind freibleibend und unverbindlich, soweit sie nicht ausdrücklich als verbindlich gekennzeichnet sind oder eine bestimmte Annahmefrist enthalten. Ein verbindlicher Vertrag kommt erst durch eine Auftragsbestätigung von Proto Labs zustande. Dabei ist der Kunde an seine Bestellung für einen Zeitraum von 30 Tagen gebunden.

Für den Umfang der Lieferung ist die Auftragsbestätigung von Proto Labs maßgebend.

Der Kunde ist alleine verantwortlich für die Erstellung des 3D CAD Modells; die hierfür notwendige Software wird nicht von Proto Labs zur Verfügung gestellt.

Konstruktions- und Formänderungen des Produkts bleiben vorbehalten, sofern diese nicht die mit dem Kunden verbindlich vereinbarte Sollbeschaffenheit des Produkts betreffen und die Änderungen für den Kunden zumutbar sind.

Soweit mit dem Kunden die Sollbeschaffenheit des Produkts verbindlich vereinbart wurde, bleiben Änderungen durch Proto Labs zulässig, soweit sie aufgrund zwingender rechtlicher Vorschriften erfolgen und dem Kunden zumutbar sind. Im Falle der Unzumutbarkeit steht dem Kunden ein Recht zum Rücktritt vom Vertrag zu. Weitergehende Ansprüche sind ausgeschlossen.

**§ 3 Kein gesetzliches Widerrufsrecht**

Proto Labs fertigt die von dem Kunden bestellten Produkte individuell nach dessen Wünschen und Vorgaben. Ein gesetzliches Widerrufsrecht für Verbraucher im Sinne des § 13 BGB besteht daher nicht.

**§ 4 Preise; Zahlungsbedingungen**

Die zwischen Proto Labs und dem Kunden vereinbarten Preise gelten nur für den in der jeweiligen Auftragsbestätigung aufgeführten Leistungs- und Lieferumfang. Etwaige Mehr- oder Sonderleistungen werden gesondert berechnet.

## 7.5.8 Proto Labs – Riemenspanner Tragarm (Teil 15)



### ProtoQuote®

#### Angebot für CNC-Bearbeitung

Erstellt für: **Zhang Peng Du**  
 Angebotsnummer: **411662**  
 Angebot vom: **14-Jul-2019**  
 Bezeichnung des Teils: **Riemenspanner\_Arm (rev: 2)**  
 Abmessungen: **11 mm x 50 mm x 16 mm**



Wir danken Ihnen für die Gelegenheit, Ihnen ein Angebot für Ihre Teile erstellen zu dürfen. Wir freuen uns darauf, mit Ihnen an diesem Projekt zu arbeiten.

Bei Fragen stehen wir Ihnen unter +49 (0) 6261 6436 947 gerne zur Verfügung.

#### 1 Spezifikationen bestätigen oder ändern und Neuberechnung

Material:	<input type="button" value="i"/> Baustahl - Mild Steel - silberfarben (S275)
Fertigungsmethode:	<input checked="" type="radio"/> Fräsmaschine <input type="radio"/> Drehmaschine
Menge:	<input type="text" value="1"/> 1 Teil(e) zu € 208,53 p. Stück € 208,53
Oberfläche:	<input type="text" value="Gegratete Kanten und leicht perigestraht"/>
Produktionszeit:	<input type="button" value="i"/> Versand der Teile in 3 Werktagen (Standardpreis)

**Sie benötigen Ihre Teile bis 18 Juli?**  
 Wählen Sie eine Herstellungszeit von 1 Tagen aus und schließen Sie die Bestellung durch Auswahl der Übernachtzustellung innerhalb von 17 Std. 56 Min. ab.

**Gesamtsumme EUR:**

#### 2 Design-Analyse

Ansicht „Bearbeiteter Zustand“

Diese Ansicht zeigt Ihnen, wie Ihr fertiges Teil – einschließlich Abweichungen von Ihrem 3D-Modell – nach dem Fräsen aussehen wird. Bitte beachten Sie, dass die farblichen Indikatoren repräsentativ sind und möglicherweise nicht alle Bearbeitungsartefakte angezeigt werden können.

