Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

Diplomarbeit

Auslegung und Konstruktion einer $H_2O/LiBr$ Absorptionskältemaschine für den Laborunterricht

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas WERNER
E302 Institut für Energietechnik und Thermodynamik

eingereicht an der Technischen Universität Wien,
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Matthias Mair-Zeininger, BSc.
0926335
Bürgergasse 11, 1100 Wien
Mitterweg 7, 4880 St.Georgen im Attergau

Wien, Jänner 2017

Matthias Mair-Zeininger

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

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, Jänner 2017

Matthias Mair-Zeininger

Abstract

Die vorliegende Arbeit umfasst die Berechnung und Konstruktion einer Absorptionskältemaschine. Diese wird dabei im Labormaßstab ausgeführt, da sie in erster Linie für Unterrichtszwecke und als Anschauungsobjekt dienen soll. Als Arbeitsmittel wurde eine wässrige Lithiumbromidlösung gewählt, da diese im Gegensatz zu Ammoniak keine toxischen Eigenschaften aufweist und Maschinen dieser Bauart in dem geplanten Maßstab nicht erhältlich sind, was als besonderer Anreiz gilt. Die thermodynamische Auslegung wurde dabei mit dem Gleichungssolver *EES-Engineering Equation Solver* der Firma *F-Chart Software, LLC* durchgeführt, welcher sehr umfangreiche Stoffwertdatenbanken beinhaltet. Als Randbedingung für die Dimensionierung wurden Leistungsdaten von 2 kW Heizleistung bei 100 $°C$ festgelegt. Des Weiteren wird von dem Gerät erwartet, dass ausreichend Möglichkeiten, um die wesentlichen Komponenten im Betrieb beobachten zu können und die nötigen Messstellen, um für den Laborunterricht sinnvolle Berechnungen anstellen zu können, vorhanden sind. Die Konstruktion sollte dabei so ausgeführt sein, dass möglichst wenig mechanische Bearbeitungsschritte notwendig sind. Konstruiert wurde mit der 2D/3D CAD-Software *Solid Edge* der Firma *Siemens Industry Software GmbH.*

The scope of the following work contains the calculation and design of an Absorption Chiller. The size of the machine is realized in Laboratory scale, as it is supposed to serve for teaching purposes and as a demonstrative device. For a working fluid, *Water/Lihiumbromide* was chosen, as it has no significant toxic effects on humans, compared to ammonia, and the aspect that no devices in this size are currently available, this adds an extra incentive. For the thermodynamic computation, the software *EEES-Engineering Equation Solver* by the company *F-Chart Software, LLC* was used, which contains thermodynamic property libraries for a wide range of fluids. As a restrictive condition for the design the heat input was set to 2 kW and the temperature of the hot water to 100 $°C$. As further conditions, the machine should provide sufficient means for an insight to the working parts, a range of measuring devices to enable reasonable exercises for students, and a production extensive design. The design was realized in the 2D/3D-CAD-Software *Solid Edge* by the Company *Siemens Industry Software GmbH.*

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, die mir während des Verfassens dieser Arbeit und auch während meines gesamten Studiums immer unterstützend zur Seite gestanden sind. An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Betreuer Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Werner, für seine kompetenten Inputs, seine unkomplizierte Herangehensweise und spontane Terminfindung bedanken. Weiters möchte ich mich noch bei Frau Dipl.-Ing. Verena Sulzgruber bedanken, die mir bei vielen praktischen Fragestellungen stets helfend zur Seite gestanden ist, sowie bei meinen Arbeitskollegen in der Lenzing AG Stefan Wagner und Manfred Gattermayer, die in einer der intensiveren Phasen dieser Arbeit sehr viel Verständnis für mich aufgebracht haben. Ein weiterer Dank gilt auch sämtlichen Studienkollegen, die mir mit Ratschlägen, Unterlagen oder sonstigen Informationen weitergeholfen haben und dabei zu sehr guten Freunden wurden. Besonders zu erwähnen sind dabei Dipl.-Ing. Florian Hofer und mein Bruder Dipl.-Ing. Reinhard Mair-Zeininger. Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Freundin Mag. Julia Böckl bedanken, die mich durch sämtliche Hochs und Tiefs meines Studiums begleitet hat und meine Motivationscoachin, Therapeutin und trotz allem liebevolle Partnerin war und nach wie vor ist. Nicht zuletzt aber möchte ich mich bei meinen Eltern Anna und Herbert Mair-Zeininger bedanken, durch deren Fleiß und unermüdlichen Einsatz für ihre Kinder mir es erst ermöglicht wurde, mich persönlich und beruflich bestens zu entwickeln.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung **1**
- 1.1. Aufgabenstellung . . . 1
- 1.2. Methoden . . . 2

2. Grundlagen **3**
- 2.1. Bauformen von Absorptionskältemaschinen . . . 6
  - 2.1.1. $H_2O/LiBr$ Absorptionskältemaschine . . . 6
  - 2.1.2. NH_3/H_2O Absorptionskältemaschine . . . 8
  - 2.1.3. $NH_3/H_2O/H_2$ Diffusionsabsorptionskältemaschine . . . 10

3. Berechnung **12**
- 3.1. Berechnung $H_2O/LiBr$ . . . 13
- 3.2. Berechnung NH_3/H_2O . . . 20

4. Konstruktion und Auswahl der Komponenten **21**
- 4.1. Behälter . . . 21
- 4.2. Wärmetauscher . . . 23
  - 4.2.1. Generator . . . 23
  - 4.2.2. Kondensator . . . 26
  - 4.2.3. Verdampfer . . . 27
  - 4.2.4. Absorber . . . 28
- 4.3. Rahmen . . . 29
- 4.4. Ventile . . . 29
- 4.5. Pumpen . . . 31
- 4.6. Verrohrung . . . 32
- 4.7. Lithiumbromid-Lösung . . . 32
- 4.8. Schaugläser . . . 33
- 4.9. Lösungswärmetauscher . . . 34
- 4.10. Tropfenabscheider . . . 35
- 4.11. Externe Kreisläufe . . . 36
- 4.12. Messpunkte . . . 38

5. Betrieb der Anlage **43**
- 5.1. Evakuierung . . . 43
- 5.2. Dichtheitsprüfung . . . 44
- 5.3. Anfahren der Anlage . . . 44
- 5.4. Stillstand . . . 45

6. Resümee **45**

A. Berechnungen **46**
- A.1. EES Code - Berechnung 1-Stufige $H_2O/LiBr$ AKM . . . 46
- A.2. EES Code - Berechnung 1-Stufige NH_3/H_2O AKM . . . 55

A.3. Nachrechnung des Absorber-Verdampfer Behälters 61

B. Technische Zeichnungen **62**
B.1. Absorptionskältemaschine 62
B.1.1. Rahmen 66
B.1.2. Generator-Kondensator 67
B.1.3. Absorber-Verdampfer 86
B.1.4. Temperaturmessstelle 113
B.1.5. Befestigungswinkel Pumpe 114
B.2. Entnahmebecher 115
B.2.1. Behälterrohr 116
B.2.2. Boden 117
B.2.3. Deckel 118
B.2.4. Flansch 119

C. RI - Fließschemata **120**
C.1. RI - Absorptionskältemaschine 120
C.2. RI - Kühlgruppe 121
C.3. RI - Heißwasserversorgung 122

D. Bestellliste **123**

Abkürzungsverzeichnis

AKM Absorptionskältemaschine

KKM Kompressionskältemaschine

DKM Diffusionsabsorptionskältemaschine

COP Coefficiency of Performance

i.d.R. in der Regel

Abbildungsverzeichnis

1. Schema Kompressionskältemaschine mit $lnp - h - Diagramm$ 3
2. Schema Absorptionskältemaschine mit $lnp - 1/T - Diagramm$ 4
3. Prinzipskizze Typ I Wärmepumpe 5
4. Prinzipskizze Typ II Wärmepumpe 6
5. Erweiterter Dühring-Plot $H_2O/LiBr$ 8
6. Rektifikationskolonne 10
7. Schema und Aufbau Diffusionsabsorptionskältemaschine 11
8. *Diagram Window* EES Berechnung $H_2O/LiBr$ 14
9. Temperaturverlauf Generator 17
10. Temperaturverlauf Kondensator 18
11. Temperaturverlauf Verdampfer 19
12. Temperaturverlauf Absorber 19
13. Diagram Window EES Berechnung NH_2/H_2O 20
14. Aufbau Absorptionskältemaschine 21
15. Behälter Generator und Kondensator 22
16. Behälter Absorber und Verdampfer 23
17. Gegenüberstellung Rieselfilm und überfluteter Absorber 24
18. Temperaturniveaus bei Rieselfilm- und überflutetem Generator 25
19. Erhöhung der Siedetemperatur durch Flüssigkeitssäule 25
20. Abbildung Generator 26
21. Abbildung Kondensator 27
22. Abbildung Verdampfer 27
23. Versuch Sicken-Aufgabewanne 28
24. Abbildung Absorber 28
25. Item Profil und Automatik Verbindungssatz 29
26. Auswahldiagramm Dosierventil und Regelventil 30
27. (v.l.n.r.) SS-1RS6MM-Nadelventil, SS-4MG-MH-Feindosierventil, Schraderventil 6 mm 31
28. Kennlinie Grundfos UPS 15-14 B PM 32
29. Stirnschauglas DN65 33
30. *Hrale* B3-12-10 Edelstahl Plattenwärmetauscher 35

31. Tropfenabscheider 36
32. Aufbau mit Heißwasserversorgung 37
33. Kühlgruppe 38
34. Entnahmestation Dichtemessung 39
35. Entnahmebecher 40
36. Temperaturmessstellen 41
37. Drucksensor DT1 42

1. Einleitung

In den letzten Jahrzehnten ist der Bedarf an Kühlung für Grund- und Komfortbedürfnisse kontinuierlich gestiegen. Den Großteil der Kühlaufgaben übernehmen dabei Kompressionskältemaschinen, die indirekt zu einer Steigerung des Treibhauseffekts führen, da sie primär mit elektrischer Energie arbeiten und ihr Anteil am Gesamtenergiekonsum dabei fast 30% beträgt. Alternative Technologien zur Kälteerzeugung, allen voran die Absorptionstechnik, könnten somit signifikant zur Reduzierung von Treibhausgasen beisteuern, bedingt durch die Form der benötigten Aktivierungsenergie, welche sowohl ungenutzte Abwärme, Solarenergie, Geothermie oder ähliches sein können [28].

Dieser Sachverhalt wird daher als Anlass genommen, für den Laborunterricht eine funktionstüchtige Anlage zu konzipieren, welche den StudentInnen das Thema der Kälteerzeugung mittels Absorptionstechnik näher bringen soll.

1.1. Aufgabenstellung

Die Aufgabe bestand darin für den Laborunterricht einen Prüfstand einer Absorptionskältemaschine zu konzipieren. Nach Absprache mit Prof. Werner wird von der Anlage erwartet, dass sie:

- mit dem Stoffpaar *Wasser/Lithiumbromid* arbeitet
- mit einer Soll-Heizleistung von $Q_{Gen} = 2\ kW$[1]
- und einer maximale Heißwassertemperatur von $T_{h,zu} = 100\ °C$ betrieben wird
- ausreichend viele Messstellen besitzt, anhand derer sinnvolle Übungsaufgaben für StudentInnen gestaltet werden können
- Möglichkeiten hat, um in das Innere der Maschine blicken zu können, um ein besseres Bild für die stattfindenden Abläufe zu erhalten und um Ursachen für eventuelle Probleme im Betrieb einfacher eruieren zu können
- eine Konstruktion, die möglichst wenig mechanische Bearbeitungsschritte verlangt, da die personellen Ressourcen naturgemäß beschränkt sind und prioritär für Forschungsprojekte eingesetzt werden müssen, sowie
- ein möglichst kompaktes und transportfähiges Design.

Ursprünglich war der gesamte Bau und die Inbetriebnahme der Anlage geplant, aus organisatorischer Gründen, in Zusammenhang mit dem Umbau des Universitätslabors, musste die Aufgabenstellung jedoch adaptiert werden. Somit war ein weiterer Bestandteil der Aufgabe die Erstellung sämtliche technischen Zeichnungen und eine möglichst

[1] Bei der Auslegung von Kältemaschinen ist natürlich die Kühlleistung ausschlaggebend, jedoch kann diese im Labor beliebig eingestellt werden. Die notwendige Heizleistung sollte allerdings begrenzt sein, um die Dimension des Wärmeerzeugers möglichst klein zu halten.

detailierte Kostenübersicht inklusive Bestellliste mit Bezugsquellen und nach Möglichkeit bereits mit Angeboten von Zulieferern. Eine vollständige Liste mit allen verwendeten Bauteilen ist in Anhang D beigelegt. Es wurde dabei für jedes Teil ein Preis ausfindig gemacht, bzw. ein Angebot eingeholt, um eine möglichst konkrete Kostenabschätzung vornehmen zu können.

1.2. Methoden

Zu Beginn wurde eine ausgiebige Literaturrecherche durchgeführt, um Projekte mit ähnlichem Charakter oder ähnlichem Themengebiet ausfindig zu machen. Ebenso diente die Recherche dazu, weitere vertiefende Kenntnisse von Absorptionskältemaschinen und den notwendigen thermodynamischen Prozessen zu erhalten und um Inspirationen für die konstruktive Gestaltung zu erlangen. Weiters ergab sich daraus ein Einblick auf den aktuellen Stand der Entwicklung.

Anhand der vorgegebenen Randbedingungen wurde eine thermodynamisch Berechnung der Anlage durchgeführt und anschließend erste Versionen der Konstruktion erstellt. In einem iterativen Prozess zwischen Berechnung, Konstruktion und Bauteilbeschaffung, wurde die Konstruktion soweit fortgeführt bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht wurde.

2. Grundlagen

Als Wärmepumpen werden Apparaturen bezeichnet, die Wärme von einem niedrigen auf ein höheres Temperaturniveau befördern. Dies schließt sowohl Kühl- wie auch Heizsysteme ein. Laut 2. Hauptsatz der Thermodynamik ist dazu Energiezufuhr in Form von Wärme oder Arbeit notwendig. Je nach Art der Energiezufuhr, ob Wärme oder Arbeit, werden unterschiedliche Technologien benötigt, welche wesentliche Unterschiede in der konstruktiven Ausführung mit sich bringen. Da in der vorliegenden Arbeit eine Absorptionskältemaschine (AKM) betrachtet wird, wird in weiterer Folge die Bezeichnung Kältemaschine anstatt Wärmepumpe verwendet.

Die typische und meist verbreitete Ausführung von Kältemaschinen, welche mittels Zufuhr von Arbeit funktionieren, ist die Kompressionskältemaschine (KKM). Sie wird sowohl in der Haustechnik zum Heizen und Kühlen, wie in handelsüblichen Kühlschränken bis hin zur Klimaanlage im Auto verwendet. Die Arbeit wird dabei durch einen mechanischen Kompressor bereitgestellt, der meist elektrisch betrieben wird.

Eine Variante von Kältemaschinen, die mittels Wärmezufuhr arbeiten, ist die Absorptionskältemaschine, auf deren Prinzip und Ausführungsvarianten noch genauer eigegangen wird. Weitere Ausführungsmöglichkeiten von wärmebetriebene Kältemaschinen stellen Apparate dar, die auf dem Prinzip der Adsorption oder dem Stirling Prozess beruhen oder mittels Strahlverdichter arbeiten, jedoch stellt die Absorptionswärmepumpe den am häufigsten zu findenden Vertreter dieser Kategorie dar [23].

In Abbildung 1 ist das Schema einer KKM und in Abbildung 2 das einer AKM dargestellt. Die Abbildungen veranschaulichen dabei, dass der Kompressor im rechten Teil der KKM bei einer AKM durch einen Lösungskreislauf eines Zweistoffgemisches ersetzt wird. Dieser wird deshalb gelegentlich auch als thermischer Verdichter bezeichnet [22].

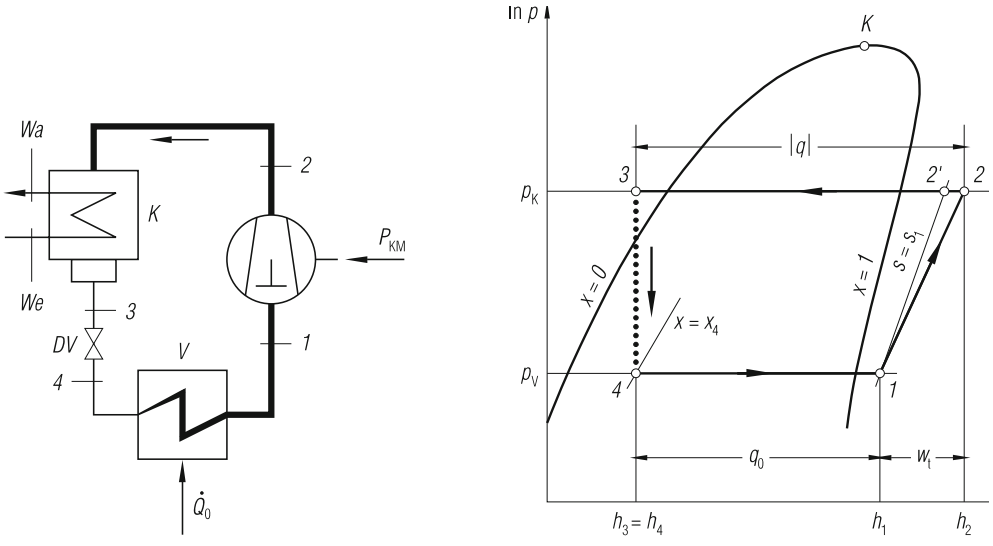


Abbildung 1: Schema Kompressionskältemaschine mit $lnp - h - Diagramm$, [14]

Bei der KKM wird über den Kompressor Kältemitteldampf im Zustand 1 angesaugt und auf Zustand 2 verdichtet, wie in Abbildung 1 zu erkennen ist. Der überhitzte Kältemitteldampf kühlt unter Abgabe der Kondensationswärme bis zur Sättigungslinie ab und wird zusätzlich um einige Kelvin unterkühlt. Das flüssige Kältemittel wird nun im Drosselventil ins Nassdampfgebiet entspannt und über den Verdampfer unter Zufuhr von Wärme, die dem zu kühlenden Medium entzogen wird, verdampft. Das Drosselventil wird dabei so eingestellt, dass nur so viel Kondensat durchtritt, dass nach dem Verdampfer wieder überhitzter Dampf vorliegt [14].

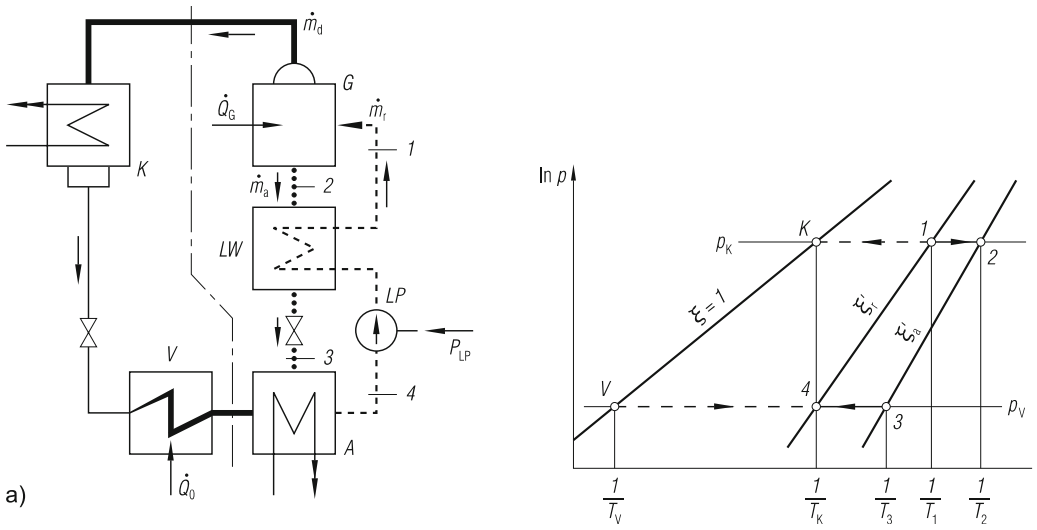


Abbildung 2: Schema Absorptionskältemaschine mit $lnp - 1/T - Diagramm$, [14]

Einen wesentlicher Unterschied der AKM zur KKM stellt das Arbeitsmittel dar, das bei der AKM ein Zweistoffgemisch ist. Beim Lösungskreislauf werden in der Literatur verschiedene Bezeichnungen wie starke, arme, schwache oder reiche Lösung verwendet, welche teilweise auch unterschiedlich zugeordnet werden. Um einer einheitliche Begriffsdefinition willen, werden in dieser Arbeit zur Bezeichnung der Lösung folgende Begriffe verwendet:

- **arme Lösung** - arm an Kältemittel (H_2O), reich an Absorbent ($LiBr$)
- **reiche Lösung** - reich an Kältemittel (H_2O), arm an Absorbent ($LiBr$)

Die AKM arbeitet wie auch die KKM auf zwei Druckniveaus, wobei sich Kondensator (K) und Generator (G) auf dem höheren und Verdampfer (V) und Absorber (A) auf dem niedrigerem Druckniveau befinden. Die notwendige Energie wird im Generator zugeführt, wo aus der reichen Lösung, der leichter flüchtige Bestandteil ausgekocht wird, der in Form von Dampf in den Kondensator weitergeleitet wird und als Kältemittel dient. Der linke Teil der Anlage, ist analog zu dem einer KKM aufgebaut. Nachdem der Kältemitteldampf im Kondensator abgekühlt und verflüssigt wurde, wird er auf Verdampferdruck gedrosselt und nimmt dort die Kälteleistung in Form von Verdampfungswärme auf. Im Generator

bleibt die arme Lösung zurück und kühlt im Lösungswärmetauscher ab, bevor sie über eine Drossel in den Absorber geleitet wird. Die vom Generator kommende arme Lösung absorbiert nun den Kältemitteldampf, sodass sich ein neues Phasengleichgewicht in der Lösung einstellt. Die dabei frei werdende Absorptionswärme wird über das durch den Absorber fließende Kühlwasser aufgenommen. Die Lösungspumpe befördert die reiche Lösung über den Temperaturwechsler, in dem es die Wärme aufnimmt, welche von der armen Lösung abgegeben wird, wieder in den Generator. Da in diesem Fall nur ein flüssiges Medium gepumpt werden muss, und nicht wie im Verdichter der KKM ein gasförmiges, ist die Verdichterarbeit um ein Vielfaches geringer [14].

