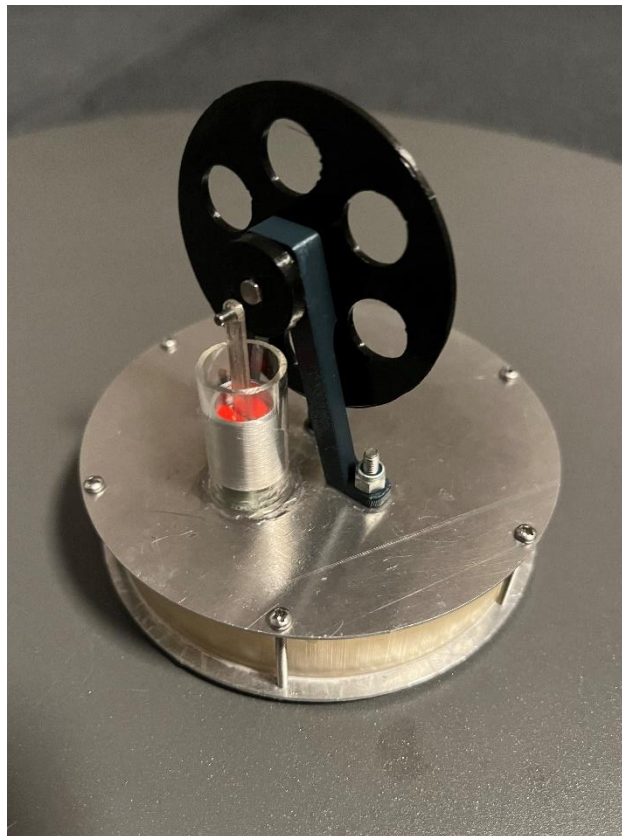


Fachgebiet Anlagentechnik
Technisches Projekt
Niedertemperatur-Stirlingmotor

WS 2022/2023



Gruppenmitglieder: Feldmann, Wilko; Mat.-Nr. 7020066
Hagen, Bjarne-Eyk; Mat.-Nr. 70020054

Betreuung: Prof. Dr.-Ing. Oliver Böcker

Inhaltsverzeichnis

1. Projektbeschreibung	1
1.1. Hinweise	1
2. Funktionsprinzip des Stirlingmotors	1
3. Umsetzung des Niedertemperatur-Stirlingmotors	1
4. Erstellung von Bauteilen mittels Rapid Prototyping (RP-Verfahren)	2
5. Verwendung von Normteilen / Kaufteilen	2
5.1. Kugellager	2
5.2. Glaszylinder	3
5.3. Verdrängerkolben	3
5.4. Zylinderstifte	3
5.5. Dichtungen	3
5.6. Sicherungselemente	3
5.7. Kleb- & Dichtmassen	4
5.8. Schmierstoffe	4
6. Änderung von Bauteilen zur Funktionalität	4
7. Manuelle Fertigung der Bauteile	4
7.1. Rundplatten	4
7.2. Verdrängerkolben	4
8. Zusammenbau	4
8.1. Vormontage	4
8.2. Endmontage	5
9. Fazit	5
10. Anhang	6

1. Projektbeschreibung

Um das Funktionsprinzip einer Wärmekraftmaschine, genauer gesagt einem Stirlingmotor, anschaulich zu erläutern ist das Ziel dieses technischen Projekts die Entwicklung und Umsetzung eines funktionsfähigen Niedertemperatur-Stirlingmotors, welcher mithilfe eines Behältnisses, beispielsweise einer Tasse, mit kochendem Wasser ($\sim 90^\circ \text{C}$) funktioniert und für einige Minuten im Einsatz ist.

1.1. Hinweise

Die Verwendung dieses Niedertemperatur-Stirlingmotors ist ausschließlich für die Verwendung mit kochendem Wasser vorgesehen. Auf keinen Fall sollte eine Kerze als Wärmequelle verwendet werden, da sich durch die niedrige Schmelztemperatur des Werkstoffs Styrodur der Verdrängerkolben plastisch verformen kann.

2. Funktionsprinzip des Stirlingmotors

Im Gegensatz zum klassischen Verbrennungsmotor-Prinzip basiert das Funktionsprinzip des Stirlingmotors auf der Verdrängung von Luft mittels eines Verdrängerkolbens. Grund hierfür ist die Temperaturdifferenz und die daraus folgende Expansion und das Zusammenziehen der Luft zwischen den beiden Planflächen im Verdrängerraum. Der Arbeitskolben wiederum nutzt diese Energie, um mechanische Antriebsenergie umzuwandeln. Durch die Übertragung der Bewegung mittels Kolbenstangen kann ein bestimmter Aktor, beispielsweise ein Rad, angetrieben werden.