Farbige Bereiche zeigen an, wo Material am Teil verbleibt. Die Farben unter der Ansicht zeigen jeweils den Fräsradius an, der diese Bereiche am ehesten erreicht. ■ Schwarze Flächen verweisen auf Bereiche die nicht vollständig gefräst werden können und dadurch Material verbleibt. Diese Features werden nicht abgebildet.

Der Einsatz des Transparenz-Schiebereglers vereinfacht die Suche nach farbigen Bereichen, die in unserem Herstellungsverfahren nicht bearbeitet werden.

Bitte zoomen und drehen Sie das Bild, um alle farbliche Indikatoren zu überprüfen, da sie unter Umständen sehr klein sein können.

Prüfen Sie die Registerkarten „Dünne Bereiche“ und „Gewindeführung“.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter [customerservice@protolabs.de](mailto:customerservice@protolabs.de) oder +49 (0) 6261 6436 947

Wenn Ihr Merkmal verdeckt/farbig überzogen ist, wird es nicht gefräst.

Fräsradius:  
 = R 0.118 in / R 3.0 mm

Dünne Bereiche

In dieser Ansicht sind alle dünnen Bereiche gekennzeichnet, die in Ihrem Modell festgestellt wurden. Dünne Bereiche können eventuell dünner als konzipiert gefräst werden und können abbrechen, ausbrechen und sich verbiegen oder verformen.

Es wurden keine dünnen Bereiche gefunden.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter [customerservice@protolabs.de](mailto:customerservice@protolabs.de) oder +49 (0) 6261 6436 947

Gewindeführung

Wir konnten keine Gewindemerkmale finden. Weitere Informationen finden Sie unter [Gewindebohrungen](#).

Nachbearbeitungen werden zu diesem Zeitpunkt nicht unterstützt.

Ursprüngliches Teil

Diese Ansicht zeigt Ihr Teilmodell, wie wir es erhalten haben.

Nachbearbeitungen werden derzeit nicht unterstützt.

Falls Sie technische Fragen zu diesem Angebot haben, wenden Sie sich bitte an unseren technischen Kundendienst unter customerservice@protolabs.de oder +49 (0) 6261 6436 947

### 3 Zusammenfassung

#### Auftragspreis

##### Ausgewählte Spezifikationen

Menge:	1	1 Teil(e) zu € 208,53 p. Stück	€ 208,53
Produktionszeit:	Versand der Teile in 3 Werktagen (Standardpreis)		
Werkstoff:	Baustahl - Mild Steel - silberfarben (S275)		
Fertigungsmethode	Fräsmaschine		

**⚠ Sie können erst aus diesem Angebot bestellen, wenn Sie auf die Registerkarte "Gewinazuordnung" in der Anzeige oben geklickt haben.**

[Neues Modell hochladen](#)

**Gesamtsumme EUR:**

#### Hinweise

- Der Kunde ist dafür verantwortlich, dass die Eigenschaften und das Verhalten des gewählten Materials den Anforderungen seiner Anwendung entspricht.
- Toleranzen von +/- 0,1mm sind zu erwarten und werden in der Regel eingehalten.
- Die geschätzte Herstellungszeit ist der bestmögliche Schätzwert, der für das Teil am Ende des Angebots vorliegt. Die tatsächliche Herstellungszeit hängt von der Komplexität der Teile, der Anzahl an unterschiedlichen Teilen, der Menge, der Materialverfügbarkeit, der Auslastung zum Zeitpunkt der Beauftragung und anderen Faktoren ab. Wir werden uns bemühen, innerhalb der geschätzten Herstellungszeit oder so zeitnah wie möglich zu liefern; dennoch besteht keine Gewähr, dass die geschätzten Herstellungszeit eingehalten werden.
- Sofern nicht anders gewünscht, werden die Teile am nächsten Werktag mit UPS geliefert. Die Lieferkosten sind im Voraus zu zahlen und werden dem Rechnungsbetrag hinzugerechnet.