Die einfachste Form der AKM arbeitet somit auf drei unterschiedlichen Temperaturniveaus und wird in zwei verschiedene Typen unterteilt und zwar in die Typ I und die Typ II Wämepumpe. In diesem Abschnitt wird außnahmsweise der Begriff Wärmepumpe noch einmal verwendet, um konsistent mit der Literatur zu sein.

- Typ I:
  Beim Typ I ist das treibende Potential immer die zugeführte Wärme auf höchster Temperatur. Sie kann entweder als Kältemaschine oder als Wärmepumpe betrieben werden, wobei als Kältemaschine die Wärme auf der niedrigsten Temperatur und als Wärmepumpe jene auf mittlerer Temperatur, die Nutzwärme darstellt. Abbildung 3 zeigt ein Blockschema, das die drei Temperaturen darstellt, innerhalb derer die Wärmepumpe arbeitet. T_e bezeichnet mit der Verdampfertemperatur die niedrigste und T_h mit der Temperatur des Heizmediums die höchste. T_c ist die Temperatur des Kühlmediums an Absorber und Kondensator [23].

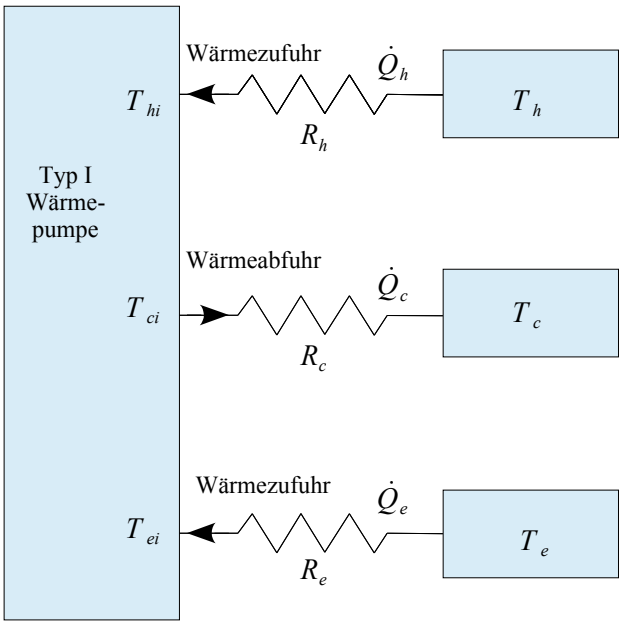


Abbildung 3: Prinzipskizze Typ I Wärmepumpe, [23]

- Typ II:
  Bei der Typ II Wärmepumpe werden sämtliche Energie- und Mediumsströme umgekehrt, wodurch bezweckt werden soll, dass die Temperatur vom mittlerem Niveau auf ein höheres transformiert wird, weswegen die Typ II Wärmepumpe auch als Wärmetransformer oder Temperaturverstärker bezeichnet wird. Die Wirtschaftlichkeit dieser Bauart ist jedoch bei aktuellem Stand der Entwicklung und den vorherrschenden Energiepreisen nicht gegeben bzw. in Anbetracht der hohen nötigen Kapitalaufwendungen und der Wartungsintensität, sehr gering. [23]

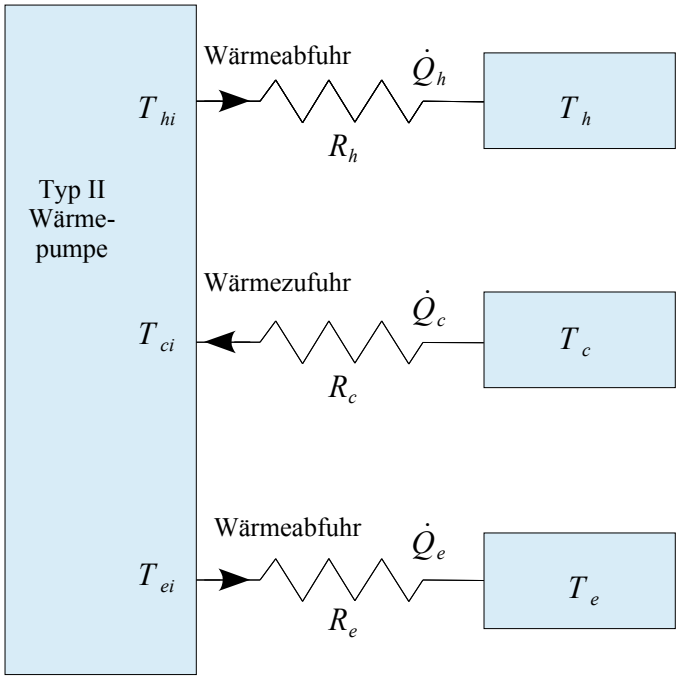


Abbildung 4: Prinzipskizze Typ II Wärmepumpe, [23]

2.1. Bauformen von Absorptionskältemaschinen

Die kommerziell erhältlichen Arten von AKM's lassen sich im wesentlichen nach ihren Arbeitsmitteln in drei Kategorien unterteilen. Ihre Unterscheidungsmerkmale sind in den folgenden Kapiteln angeführt.

2.1.1. $H_2O/LiBr$ Absorptionskältemaschine

Diese Technologie ist seit den 1950er Jahren weit verbreitet und liefert konstant und verlässlich Kühlleistungen, wenn der Betrieb laut Herstellerangaben durchgeführt wird. Das Stoffpaar $H_2O/LiBr$ hat sich dabei unter einer Vielzahl an verschiedener in Betracht zu ziehender Kombinationen, als das zu bevorzugende herausgestellt.

Bei $H_2O/LiBr$ Anlagen dient das Wasser als Kältemittel, da es im Vergleich zu Lithiumbromid eine erheblich niedrigern Siedepunkt hat, welcher bei reinem Lithiumbromidsalz unter Normalbedingungen bei 1.282 $°C$ liegt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Kältemitteldampf aus reinem Wasser besteht. Bei erhöhten Dampfgeschwindigkeiten kann es jedoch dazu kommen, dass Spuren von Salz im Dampf mitgeführt werden, was einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Korrosionsverhalten haben kann. Der niedrige Dampfdruck von $LiBr$ hat somit den Vorteil, dass ausschließlich Kältemittel verdampft wird, jedoch ist durch den Gefrierpunkt von Wasser die theoretisch maximale Kühltemperatur auf 0 $°C$ beschränkt [23]. Für einen sicheren Betrieb sollte die Verdampfertemperatur deshalb nicht weniger als 3 $°C$ betragen, woraus eine Kaltwassertemperatur von etwa 5 $°C$ resultiert. Um ein Auskristallisieren des Salzes zu verhindern, sollte die Anlage so betrieben werden, dass eine Lösungskonzentration von 63%-LiBr am Generatoraustritt nicht überschritten wird. I.d.R. sind die Auslegungsbedingungen daher so, dass ebendort eine Konzentration von etwa 60%-LiBr vorherrscht [22].

LiBr-AKM's können bei sehr niedrigen Heißwasser-Temperaturen betrieben werden, wodurch sie speziell für Gebäudeklimatisierung interessant sind [22]. Moderne Anlagen sind in der Lage mit Heißwassertemperaturen im Bereich von bis zu 70 $°C$ zu arbeiten [31].

Die vorherrschenden Drücke sind typischerweise subatmosphärisch und werden von den Stoffeigenschaften der Arbeitsmittel und den gewünschten Bedingungen gesteuert. Der Druck im Verdampfer und im Absorber resultiert somit aus der Verdampfertemperatur und der Druck im Generator und Kondensator aus der Kondensatortemperatur. Bei einer Temperatur von 5 $°C$, wie sie beispielsweise am Verdampfer vorliegen, hat Wasser einen Dampfdruck von $8,72$ $mbar$. Aus diesen niedrigen Drücken resultieren einige sehr entscheidende Bedingungen für das Design der Anlage. Diese sind unter anderem:

- große Behälter durch das spezifische Volumen des Dampfes
- hohe Anforderungen an die Dichtheit der Behälter
- empfindliches Verhalten auf die Anwesenheit nichtkondensierbarer Gase
- hydrostatische Effekte

Obwohl die vorherrschenden Drücke noch unter die Definition Grobvakuum fallen, muss die Dichtheit trotzdem gewährleistet werden, da der Eintritt von Luft einerseits den Wärme- und Stoffübergang beeinflusst und andererseits Korrosion begünstigt [23].

In Abbildung 5 ist im Dühring-Plot das Lösungsfeld von $H_2O/LiBr$ dargestellt, das auf der linken Seite noch um den zugehörigen Dampfdruck von Wasser bei der jeweiligen Gleichgewichtstemperatur erweitert wurde. Die blauen Linien stehen dabei für den Kältemittelkreislauf, wobei die strichlierten Linien für den dampfförmigen und die durchgzogenen für den flüssigen Zustand stehen. Die orangen und blauen Linien symbolisieren den Lösungskreislauf. Dieses Diagramm sollte bei der Auslegung einer $H_2O/LiBr$ Kältemaschine stets im Auge behalten werden, um nicht zu nahe an den Kristallisationsbereich zu gelangen [22].

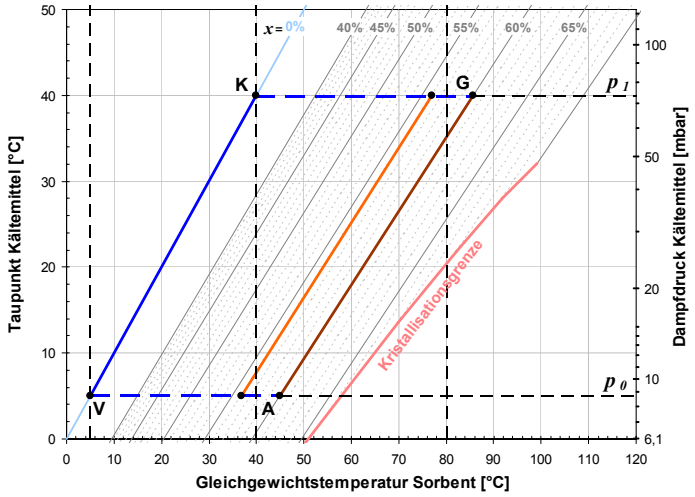


Abbildung 5: Erweiterter Dühring-Plot $H_2O/LiBr$, [22]

2.1.2. NH_3/H_2O Absorptionskältemaschine

Der Einsatz des Arbeitsmittelpaares NH_3/H_2O in AKMs – wobei NH_3 der leichter flüchtige Bestandteil ist und somit als Kältemittel dient – wirkt auf den ersten Blick sehr ähnlich wie mit $H_2O/LiBr$. Es sind jedoch einige Punkte zu beachten, die größtenteils auf die unterschiedlichen Stoffeigenschaften zurückzuführen sind. Aus gesundheitlicher und gefahrentechnicher Sicht ist dabei zu beachten, dass Ammoniak im Konzentrationsbereich von $16-25\%$-vol in der Umgebungsluft ein explosives Gemisch bildet [23] und als Grenzwert für die maximale Arbeitsplatzkonzentration ein Tagesmittelwert von 20 ppm und eine Kurzzeitbelastung von 50 ppm festgelegt ist [1]. Ammoniak riecht jedoch bereits ab einer sehr geringen Konzentration stark beißend, was als Schutzmechanismus dienlich ist und auch um Leckagen festzustellen. Aus materialtechnischer Sicht wirkt Ammoniak stark korrosiv auf Kupfer und Kupferlegierungen, weshalb bei NH_3/H_2O AKMs vorwiegend Baustahl bzw. Edelstahl eingesetzt wird, wobei bei ersterem Korrosionsschutzadditive notwendig sind. Diese werden in der Größenordnung von etwa 1% zugesetzt und sind meist Salze, welche schützende Oxidschichten auf der Metalloberfläche bilden. Aus dem Einsatz von Stahl bei den Wärmetauschern resultieren wesentliche Unterschiede in Konstruktion, da die Wärmeleitfähigkeit von Stahl etwa bei 1/10 derer von Kupfer liegt. Ammoniak weist relativ hohe Dampfdrücke auf, wodurch der Einfluss von nicht kondensierbaren Gasen im System keine so gravierende Auswirkungen auf den Wirkungsgrad hat, wie bei $LiBr$ Maschinen, jedoch empfiehlt es sich trotzdem diese im System möglichst zu vermeiden. Unter Normalbedingungen[2] hat Ammoniak einen Dampfdruck von $8,5$ bar und einen Siedepunkt von $-33,35$ $°C$ Im Vergleich zu Ammoniak ist der Dampfdruck von Wasser jedoch nicht vernachlässigbar, woraus ein weiterer signifikanter Unterschied zu $H_2O/LiBr$ Systemen entsteht. Der im Generator erzeugte Dampf enthält Wasserdampf in der Größenordnung von etwa 5%. Das im Dampf ent-

[2] 20 $°C$, $101,3$ kPa

haltene Wasser gelangt gemeinsam mit dem Ammonikdampf über den Kondensator in den Verdampfer, wo es sich folglich ansammelt, da es unter den Systembedingungen nicht verdampft werden kann. Es müsste somit kontinuierlich oder diskontinuierlich abgeführt und dem Absorber wieder zugeführt werden. Dadurch entstehen beträchtliche Verluste, da einerseits Wärme nötig ist um das Wasser im Generator zu verdampfen und andererseits keine Kühlleistung vom Wasser umgesetzt wird. Um dies zu vermeiden, ist bei NH_3/H_2O AKMs für einen effizienten Betrieb eine Rektifikationskolonne nach dem Generator notwendig, um möglichst reinen NH_3 Dampf zu erhalten. Eine weitere Einrichtung um den Nachteil von Wasser im Kältemitteldampf zu kompensieren, ist ein Kondensatvorkühler oder auch Kältemittelwärmetauscher genannt. Dieser ist zwischen Austritt am Kondensator und Austritt am Verdampfer geschaltet. Im Kältemittelwärmetauscher wird das Kondensat heruntergekühlt, was zu einer erhöhten Kühllast führt und das im Verdampferaustritt enthaltene Wasser verdampft [23].

In Abbildung 6 ist eine Rektifikationskolonne dargestellt, bei der im Punkt 1 der vom Absorber kommende Lösungsstrom eingespeist wird und im Gegenstrom zum aufsteigenden Dampf in den Generator gelangt. Der dort entstehende Dampf steigt in der Kolonne auf und passiert im Gegenstrom das vom Rücklaufkühler kommende Kondensat. Das Kondensat enthält im Vergleich zum Dampfstrom einen relativ hohen Wasseranteil, aber trotzdem einen wesentlich höheren Ammoniakanteil als die Lösung in Punkt 1. Daraus resultiert, dass das rückströmende Kondensat, Wasser aus dem Dampf aufnehmen kann. Der Wärme- und Massenaustausch des Dampfs mit dem Kondensat wird dabei durch die Verwendung von Packungsmaterial oder horizontalen Platten erhöht. Mit steigender Höhe in der Kolonne sinkt die Temperatur des Dampfs, wodurch bei gleichbleibendem Druck Wasser kondensieren muss. Die freiwerdende Kondensationswärme verdampft dabei einen Teil des Ammoniak im Kondensat, was zu fast reinem Ammoniakdampf führt [23].

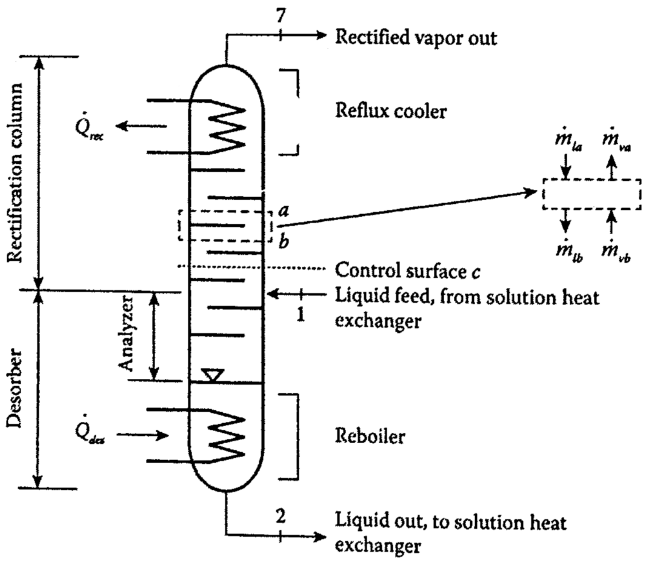


Abbildung 6: Rektifikationskolonne, [23]

2.1.3. $NH_3/H_2O/H_2$ Diffusionsabsorptionskältemaschine

Die Diffusionsabsorptionskältemaschine (DKM) wird, ebenso wie NH_3/H_2O-Anlagen, mit Ammoniak als Kältemittel und Wasser als Absorbent betrieben, jedoch beinhaltet sie als zusätzliche Komponente Wasserstoff als Hilfsgas. Obwohl eine Vielzahl an Kombinationen von Arbeitsmitteln möglich sind, ist die Kombination $NH_3/H_2O/H_2$ kommerziell am häufigsten verbreitet. Das besondere an dieser Maschine ist, dass sie ohne Zufuhr von mechanischer Arbeit funktioniert und somit auch ohne bewegliche Teile auskommt. Die Umwälzung der Lösung erfolgt dabei mittels einer Blasenpumpe welche rein durch Wärmezufuhr betrieben wird. Als Vorteil daraus ergibt sich, dass die DKM dadurch nahezu geräuschlos arbeiten kann. Aufgrund dieser beiden Eigenschaften bedient die DKM vor allem Nischenmärkte wie Hotelzimmerkühlschränke bzw. Minibars (Geräuschpegel) und Campingbusse (kein elektrischer Anschluss notwendig) [23].

Obwohl DKM's über Stunden ohne Probleme betrieben werden können, besteht der Nachteil dieser Bauart in den relativ kleinen erreichbaren Kühlleistungen, welche in einem Bereich von $200 - 400\ W$ bei einem COP von $0,2 - 0,25$ liegen [28].