3. Umsetzung des Niedertemperatur-Stirlingmotors

Als maßliche Dimensionierung des technischen Projekts gilt eine Tasse das Objekt, welche mit einem Durchmesser von $\varnothing 80 \text{ mm}$ angenommen wird. Somit ergab sich das Maß für die Rundplatten, welche der Wärmeübertragung in den Verdrängerzylinder dienen. Um die Konstruktion schmal zu halten wurde der Arbeitszylinder und die Aktor Einheit auf der Rundplatte oben platziert.

Zunächst gilt es beim Niedertemperatur-Stirlingmotor auf die besondere Berücksichtigung der Reibung, denn aufgrund nur niedriger Temperaturdifferenzen kann dies bei falscher Auswahl der Werkstoffe zur fehlenden Funktionalität führen.

Planlich wird als erstes der Bewegungsraum des Verdrängerkolbens betrachtet. Zwei Rundbleche aus dünnem Aluminiumblech dienen der Wärmeübertragung von Wärmequelle zum Bewegungsraum des Verdrängerkolbens. Verbunden werden diese Rundbleche durch möglichst wenig wärmeleitfähige Verbindungsstücke. In diesem Fall sind es schmale M2-Schrauben, welche nach einem Testversuch wenig Wärmeleitung zulassen.

Der Verdrängerkolben im Verdrängerzylinder besteht aus Styrodur. Die folgenden technischen Maße sind dem Abschnitt der Fertigung zu entnehmen. Dieser befindet sich innerhalb des Verdrängerzylinders aus einem durchscheinendem Harz, der gleichzeitig als Distanzhalter zwischen den Rundblechen dient.

Der Arbeitszylinder ist durch die \varnothing 12,5 mm-Bohrung im Rundblech oben mit dem Bewegungsraum des Verdrängerkolbens verbunden. Der Arbeitskolben, welcher aus einem Grundkörper, einer Aluminiumhülse und zwei O-Ringen als Verbindungselemente besteht, ist verbunden mit einer Kolbenstangenkombination (Pleuel), welche mit der Scheibe (Wellenaufsatz) und der Arbeitswelle im Lager des Aufbaus verbunden ist. Eine translatorische Bewegung des Arbeitskolben wird somit in eine rotatorische Bewegung der Arbeitswelle umgesetzt. Schließlich ist auf der Arbeitswelle ebenfalls ein Aktor (Schwungrad) aufgesetzt, welcher als träge Masse die Rotation erfährt.

4. Erstellung von Bauteilen mittels Rapid Prototyping (RP-Verfahren)

Der Arbeitskolben, die Befestigungsstruktur des Laufrads sowie die Verbindungspleuel sollen mittels 3D-Drucks und dem Material PLA (Polylactid) gefertigt werden. Aufgrund der erhöhten Temperatur der Rundbleche ist für den Verdrängerzylinder ein RP-Bauteil aus einem temperaturbeständigen Harz zu wählen. Hierfür werden im Vorhinein 3D-Modelle der Bauteile mittels der 3D-Konstruktionssoftware SolidWorks 2021 erstellt. Die STL-Dateien zum Nachdrucken können auf folgender Plattform heruntergeladen werden:

<https://github.com/bjarneh1/niedertemp-stirlingmotor>

- Arbeitskolben 2.stl
- Aufsatz Rundplatte oben.stl
- Buchse.stl
- HalterungWD40Lager.stl
- Pleuel.stl (2x)
- Schwungrad.stl
- Verdrängerzylinder.stl
- Wellenaufsatz.stl

5. Verwendung von Normteilen / Kaufteilen

5.1. Kugellager

Für den Niedertemperatur-Stirlingmotor werden aufgrund der minimalistischen Bauraumverhältnisse besondere Miniaturkugellager 684-C3¹. Die Besonderheit dieses Kugellagers ist die erhöhte Lagerluft (C3). Durch die offene Dichtungen ist außerdem eine Nachschmierbarkeit gegeben.

¹ [Miniaturlager - erhöhte Lagerluft 684-C3 4x9x4, 1,86 € \(kugellager-express.de\)](https://www.kugellager-express.de/)

5.2. Glaszylinder

Der Glaszylinder für die axiale Führung des Arbeitskolbens eignet sich ebenfalls hervorragend, aufgrund der geringen Reibverluste durch Glas. Hierfür wurde ein Glaszylinder bestellt² und mittels Sofortklebstoff auf dem Rundblech befestigt.