#### Allgemeine Geschäftsbedingungen – ProtoQuote interaktives Angebot

##### Allgemeine Verkaufs- und Lieferbedingungen der Proto Labs GmbH

#### § 1 Anwendbarkeit der Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen

Die Proto Labs GmbH (nachfolgend: „Proto Labs“) fertigt für ihre Kunden mit Hilfe innovativer 3D-Druck-, CNC-Bearbeitungs- und Spritzguss-Techniken anhand eines vom Kunden übermittelten 3D CAD-Modells individuelle, kundenspezifische Prototypen und Produktionsteile in kleinen bis mittelgroßen Serien (nachfolgend: „Produkte“) an.

Diese Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen finden auf alle Verträge Anwendung, die Proto Labs mit ihren Kunden über die Herstellung und Lieferung der Produkte schließt. Sie gelten auch für alle zukünftigen Lieferungen, Leistungen oder Angebote an den Kunden, selbst wenn sie nicht nochmals gesondert vereinbart werden. Proto Labs erkennt entgegenstehende oder abweichende Geschäftsbedingungen des Kunden nicht an, es sei denn, Proto Labs hat ihre Geltung ausdrücklich schriftlich vereinbart.

Diese Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen gelten auch für den Fall, dass Proto Labs in Kenntnis entgegenstehender oder abweichender Bedingungen des Kunden vorbehaltlos eine Bestellung annimmt oder eine Lieferung ausführen sollte.

#### § 2 Vertragsschluss und Gegenstand der Lieferung

Alle Angebote von Proto Labs sind freibleibend und unverbindlich, soweit sie nicht ausdrücklich als verbindlich gekennzeichnet sind oder eine bestimmte Annahmefrist enthalten. Ein verbindlicher Vertrag kommt erst durch eine Auftragsbestätigung von Proto Labs zustande. Dabei ist der Kunde an seine Bestellung für einen Zeitraum von 30 Tagen gebunden.

Für den Umfang der Lieferung ist die Auftragsbestätigung von Proto Labs maßgebend.

Der Kunde ist alleine verantwortlich für die Erstellung des 3D CAD Modells; die hierfür notwendige Software wird nicht von Proto Labs zur Verfügung gestellt.

Konstruktions- und Formänderungen des Produkts bleiben vorbehalten, sofern diese nicht die mit dem Kunden verbindlich vereinbarte Sollbeschaffenheit des Produkts betreffen und die Änderungen für den Kunden zumutbar sind.

Soweit mit dem Kunden die Sollbeschaffenheit des Produkts verbindlich vereinbart wurde, bleiben Änderungen durch Proto Labs zulässig, soweit sie aufgrund zwingender rechtlicher Vorschriften erfolgen und dem Kunden zumutbar sind. Im Falle der Unzumutbarkeit steht dem Kunden ein Recht zum Rücktritt vom Vertrag zu. Weitergehende Ansprüche sind ausgeschlossen.

#### § 3 Kein gesetzliches Widerrufsrecht

Proto Labs fertigt die von dem Kunden bestellten Produkte individuell nach dessen Wünschen und Vorgaben. Ein gesetzliches Widerrufsrecht für Verbraucher im Sinne des § 13 BGB besteht daher nicht.

#### § 4 Preise; Zahlungsbedingungen

Die zwischen Proto Labs und dem Kunden vereinbarten Preise gelten nur für den in der jeweiligen Auftragsbestätigung aufgeführten Leistungs- und Lieferumfang. Etwaige Mehr- oder Sonderleistungen werden gesondert berechnet.

Soweit nicht ausdrücklich anders vereinbart, verstehen sich die Preise für die Produkte in Euro ab Werk ohne gesetzliche Mehrwertsteuer, Verpackung und Transport. In diesem Fall werden diese Kosten wie auch etwaige Zölle, Steuern, Gebühren oder ähnliche Abgaben, soweit Proto Labs diese zu tragen hat, gesondert berechnet und in der Rechnung gesondert ausgewiesen.