In Abbildung 7 ist links das Schema und rechts der typische Aufbau einer DKM mit ihren wesentlichen Komponenten dargestellt. Diese sind der Generator/Blasenpumpe, Kondensator, Verdampfer, Lösungswärmetauscher, Gaswärmetauscher, Lösungsreservoir und der Absorber. Im Generator wird dem System die Antriebswärme zugeführt, wodurch sich in der Lösung Ammoniakdampfblasen bilden. Diese steigen auf und nehmen einen Teil der nun reicheren Lösung mit. Die reiche Lösung fließt in den Absorber über den Lösungswärmetauscher, wo sie von der armen Lösung abgekühlt wird. Der Ammoniakdampf steigt auf und gelangt in den Kondensator, in dem die Kondensationswärme an die Umgebung abgegeben wird und der Dampf verflüssigt wird. Das Kondensat fließt

weiter in den Verdampfer, der mit dem Hilfgas (Wasserstoff) gefüllt ist. Nach dem Gesetz von Dalton sinkt durch die Anwesenheit von H_2 der Partialdruck von Ammoniak nun ab, obwohl der Gesamtdruck im System gleich bleibt, und das Ammoniak verdampft. Die dazu benötigte Wärme stellt wiederum die zur Verfügung stehende Kühlleistung dar. Das H_2/NH_3 Gasgemisch sinkt aufgrund seiner höheren Dichte über den Gaswärmetauscher in den Absorber ab und gelangt im Gegenstrom zur reichen Lösung durch den Absorber über den Gaswärmetauscher wieder in den Verdampfer. Im Absorber wird von der reichen Lösung, das im Gas enthaltene Ammoniak wieder absorbiert. Die frei werdende Absorptionswärme wird in der Regel wieder an die Umgebung abgegeben. Dadurch, dass der Ammoniak-Anteil im Gas stetig abnimmt, nimmt auch die Dichte des Hilfsgases wieder ab. Diese Dichteunterschiede sind die treibenden Kräfte im Gaskreislauf der DKM. Im Gaswärmetauscher kann vom Verdampfer kommendes, nicht verdampftes Kondensat verdampft werden, wodurch die Temperatur des reinen Hilfsgases vor dem Verdampfereintritt gesenkt wird, was eine Wirkungsgradsteigerung bewirkt. Im rechten Teil von Abbildung 7 ist zu erkennen, dass der erste Teil des Kondensators noch Richtung Generator geneigt ist. Diese Maßnahme stellt den Rektifikator dar, in dem ein Teil des Dampfes bereits kondensiert und im Gegenstrom vom aufsteigenden Dampf Wasser aufnimmt, wodurch der Dampf, der in den Kondensator gelangt einen wesentlich höheren Ammoniakgehalt hat. Wird die im Rektifikator frei werdende Wärme zur Vorwärung der vom Absorber in den Generator fließenden reichen Lösung genutzt, lässt sich ebenfalls eine Steigerung des COP's erreichen [28].

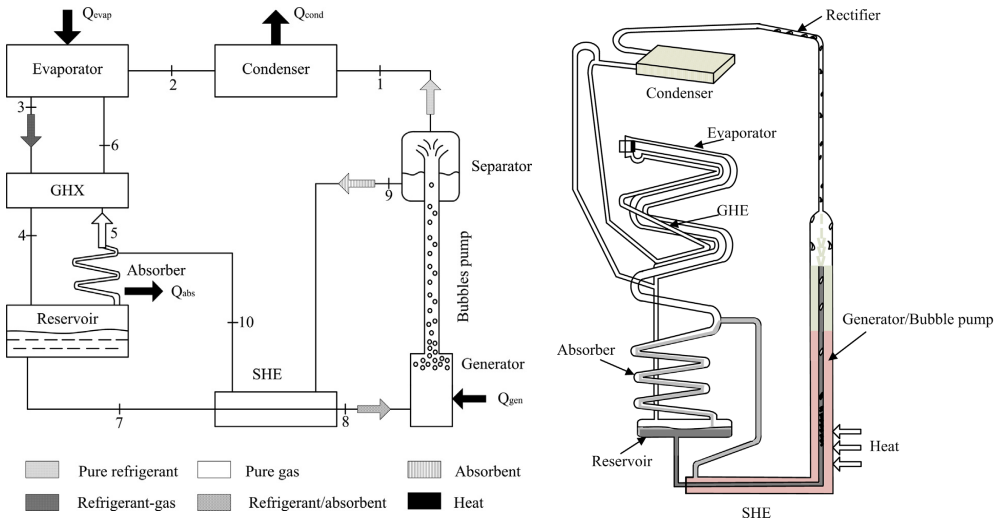


Abbildung 7: Schema und Aufbau Diffusionsabsorptionskältemaschine, [28]

3. Berechnung

Als Grundlage für die Konstruktion der AKM dient eine thermodynamische Auslegung mit den geforderten Parametern. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde die Berechnung sowohl für die Stoffpaarung *Wasser/Lithiumbromid* wie auch für *Ammoniak/Wasser* durchgeführt. Das Hauptaugenmerk wurde jedoch auf die $H_2O/LiBr$-AKM gelegt.

Das Buch *Absorption Chillers and Heat Pumps* [23] stellte sich bei der gesamten Konzeption der Anlage, aber vor allem bei der Berechnung, als äußert nützlich heraus und bietet viele Hilfestellungen für die Vorgehensweise und die Annahmen in der Berechnung sowie dem allgemeinen Verständnis der Abläufe in AKM's. Die Ansätze, die im Buch gezeigt wurden weitgehend übernommen und für geplante Anlage adaptiert und erweitert.

Die Berechnung der AKM wurde mit Hilfe des Programms *EES - Engineering Equation Solver* gelöst. EES ist ein Gleichungssolver, der je nach verwendeter Version bis zu 24.000 miteinander verknüpfte, nichtlineare algebraische und differentielle Gleichungen lösen kann. Weiters kann es zum Lösen von Differential- und Integralgleichungen genutzt werden, für Optimierungsaufgaben, für Unsicherheitsanalysen, zum Durchführen von linearer und nicht linearer Regression, zum Umrechnen von Einheiten und zur Kontrolle derer Konsistenz. Mit EES können des weiteren Plots in Publikationsqualität erzeugt werden. Ein wesentlicher Bestandteil des Programms sind jedoch die hinterlegten thermodynamischen Stoffwertdatenbanken, welche direkt in die Berechnung integriert werden können und Stoffwerte mit einer sehr hohen Genauigkeit wiedergeben [5].

Verwendete Stoffwert-Datenbanken

Zur Berechnung der Stoffwerte der wässrigen Lithiumbromidlösung sind in EES drei verschiedene Datenbanken verfügbar.

- LiBr.DLL

  Diese Datenbank beruht auf den Stoffwertfunktionen in ASHRAE [13] und wird nicht mehr empfohlen, da bereits neuere, exaktere Datenbanken in EES zur Verfügung stehen. Die Datenbank wird nur noch aus Gründen der Rückwärtskompatibilität für ältere Programme angeboten.

- LiBrH2O.LIB Das zweite Paket beruht auf den Erkenntnissen von Pàtek und Klomfar [27] und beinhaltet zusätzlich Funktionen für die Viskosität nach Lee et al. [26] und die thermische Leitfähigkeit nach [19].

- LiBrSSC.DLL Das Paket *LiBrSSC.DLL* wurde von Yuan und Herold [34] [33] entwickelt.

Für die Berechnung wurde das dritte Paket *LiBrSSC.DLL* herangezogen.
Die Stoffwerte von Ammoniak wurden mithilfe der Datenbank *NH3H2O* ermittelt welche auf den Berechnungen von Ibrahim und Klein [24] beruhen.

3.1. Berechnung $H_2O/LiBr$

Der vollständige EES-Code, dem die Berechnung zugrunde liegt, ist in Anhang A.1 ersichtlich. Der Code wurde zwar großzügig mit Kommentaren versehen, für ein besseres Verständnis sind jedoch einige der wesentlichen Ansätze im folgenden Abschnitt beschrieben.

In Abbildung 8 ist das *Diagram Window* der EES Berechnung zu sehen. Darin sind die Hauptkomponenten der AKM schematisch dargestellt und die wesentlichten Eckdaten gegeben.

Als Eingangsparameter sind eine Heizleistung von 2 kW gegeben und eine Heißwassereingangstemperatur von 100 $°C$. Bei kommerziellen Kälteanlagen sind die benötigte Kühlleistung und die Heiß-, Kühl und Kaltwassertemperaturen i.d.R. die ausschlaggebenden Parameter für die Auslegung. Da es sich hierbei jedoch, wie eingangs erwähnt, um eine Anlage für den Laborunterricht handelt, sind die Kühl- und Kaltwasserparameter frei einstellbar, jedoch sollte die notwendige Heizleistung begrenzt sein, um die Dimension des Wärmeerzeugers möglichst klein zu halten.

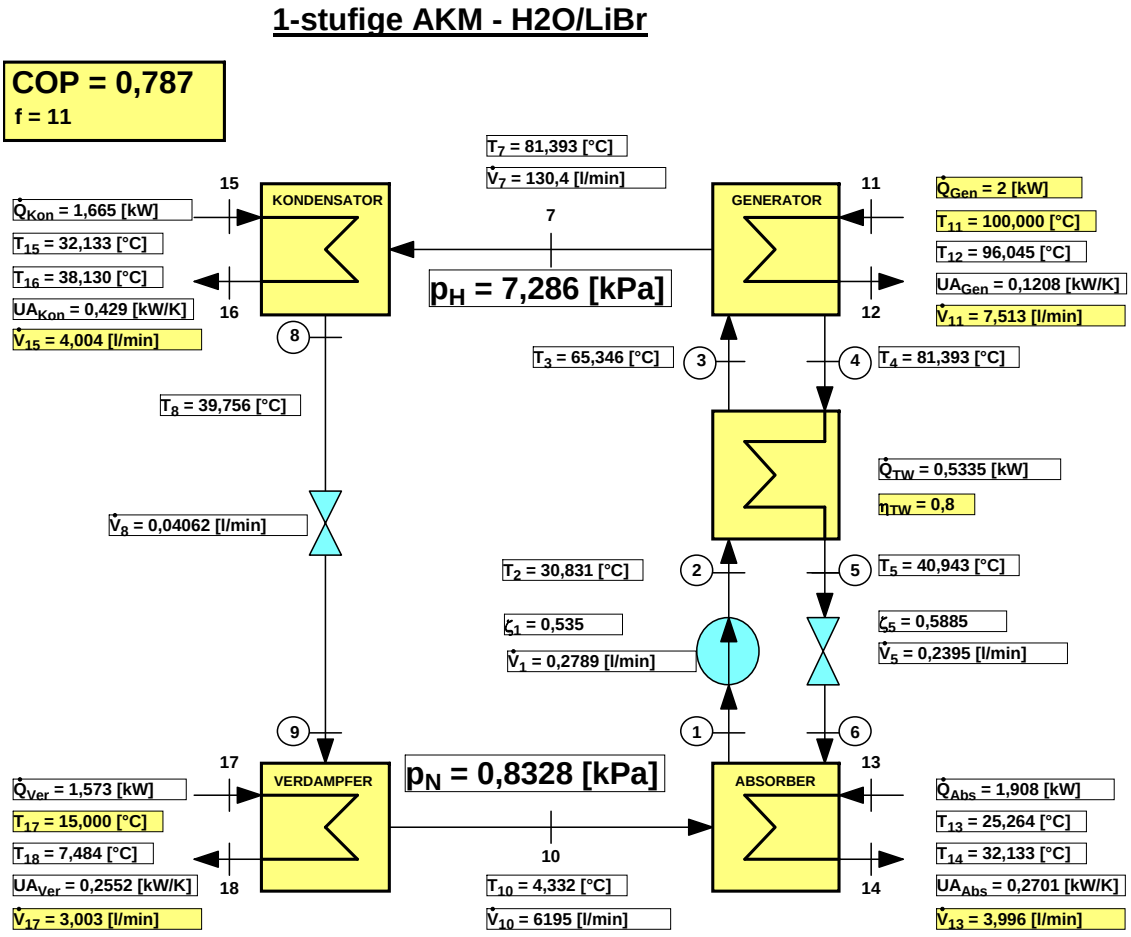


Abbildung 8: *Diagram Window* EES Berechnung $H_2O/LiBr$

Annahmen im Berechnungsmodell:

- Die Anlage als Ganzes ist adiabat und somit wird sämtlicher Wärmeaustausch mit der Umgebung vernachlässigt.
- Die Drosselventile im Lösungs- und Kältemittelkreislauf arbeiten isenthalp.
- Der Pumpenwirkungsgrad wurde mit $\eta_p = 1$ angenommen.
- Der Wirkungsgrad im Temperaturwechsler wurde mit $\eta_{TW} = 0,8$ angenommen.

Vorab wurden die einzelnen thermodynamischen Zustände definiert. Die Annahme, dass es sich an den Auslässen der Komponenten jeweils um einen gesättigten Zustand handelt, wurden der Einfachheit halber für das Berechnungsmodell gemacht. In Wirklichkeit muss jedoch immer ein treibendes Potential vorhanden sein, damit Wärmeübertragung stattfinden kann. So ist davon auszugehen, dass die flüssigen Zustände etwas

unterkühlt und die dampfförmigen ein wenig überhitzt sind. Um diese realen Zustände mit einzuberechnen, bedarf es jedoch zusätzlicher Daten und die Komplexität der Berechnung wird dadurch erhöht. In [23] wurde der Zustand 7, zwischen Generator und Kondensator als überhitzter Dampf beschrieben. Dadurch ist davon auszugehen, dass in der Berechnung ein Rieselfilmgenerator vorausgesetzt ist. In dieser Arbeit wird jedoch ein überfluteter Generator verwendet, wodurch der Kältemitteldampf maximal die Sättigungstemperatur der Lösung erreichen kann [22]. Der Unterschied zwischen Rieselfilm und überflutetem Generator wird in Abschnitt 4.2.1 noch näher beschrieben.

Tabelle 1: Annahmen für thermodynamische Zustände vgl. [23]

Punkt	**Zustand**	**Anmerkung**
1	flüssig gesättigte Lösung	Annahme
2	unterkühlte Lösung	ergibt sich aus dem isentropen Pumpenmodell
3	unterkühlte Lösung	ergibt sich aus Temperaturwechsler
4	gesättigte Lösung	Annahme, weil Behältersieden vorliegt
5	unterkühlte Lösung	ergibt sich aus Temperaturwechsler
6	Nassdampf/flüssig	je nach Wirkungsgrad im Wärmetauscher
7	Wasserdampf gesättigt	reiner Wasserdampf, gesättigt wegen Behältersieden
8	Wasser gesättigt	real etwas unterkühlt
9	Nassdampf	folgt aus Annahme 8
10	Wasserdampf gesättigt	real etwas überhitzt

Für die Berechnung der Wärmetauscher wurde das UA-Modell verwendet. Dabei ist der UA-Wert das Produkt aus Wärmedurchgangskoeffizient U $[\frac{W}{m^2K}]$ und Wärmetauscherfläche A $[m^2]$ und hat daher die Einheit $[\frac{W}{K}]$. Gemeinsam mit der mittleren logarithmischen Tempertuardifferenz ΔT_{lm} ergibt sich somit:

$$\dot{Q} = \Delta T_{lm} * UA \tag{1}$$

Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz berechnet sich dabei wie folgt, wobei die Indizes k das kalte Medium, h das heiße Medium und 1 und 2 das jeweilige Ende des Wärmetauschers kennzeichnen:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,1} - T_{k,1}) - (T_{h,2} - T_{k,2})}{ln\frac{T_{h,1} - T_{k,1}}{T_{h,2} - T_{k,2}}} \tag{2}$$

Dieses Modell bietet eine praktische Möglichkeit um die Wärmetauscher in erster Näherung zu dimensionieren. Jedoch setzt es voraus, dass die UA-Werte Konstanten sind, wobei die Realität natürlich wesentlich komplexer ist, da der Wärmedurchgangskoeffizient von Variablen wie z.B. den vorliegenden Strömungsverhältnissen abhängig ist. Ein weiteres Problem ergibt sich aus der Definition der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz, da es bei dieser, falls sich die Temperaturen nicht in einem vorgesehenen

Bereich bewegen, zu Singularitäten kommen kann. Dies kann vor allem bei Iterationsprozessen, wie sie in dem Berechnungsmodell nötig sind, zum Abbruch führen, bevor Lösungen gefunden werden [23].

Um diesen Problemen entgegenzuwirken wurde eine *Function* benutzt, die den Abbruch der Iteration aufgrund einer Singularität unterbindet. Diese hat die Form einer If-Funktion:

```
Function tlm(T1;T2;T3;T4)
Tgr=T1-T2
Tkl=T3-T4
if(Tgr=Tkl) Then tlm=Tgr
Else
if(Tgr<0) or (Tkl<0) Then tlm=0
Else tlm=(Tgr-Tkl)/ln(Tgr/Tkl)
Endif
Endif
End
```

Als Eingabewerte werden die Temperaturen in der Reihenfolge wie in Gleichung 2 eingegeben und die *Function* kontrolliert, ob der Temeperaturunterscheid am Eingang gleich jenem am Ausgang entspricht, in diesem Fall wäre $T_{lm} = T_{h,1} - T_{k,1}$ und, ob eine der beiden Temperaturdifferenzen negativ ist, dies führt zu $T_{lm} = 0$ führen. Ansonsten wird T_{lm} nach Gleichung 2 berechnet.

Für den Wärmedurchgangskoeffizient sind neben den Geometrien der Wärmetauscher gemeinsam mit der Wärmeleitfähigkeit λ der Wärmeübergangskoeffizient α an der Innensowie an der Außenseite der Wärmetauscherrohre verantwortlich. Die Wärmeleitfähigkeit kann sehr verlässlich anhand der Materialeigenschaften der Wärmetauscher berechnet werden [30], wobei EES hierfür ebenfalls über Stoffwertdatenbanken verfügt, durch welche sich die Wärmeleitfähigkeit für ausgewählte Materialien abhängig von der Temperatur berechnen lässt.

Schwieriger zu bestimmen sind dabei die Wärmeübergangskoeffizienten. Die inneren Wärmeübergangskoeffizienten wurden laut VDI-Wärmeatlas [30] berechnet, wie in Anhang A.1 zu sehen und beschrieben ist. Da die Wärmetauscher allesamt nur sehr geringe Leistungen übertragen, aber trotzdem eine gewisse Mindestbaugröße wünschenswert ist, resultieren relativ geringe Wärmestromdichten und auch Strömungsgeschwindigkeiten im Inneren der Rohre. Um bei einer Variation der Massenströme die korrekte Strömungsform miteinzuberechnen, wurde deshalb wiederum eine *Function* eingeführt, um die Nusseltzahl in Abhängigkeit der jeweils vorhandenen Reynoldszahl zu berechnen, wobei sie dabei zwischen folgenden Bereichen unterscheidet:

- laminar: $Re < 2300$
- Übergangsbereich: $2300 < Re < 10000$
- turbulent: $Re > 10000$

Zur Bestimmung der äußeren Wärmeübergangskoeffizienten wurde unterschiedliche Literatur herangezogen, welche sich teils speziell mit den Eigenschaften von wässriger Lithiumbromidlösung im subatmosphärischen Druckbereich beschäftigt. In *Behältersieden von wässriger Lithiumbromidlösung* [22] konnte für den Generator bei einer Wärmestromdichte von $\dot{q} = 18\ \frac{kW}{m^2}$ ein Wärmeübergangskoeffizient von $\alpha_{Gen} = 1200\ \frac{W}{m^2K}$ für überflutete Generatoren mit zwei übereinanderliegenden Rohrlagen abgelesen werden. Am Kondensator wurde $\alpha_{Kon} = 3492\ \frac{W}{m^2K}$ nach VDI-*J1 Filmkondensation reiner Dämpfe* [30] berechnet, wie in Anhang A.1 zu sehen ist. Für den Absorber wurde in Wohlfeil [32] ein Wert von $\alpha_{Abs} = 2000\ \frac{W}{m^2K}$ gefunden und für den Verdampfer mit $\alpha_{Ver} = 4000\ \frac{W}{m^2K}$ ein passender Wert aus Cerbe [17] herangezogen, da für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten beim Verdampfen an der Außenseite von Rohren in der Literatur keine passende Methode gefunden wurde, sondern lediglich für das Verdampfen innerhalb der Rohre.

Abschließend zeigen folgenden Abbildungen die Plots der Temperaturverläufe an den jeweilgen Wärmetauschern. Dazu ist jeweils gegeben, mit welchen Temperaturen die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz T_{lm} berechnet wurde. Sämtliche Energie- und Massenbilanzen sind in Anhang A.1 angeführt und kommentiert.