- Ø 14,5 mm Glaszylinder

5.3. Verdrängerkolben

Damit die Expansion der erwärmten Luft im Zylinder zur Verdrängung des Verdrängerkolbens ausreicht, ist ein Material mit einer geringen Dichte zu wählen. Hierfür bot sich ein Material aus Styrodur mit einer Dichte von 1050 kg/m³ an, welches manuell bearbeitet wurde.

- 100x100x10 mm Styrodur

5.4. Zylinderstifte

Folgende Zylinderstifte nach ISO 8734 wurden verwendet:

- Ø 2x4 mm
- Ø 2x7 mm (3x)
- Ø 2x34,5 mm
- Ø 4x14 mm

Der Verbau ist der Montageanleitung zu entnehmen.

5.5. Dichtungen

Die Dichtung und Haftung des Arbeitskolbens werden durch statische Dichtungen mittels O-Ringen gewährleistet. Die Abmaße des Arbeitskolbens wurden hierbei auf die Normgrößen der O-Ringe angepasst. Folgende O-Ringe aus NBR70 nach ISO 3601 wurden verwendet:

- 2x O-Ring 10x1,5 mm (Arbeitskolbenkombination)

5.6. Sicherungselemente

Folgende Schrauben & Sicherungselemente-Kombinationen wurden für den Niedertemperatur-Stirlingmotor verwendet:

- M2x28 mm (DIN 7985) + M2 Sechskantmutter (DIN 934) (6x)
- M3x7 mm (DIN 933) + M3 Sicherungsmutter Sechskant selbstsichernd (DIN 985) (2x)

² <https://www.ebay.de/itm/154886890067?chn=ps&noro-ver=1&mkevt=1&mkrid=7071533165376683&mkcid=2&itemid=154886890067&targetid=4582627049753644&device=c&mktype=&googleloc=&poi=&campaignid=376712746&mkgroupid=1264439088661572&rlsarget=pla-4582627049753644&abclid=9300540&merchantid=87778&msclkid=28f537e4f2991c5a993f5473d6b5357d>

5.7. Kleb- & Dichtmassen

Zur Befestigung und Sicherstellung der Dichtheit von den Bauteilen werden folgende Kleb- & Dichtmassen verwendet:

- Loctite 401 – Sekundenkleber - Sofortklebstoff
- Yachtcare Polyurethan Kleb- und Dichtmasse Weiß 310 ml³

5.8. Schmierstoffe

Zur Unterstützung der Leichtläufigkeit wird folgender Schmierstoff für das Lager eingesetzt:

- WD40 Multifunktions-Öl 100ml⁴

6. Änderung von Bauteilen zur Funktionalität

Zunächst war angedacht möglichst alle Bauteile der Baugruppe per RP-Verfahren zu fertigen. Nach einem gescheiterten Versuch war nach Rücksprache die Fehlerquelle der zu großen Reibung identifiziert. Somit fiel die Wahl des Werkstoffs des Arbeitszylinders auf Glas. Hinzu kommt die Arbeitskolbenhülse, welche nun aus Aluminium gefertigt wird, um sowohl die Haftung am Grundkörper des Arbeitskolbens zu verbessern, als auch die Leichtläufigkeit zu gewährleisten. Hierbei liegt der Gleitreibungskoeffizient, welcher maßgeblich für die Reibung innerhalb der axialen Bewegung verantwortlich ist, bei lediglich $\mu_G = 0,25^5$.

7. Manuelle Fertigung der Bauteile

7.1. Rundplatten

Aufgrund der Positionierung der Bohrungen auf den Rundplatten aus Aluminium in einem Teilkreis, wird die manuelle Fertigung mittels Tischbohrmaschine o.ä. erschwert. Daher wurde die Fertigung der Rundplatten fremdvergeben und mittels Laserschneidverfahren durchgeführt. Genaue Maße und Bohrungen der Rundplatten sind der technischen Zeichnung dem Anhang aus Abbildung 3 und 4 zu entnehmen.

7.2. Verdrängerkolben

Das bestellte Styrodur wird auf $\varnothing 85$ mm angerissen und mittels eines Sicherheitsmessers ausgeschnitten.