Soweit nicht ausdrücklich anders vereinbart, erfolgen Zahlungen des Kunden per Kreditkarte oder Vorkasse. Ein längeres Zahlungsziel kann – soweit eine positiv ausgefallene Bonitätsprüfung zugrunde gelegt werden kann - mit 30 (dreißig) Tagen netto gewährt werden. Für die Rechtzeitigkeit der Zahlung ist der Eingang der Zahlung bei Proto Labs maßgebend.

Leistet der Kunde bei Fälligkeit nicht, und ist der Kunde ein Kaufmann im Sinne des HGB, so sind die ausstehenden Beträge ab dem Tag der Fälligkeit

## 7.5.9 1zu1 – alle Teile außer Fundament und Riemenspanner Tragarm (alle Teile außer Teil 1 und Teil 15)



1zu1 Prototypen GmbH & Co KG, Färbergasse 15, A-6850 Dornbirn  
T +43 (0)5572 52946-0, info@1zu1.eu, www.1zu1.eu

DU ZHANG PENG  
z.Hd. Zhang Peng Du  
Triester Straße 328/3  
1230 Wien

**Angebot**  
**194312-4**  
Datum: 12.07.2019  
Projekt: Stirlingmotor (MF)  
Anfrage-Nr.: Herr Du (Online)  
Seite 1/5

+

Sehr geehrter Herr Du,

wir danken Ihnen recht herzlich für Ihre Anfrage und bieten das Fertigen der gewünschten Teile gerne an:

Projekt bestehend aus folgenden Teilen:

### 1. Fundament.stp

Ihr Verwendungszweck: **Prototyp**



Leistung	Bemerkungen	Einzelpreis	Stück	Betrag
Mechanische Fertigung	Programmierung Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	130,00	1	130,00
	Rüsten Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	180,00	1	180,00
	Einzelteil 1.0038 (S235JR) Bauteil mechanisch gefertigt laut 3D-Daten. Allgemeine Fertigungstoleranz laut DIN ISO 2768 mK. Beachten Sie bitte. Aufgrund der Geometrie, muss mit Verzug gerechnet werden.	290,00	1	290,00

**(Positionssumme EURO 600,00)**

### 2. Kolben\_mit\_Pleuel.stp

Ihr Verwendungszweck: **Prototyp**



Leistung	Bemerkungen	Einzelpreis	Stück	Betrag
Mechanische Fertigung	Programmierung Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	70,00	1	70,00
	Rüsten Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	80,00	1	80,00
	Einzelteil 1.0038 (S235JR) Bauteil mechanisch gefertigt laut 3D-Daten.	95,00	2	190,00

UID: ATU 61939102, FN: 267627w, Landesgericht Feldkirch  
Geschäftsführer: Wolfgang Humml, Ing. Hannes Hämmerle

Hypo Vorarlberg Bank AG  
IBAN: AT37 5800 0142 7754 2014, BIC: HYPVAT2B  
Dornbirner Sparkasse Bank AG  
IBAN: AT05 2060 2000 0020 6557, BIC: DOSPAT2DXXX

1zu1 Prototypen GmbH & Co KG, Färbergasse 15, A-6850 Dornbirn  
T +43 (0)5572 52946-0, info@1zu1.eu, www.1zu1.eu

**Angebot**  
Vorgangs-Nr.: 194312-4  
Datum: 12.07.2019  
Seite 2/5

**2. Kolben\_mit\_Pleuel.stp**

Ihr Verwendungszweck: **Prototyp**

Leistung	Bemerkungen	Einzelpreis	Stück	Betrag
	Allgemeine Fertigungstoleranz laut DIN ISO 2768 mK.			