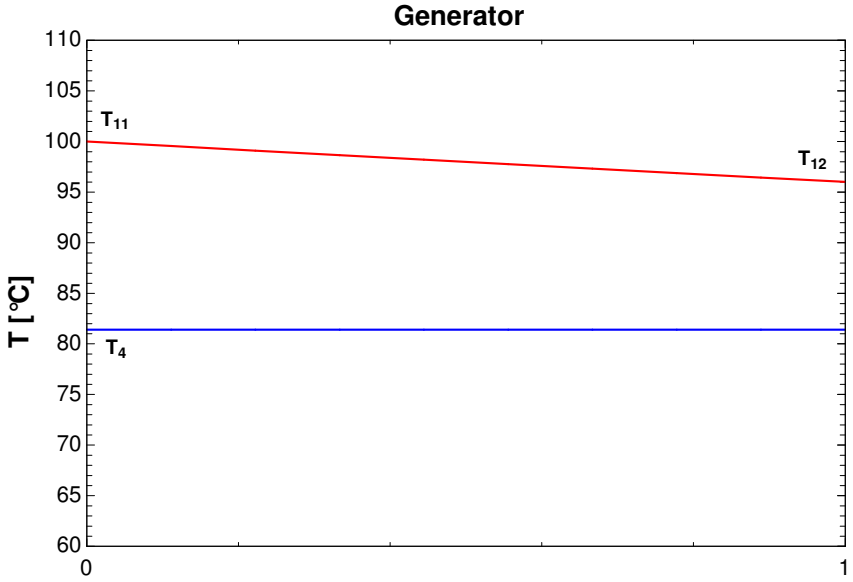


Abbildung 9: Temperaturverlauf Generator

$$\Delta T_{lm,Gen} = \frac{(T_{11} - T_4) - (T_{12} - T_4)}{ln\frac{T_{11} - T_4}{T_{12} - T_4}}$$

Im überfluteten Generator kann prozessseitig nur die Temperatur der siedenden Flüssigkeit herangezogen werden, dieser Sachverhalt wird in Abschnitt 4.2.1 noch genauer beschrieben.

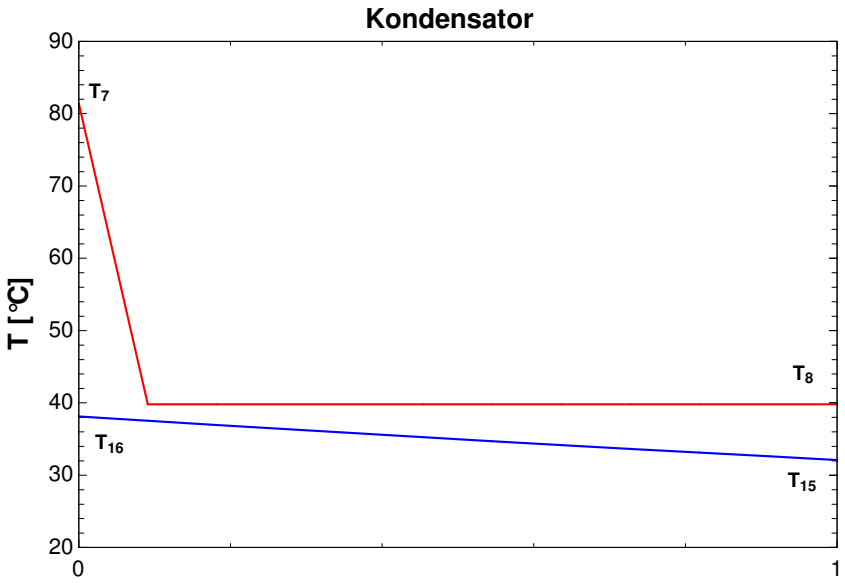


Abbildung 10: Temperaturverlauf Kondensator

$$\Delta T_{lm,Kon} = \frac{(T_8 - T_{15}) - (T_8 - T_{16})}{ln\frac{T_8 - T_{15}}{T_8 - T_{16}}}$$

Hierbei ist anzumerken, dass die Temperatur T_7 mit der der Kältemitteldampf vom Generator kommt, nicht in die Berechnung der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz einbezogen wird, da der sensible Anteil nur etwa 3% der gesamten Kondensatorleistung beträgt [30].

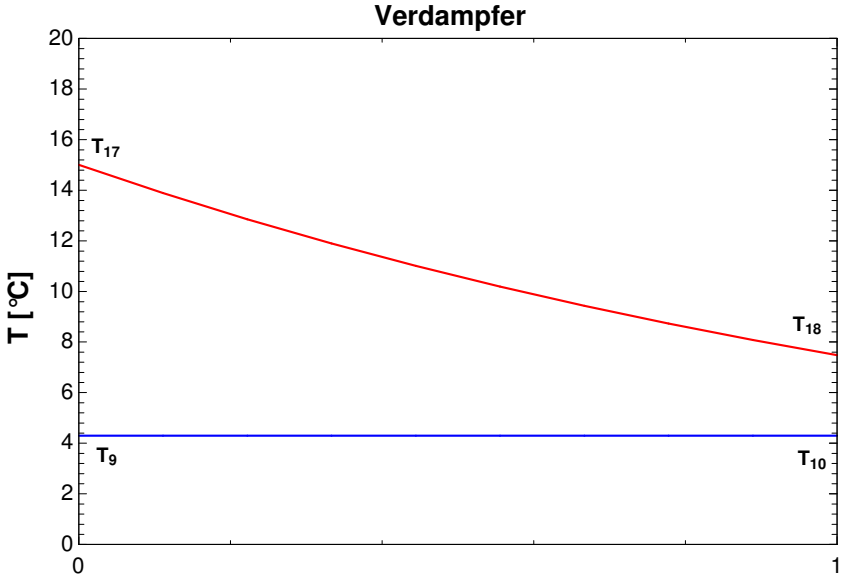


Abbildung 11: Temperaturverlauf Verdampfer

$$\Delta T_{lm,Ver} = \frac{(T_{17} - T_{10}) - (T_{18} - T_{10})}{ln\frac{T_{17} - T_{10}}{T_{18} - T_{10}}}$$

Da der Dampf über die Kältemitteldrossel bereits ins Nassdampfgebiet enstpannt wird, hat er die gleiche Temperatur wie der gesättigte Dampf nach dem Verdampfer, weshalb für die Gleichung $\Delta T_{lm,Ver}$, T_{10} anstatt T_9 eingesetzt wurde.

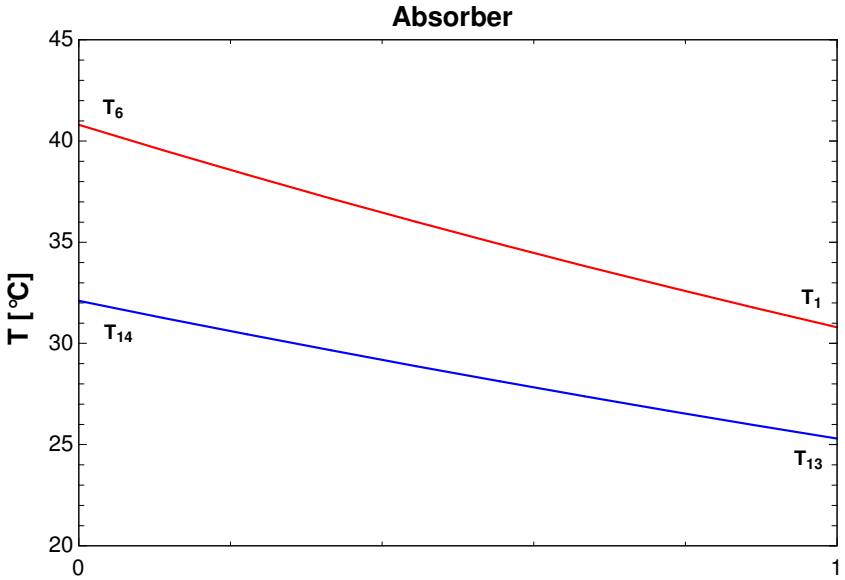


Abbildung 12: Temperaturverlauf Absorber

$$\Delta T_{lm,Abs} = \frac{(T_6 - T_{14}) - (T_1 - T_{13})}{ln\frac{T_6 - T_{14}}{T_1 - T_{13}}}$$

Der Absorber wird im Gegenstrom zur eintretenden Lösung durchflossen, woraus sich obige Gleichung für die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz ergibt.

3.2. Berechnung NH_3/H_2O

Im Anschluss ist wiederum das *Diagram Window* eines beispielhaften NH_3/H_2O-Kreislaufes dargestellt, der mittels EES berechnet wurde. Der Einfachheit halber wurden für diese Berechnung die selben UA-Werte herangezogen, wie sie für die Berechnung der $H_2O/LiBr$-Anlage verwendet wurden. Ein Unterschied ist die bereits erwähnte Rektifikationskolonne, die in die Berechnung eingezogen wurde und zusätzliche Kühlung benötigt. Es ist in Abbildung 13 gut zu erkennen, auf welchen Druckniveaus NH_3/H_2O-Anlagen arbeiten. Der zugrunde liegende EES-Code ist in Anhang A.2 einzusehen.

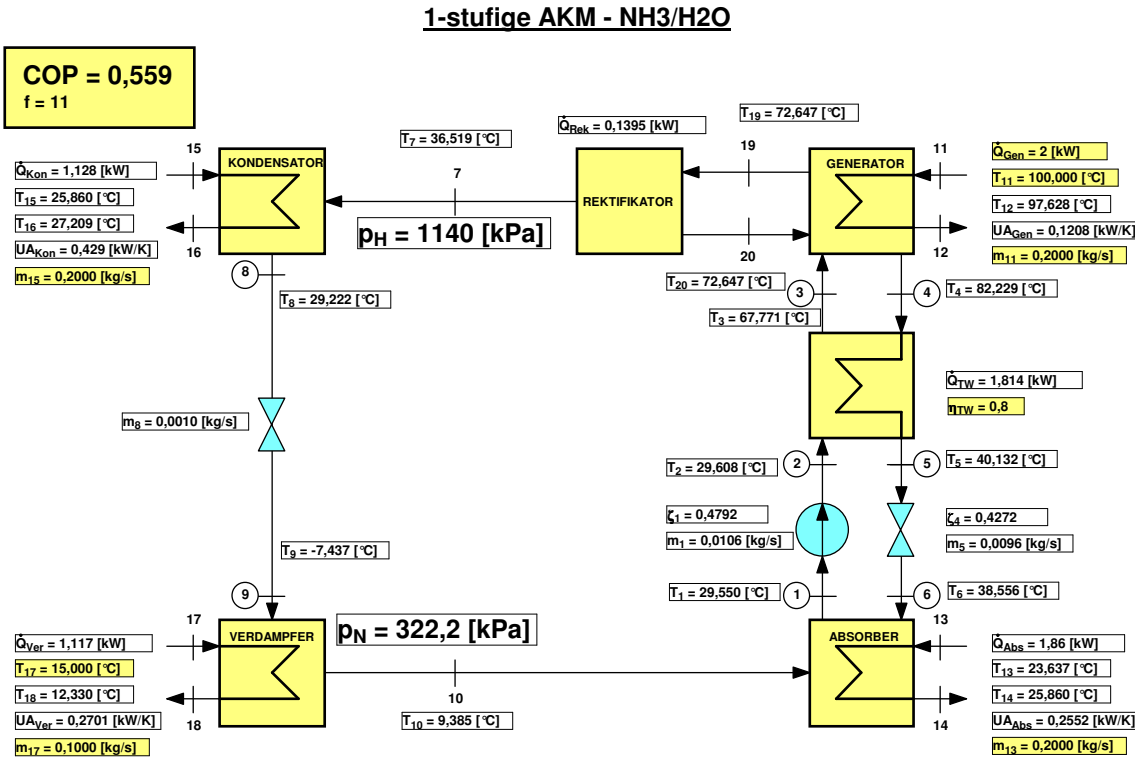


Abbildung 13: Diagram Window EES Berechnung NH_3/H_2O

4. Konstruktion und Auswahl der Komponenten

In den folgenden Abschnitten sind die ausgewählten Materialien, Zukaufteile und Baugruppen angeführt, und erklärt auf welcher Grundlage die Komponenten ausgewählt wurden. Abbildung 14 zeigt die Absorptionskältemaschine, wie sie im aufgebauten Zustand aussehen soll.

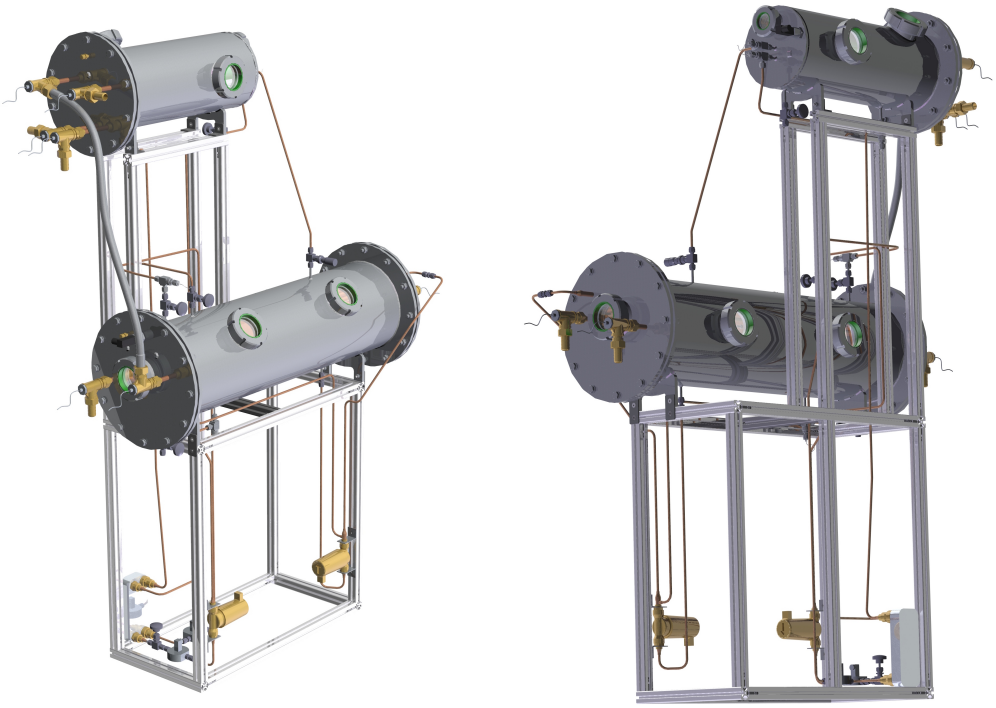


Abbildung 14: Aufbau Absorptionskältemaschine

4.1. Behälter

Die Materialwahl für die Druckbehälter und jene Teile, die sich im direkten Kontakt mit der Lösung befinden, fiel auf nichtrostenden Stahl (Ws.Nr.: 1.4301). Dieser weist in Verbindung mit wässriger Lithiumbromidlösung eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit im Vergleich zu gewöhnlichem Baustahl auf [16]. Zwar wird in herkömmlichen AKMs's Baustahl als Behältermaterial eingesetzt, welcher unter der Voraussetzung, dass sich keine Luft – vor allem Sauerstoff - im System befindet, ausreichend Korrosionsbeständig ist [23]. Jedoch ist davon auszugehen, dass kommerzielle Anlagen den hohen Anforderungen an Dichtheit genügen und nur selten geöffnet werden. Zusätzlich würde sich bei größeren Anlagen der merkliche Preisunterschied von ca. 1/4 von Baustahl zu Edelstahl deutlich auf die Anlagenkosten auswirken. Bei der geplanten Laboranlage sind jedoch die Preisunterschiede vertretbar, da die benötigte Materialmenge überschaubar ist. Ein weiteres Argument für die Wahl von Edelstahl ist, dass bei den niedrigen

vorherschenden Lösungsmassenströmen selbst geringe Mengen an Korrosionsprodukten zu Verstopfungen oder Ablagerungen führen könnten. Gerade im Hinblick dessen, dass die Anlage in der ersten Phase der Inbetriebnahme eventuell mehrmals geöffnet werden muss, könnte es daher zu vermehrter Korrosion bei der Verwendung von Baustahl kommen.

Die Abmessungen der Behälter ergaben sich in erster Linie durch die benötigte Größe der Wärmetauscher. Aus den unterschiedlich hohen Drücken im Generator/Kondensator-Behälter und Absorber/Verdampfer-Behälter ergeben sich die spezifischen Dampfvolumina, woraus der Größenuntschied der beiden Behälter resultiert. In Anhang A.3 wurde der Absorber/Verdampfer-Behälter nachgerechnet, um sicher zu gehen, dass er die Belastungen durch den Außendruck standhält. Die Abbildungen 15 und 16 zeigen die beiden Behälter von außen und mit Einblick in ihr Innenleben.

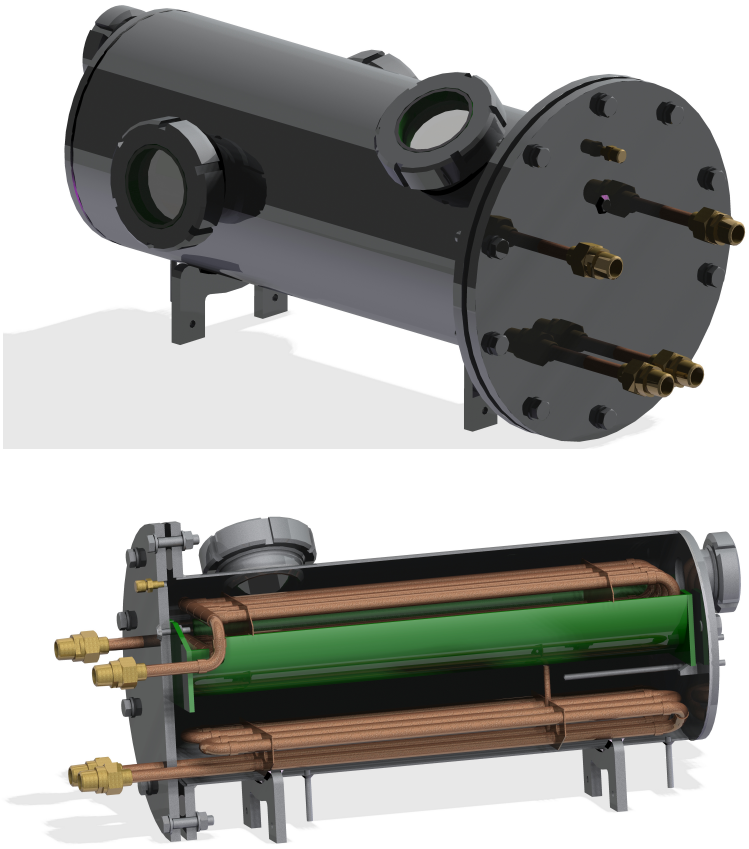


Abbildung 15: Behälter Generator und Kondensator

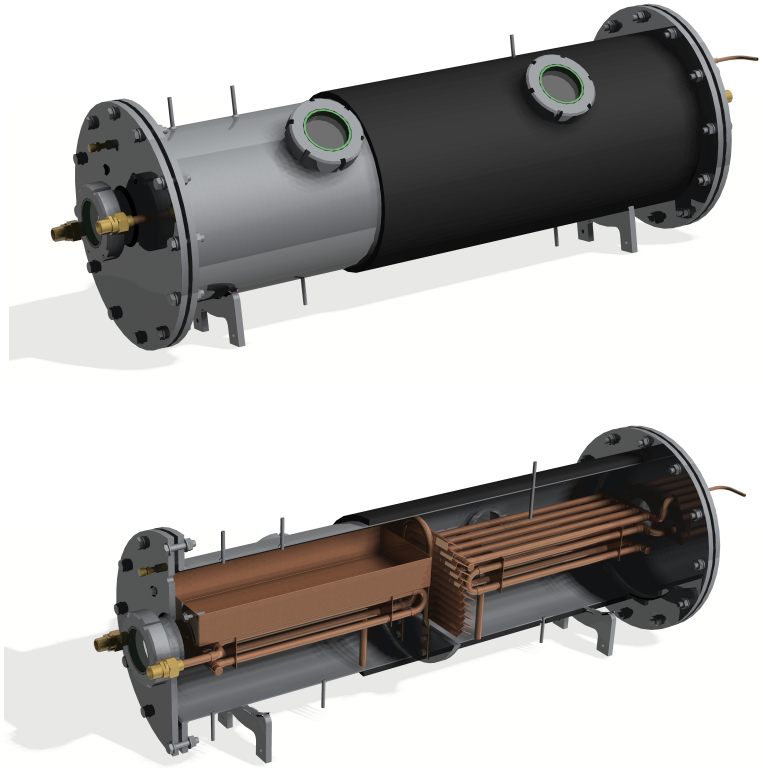


Abbildung 16: Behälter Absorber und Verdampfer

4.2. Wärmetauscher

Sämtliche Wärmetauscher sind mit Kupferrohren der Dimenson ø12 x 6 mm ausgeführt und mit Lötfittingen verbunden, wie sie in der Heizungs- und Klimatechnik als Standardteile erhältlich sind. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass kompakte Wärmetauscher ohne großen Aufwand an Biegearbeiten mit entsprechender Genauigkeit gefertigt werden können.