8. Zusammenbau

8.1. Vormontage

Zunächst werden der Aufsatz und der Arbeitszylinder auf die Rundplatte oben geklebt. Eine Aushärtezeit ist zu berücksichtigen. In den Wellenaufsatz wird auch der $\varnothing 2 \times 7$ mm Zylinderstift montiert und festgeklebt für die Aufnahme

³ <https://www.obi.de/bootslacke/yachtcare-polyurethan-kleb-und-dichtmasse-weiss-310-ml/p/4133419>

⁴ <https://www.obi.de/sonstige-wartung-autoreparatur/wd40-multifunktions-oel-100-ml/p/8354433>

⁵ Beckhoff. Zugriff: 14.12.2022. https://infosys.beckhoff.com/index.php?content=../content/1031/tc_motion_designer/2761712779.html&id=

des Pleuels. Als Nächstes wird der andere $\varnothing 2 \times 7$ mm Zylinderstift zur Aufnahme des zweiten Pleuels für den Verdränger Kolbens ins Schwungrad eingeklebt. Danach wird das Miniaturkugellager in die Halterung eingepresst (zur planen Seite der Halterung ausrichten). Hiernach wird der $\varnothing 2 \times 34,5$ mm Zylinderstift mit der Buchse verbunden und mittels Sofortkleber fixiert. Dazu muss das zweite Pleuel mittels eines Zylinderstifts $\varnothing 2 \times 4$ mm mit der Buchse verbunden.

Für die Unterbaugruppe des Arbeitskolbens werden zunächst die O-Ringe $\varnothing 10 \times 1,5$ mm auf die Einstiche des Arbeitskolben 2 montiert. Anschließend wird der zweite Pleuel mit dem letzten $\varnothing 2 \times 7$ mm Zylinderstift gesichert. Darauf folgend wird der Arbeitskolben 2 in den Arbeitskolben (Aluminiumhülse) gepresst.

8.2. Endmontage

Zunächst wird die Dichtmasse in die Rillen des Verdrängerzylinders eingebracht und dieser auf der unteren Rundplatte ausgerichtet. Anschließend wird die Halterung des Lagers mittels zwei M3-Sechskantschrauben (DIN 933) sowie Sicherungsmuttern an der Rundplatte oben verschraubt. Dabei muss die Ausrichtung beachtet werden (Plane Seite zum Arbeitszylinder). Anschließend wird der vormontierte $\varnothing 2 \times 34,5$ mm Zylinderstift mittig in den Verdränger Kolben gesteckt und mittels etwas Sofortkleber geklebt.

Die obere Einheit der Rundplatte wird anschließend zur unteren Rundplatte ausgerichtet und angepresst an den Verdränger Zylinder. Zusätzlich werden die 6 M2-Linsenkopfschrauben mit Kreuzschlitz durch die 6 Bohrungen der Rundplatten mit den 6 Sechskantmuttern gesichert.

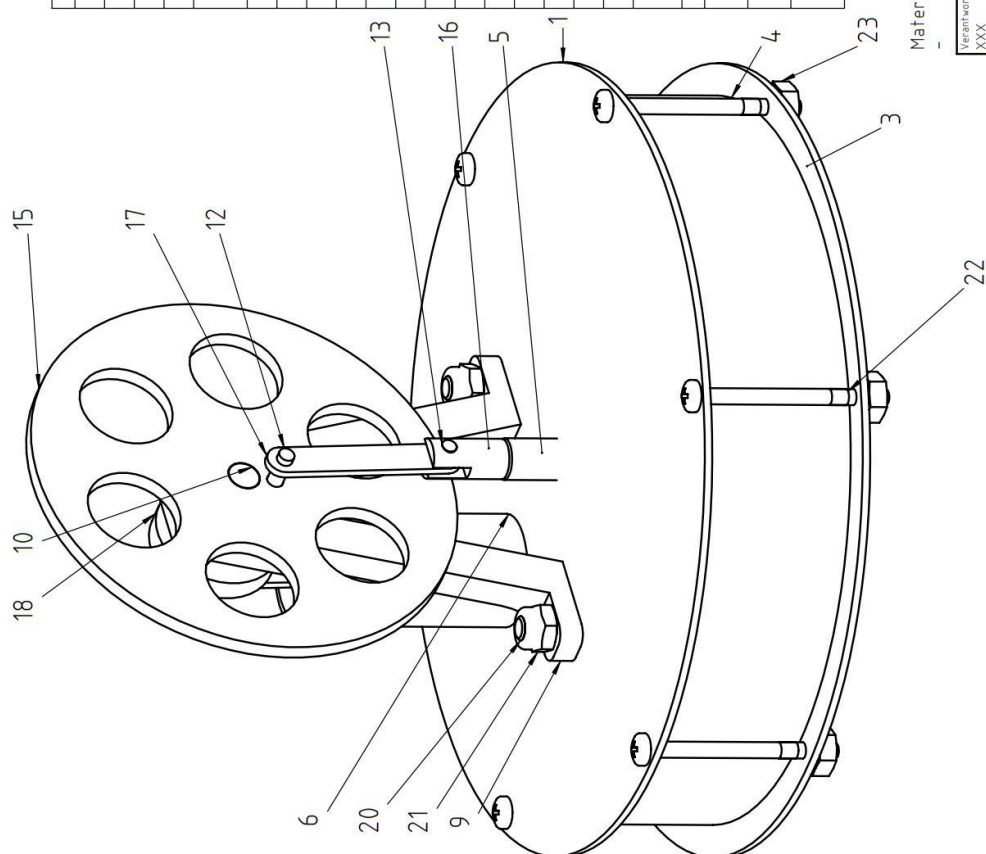
Die Unterbaugruppe Arbeitskolben wird danach mittels Multifunktions-Öl geschmiert und in den Arbeitszylinder eingeführt. Anschließend wird der $\varnothing 4 \times 14$ mm Zylinderstift (Welle) durch das Lager gesteckt. Gleichzeitig wird das Miniaturkugellager geschmiert. Der Wellenaufsatz und das Schwungrad werden nun 90° -versetzt zu einander auf der Welle montiert und mittels Sofortkleber fixiert.