**(Positionssumme EURO 340,00)**

**3. Lagerbock\_Nocke.stp**

Ihr Verwendungszweck: **Prototyp**



Leistung	Bemerkungen	Einzelpreis	Stück	Betrag
Mechanische Fertigung	Programmierung Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	90,00	1	90,00
	Rüsten Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	80,00	1	80,00
	Einzelteil 1.0038 (S235JR) Bauteil mechanisch gefertigt laut 3D-Daten. Allgemeine Fertigungstoleranz laut DIN ISO 2768 mK. Beachten Sie bitte. Aufgrund der Geometrie, muss mit Verzug gerechnet werden.	115,00	4	460,00

**(Positionssumme EURO 630,00)**

**4. Nocke.stp**

Ihr Verwendungszweck: **Prototyp**



Leistung	Bemerkungen	Einzelpreis	Stück	Betrag
Mechanische Fertigung	Vorrichtung Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	220,00	1	220,00
	Programmierung Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	240,00	1	240,00
	Rüsten Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	80,00	1	80,00
	Einzelteil 1.0038 (S235JR) Bauteil mechanisch gefertigt laut 3D-Daten. Allgemeine Fertigungstoleranz laut DIN ISO 2768 mK.	300,00	2	600,00

**(Positionssumme EURO 1.140,00)**

UID: ATU 61939102, FN: 267627w, Landesgericht Feldkirch  
Geschäftsführer: Wolfgang Humml, Ing. Hannes Hämmerle

Hypo Vorarlberg Bank AG  
IBAN: AT37 5800 0142 7754 2014, BIC: HYPVAT2B  
Dornbirner Sparkasse Bank AG  
IBAN: AT05 2060 2000 0020 6557, BIC: DOSPAT2DXXX

1zu1 Prototypen GmbH & Co KG, Färbergasse 15, A-6850 Dornbirn  
T +43 (0)5572 52946-0, info@1zu1.eu, www.1zu1.eu

**Angebot**  
Vorgangs-Nr.: 194312-4  
Datum: 12.07.2019  
Seite 3/5

**5. Regenerator.stp**

Ihr Verwendungszweck: **Prototyp**



Leistung	Bemerkungen	Einzelpreis	Stück	Betrag
Mechanische Fertigung	Programmierung Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	90,00	1	90,00
	Rüsten Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	80,00	1	80,00
	Einzelteil 1.0038 (S235JR) Bauteil mechanisch gefertigt laut 3D-Daten. Allgemeine Fertigungstoleranz laut DIN ISO 2768 mK.	210,00	1	210,00

**(Positionssumme EURO 380,00)**

**6. Riemenspanner\_Arm.stp**

Ihr Verwendungszweck: **Prototyp**



Leistung	Bemerkungen	Einzelpreis	Stück	Betrag
Mechanische Fertigung	Programmierung Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	60,00	1	60,00
	Rüsten Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	60,00	1	60,00
	Einzelteil 1.0038 (S235JR) Bauteil mechanisch gefertigt laut 3D-Daten. Allgemeine Fertigungstoleranz laut DIN ISO 2768 mK.	85,00	1	85,00

**(Positionssumme EURO 205,00)**

**7. Riemenspanner\_Fundament.stp**

Ihr Verwendungszweck: **Prototyp**



Leistung	Bemerkungen	Einzelpreis	Stück	Betrag
Mechanische Fertigung	Programmierung Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	80,00	1	80,00
	Rüsten Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	60,00	1	60,00
	Einzelteil 1.0038 (S235JR) Bauteil mechanisch gefertigt laut 3D-Daten. Allgemeine Fertigungstoleranz laut DIN ISO 2768 mK.	115,00	1	115,00

**(Positionssumme EURO 255,00)**

UID: ATU 61939102, FN: 267627w, Landesgericht Feldkirch  
Geschäftsführer: Wolfgang Humml, Ing. Hannes Hämmerle

Hypo Vorarlberg Bank AG  
IBAN: AT37 5800 0142 7754 2014, BIC: HYPVAT2B  
Dornbirner Sparkasse Bank AG  
IBAN: AT05 2060 2000 0020 6557, BIC: DOSPAT2DXXX

## Anhang

1zu1 Prototypen GmbH & Co KG, Färbergasse 15, A-6850 Dornbirn  
T +43 (0)5572 52946-0, info@1zu1.eu, www.1zu1.eu