4.2.1. Generator

Der Generator kann bei einer AKM entweder als Rieselfilm- oder als überfluteter Wärmetauscher ausgeführt werden. Die Wahl fiel auf die Ausführung mit überflutetem Generator, da für diesen ein unter Umständen aufwendiges Berieselungssystem wegfällt, dass die Anlagenkosten und den Fertigungsaufwand in jedem Fall gesteigert hätte. Abbildung 17 zeigt schematisch die Gegenüberstellung eines überfluteten Generators zu einem Rieselfilmgenerator.

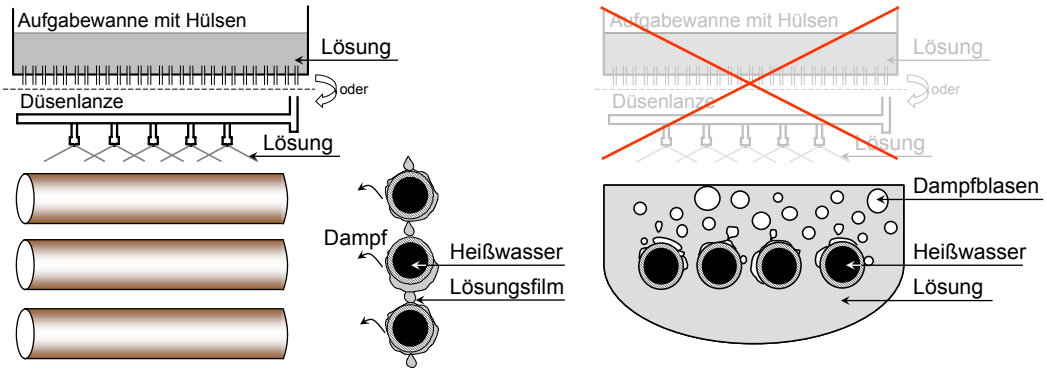


Abbildung 17: Gegenüberstellung Rieselfilm und überfluteter Absorber, [22]

Beim Rieselfilmgenerator auf der linken Seite sind zwei Varianten der Berieselung dargestellt. Zum einen eine Aufgabewanne mit Kapillarröhrchen, welche für eine zufriedenstellende Verteilung der Lösung sehr vielzählig und exakt positioniert werden müssen und auf der rechten Seite die Ausführung mittels Sprühdüsen, welche einen Vordruck von einigen hundert *mbar* benötigen um ein entsprechenes Sprühbild zu erhalten. Dies wirkt sich im beiden Fällen auf den Fertigungsaufwand aus. Im zweiten Fall auf die Dimension der Lösungspumpe und damit einer Erhöhung des Energiebedarfs. Zusätzlich kann es bei beiden Systemen, aufgrund der kleinen Dimensionen der Düsen und Kapillarröhrchen, zu Verstopfungen kommen.

Bei der Auswahl eines der beiden Systeme sind zudem auch unterschiedliche thermodynamische Rahmenbedingugnen zu beachten. Der Rieselfilmgenerator wird im Gegenstrom zur aufgetröpfelten Lösung durchströmt, wodurch eine prozesseitige Temperaturspreizung von Eingangstemperatur zur Ausgangstemperatur genutzt werden kann. Die Temperaturspreizung kann dabei sogar mit jener des Heißwassers überlappen, was dazu führt, dass bei der Ausführung als Rieselfilm bereits sehr niedrige Antriebstemperaturen genutzt werden können. Bei der überfluteten Ausführung kann der Temperaturunterschied, der eintretenden Lösung zur Heißwassertemperatur nicht genutzt werden. Da die eintretende Menge im Vergleich zur im Pool vorliegenden Menge sehr gering ist und eine gute Durchmischung des Pools durch das Auftreten von Blasensieden gegeben ist, vermischt sich diese sofort beim Eintritt, somit kann zur Wärmeentkopplung nur die Temperaturdifferenz des Heißwassers zur Temperaur des Lösungspools genutzt werden, welche durch die Siedetemperatur beim Austrittszustand gegeben ist. Daraus resultiert, unter der Beibehaltung der prozesseitigen Temperaturen, eine höher notwendige Heißwassertemperatur. Abbildung 18 veranschaulicht diesen Sachverhalt recht deutlich [22].

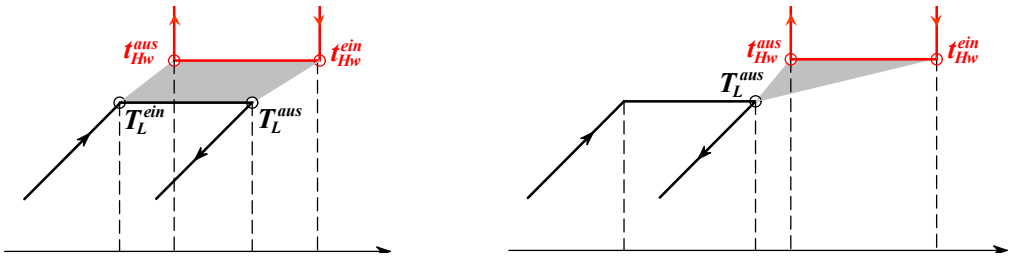


Abbildung 18: Temperaturniveaus bei Rieselfilm- und überflutetem Generator, [22]

Dem Nachteil der überfluteten Ausführung steht jedoch der Vorteil eines besseren Wärmeübergangs gegnüber. Beim Rieselfilm liegt Oberflächensieden vor und der Wärmeübergangskoeffizient bestimmt sich weitgehend durch Wärmeleitung durch den Lösungsfilm, welcher aufgrund der niedrigen Reynoldszahlen und der dünnen Filmdicken laminar ist, was sich negativ auf den Wärmeübergangskoeffizient auswirkt. Setzt man beim überfluteten Generator eine entsprechende Temperaturdifferenz voraus, kann durch das Auftreten von Blasensieden ein deutlich höherer Wärmeübergangskoeffizient als beim Oberflächensieden erreicht werden. Zusätzlich begünstigen bei dieser Ausführung aufsteigende Dampfblasen eine turbulente Zweiphasenströmung im Lösungspool, welche sich ebenfalls positiv auf die Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten auswirkt. Durch die Flüssigkeitssäule über den Generatorrohren muss jedoch lokal mit einer höheren Siedetemperatur gerechnet werden, was bei der Auslegung von Generatoren berücksichtigt werden muss [22].

Das folgende rechnerische Überlegung liefert etwa eine Abschätzung, in wie weit sich die Siedetemperatur mit der Flüssigkeitssäule ändert. Abbildung 19 zeigt dabei den Querschnitt des Generators wie er in dieser Arbeit ausgeführt wurde, in dem eine Füllhöhe von 45 mm über der Unterseite der untersten Rohrlage angenommen wird.

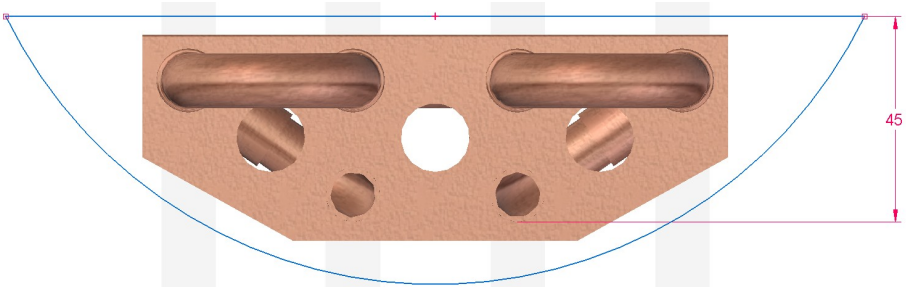


Abbildung 19: Erhöhung der Siedetemperatur durch Flüssigkeitssäule

Mit Hilfe von *EES* wurde anhand der Zustandsdaten im Lösungspool die Änderung der Siedetemperatur durch die Flüssigkeitssäule errechnet.

$h_{Fl} = 0,045\ m$	Höhe der Flüssigkeitssäule
$\rho_L = 1.658\ \frac{kg}{m^3}$	Dichte der Lösung
$zeta_L = 0,5885$	LiBr-Gehalt der Lösung

$p_{FL} = \rho_L * g * h_{FL} = 0,7317\ kPa$	Druckerhöhung durch die Flüssigkeitssäule
$T_{Siede,alt} = 81,4\ °C$	Siedetemperatur an der Oberfläche
$T_{Siede,neu} = 83,5\ °C$	Siedetemperatur an der Rohrunterseite

Durch die geringen Abmessungen des Generators ergibt sich eine Temperaturerhöhung von lediglich $2,4\ °C$ was bei der Auslegung des Generators in diesem Fall vernachlässigt wurde. Bei größeren Ausführungen, insbesondere, wenn die Rohre in mehreren Lagen übereinander liegen, muss diesem Umstand jedoch Rechnung getragen werden, da er sich auf die zu Verfügung stehende treibende Temperaturdifferenz auswirkt und somit eine höhere notwendige Eingangstemperatur des Heißwassers bewirkt [22]. Abbildung 20 zeigt das 3D-Modell des Generators.

Abbildung 20: Abbildung Generator

4.2.2. Kondensator

Der Kondensator befindet sich im gleichen Behälter wie der Generator und ist über dem Lösungspool angeordnet. Das anfallende Kondensat wird im Kondensatbecken gesammelt und zum Verdampfer weitergeleitet. Die Dichtung gegenüber dem Behälter erfolgt wie in Abbildung 21 dargestellt, mittels einer Gummidichtung, welche über das Kondensatbecken an die hintere Behälterwand gepresst wird. Das Kondensatbecken ist aus Polypropylen gefertigt, da das Rohr einerseits günstig im Baumarkt erhältlich und laut Herstellerangaben für Temperaturen bis 90 $°C$ einsetzbar ist. Weiters hat der Einsatz eines Kunststoffrohres den Vorteil, dass das Kondensat gegenüber dem von unten kommenden Dampf besser isoliert ist, als bei dem Einsatz einer Blechwanne. In Abbildung 21 ist der Aufbau das 3D-Modell des Kondensators mit der Kondensatwanne dargestellt.

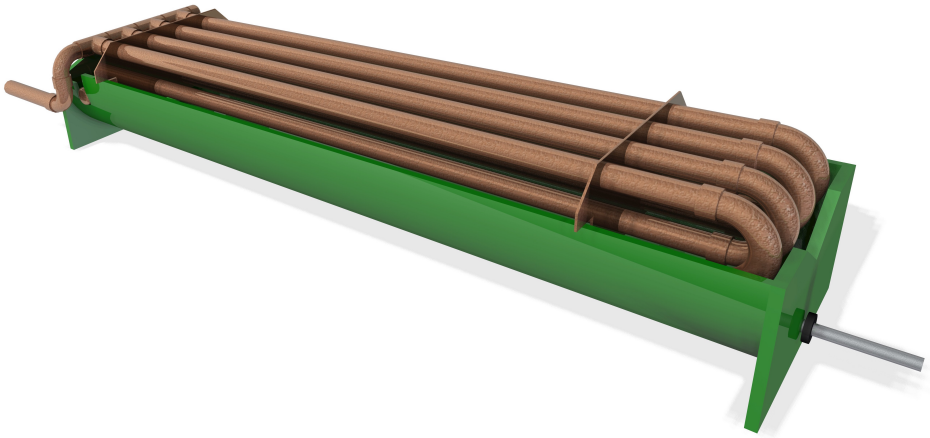


Abbildung 21: Abbildung Kondensator

4.2.3. Verdampfer

Für den Verdampfer ist es notwendig, das nicht verdampfte Kältemittel aus dem Sumpf zu rezyklieren und wieder am Verdampferkopf einzubringen. Um eine aufwendige Installation von zwei Verteilsystemen für das Kältemittel zu vermeiden, wurde nur für den Rezyklierkreislauf ein Berieselungssystem vorgesehen, das vom Kondensator kommende Kältemittel troft direkt in den Verdampfersumpf. Die Aufgabe erfolgt dabei über eine Rohrlage, welche wiederum über Kupferfittinge miteinander verbunden ist und aus Rohren besteht, welche über ihre Länge mit jeweils 75 Bohrungen des Durchmessers ø1 mm versehen sind, um das Kältemittel gleichmäßig über den Verdampferrohren zu verteilen. Dabei sollte versucht werden die Durchflussmenge so einzustellen, dass eine möglichst gute Benetzung des Verdampfers erreicht wird. Die Ausführung ist in Abbildung 22 dargestellt.

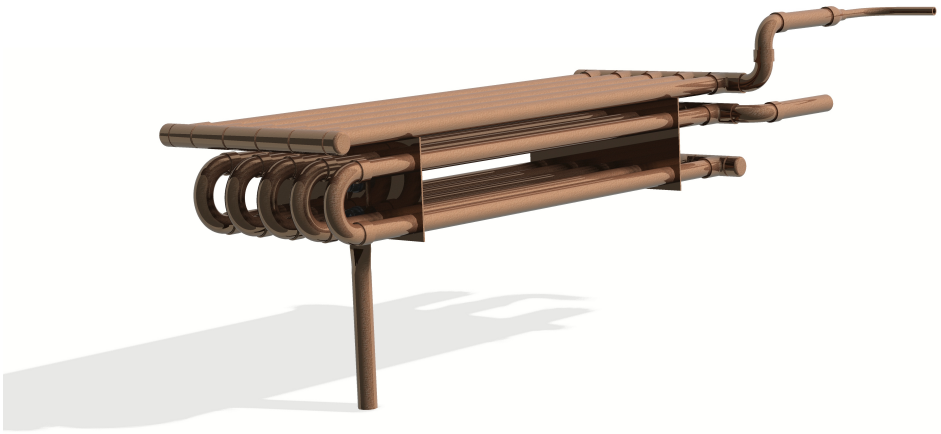


Abbildung 22: Abbildung Verdampfer

4.2.4. Absorber

Die Aufgabe der armen Lösung auf den Absorber erfolgt über eine Aufgabewanne, deren Boden mit fünf Reihen von Sicken versehen ist, welche jeweils in einem Abstand von 14 mm entlang der Absorberrohre angeordnet sind. Die Sicken werden dabei mit Bohrung des Durchmessers ø1 mm versehen. Die Wanne wird aus Kupferblech mit einer Stärke von $0,6$ mm gefertigt.

Für den Absorber empfiehlt Beutler [15] die Rohre vorher mit Schleifpapier, in seinem Fall Körnung 100, aufzurauhen, um eine bessere Benetzbarkeit der Rohre zu erzielen.

Abbildung 23 zeigt einen Versuch, wie sich die Sicken im Kupferblech ausführen lassen. Diese wurden mit einem handelsüblichen Körner ins Blech geschlagen und mit Bohrungen der Durchmesser ø$1,0$ mm, ø$1,5$ mm, ø$2,0$ mm, ø$2,5$ mm versehen. Ganz links auf der Abbildung 23 ist eine unbearbeitete Sicke zu sehen. Die Bearbeitung geht dabei sehr schnell und einfach, es muss lediglich das Blech im Anschluss ein wenig ausgerichtet werden, da das Schlagen der Sicken zu einem leichten Verzug in der Blechebene führt.

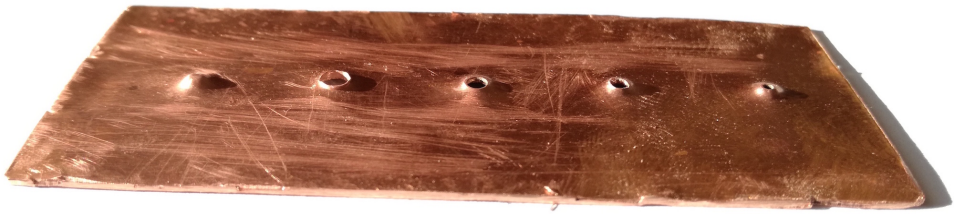


Abbildung 23: Versuch Sicken-Aufgabewanne

Abbildung 24 zeigt wiederum das 3D-Modell des Absorbers mitsamt Aufgabewanne.

Abbildung 24: Abbildung Absorber

4.3. Rahmen

Der Rahmen wurde aus Aluminium-Profilen der Firma *item* gestaltet. Diese bieten den Vorteil, dass sie bei geringem Gewicht eine hohes Wiederstandsmoment aufweisen und mittels der erhältichen Verbindungssätze ohne zusätzliche mechanische Arbeitsschritte zusammengesetzt werden können. Dadurch ist eine hohe Modularität und Erweiterbarkeit gewährleistet, die unter Umständen im Laufe der Inbetriebnahme notwendig ist. Abbildung 25 zeigt das verwendete Profil der Baureihe 6 und die verwendeten Automatik Verbindsätze [6].

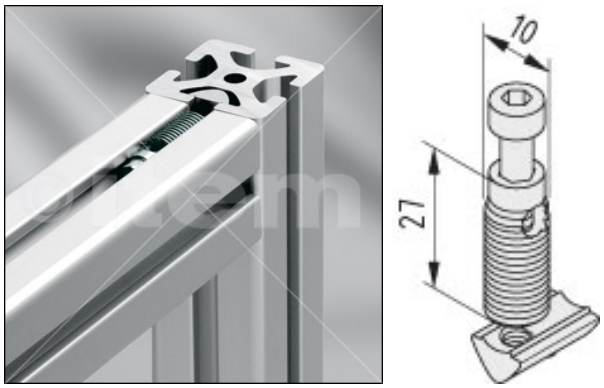


Abbildung 25: Item Profil und Automatik Verbindungssatz, [6]

Die Verbinder sind mit einem selbstschneidendem Linksgewinde ausgestattet, wobei die Verwendung von Schmiermittel beim Einbringen empfohlen wird und die Schrauben selbst sollten mit einem maximalen Anzugsmoment von 8 Nm angezogen werden. Die verwendeten Profile der Baureihe **Item 6 schwer** haben einen Querschnitt von 30 x 30 mm und ein Flächenträgheitsmoment von $4,15$ cm^4 [6]. Durch die geringen Belastungen und der Ausführung der Konstruktion, welche das Auftreten von Biegebeanspruchungen weitgehend vermeidet, sind keine merklichen Verfomungen zu erwarten, weshalb von einer Nachrechnung des vielfach statisch unbestimmten Rahmens abgesehen wird.

4.4. Ventile

Für die Evakuierung wurde jeweils bei den Behältern für den Absorber/Verdampfer und Generator/Kondensator ein 6 mm Schrader Ventil zum Einlöten benutzt, das laut einem Kältetechniker der Firma *Ernst Winninger GmbH* ein Standardventil in der Klimatechnik und mit den gängigen Befüllarmaturen für Klimaanlagen kompatibel ist.

Die Drosselorgane wurden als Nadelventile der Firma *Swagelok* ausgeführt. Für die Kältemitteldrossel wurde das Ventil *SS-6MG-MM-MH* mit $C_v = 0,04$ und für die Lösungsdrossel das Ventil *SS-1RS6MM* mit $C_v = 0,37$ gewählt. Der C_v-Wert gibt dabei die maximale Durchflusskonstante an.

Laut den Unterlagen zur Ventilauslegung, die auf der Homepage von *Swagelok* zum Donwload zur Verfügung stehen, berechnet sich der maximale Durchfluss eines Ventils nach folgender Formel:

$$q = N_1 * C_v * \sqrt{\frac{\Delta p}{G_f}} \tag{3}$$

q ... Durchfluss $[l/min]$
N_1 ...Konstante zur Berücksichtigung der Einheiten
Δp ... Druckunterschied $[bar]$
G_f ... spezifisches Gewicht $[kg/dm^3]$

Da die Durchflussmenge in diesem Fall bekannt ist und der benötigte C_v-Wert zu berechnen ist, wurde die Formel auf C_v gebracht und unter Berücksichtigung des Höhenunterschieds zwischen oberen und unteren Behälter, jedoch unter Vernachlässigung der in den Rohrleitungen auftretenden Druckverluste, folgende Werte berechnet:
$C_{v,L} = 0,081$...C_v-Wert Lösungsdrossel
$C_{v,K} = 0,011$...C_v-Wert Kältemitteldrossel

Mit diesen Werten wurde in die beigelegten Diagramme zur Auswahl der Ventile gegangen und kontrolliert, ob diese für die Anwendung geeignet sind. Abbildung 26 zeigt links das Auswahldiagramm für die Kältemitteldrossel und rechts für die Lösungsdrossel. In Abbildung 27 sind die gewählten Ventile dargestellt.