Zuletzt muss noch der Arbeitskolben mit der Welle über das Pleuel mittels des $\varnothing 2 \times 4$ mm Zylinderstifts verbunden werden. Das andere Pleuel wird danach auf den Stift des Schwungrads aufgesetzt.

9. Fazit

Die Funktionalität des Niedertemperatur-Stirlingmotors ist aufgrund der geringen Reibung innerhalb des Arbeitskolbens nach veränderter Materialauswahl vollständig gegeben. Außerdem kann eine Laufzeit von mindestens 5 Minuten, jedoch höchstens 15 Minuten, erreicht werden. Die Laufzeit ist hierbei lediglich auf die zu hohe Wärmeabfuhr des kochenden Wassers an die Umgebung begrenzt. Die beigegefügte Bedienungsanleitung ist zu berücksichtigen.

10. Anhang



POS-NR.	BENENNUNG	BESCHREIBUNG	MENGE
1	Platte oben		1
2	Verdrängerkolben		1
3	Platte unten		1
4	Verdrängerzylinder		1
5	Aufsatz Rundplatte oben		1
6	Arbeitszylinder		1
7	Arbeitskolben		1
8	Arbeitskolben 2		1
9	Halterung		1
10	Zylinderstift		1
11	Zylinderstift		1
12	Zylinderstift		2
13	Zylinderstift		1
14	Zylinderstift		1
15	Schwungrad		1
16	Buchse		1
17	Pleuel		2
18	Wellenaufsatz		1
19	Zylinderstift 2x34,5mm		1
20	DIN 933 - M3 x 8-N		2
21	Mutter din_985-m3x0_5-5		2
22	DIN EN ISO 7985 - M2 x 28 - Z - 28N		6
23	M2 Sechskantmutter (DIN 934)		6

Material: -

Maßstab 2:1

Allgemeintoleranz ISO 2768-mK

Gezeichnet von XXX

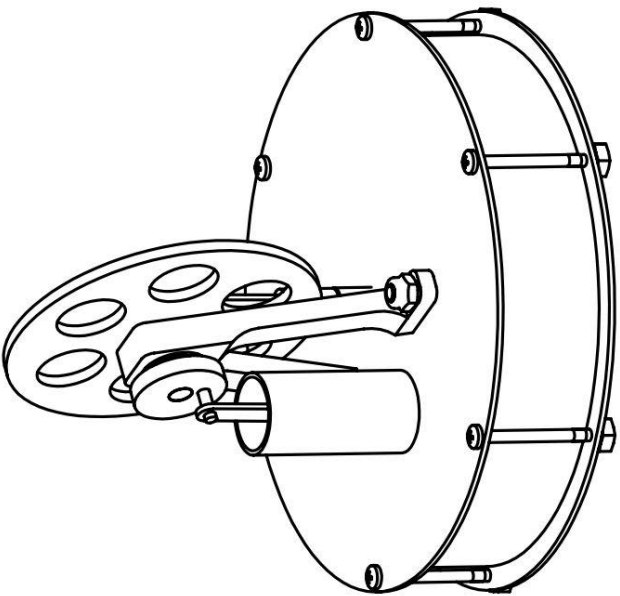


Geprüft von XXX

Freigegeben von XXX

Verantwortl. Abt. XXX Technische Referenz XXX University of Applied Sciences HOCHSCHULE EMDEN-LEER	Baugruppenzeichnung Titel Nieder temperatur- Stirlingmotor	Dokumentenstatus A3 XXX	Zeichnungsnummer Baugr1 Ausgabedatum 10.01.2023
		Dokumentenstatus A3 XXX	