### Angebot

Vorgangs-Nr.: 194312-4  
Datum: 12.07.2019  
Seite 4/5

### 8. Zylinder.stp

Ihr Verwendungszweck: **Prototyp**



Leistung	Bemerkungen	Einzelpreis	Stück	Betrag
Mechanische Fertigung	Programmierung Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	80,00	1	80,00
	<b>Rüsten</b> Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	90,00	1	90,00
	Einzelteil Kupfer (Cu-ETP CW004A) Bauteil mechanisch gefertigt laut 3D-Daten. Allgemeine Fertigungstoleranz laut DIN ISO 2768 mK. Beachten Sie bitte. Aufgrund der dünnen Wandstärken, muss mit Vibrationsspuren gerechnet werden.	110,00	2	220,00

**(Positionssumme EURO 390,00)**

### Projektkosten-Übersicht:

Mechanische Fertigungen	3.940,00
Projektpreis netto in EURO	3.940,00
20 % MwSt.	788,00
<b>Projektpreis brutto in EURO</b>	<b>4.728,00</b>

**Zahlungskondition:** 100% Vorkasse

**Lieferadresse::** DU ZHANG PENG, Zhang Peng Du, Triester Straße 328/3, 1230 Wien

**Lieferkondition:** CPT / Zustellung an Lieferadresse durch DHL / DLZ 18 Arbeitstage ab Bestellung und Anlieferung freigegebener 3D-Daten.

UID: ATU 61939102, FN: 267627w, Landesgericht Feldkirch  
Geschäftsführer: Wolfgang Humml, Ing. Hannes Hämmerle

Hypo Vorarlberg Bank AG  
IBAN: AT37 5800 0142 7754 2014, BIC: HYPVAT2B  
Dornbirner Sparkasse Bank AG  
IBAN: AT05 2060 2000 0020 6557, BIC: DOSPAT2DXXX

1zu1 Prototypen GmbH & Co KG, Färbergasse 15, A-6850 Dornbirn  
T +43 (0)5572 52946-0, info@1zu1.eu, www.1zu1.eu

**Angebot**

Vorgangs-Nr.: 194312-4  
Datum: 12.07.2019  
Seite 5/5

Wir hoffen, dass unser Angebot Ihren Vorstellungen entspricht, sichern Ihnen eine einwandfreie Ausführung zu und würden uns über diesen Auftrag freuen.

Mit freundlichen Grüßen

Lina Ellensohn  
Projektleitung Prototyping  
T +43-5572-52946-272  
lina.ellensohn@1zu1.eu

1zu1-Projektverantwortung:

Raphael Madlener  
Projektleitung Prototyping  
T +43-5572-52946-246  
raphael.madlener@1zu1.eu

**Anmerkungen**

**Allgemeine Geschäftsbedingungen**

Es gelten unsere AGB's, die Sie mit dem Angebot oder der Auftragsbestätigung als separates PDF-Dokument, erhalten haben.

UID: ATU 61939102, FN: 267627w, Landesgericht Feldkirch  
Geschäftsführer: Wolfgang Humml, Ing. Hannes Hämmerle

Hypo Vorarlberg Bank AG  
IBAN: AT37 5800 0142 7754 2014, BIC: HYPVAT2B  
Dornbirner Sparkasse Bank AG  
IBAN: AT05 2060 2000 0020 6557, BIC: DOSPAT2DXXX

## 7.5.10 1zu1 – Fundament (Teil 1)



1zu1 Prototypen GmbH & Co KG, Färbergasse 15, A-6850 Dornbirn  
T +43 (0)5572 52946-0, info@1zu1.eu, www.1zu1.eu

DU ZHANG PENG  
z.Hd. Zhang Peng Du  
Triester Straße 328/3  
1230 Wien

**Angebot**  
**194312-7**

Datum: 15.07.2019  
Projekt: Stirlingmotor (MF)  
Anfrage-Nr.: online  
Seite 1/2