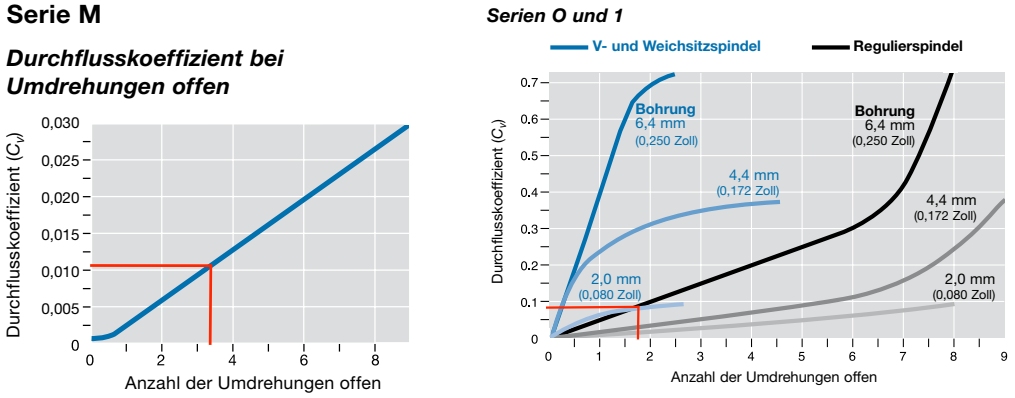


Abbildung 26: Auswahldiagramm Dosierventil und Regelventil, [12]

Abbildung 27: SS-1RS6MM-Nadelventil, SS-4MG-MH-Feindosierventil, Schraderventil 6 mm, [7] [12]

4.5. Pumpen

Für sämtliche Pumpen wurde die Zirkulationspumpe *UPS 15-14 B PM* der Firma *Grundfos* gewählt. Die zwingenden Anforderungen an die Pumpe sind:

- hermetische Ausführung
- geringe Durchflussmengen (Lösungspumpe $V_{dot} = 0,015\ \frac{m^3}{h}$)

Die Zirkulationspumpe besitzt drei einstellbare Leistungsstufen – 3 W, 5 W, 8 W – welche konstanter Drehzahlstufen entsprechen. Dadurch kann der Durchfluss mittels eines druckseitig angeordeten Nadelventil geregelt werden. Die Pumpe arbeitet mit einem frei beweglichen Permanentmagnet-Rotor, der durch Zapfen gelagert und leicht demontierbar ist. Durch den Einsatz einer statischen Dichtung, ist der Rotorkopf gegen Undichtheiten geschützt. Abbildung 28 zeigt das Kennlinienfeld der gewählten Pumpe mit den drei verschiedenen Leistungsstufen [10].

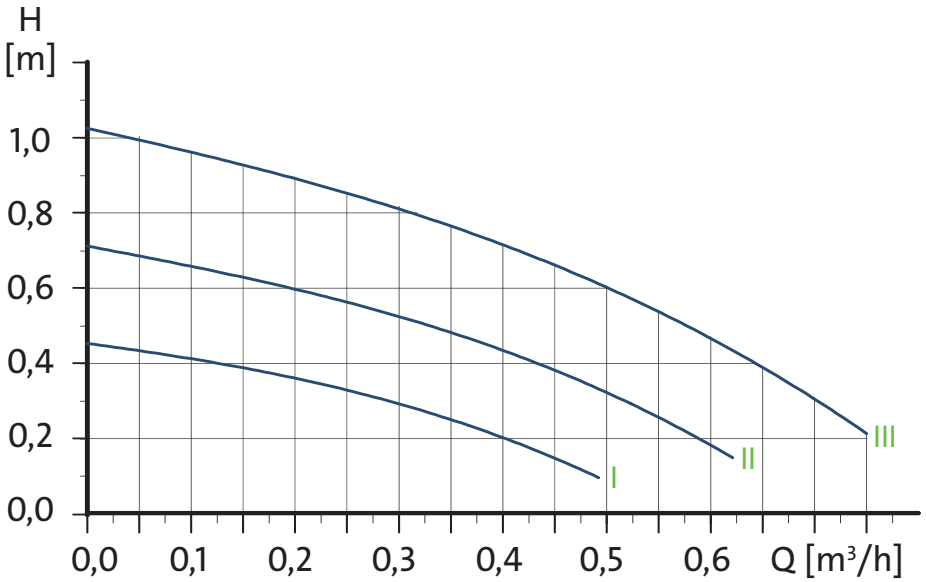


Abbildung 28: Kennlinie *Grundfos UPS 15-14 B PM*, [10]

Die Pumpe wird als kritischstes Bauteil der Anlage gesehen. Ob sie für den Einsatz auf Dauer tatsächlich geeignet ist, wird sich im laufenden Betrieb zeigen. Der Hersteller konnte für diesen Einsatzzweck keine Angaben machen, da die Pumpe für den Betrieb mit Wasser vorgesehen ist.

4.6. Verrohrung

Die Verrohrung wurde weitgehend durch biegeweiche Kupferrohre mit der Dimension ø6 x 1 mm ausgeführt. Die niedrigen Massenströme führen dabei zu einer maximalen Fließgeschwindigkeit von unter $0,4\ \frac{m}{s}$ und die Rohre lassen sich leicht von Hand biegen. Als Anschlüsse an die Behälter wurden jedoch Edelstahlrohre der gleichen Dimension eingesetzt, da sich diese mit den Behältern verschweißen lassen und somit ein stabiles Verbindungselement darstellen.

4.7. Lithiumbromid-Lösung

Die verwendete Lithiumbromidlösung wird direkt von der Firma *BS NOVA Apparatebau GmbH* bezogen, welche unter anderem Absorptionskältemaschinen herstellt. Die bestellte Lösung hat den Vorteil, dass sie direkt für den Einsatz in einer $H_2O/LiBr$-AKMs vorgesehen ist und bereits mit dem Korrosionsschutzadditiv Lithiummolybdat (Li_2MoO_4) inhibitiert. Laut dem Sicherheitsdatenblatt, dass die Firma *BS NOVA* dankenswerterweise vorab bereitgestellt hat, weist die Lösung folgende Zusammensetzung auf:

Lithiumbromid ($LiBr$)	$54,6$ %-wt
Lithiummolybdat (Li_2MoO_4)	$0,015$ %-wt
Kalzium (Ca)	< 8 ppm
Magnesium (Mg)	< 1 ppm
Sulfate (SO_4)	$0,005$ %-wt
Chlor (Cl)	$< 0,04$ %-wt

Ein weiterer Zusatz, der vor allem im Absorber zu einer Erhöhung des Wärmeübergangs führt, ist das Tensid *Octyl Alkohol* (2-ethyl-1-hexanol). Ein entscheidender Mechanismus hierbei, ist die Induzierung von Marangoni Konvektion in der Flüssigkeit. Der Octyl Alkohol geht jedoch auch in die dampfförmige Phase über. Daraus resultiert, dass der Alkohol im Verdampfersumpf auf dem Wasser aufschwimmt, weswegen bei der Rezirkulatonspumpe im Verdampfer darauf geachtet werden muss, dass die Ansaugleitung so getaltet ist, dass diese auch die Oberfläche miteinbezieht, sodass auch der Alkohol rezykliert werden kann [23]. Der Einfachheit halber und da es sich um eine reine Laboranlage handelt, welche keine großen Ansprüche an den Wirkungsgrad stellt, wird deshalb vorerst auf die Zugabe von Octyl Alkohol verzichtet.

4.8. Schaugläser

Die Schaugläser stellen einen wichtigen Teil dar, da sie einerseits dazu dienen, den StudentInnen einen genauen Einblick in die ablaufenden Prozesse zu geben und andererseits, um mögliche Fehlerquellen im Betrieb leichter ausfindig zu machen. Es wurden die in Abbildung 29 dargestellten Edelstahlschaugläser mit Borosilikatgläsern und PTFE Dichtung gewählt, welche direkt auf die Behälter geschweißt werden können und eine Sichtöffnung von ø65 mm besitzen.

Abbildung 29: Stirnschauglas DN65, [8]

4.9. Lösungswärmetauscher

Die Notwendigkeit eines Lösungswärmetauschers, oder auch Temperaturwechsler genannt, ergibt sich aus dem internen Temperaturaustausch, der dazu führt, dass weniger Heizleistung zum Auskochen der Lösung und weniger Kühlleistung am Absorber benötigt wird, wie in Abbildung 8 leicht zu erkennen ist. Weiters ist zu beachten, dass sich die siedende, arme Lösung im Generator auf Gleichgewichtstemperatur befindet. Wird diese nun, ohne vorher im Lösungswärmetauscher abgekühlt zu werden, auf Absorberdruck gedrosselt, verdampft aus der Lösung am Absorberkopf weiter Kältemittel. Dieser Kältemitteldampf wird zunächst am Absorber resorbiert, wodurch weniger Kapazität zur Verfügung steht, um Kältemitteldampf vom Verdampfer aufzunehmen. Dies führt folglich dazu, dass die Kälteleistung sinkt, die Verdampfertemperatur steigt und sich ein höherer Druck im Absorber einstellt. Die Menge an ausgedampftem Kältemittel im Absorber kann bis zu 40 % des gesamten Kältemitteldampfstroms betragen. Deshalb ist es notwendig, den Lösungsmittelwärmetauscher so auszulegen, dass die arme Lösung unter Gleichgewichtstemperatur bei Absorberdruck gebracht wird [32].

Als Lösungswärmetauscher wurde bei dieser Anlage ein Edelstahl Plattenwärmetauscher des Herstellers *Hrale* der Bauart *B3-12-10* gewählt, welcher zwar für den Einsatzzweck überdimensioniert ist, jedoch aufgrund seines günstigen Preises eine gute Alternative zu einem selbstgebauten Rohr in Rohr Wärmetauscher aus Kupferrohren bietet. Der Wärmetaucher ist aus zehn mit Kupfer verlöteten Edelstahlplatten aufgebaut und laut Hersteller beträgt das Volumen pro Durchgang von $0,18\,l$, was bei den vorhandenen Volumenströmen eine Verweilzeit von $1,55\ min$ auf der heißen und $1,33\ min$ auf der kalten Seite zur Folge hat. Die wirksame Wärmetauscherfläche beträgt dabei $0,12\ m^2$ [9]. Abbildung 30 zeigt die Hauptabmessungen und den Druckverlust über den Volumenstrom. Die rote Linie ganz links im Diagramm zeigt dabei den Betriebspunkt des Wärmetauschers an.

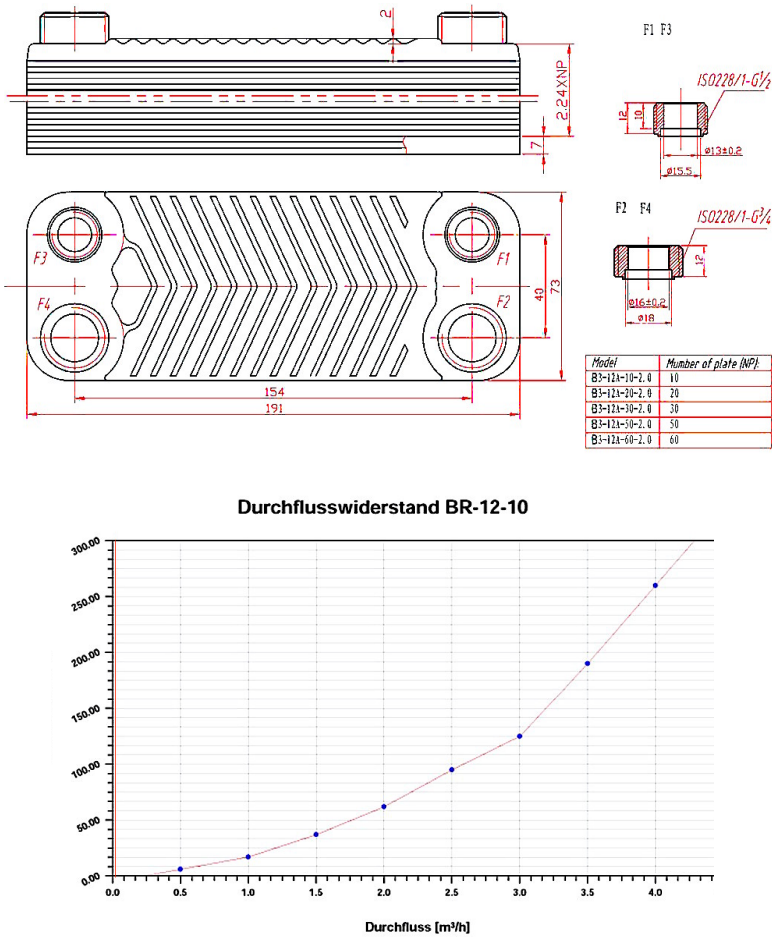


Abbildung 30: *Hrale* B3-12-10 Edelstahl Plattenwärmetauscher, [9]

4.10. Tropfenabscheider

Der Tropfenabscheider zwischen Verdampfer und Absorber dient dazu, die vom Dampfstrom mitgeführten Wassertröpfchen abzuscheiden und zu verhindern, dass Lösung vom Absorberbehälter in den Verdampferbehälter zurückspritzt. In diesem Fall wurde er mit Kupferblechen ausgeführt, da diese leicht zu bearbeiten sind. Die Geometrien wurden in Anlehnung an [29] gewählt und für die Anwendung auf die entsprechende Baugröße skaliert. Die Bleche werden dabei in dafür vorgesehene Schlitze in der Halterung montiert und anschließend verlötet.

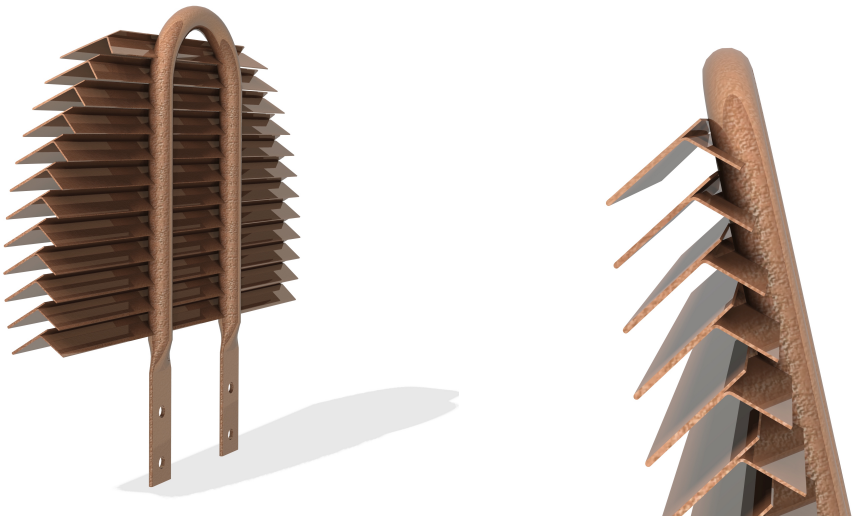


Abbildung 31: Tropfenabscheider

4.11. Externe Kreisläufe

- Heißwasserversorgung:
  Für die Bereitstellung des notwendigen Heißwassers ist ein druckfester Warmwasserboiler vorgesehen, wie beispielsweise das Modell ***VEH 80/7 exclusive*** der Firma *Vaillant*. Dieser ist auf einen Arbeitsdruck von 6 bar ausgelegt, hat an 230 V 4 kW Heizleistung und ist in einem Temperaturbereich von $7-85\,°C$ frei einstellbar [3]. An dieser Stelle müssten am Thermostat Veränderungen vorgenommen werden, um die Temperatur bis 100 $°C$ einstellen zu können. Diese Maßnahme sollte vom Fachmann durchgeführt werden. Jedoch sind druckfeste Warmwasserboiler mit einem Sicherheitsventil ausgestattet das bei $6-10$ bar abbläst, dadurch besteht keine Gefahr, dass sich im Behälter zuviel Druck aufbaut. Als Vorsichtsmaßnahme, sollte trotzdem eine Schutzvorrichtung angedacht werden, die den Behälter von den anwesenden Personen abschirmt. Eine mögliche Ausführungsvariante ist in Abbildung 32 zu sehen, wo der gesamte Aufbau der AKM dargestellt ist. Die Kabine ist dabei nach hinten offen sowie seitlich, vorne und oben mittels einer 4 mm Acrylglasscheibe abgeschlossen.

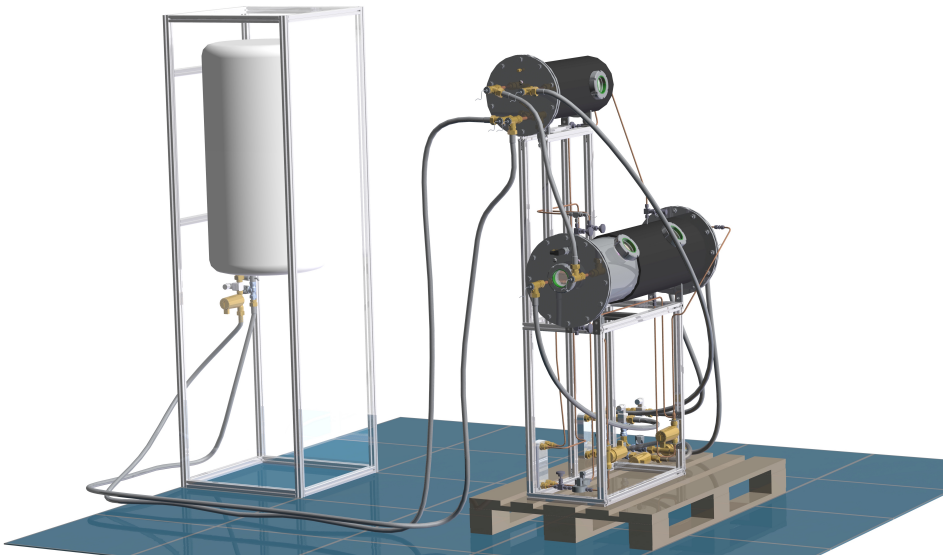


Abbildung 32: Aufbau mit Heißwasserversorgung

- Kühlwasserversorgung:
  Der Kühlwassermassenstrom wird über eine Kühlgruppe zur Verfügung gestellt, welche an den Kaltwassersatz des Universitätslabors angeschlossen wird. In der Kühlgruppe wird ein Teil des vom Absorber und Kondensator abgegebenen Wärmestroms als Kühllast für den Verdampfer zur Verfügung gestellt. In Anhang C.2 ist das RI-Fließbild der Kühlgruppe dargestellt und Abbildung 33 stellt den Aufbau der Kühlgruppe dar. Sollte es sich als zu aufwändig herausstellen, mittels der ausgewählten Ventile einen stationären Zustand zu erreichen, könnten eventuell 3-Wege Mischventile mit Thermostatkopf verwendet werden.

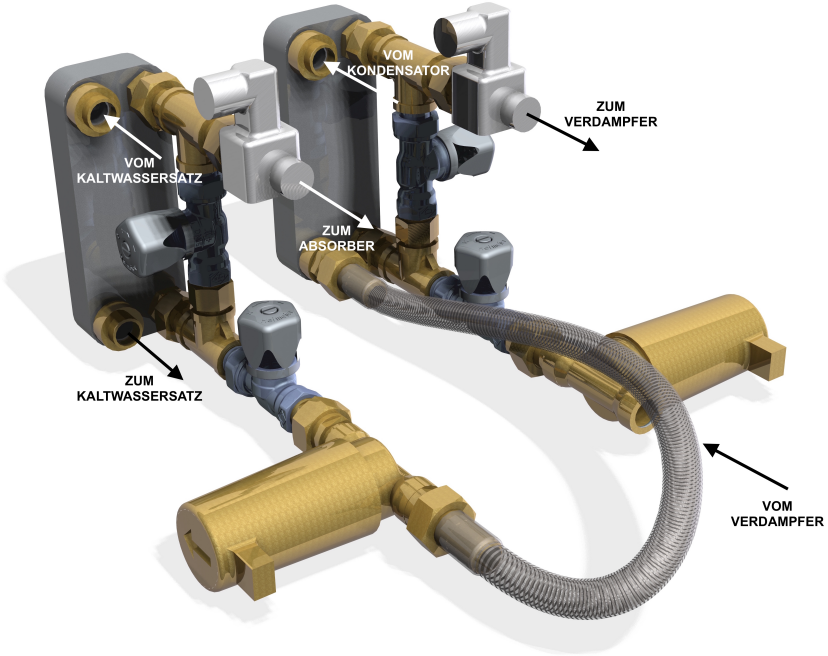


Abbildung 33: Kühlgruppe

4.12. Messpunkte

Wie eingangs bereits erwähnt, soll die Anlage mit den nötigen Messinstrumenten ausgestattet werden, um ausreichend Daten zur Regelung im Betrieb und zur Auswertung durch StudentInnen im Rahmen einer Übungsaufgabe zur Verfügung zu stellen. Der Aufwand der dafür betrieben wird, sollte sich in einem Rahmen bewegen, der ausreicht um vernünftige Aussagen über das Verhalten der Anlage treffen zu können, muss jedoch in Grenzen gehalten werden, da es sich nicht um ein Forschungsobjekt handelt, dessen Vermessung zu belastbaren Ergebnissen führen soll.