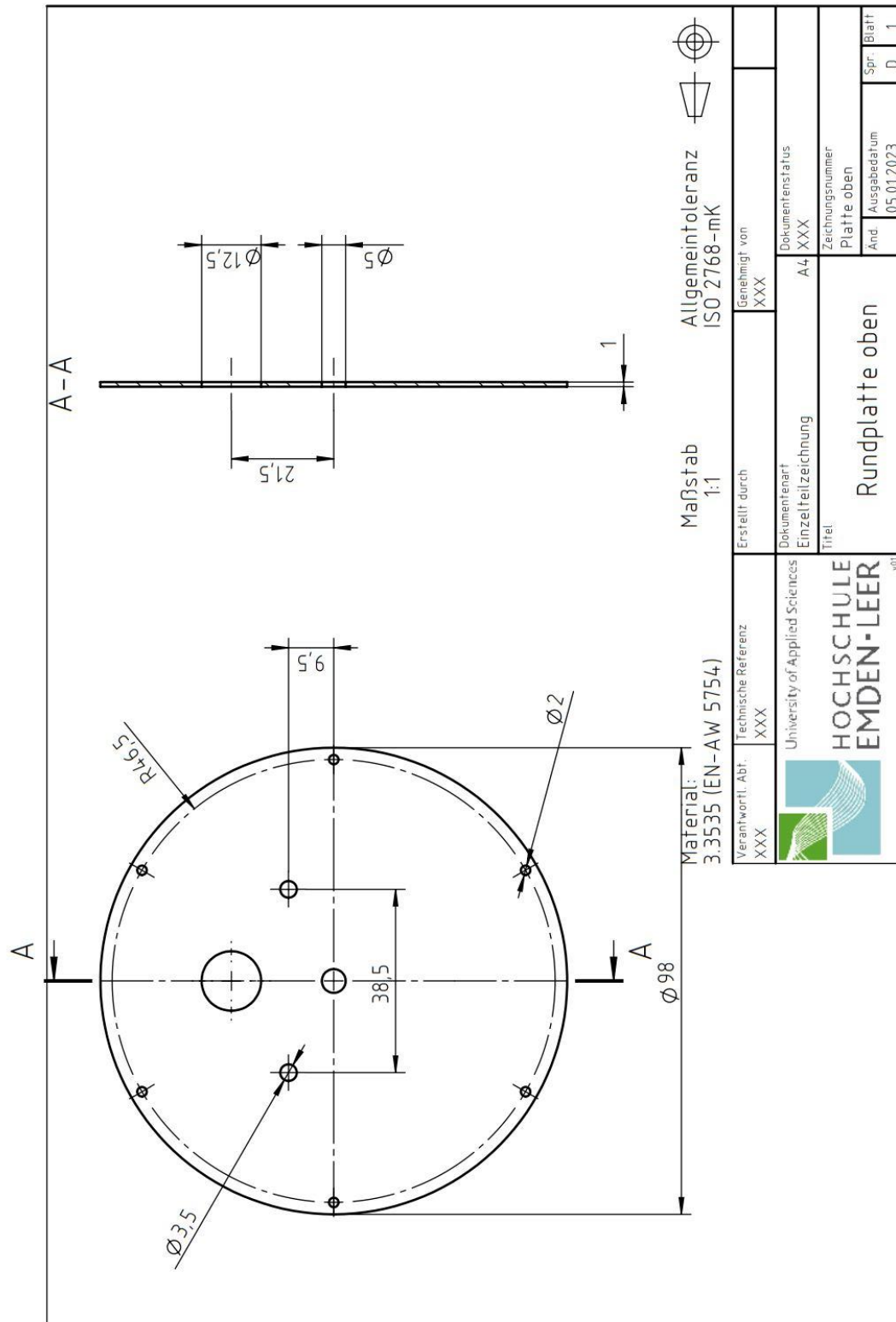
SOLIDWORKS Lehrprodukt - Nur für Lehrzwecke.