Sehr geehrter Herr Du,

wir danken Ihnen recht herzlich für Ihre Anfrage und bieten das Fertigen der gewünschten Teile gerne an:

Projekt bestehend aus folgenden Teilen:

**1. Fundament.stp**

Ihr Verwendungszweck: **Prototyp**



Leistung	Bemerkungen	Einzelpreis	Stück	Betrag
Mechanische Fertigung	Programmierung Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	130,00	1	130,00
	Rüsten Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	180,00	1	180,00
	Einzelteil 1.0038 (S235JR) Bauteil mechanisch gefertigt laut 3D-Daten. Allgemeine Fertigungstoleranz laut DIN ISO 2768 mK. Beachten Sie bitte. Aufgrund der Geometrie, muss mit Verzug gerechnet werden.	290,00	1	290,00

**(Positionssumme EURO 600,00)**

**Projektkosten-Übersicht:**

Mechanische Fertigungen	600,00
Projektpreis netto in EURO	600,00
20 % MwSt.	120,00
<b>Projektpreis brutto in EURO</b>	<b>720,00</b>

**Zahlungskondition:** 100% Vorkasse

UID: ATU 61939102, FN: 267627w, Landesgericht Feldkirch  
Geschäftsführer: Wolfgang Humml, Ing. Hannes Hämmerle

Hypo Vorarlberg Bank AG  
IBAN: AT37 5800 0142 7754 2014, BIC: HYPVAT2B  
Dornbirner Sparkasse Bank AG  
IBAN: AT05 2060 2000 0020 6557, BIC: DSPAT2DXXX

## Anhang

1zu1 Prototypen GmbH & Co KG, Färbergasse 15, A-6850 Dornbirn  
T +43 (0)5572 52946-0, info@1zu1.eu, www.1zu1.eu

### Angebot

Vorgangs-Nr.: 194312-7  
Datum: 15.07.2019  
Seite 2/2

**Lieferadresse::** DU ZHANG PENG, Zhang Peng Du, Triester Straße 328/3, 1230 Wien

**Lieferkondition:** CPT / Zustellung an Lieferadresse durch DHL / DLZ 15 Arbeitstage ab Bestellung und Anlieferung freigegebener 3D-Daten.

Wir hoffen, dass unser Angebot Ihren Vorstellungen entspricht, sichern Ihnen eine einwandfreie Ausführung zu und würden uns über diesen Auftrag freuen.

Mit freundlichen Grüßen

Lina Ellensohn  
Projektleitung Prototyping  
T +43-5572-52946-272  
lina.ellensohn@1zu1.eu

1zu1-Projektverantwortung:

Manuel Wessel  
Projektleitung Prototyping  
T +43-5572-52946-0  
manuel.wessel@1zu1.eu

### Anmerkungen

#### Allgemeine Geschäftsbedingungen

Es gelten unsere AGB's, die Sie mit dem Angebot oder der Auftragsbestätigung als separates PDF-Dokument, erhalten haben.

UID: ATU 61939102, FN: 267627w, Landesgericht Feldkirch  
Geschäftsführer: Wolfgang Humml, Ing. Hannes Hämmerle

Hypo Vorarlberg Bank AG  
IBAN: AT37 5800 0142 7754 2014, BIC: HYPVAT2B  
Dornbirner Sparkasse Bank AG  
IBAN: AT05 2060 2000 0020 6557, BIC: DOSPAT2DXXX

## 7.5.11 1zu1 – Riemenspanner Tragarm (Teil 15)



1zu1 Prototypen GmbH & Co KG, Färbergasse 15, A-6850 Dornbirn  
T +43 (0)5572 52946-0, info@1zu1.eu, www.1zu1.eu

DU ZHANG PENG  
z.Hd. Zhang Peng Du  
Triester Straße 328/3  
1230 Wien

**Angebot**  
**194312-8**

Datum: 15.07.2019  
Projekt: Stirlingmotor (MF)  
Anfrage-Nr.: online  
Seite 1/2

+

Sehr geehrter Herr Du,

wir danken Ihnen recht herzlich für Ihre Anfrage und bieten das Fertigen der gewünschten Teile gerne an:

Projekt bestehend aus folgenden Teilen:

**1. Riemenspanner\_Arm.stp**

Ihr Verwendungszweck: **Prototyp**



Leistung	Bemerkungen	Einzelpreis	Stück	Betrag
Mechanische Fertigung	Programmierung Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	60,00	1	60,00
	Rüsten Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	60,00	1	60,00
	Einzelteil 1.0038 (S235JR) Bauteil mechanisch gefertigt laut 3D-Daten. Allgemeine Fertigungstoleranz laut DIN ISO 2768 mK.	85,00	1	85,00

**(Positionssumme EURO 205,00)**

**2. Zylinder\_dicker.stp**

Ihr Verwendungszweck: **Prototyp**



Leistung	Bemerkungen	Einzelpreis	Stück	Betrag
Mechanische Fertigung	Programmierung Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	80,00	1	80,00
	Rüsten Arbeitsleistung keine Warenlieferung!	90,00	1	90,00
	Einzelteil Kupfer (Cu-ETP CW004A) Bauteil mechanisch gefertigt laut 3D-Daten.	110,00	2	220,00

UID: ATU 61939102, FN: 267627w, Landesgericht Feldkirch  
Geschäftsführer: Wolfgang Humml, Ing. Hannes Hämmerle

Hypo Vorarlberg Bank AG  
IBAN: AT37 5800 0142 7754 2014, BIC: HYPVAT2B  
Dornbirner Sparkasse Bank AG  
IBAN: AT05 2060 2000 0020 6557, BIC: DSPAT2DXXX

# Anhang

1zu1 Prototypen GmbH & Co KG, Färbergasse 15, A-6850 Dornbirn  
T +43 (0)5572 52946-0, info@1zu1.eu, www.1zu1.eu

**Angebot**  
Vorgangs-Nr.: 194312-8  
Datum: 15.07.2019  
Seite 2/2

## 2. Zylinder\_dicker.stp

Ihr Verwendungszweck: **Prototyp**

Leistung	Bemerkungen	Einzelpreis	Stück	Betrag
	Allgemeine Fertigungstoleranz laut DIN ISO 2768 mK.			

**(Positionssumme EURO 390,00)**

### Projektkosten-Übersicht:

Mechanische Fertigungen	595,00
Projektpreis netto in EURO	595,00
20 % MwSt.	119,00
<b>Projektpreis brutto in EURO</b>	<b>714,00</b>

**Zahlungskondition:** 100% Vorkasse

**Lieferadresse:** DU ZHANG PENG, Zhang Peng Du, Triester Straße 328/3, 1230 Wien

**Lieferkondition:** CPT / Zustellung an Lieferadresse durch DHL / DLZ 15 Arbeitstage ab Bestellung und Anlieferung freigegebener 3D-Daten.

Wir hoffen, dass unser Angebot Ihren Vorstellungen entspricht, sichern Ihnen eine einwandfreie Ausführung zu und würden uns über diesen Auftrag freuen.

Mit freundlichen Grüßen

Lina Ellensohn  
Projektleitung Prototyping  
T +43-5572-52946-272  
lina.ellensohn@1zu1.eu

1zu1-Projektverantwortung:

Manuel Wessel  
Projektleitung Prototyping  
T +43-5572-52946-0  
manuel.wessel@1zu1.eu

### Anmerkungen

#### Allgemeine Geschäftsbedingungen

Es gelten unsere AGB's, die Sie mit dem Angebot oder der Auftragsbestätigung als separates PDF-Dokument, erhalten haben.

UID: ATU 61939102, FN: 267627w, Landesgericht Feldkirch  
Geschäftsführer: Wolfgang Humml, Ing. Hannes Hämmerle

Hypo Vorarlberg Bank AG  
IBAN: AT37 5800 0142 7754 2014, BIC: HYPVAT2B  
Dornbirner Sparkasse Bank AG  
IBAN: AT05 2060 2000 0020 6557, BIC: DOSPAT2DXXX