- **Durchflussmessung:**
  In den externen Wasserkreisläufen wird der Durchfluss mittels eines Turbinen Durchflussmesser der Serie *FCH-C-Ms* und im Lösungskreislauf mit der Serie *FCH-m-ALU-IND* der Firma *B.I.O-TECH e.K.* gemessen. Problematisch könnte dabei die Dichtheit der Durchflussmesser der Lösung sein, da diese laut Hersteller in einem Druckbereich von $-0,7-10\ bar$ arbeiten, jedoch einen maximalen Druck von 50 *bar* aushalten. Als Alternative könnten magnetisch induktive Durchflussmesser eingesetzt werden, wie sie auch Beutler [15] einsetzte, jedoch liegen die Preise dafür etwa bei dem 3-fachen der Turbinen Durchflussmesser. Der Messbereich des gewählten Durchflussmessers für die Lösung liegt bei $0,015-1,0\ \frac{l}{min}$ bei einer Messgenauigkeit von +/-2 %. Diese Werte gelten für Wasser bei 20 $°C$ [4].

- **Messung der Zusammensetzung**
  Die Messung der Zusammensetzung der Lösung kann bei dem Arbeitsstoffgemisch nur über die Dichte in Kombination mit der Temperatur erfolgen, über die durch eine geeignete Stoffwertdatenbank Rückschlüsse auf die Zusammensetzung gezogen werden kann [22] [15]. Dies könnte wie in Estiot [22] mittels Coriolis-Massendurchflussmesser kontinuierlich stattfinden oder wie in Beutler [15] über eine Entnahmestation und anschließender Dichtemessung diskontinuierlich. Coriolis-Massendurchflussmesser haben den Vorteil, dass sie selbst bei sehr kleinen Massenströmen, wie sie hier auftreten, sehr genau arbeiten. Sie bewegen sich jedoch preislich in einer Dimension, die bei weitem das geplante Budget überschreitet. Somit wurde eine diskontinuierliche Messung über eine Entnahmestation gewählt. In diesem Fall könnte die Dichte anschließend mittels eines Aräometers [25] oder mittels eines definierten Prüfkörpers dessen Auftrieb über einer Mikrowaage gemessen wird, bestimmt werden [15]. In Abbildung 34 ist das Schema dargestellt, wie die Entnahmestation in Beutler [15] ausgeführt wurde.

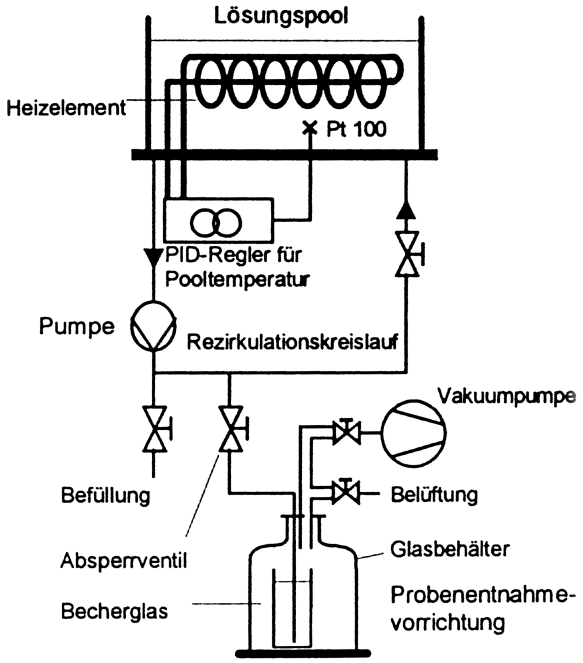


Abbildung 34: Entnahmestation Dichtemessung, [15]

Diese Ausführung wurde in vereinfachter Version übernommen und wie in Abbildung 35 zu sehen ist, gestaltet. Der Entnahmebecher wurde dabei so ausgeführt, dass er sowohl am Absorberaustritt wie auch am Generatoraustritt montiert werden kann. Um Lösung aus dem System zu entnehmen, ist es notwendig, den Becher vorher am Entnahmeventil mittels Schneidringverschraubung, welche am Entnahmeventil fixiert ist, zu befestigen und anschließend über das Schrader Ventil zu

evakuieren. Dabei ist der Innendruck soweit abzusenken, dass er unter dem Systemdruck liegt. Das Befüllrohr ist dabei bis kurz über dem Becherboden ausgeführt, sodass es durch Belüften des Bechers möglich ist, die Lösung wieder fast zur Gänze ins System zurückzuleiten.

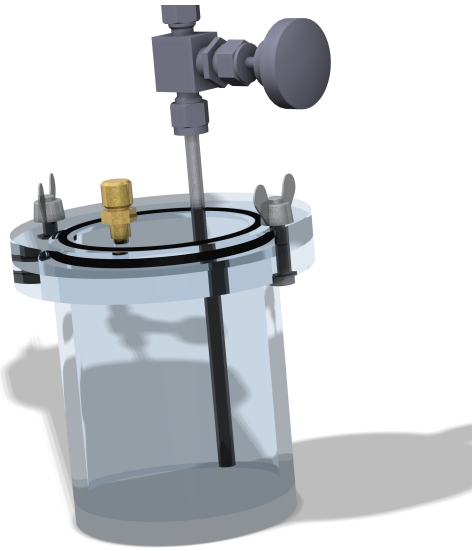


Abbildung 35: Entnahmebecher

- **Temperaturmessung**

  Die Temperatur wird über PT100-Fühler gemessen, welche über ein T-Stück jeweils am Aus- bzw. Eingang der Behälter bzw. Wärmetauscher montiert sind. Für die Temperatur der externen Kreisläufe werden 1/2" x 50 mm-Einschraubfühler verwendet und für die internen Prozesstemperaturen Kabelfühler mit ø6 mm x 50 mm. Die Kabelfühler werden über eine durchgebohrte Einschraubverschraubung der Firma *Swagelok* eingebaut. Die Fühler können dabei bis zu einer Temperatur von 105 $°C$ eingesetzt werden, wobei baugleiche Ausführungen auch für höhere Temperaturen erhältlich sind [11].

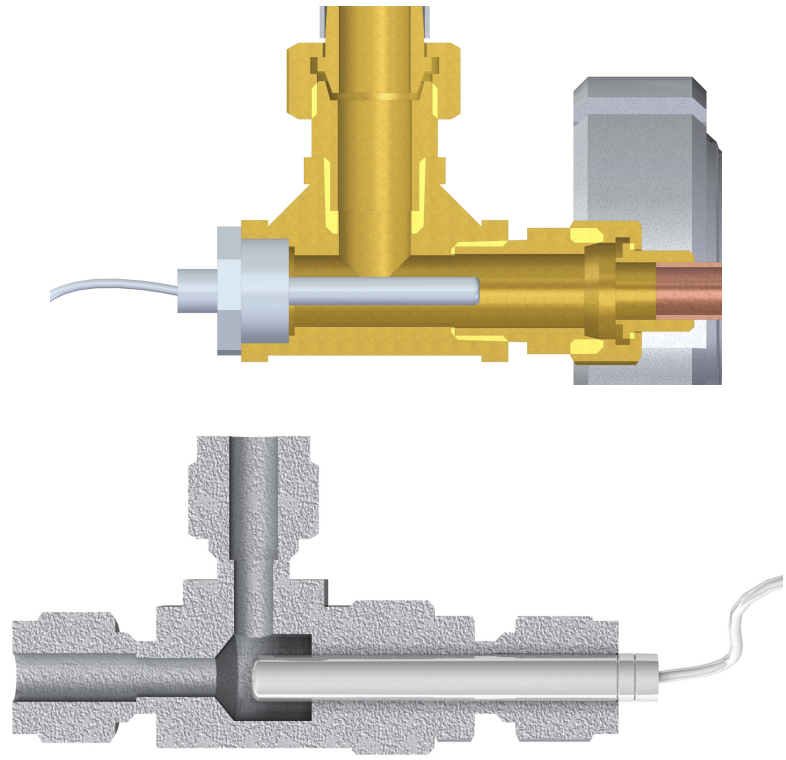


Abbildung 36: Temperaturmessstellen

- **Druckmessung**

  Für die Messung des jeweiligen Behälterdruckes wurde der in Abbildung 37 dargestellte Drucktransmitter für Über- und Unterdruck verwendet, der in der gewünschten Ausführung einen Messbereich von -1 *bar* bis 3 *bar* abdeckt und über einen G1/2" Gewindezapfen an den Behälter montiert werden kann. Dabei ist zu beachten, dass es sich hierbei um einen Differenzdrucksensor handelt, somit muss der Absolutdruck im Labor in regelmäßigen Abständen gemessen werden, um eine Referenz für den angezeigten Relativdruck zu haben.

Abbildung 37: Drucksensor DT1

5. Betrieb der Anlage

Erfahrungsgemäß beträgt die Lebensdauer einer gut gewarteten AKM in etwa 20 Jahre. Nach dieser Zeit sind bereits signifikante Korrosionsschäden, speziell an Stahloberflächen und im Bereich der Rohrböden und erhöhte Leckraten zu verzeichnen. Ein Austausch der Anlage ist dann i.d.R. wirtschaftlicher als weitere Reparaturen.

Zu den üblichen Wartungsarbeiten bei $LiBr/H_2O$ AKMs gehören

- das Absaugen von nichtkondensierbaren Gasen
- die Zugabe von Octyl Alkohol
- die Zugabe von Korrosionsinhibitoren
- die Zugabe von Pufferlösung zum stabilisieren des pH-Wertes

Die nötigen Intervalle dafür hängen von mehreren Variablen ab, unter anderem auch von der Größe der AKM und der Vakuumanlage. Bei kommerziellen Anlagen sind diese laut Herstellerangaben durchzuführen. Zusätzlich sollten auch in regelmäßigen Abständen die Leistungsparameter mit definierten Standardwerten verglichen werden, um potentielle Probleme zu erkennen [23].

Die geplante Laboranlage wird voraussichtlich einmal pro Semester im Rahmen geeigneter Laborübungen in Betrieb genommen. Der Verschleiß der Lösung wird daher als eher unbedeutend angenommen, somit fallen die letzten drei Punkte der regelmäßigen Wartungsaufgaben weg. Verschleiß der Lösung kann unter anderem etwa die Aufnahme von Schmutzpartikeln oder von eventuellen Korrosionsprodukten bedeuten. Der hauptsächliche Grund für das Versagen, bzw. Fehler in LiBr-AKMs ist die Korrosion [18].

5.1. Evakuierung

Die Evakuierung kann mittels einer herkömmlichen Vakuumpumpe, wie sie auch zum evakuieren von KKM's eingesetzt wird, durchgeführt werden. Um sicherzustellen, dass nichtkondensierbare Gase großteils entfernt werden, wird empfohlen, die Anlage mit Wasserdampf zu spülen. Dies kann durch aktivieren des Generators und einschalten der Lösungspumpe beschleunigt werden. Zu beachten ist, dass in der Lösung nichtkondensierbare Gase gelöst sind, welche jedoch nach gewisser Zeit von selbst aus der Lösung ausdiffundieren [23]. Wird der Druck im Behälter nun auf 1 *mbar* gebracht, was mit den genannten Vakuumpumpen ohne weiteres möglich ist, wird der Dampfdruck des Wassers auf jeden Fall unterschritten. Dies bedeutet, dass Wasserdampf über die Vakuumpumpe abgesaugt wird, welcher im Verdichterteil der Pumpe wieder kondensieren und mit dem Öl eine Öl-Wasser-Emulsion bilden würde. Deshalb ist es zu empfehlen, während der Evakuierung das Gasbalastventil der Pumpe zu öffnen, da dadurch am Beginn der Verdichtung der Pumpe Umgebungsluft zugeführt wird, welche den Wasserdampf aufnimmt und somit die Kondensation des Wasserdampfs unterbunden wird [2].

Die Entnahme des Wasserdampfes wirkt sich natürlich auf die Lösungskonzentration aus. Um ein Gefühl dafür zu bekommen in wie weit sich das Spülen auf die Lösungskonzentration auswirkt, wurde folgende Abschätzung durchgeführt. Die Stoffwerte wurden dabei in EES errechnet und die Größenordnung der Parameter eher konservativ gerundet.

$V_{beh} = 0,06\ m^3$	Volumen der Behälter
$V_{Dampf} = 2\ m^3$	entnommenes Dampfvolumen (entspricht dem 33-fachen des Innenvolumens)
$p_{ev} = 5\ mbar$	Innendruck bei der Evakuierung
$m_D = 8\ g$	entnommene Dampfmenge
$m_{Ges} = 20\ kg$	in der Anlage enthaltene Menge an Lösung
$\zeta = 55\ \% - wt$	LiBr Gewichtsanteil der Lösung
$m_W = 20 * 0,55 = 9\ kg$	enthaltene Wassermenge

$$\zeta_{neu} = 100\% - \frac{m_W - m_D}{m_{Ges} - m_D} * 100 = 100\ \% - \frac{9 - 0.008}{20 - 0.008} * 100 = 55,022\ \% \qquad (4)$$

Dies entspricht einer Änderung um $0,022$ %-Punkte. Wird die selbe Berechnung nun mit einem Evakuierungsdruck von 1 $mbar$ durchgeführt sinkt dieser Wert sogar auf $0,0047$ %-Punkte. Die Änderung ist somit für die vorgesehenen Anwendungszwecke vernachlässigbar.

5.2. Dichtheitsprüfung

Es sollte bereits bei der Montage darauf geachtet werden, sämtliche Bauteile schmutz- und fettfrei zu halten und die Maschine, nach erfolgter Evakuierung, auf eventuelle Leckagen zu überprüfen.

Dies kann beispielsweise erfolgen, indem der Druck in der trockenen Anlage über einen definierten Zeitraum kontrolliert wird. Laut Cosenza [18] muss ab einem Luftanteil von $0,1$ % mit einer Beeinträchtigung der Absorberleistung gerechnet werden. Das würde bei voraussichtlichen 8 $mbar$ Betriebsdruck im Absorber eine Druckerhöhung um $0,008$ $mbar$ bedeuten. Bei der Überprüfung der Leckrate sollte folglich darauf geachtet werden, dass über den geplanten Betriebszeitraum, z.B. 8 Stunden eine Druckerhöhung von $0,008$ $mbar$ nicht überschritten wird [32].

5.3. Anfahren der Anlage

$H_2O/LiBr$ Anlagen laufen naturgemäß sehr stabil, bis auf Probleme die bei eventueller Kristallisation der Lösung auftreten können. I.d.r. reicht es die Lösungspumpen und die externen Kreisläufe zu aktivieren, die jeweiligen Zustände stellen sich dann anhand ihrer thermodynamischen Stoffeigenschaften ein. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass Kristallisation vermieden wird, da daraus resultierende Verstopfungen unter Umständen nur mit höherem Aufwand wieder zu lösen sind. In den meisten Fällen resultiert

ein Kristallisationseintritt durch einen plötzlichen Ausfall der Absorber- und Kondensatorkühlung, der dazu führt, dass die Lösung immer höher aufkonzentriert wird, was letztendlich zum Auskristallisieren von $LiBr$-Salz führt. Um dies zu verhindern ist die Konzentrationsmessung der Lösung notwendig, wie in Abschnitt 4.12 beschrieben, damit diese in einem Bereich von unter ca. 65 %-LiBr bleibt. Dazu sollte das Lösungsfeld aus Abbildung 5 im Auge behalten werden [23]. Bei der Anlage, die im Rahmen dieser Arbeit konzipiert wurde, ist auf der Druckseite der Kältemittel-Rezyklationspumpe eine T-Stück zur Abzweigung eines Teilmassenstroms vorgesehen. Über ein Regelventil kann dieser Teilmassenstrom des Kältemittels in den Absorber eingeleitet werden um die Lösung zu verdünnen, sollte ein Zustand eintreten, der zur Kristallisation führen könnte.

5.4. Stillstand

Bei jedem Öffnen der Anlage sollte diese vorher mit Stickstoff oder einem anderen Inertgas geflutet werden, um den Eintritt von Sauerstoff möglichst gering zu halten. Im Stillstand muss sie auf jeden Fall mit N_2 auf ein Druckniveau über Umgebungsdruck gefüllt werden, um zu verhindern, dass während des Stillstands Luft in die Behälter eindringt und zu Korrosion führt [23].

6. Resümee

Eine funktionstüchtige Absorptionskältemaschine in dieser Größenordnung zu entwerfen, verlangte unter den restriktiven Umständen eines beschränkten Budgets viel Kreativität, da erschwingliche Standardkomponenten in den meisten Fällen nicht für diesen Einsatzzweck gebaut werden. Es wurden jedoch sämtliche Teile sorgfältig ausgewählt, konstruiert, bedacht und soweit wie möglich auf die nötigen Eigenschaften kontrolliert, um ihren Zweck in der Anlage zu erfüllen. Oft war dies aufgrund mangelnder Daten nur schwer durchzuführen. Diese Arbeit bietet aber trotzdem eine gute Grundlage, um eine AKM wie sie eingangs gefordert wurde, bauen zu können.

Bei der Montage sollte jedenfalls sorgfältig auf die Dichtheit der Behälter und vor allem sämtlicher Verbindungen geachtet werden. Es wurde bereits erwähnt, dass die Wärmestromdichten relativ gering ausfielen, daher könnte es eventuell nötig sein, die Heizleistung von 2 kW zu erhöhen, falls kein Blasensieden im Generator auftritt. Weiters ist es wichtig, auf eine ausreichende Isolierung zu achten, da bei den geringen Leistungen Verluste and die Umgebung mitunter starken Einfluss haben können.

A. Berechnungen

A.1. EES Code - Berechnung 1-Stufige $H_2O/LiBr$ AKM

```
"Diplomarbeit - Auslegung und Konstruktion einer H2O/LiBr Absorptionskältemaschine für den Laborunterricht"
"Matthias Mair-Zeininger, 2017"
"Berechnung: 1-stufige H2O/LiBr Absorptionskältemaschine"

$UpdateGuesses
$TabStops 0,5 2 10 15 cm

"Function für mittlere logarithmische Temperaturdifferenz, mit Kontrolle auf Singularitäten"
Function tlm(T1;T2;T3;T4)
    Tgr=T1-T2
    Tkl=T3-T4
    if(Tgr=Tkl) Then
    tlm=Tgr
    Else
    if(Tgr<0) or (Tkl<0) Then
    tlm=0
    Else
    tlm=(Tgr-Tkl)/ln(Tgr/Tkl)
Endif
Endif
End

"Function für mittlere Nusselt Zahl der Wärmetauscher in Abhängigkeit von der Reynoldszahllaut VDI Wärmeatlas G1 Durchströmte Rohre"
Function nusm(zeta;Re;Pr;d_i;L;Pr_wi;K_Fak)

"Laminar"
If (Re<2300) Then

    Nus_m_1=3,66                                                                    "Gl.4"
    Nus_m_2=1,615*(Re*Pr*d_i/L)^(1/3)                                               "Gl.5"
    Nus_m_3=(2/(1+22*Pr))^(1/6)*(Re*Pr*d_i/L)^(1/2)                                 "Gl.11"
    nusm=(Nus_m_1^3+0,7^3+(Nus_m_2-0,7)^3+Nus_m_3^3)^(1/3)*K_Fak
    "Gl.12"
Else
if(Re=>2300) and (Re<10000) Then
    "Übergangsbereich - unter Einfluss der Temp-Abhängigkeit der Stoffwerte (4.2)"

    Nu_m_nu2_2300=1,953*(2300*Pr*d_i/L)^(1/3)                                       "Gl.35"
    Nu_m_nu3_2300=0,924*Pr^(1/3)*(2300*d_i/L)^(1/2)                                 "Gl.36"
    Nu_m_L2300=(83,326+(Nu_m_nu2_2300-0,6)^3+Nu_m_nu3_2300^3)^(1/3)                 "Gl.34"

    gamma=(Re-2300)/(10^4-2300)                                                     "Gl.30"
    Nu_m_T104=(0,0308/8)*10^4*Pr/(1+12,7*sqrt(0,0308/8)*(Pr^(2/3)-1))*(1+(d_i/L)^(2/3))  "Gl.37"
    nusm=((1-gamma)*Nu_m_L2300+gamma*Nu_m_T104)*(Pr/Pr_Wi)^(0,11)                   "Gl.29"

Else
 if(Re=>10000) Then
    "Turbulent - unter Einfluss der Temp-Abhängigkeit der Stoffwerte (Gl.26)"
    nusm=((zeta/8)*Re*Pr)/(1+12,7*sqrt(zeta/8)*(Pr^(2/3)-1))*(1+(d_i/L)^(2/3))*(Pr/Pr_Wi)^(0,11)
Endif
Endif
Endif
End

"Procedure für die Wärmetauscherberechnung mittels Wirkungsgrad"
Procedure etawt(eta;m_dot_c;m_dot_h;T_in_c;T_in_h;cph;cpc:T_out_h;T_out_c;Q_dot)
    C_dot_c=m_dot_c*cpc
    C_dot_h=m_dot_h*cph
    C_dot_min=min(C_dot_c;C_dot_h)
    Q_dot=eta*C_dot_min*(T_in_h-T_in_c)
    T_out_c=T_in_c+Q_dot/C_dot_c
    T_out_h=T_in_h-Q_dot/C_dot_h
End
```