Abbildung 1 – Gesamtzeichnung

		Maßstab 1:1		Allgemeintoleranz ISO 2768-mK			
		Erstellt durch XXX		Genehmigt von XXX			
Verantwortl. Abt. XXX		Technische Referenz XXX		Dokumententyp Baugruppenzeichnung		Dokumentenstatus A4 XXX	
		University of Applied Sciences HOCHSCHULE EMDEN-LEER vdt		Titel Niedertemperatur- Stirlingmotor		Zeichnungsnummer Baugr1	
				And. Ausgabedatum 10.01.2023		Spr. Blatt D 1	

SOLIDWORKS Lehrprodukt - Nur für Lehrzwecke.

Abbildung 2 - Gesamtzeichnung Teil 2



SOLIDWORKS Lehrprodukt - Nur für Lehrzwecke.

Abbildung 3 - Technische Zeichnung Rundplatte oben

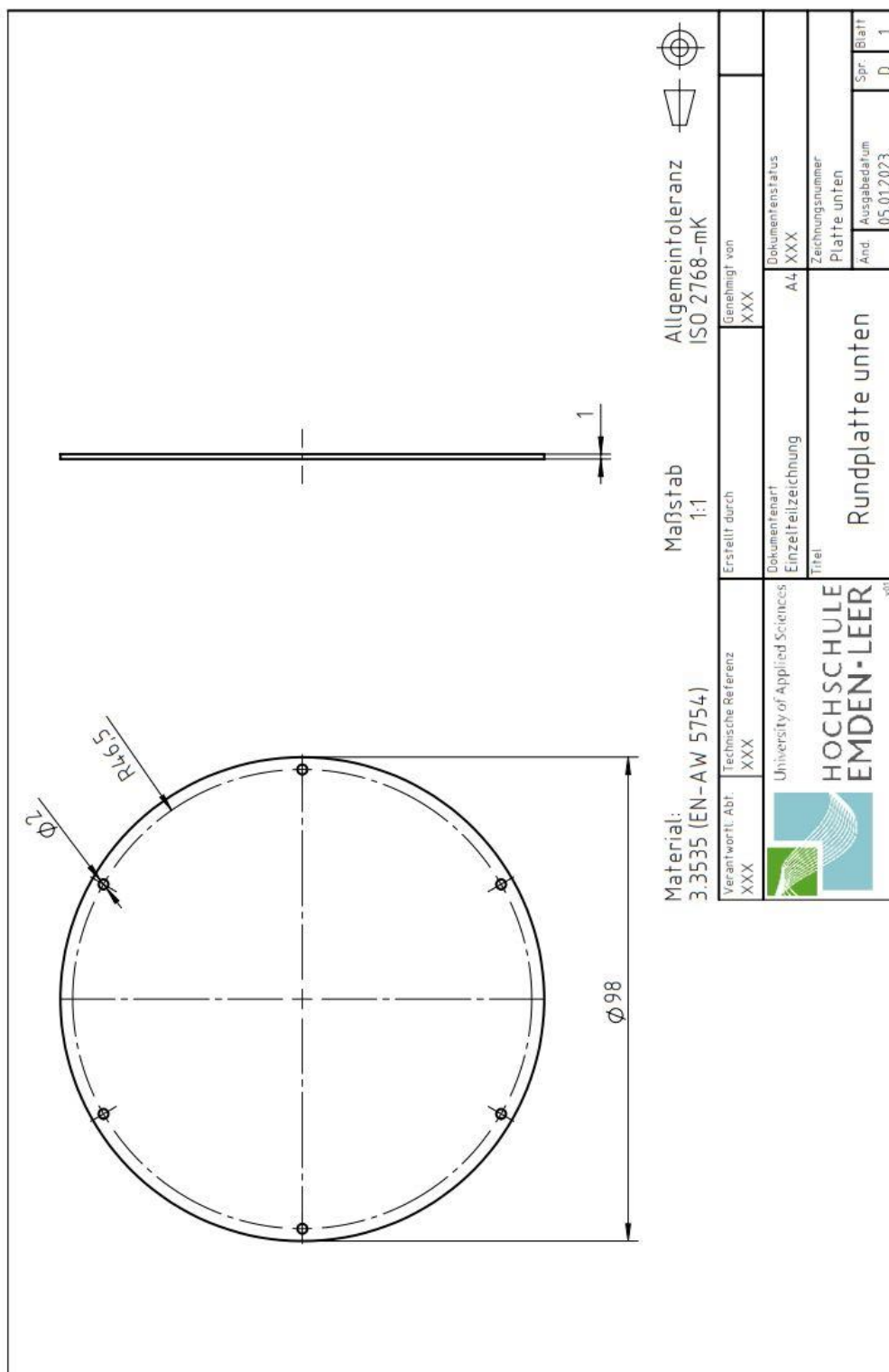
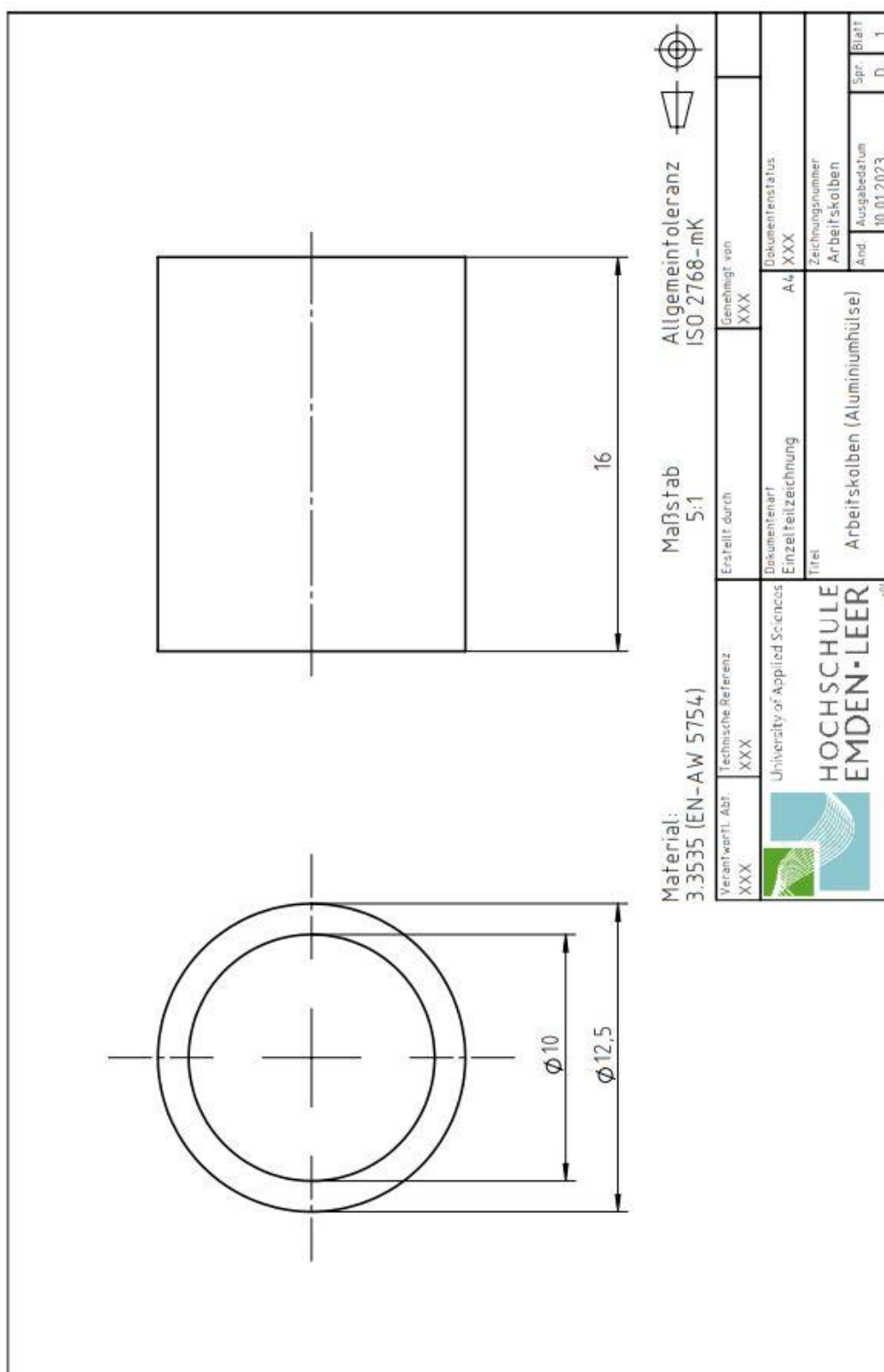


Abbildung 4 - Technische Zeichnung Rundplatte unten



SOLIDWORKS Lehrprodukt - Nur für Lehrzwecke.

Abbildung 5 - Technische Zeichnung Arbeitskolben