"Inhaltsverzeichnis:

1. Eingabewerte
1.1 Heißwasser Generator
1.2 Kühlwasser Kondensator
1.3 Kühlwasser Absorber
1.4 Kaltwasser Verdampfer
1.5 Lösungspumpe
1.6 Wärmetauscherparameter
1.7 Mittlere Logarithmische Temperaturen
1.8 Dampfgehalt
1.9 Zusammensetzung
1.10 Temperatur
1.11 Druckniveau

2. Charakterisierende Gleichungen
2.1 Generator
2.2 Kondensator
2.3 Kältemitteldrossel
2.4 Verdampfer
2.5 Absorber
2.6 Lösungsdrossel
2.7 Lösungspumpe
2.8 Temperaturwechsler
2.9 Wärmeströme mittels UA-Werten und T_LM
2.10 Massenstrom [kg/s]

3.Zustandsdaten
3.1 Zusammensetzung [% LiBr]
3.2 Enthalpie [kJ/kg]
3.3 Spezifisches Volumen [m^3/kg]
3.4 Durchflussrate [l/min]
3.5 Druck [kPa]

4. Leistungsdaten
4.1 Coefficiency of performance
4.2 Lösungszirkulationsrate

5. UA-Werte der Wärmetauscher
5.1 Äußerer Wärmeübergangskoeffizienten [W/m^2-K]
5.1.2 Äußerer Wärmeübergangskoeffizient Kondensator VDI S.1017
5.2 Innere Wärmeübergangskoeffizienten der Wärmetauschern laut VDI Wärmeatlas G1 Durchströmte Rohre
5.2.1 Mittlere Wassertemperaturen [°C]
5.2.2 Abgeschätze Wandtemperaturen [°C]
5.2.3 Wärmeleitfähigkeiten Kupfer [W/m-K]
5.2.4 Dimensionen WT-Kupferrohre
5.2.4.1 Durchmesser [m]
5.2.4.2 Längen und Gangzahlen
5.2.4.3 Oberflächen [m^2]
5.2.4.4 Querschnittsflächen der WT-Rohre [m^2]
5.2.5 Wärmestromdichten [W/m^2]
5.2.6 Dynamische Viskosität [kg/m-s]
5.2.7 Fließgeschwindigkeiten [m/s]
5.2.8 Reynoldszahl [/]
5.2.9 Prandtlzahl
5.2.10 Prandtlzahl mit Wandtemperatur
5.2.11 Rohrreibungsbeiwert
5.2.12 K-Faktor-Einfluss der Temp.-Abhängigkeit der Stoffwerte
5.2.13 Mittlere Nusselt Zahl
5.2.14 Wärmeleitfähigkeit Wasser
5.2.15 Innerer Wärmeübergangskoeffizient
5.3 UA-Werte"

```
"1. Eingabewerte"
"1.1 Heißwasser Generator 11-12"
    T[11]=100
    m[11]=0,12

"1.2 Kühlwasser Kondensator 15-16"
    T[15]=T[14]
    m[15]=m[13]

"1.3 Kühlwasser Absorber 13-14"
    "T[13]=25"                                   "erforderliche Kühlwassertemp. durch
Bedingung Q_dot_Gen=2kW errechnet"
    m[13]=,0664

"1.4 Kaltwasser Verdampfer 17-18"
    T[17]=15
    m[17]=,05

"1.5 Lösungspumpe"
    "m[1]=0,006"                                 "erforderlicher Massenstrom der
Lösungspumpe durch f=11 errechnet"

"1.6 Wärmetauscherparameter"
    UA_Gen=UA_Gen_b
    UA_Kon=UA_Kon_b
    UA_Abs=UA_Abs_b
    UA_Ver=UA_Ver_b

    k_Gen=UA_Gen_b/(A_a_Gen*n_Gen)*convert(kW/m^2-K;W/m^2-K)
    k_Kon=UA_Kon_b/(A_a_Kon*n_Kon)*convert(kW/m^2-K;W/m^2-K)
    k_Abs=UA_Abs_b/(A_a_Abs*n_Abs)*convert(kW/m^2-K;W/m^2-K)
    k_Ver=UA_Ver_b/(A_a_Ver*n_Ver)*convert(kW/m^2-K;W/m^2-K)

    eta_TW=0,8

"1.7 Mittlere Logarithmische Temperaturen"
    T_LM_Gen=tlm(T[11];T[4];T[12];T[4])          "T[4] ist Siedetemperatur vom Siedepool"
    T_LM_Kon=tlm(T[8];T[15];T[8];T[16])          "sensibler Anteil (2,9%) vernachlässigbar: VD
S.1020"
    T_LM_Abs=tlm(T[6];T[14];T[1];T[13])          "sensibler Anteil von absorbiertem Dampf
vernachlässigt"
    T_LM_Ver=tlm(T[17];T[10];T[18];T[10])
    T_LM_TW=tlm(T[4];T[5];T[3];T[2])

 "1.8 Dampfgehalt"
    x[8]=0                                       "Nass-Gesättigt nach Kondensator"
    x[10]=1,0                                    "Trocken-Gesättigt nach Verdampfer"
    x[7]=1

"1.9 Zusammensetzung"
    zeta[4]= LiBrSSCX(T[4]; p_H)                 "Gesättigt nach Generator"
    zeta[1]= LiBrSSCX(T[1]; p_N)                 "Gesättigt nach Absorber - eventuelle
Unterkühlung vernachlässigt"
    zeta[7]=0

"1.10 Temperatur"
    T[7] = LiBrSSCT(p_H;zeta[4])                 "Sättigungstemperatur von LiBr bei
Austrittszusammensetzung - ideale Vermischung des Pools durch Blasensieden"

"1.11 Druckniveau"
    p_H=pressure(Water;T=T[8];x=x[8])
    p_N=pressure(Water;T=T[10];x=x[10])
```

```
"2. Charakterisierende Gleichungen"
"2.1 Generator"
    m[3]=m[4]+m[7]                                  "Gesamte Massenbilanz"
    m[3]*zeta[3]=m[4]*zeta[4]                       "Massenbilanz Lithiumbromid"
    h[3]*m[3]-h[4]*m[4]-h[7]*m[7]+Q_dot_Gen=0       "Energiebilanz"
    Q_dot_Gen=m[11]*(h[11]-h[12])                   "Q_dot_Gen=2 [kW] Sollwert"
    Q_dot_Gen=2[kW]

"2.2 Kondensator"
    m[8]=m[7]                                       "Massenbilanz"

    Q_dot_Kon=m[7]*(h[7]-h[8])                      "Energiebilanz"
    Q_dot_Kon=m[15]*(h[16]-h[15])

    Q_Kon_Sen=(h[7]- h_kon_sat)*m[7]
    Q_kon_Lat=( h_kon_sat-h[8])*m[7]
     h_kon_sat=enthalpy(Water;T=T[8];x=1)

    Anteil_Kon_Sen=Q_Kon_Sen/Q_dot_kon*100          "Sensibler Anteil Kondensatorwärme"
    Anteil_Kon_Lat=Q_Kon_Lat/Q_dot_kon*100          "Latenter Anteil Kondensatorwärme"

"2.3 Kältemitteldrossel"
    m[9]=m[8]                                       "Massenbilnaz"
    h[9]=h[8]                                       "Energiebilanz-isenthalpe Drossel"
    T_9_Sat=t_sat(Water;P=p_N)

"2.4 Verdampfer"
    m[10]=m[9]                                      "Massenbilanz"
    Q_dot_Ver=m[9]*(h[10]-h[9])                     "Energiebilanz"
    Q_dot_Ver=m[17]*(h[17]-h[18])

"2.5 Absorber"
    m[10]*h[10]+h[6]*m[6]=Q_dot_Abs+m[1]*h[1]       "Energiebilanz"
    Q_dot_Abs=m[13]*(h[14]-h[13])

    h[6] = LiBrSSCh(T[6];zeta[6];p_N)

"2.6 Lösungsdrossel"
    m[6]=m[5]                                       "Massenbilanz"
    h[6]=h[5]                                       "Energiebilanz-isenthalpe Drossel"

"2.7 Lösungspumpe"
    m[2]=m[1]                                       "Massenbilanz"
    h[2]=h[1]+Pwork*convert(W;kW)/m[1]              "Energiebilanz"
    Pwork=m[1]*v[1]*(p[2]-p[1])*convert(kW;W)       "Isentrope Pumpenarbeit"

"2.8 Temperaturwechsler"
    m[3]=m[2]                                       "Massenbilanz"
    m[5]=m[4]

    cp_45=(h[4]-h[5])/(T[4]-T[5])                   "Energiebilanz"
    cp_23=(h[3]-h[2])/(T[3]-T[2])

    Call etawt(eta_TW;m[2];m[4];T[2];T[4];cp_45;cp_23:T[5];T[3];Q_dot_TW)

"2.9 Wärmeströme mittels UA-Werten und T_LM"
    Q_dot_Gen=T_LM_Gen*UA_Gen
    Q_dot_Kon=T_LM_Kon*UA_Kon
    Q_dot_Abs=T_LM_Abs*UA_Abs
    Q_dot_Ver=T_LM_Ver*UA_Ver

    Q_tot=Q_dot_Abs-Q_dot_Ver+Q_dot_Kon-Q_dot_Gen-Pwork*convert(W;kW)  "Gesamtwärmestrom->0"
```

"2.10 Massenstrom [kg/s]"
m[14]=m[13]
m[16]=m[15]
m[12]=m[11]
m[18]=m[17]
"3.Zustandsdaten"
"Sämtliche Stoffwerte von LiBr/H2O mittels SSCLiBr.DLL berechnet"

"3.1 Zusammensetzung [% LiBr]"
zeta[2]=zeta[1]
zeta[3]=zeta[2]
zeta[5]=zeta[4]
zeta[6]=zeta[5]
zeta[8]=zeta[7]
zeta[9]=zeta[8]
zeta[10]=zeta[9]

"3.2 Enthalpie [kJ/kg]"

h[1] = LiBrSSCh(T[1];zeta[1];p[1])
h[2] = LiBrSSCh(T[2];zeta[2];p[2])
h[3] = LiBrSSCh(T[3];zeta[3];p[3])
h[4] = LiBrSSCh(T[4];zeta[4];p[4])
h[5] = LiBrSSCh(T[5];zeta[5];p[5])
h[7]=**enthalpy**(***Water***;***T***=T[7];***x***=x[7])
h[8]=**enthalpy**(***Water***;***T***=T[8];***x***=x[8])
T[9]=**temperature**(***Water***;***h***=h[9];***P***=p[9])
h[9]=**enthalpy**(***Water***;***T***=T[9];***x***=x[9])
h[10]=**enthalpy**(***Water***;***T***=T[10];***x***=x[10])
h[11]=**enthalpy**(***Water***;***T***=T[11];***P***=p_w)
h[12]=**enthalpy**(***Water***;***T***=T[12];***P***=p_w)
h[13]=**enthalpy**(***Water***;***T***=T[13];***P***=p_w)
h[14]=**enthalpy**(***Water***;***T***=T[14];***P***=p_w)
h[15]=**enthalpy**(***Water***;***T***=T[15];***P***=p_w)
h[16]=**enthalpy**(***Water***;***T***=T[16];***P***=p_w)
h[17]=**enthalpy**(***Water***;***T***=T[17];***P***=p_w)
h[18]=**enthalpy**(***Water***;***T***=T[18];***P***=p_w)

"3.3 Spezifische Volumen [m^3/kg]"
v[1] = LiBrSSCv(T[1];zeta[1])
v[2] = LiBrSSCv(T[2];zeta[2])
v[3] = LiBrSSCv(T[3];zeta[3])
v[4] = LiBrSSCv(T[4];zeta[4])
v[5] = LiBrSSCv(T[5];zeta[5])
v[6] = LiBrSSCv(T[6];zeta[6])

v[7]=**volume**(***Water***;***T***=T[7];***x***=x[7])
v[8]=**volume**(***Water***;***T***=T[8];***x***=x[8])
v[9]=**volume**(***Water***;***T***=T[9];***x***=x[9])
v[10]=**volume**(***Water***;***T***=T[10];***x***=x[10])

v[11]=**volume**(***Water***;***T***=T[11];***P***=p_w)
v[12]=**volume**(***Water***;***T***=T[12];***P***=p_w)
v[13]=**volume**(***Water***;***T***=T[13];***P***=p_w)
v[14]=**volume**(***Water***;***T***=T[14];***P***=p_w)
v[15]=**volume**(***Water***;***T***=T[15];***P***=p_w)
v[16]=**volume**(***Water***;***T***=T[16];***P***=p_w)
v[17]=**volume**(***Water***;***T***=T[17];***P***=p_w)
v[18]=**volume**(***Water***;***T***=T[18];***P***=p_w)

```
"3.4 Durchflussrate [l/min]"
    V_dot[1]=v[1]*m[1]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[2]=v[2]*m[2]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[3]=v[3]*m[3]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[4]=v[4]*m[4]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[5]=v[5]*m[5]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[6]=v[6]*m[6]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[7]=v[7]*m[7]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[8]=v[8]*m[8]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[9]=v[9]*m[9]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[10]=v[10]*m[10]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[11]=v[11]*m[11]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[12]=v[12]*m[12]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[13]=v[13]*m[13]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[14]=v[14]*m[14]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[15]=v[15]*m[15]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[16]=v[16]*m[16]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[17]=v[17]*m[17]*convert(m^3/s;l/min)
    V_dot[18]=v[18]*m[18]*convert(m^3/s;l/min)

"3.5 Druck [kPa]"
    p[1]=p_N
    p[2]=p_H
    p[3]=p_H
    p[4]=p_H
    p[5]=p_H
    p[6]=p_N
    p[7]=p_H
    p[8]=p_H
    p[9]=p_N
    p[10]=p_N

"4. Leistungsdaten"
"4.1 Coefficiency of performance"
    COP=m[9]*(h[10]-h[9])/(m[11]*(h[11]-h[12]))          "Ohne Einfluss der Pumpe: Pw<<"

"4.2 Lösungszirkulationsrate"
    f=m[3]/m[7]                                          "Richtwert: 11"
    f=11

"5. UA-Werte der Wärmetauscher"
"5.1 Äußere Wärmeübergangskoeffizienten [W/m^2-K]"
    alpha_a_Gen=1200[W/m^2-K]    "!laut. Estiot, E. 2009, S.98 "
    "alpha_a_Kon=3492[W/m^2-K]"  "!laut VDI S.1017 -> Berechnung siehe weiter unten"
    alpha_a_Abs=2000[W/m^2-K]    "!laut Wohlfeil, A. 2009 S.152"
    alpha_a_Ver=4000[W/m^2-K]    "!laut G.Cerbe, G.Wilhelms, Technische Thermodynamik, 16.Aufl 2011, S.374, T8.5'

"5.1.2 Äußerer Wärmeübergangskoeffizient Kondensator VDI S.1017"
    Nus_Kon_Film=alpha_a_Kon*L_char/lambda_Kondensat
    Nus_Kon_Film=0,959*((1-rho_D_Kon/rho_F_Kon)/Re_F_kon)
    L_char=((eta_F_Kon/rho_F_Kon)^2/g#)^(1/3)
    lambda_Kondensat=conductivity(Water;T=T[8];x=x[8])
    rho_D_Kon=1/volume(Water;T=T[8];x=1)
    rho_F_Kon=1/v[8]
    Re_F_Kon=m[8]/5/(pi#*d_a_Kon*eta_F_Kon)
    eta_F_Kon=viscosity(Water;T=T[8];x=x[8])

"5.2 Inneren Wärmeübergangskoeffizienten der Wärmetauschern laut VDI Wärmeatlas G1 Durchströmte Rohre"
"5.2.1 Mittlere Wassertemperaturen [°C]"
    T_m_11_12=(T[11]+T[12])/2
    T_m_15_16=(T[15]+T[16])/2
    T_m_13_14=(T[13]+T[14])/2
    T_m_17_18=(T[17]+T[18])/2
```

"5.2.2 Abgeschätze Wandtemperaturen [°C]"
T_w_Gen_i=T_m_11_12-2[°C]
T_w_Kon_i=T_m_15_16+2[°C]
T_w_Abs_i=T_m_13_14+2[°C]
T_w_Ver_i=T_m_17_18-2[°C]

"5.2.3 Wärmeleitfähigkeiten Kupfer [W/m-K]"
lambda_Cu_Gen=**conductivity**(Copper; ***T***=T_w_Gen_i)
lambda_Cu_Kon=**conductivity**(Copper; ***T***=T_w_Kon_i)
lambda_Cu_Abs=**conductivity**(Copper; ***T***=T_w_Abs_i)
lambda_Cu_Ver=**conductivity**(Copper; ***T***=T_w_Ver_i)

"5.2.4 Dimensionen WT-Kupferrohre"
"5.2.4.1 Durchmesser [m]"
d_a_Gen=0,012
d_i_Gen=0,010

d_a_Kon=0,012
d_i_Kon=0,010

d_a_Abs=0,012
d_i_Abs=0,010

d_a_Ver=0,012
d_i_Ver=0,010

"5.2.4.2 Längen und Gangzahlen"
L_Gen=4*0,44+5*0,018*Pi+2*0,470
n_Gen=1

L_Kon=2*0,435+0,018*Pi
n_Kon=5
L_Kon_Ges=n_Kon*L_Kon

L_Abs=2*0,350+0,018*Pi
n_Abs=5
L_Abs_Ges=L_Abs*n_Abs

L_Ver=2*0,350+0,018*pi
n_Ver=5
L_Ver_Ges=n_Ver*L_Ver

"5.2.4.3 Oberflächen [m^2]"
A_a_Gen=L_Gen*d_a_Gen*Pi# "Oberfläche pro Gang außen"
A_i_Gen=L_Gen*d_i_Gen*Pi# "Oberfläche pro Gang innen"
A_a_Gen_Ges=A_a_Gen*n_Gen "Gesamtoberfläche"

A_a_Kon=L_Kon*d_a_Kon*Pi# "Oberfläche pro Gang außen"
A_i_Kon=L_Kon*d_i_Kon*Pi# "Oberfläche pro Gang innen"
A_a_Kon_Ges=A_a_Kon*n_Kon "Gesamtoberfläche"

A_a_Abs=L_Abs*d_a_Abs*Pi# "Oberfläche pro Gang außen"
A_i_Abs=L_Abs*d_i_Abs*Pi# "Oberfläche pro Gang innen"
A_a_Abs_Ges=A_a_Abs*n_Abs "Gesamtoberfläche"

A_a_Ver=L_Ver*d_a_Ver*Pi# "Oberfläche pro Gang außen"
A_i_Ver=L_Ver*d_i_Ver*Pi# "Oberfläche pro Gang innen"
A_a_Ver_Ges=A_a_Ver*n_Ver "Gesamtoberfläche"

"5.2.4.4 Querschnittsflächen der WT-Rohre [m^2]"
A[11]=d_i_Gen^2*Pi/4
A[15]=d_i_Kon^2*Pi/4
A[13]=d_i_Abs^2*Pi/4
A[17]=d_i_Ver^2*Pi/4

```
"5.2.5 Wärmestromdichten [W/m^2]"
    q_Gen=Q_dot_Gen/(A_a_Gen*n_Gen)*convert(kW/m^2;W/m^2)
    q_Kon=Q_dot_Kon/(A_a_Kon*n_Kon)*convert(kW/m^2;W/m^2)
    q_Abs=Q_dot_Abs/(A_a_Abs*n_Abs)*convert(kW/m^2;W/m^2)
    q_Ver=Q_dot_Ver/(A_a_Ver*n_Ver)*convert(kW/m^2;W/m^2)

"5.2.6 Dynamische Viskosität [kg/m-s]"
    p_w=110[kPa]                                    "Angenommener Wert für Druck in externen
Wasserkreisläufen -> Viskosität ändern
                                                    sich im Bereich 1-5bar nicht wesentlich"

    mu_Gen=viscosity(Water;T=T_m_11_12;P=p_w)
    mu_Kon=viscosity(Water;T=T_m_15_16;P=p_w)
    mu_Abs=viscosity(Water;T=T_m_13_14;P=p_w)
    mu_Ver=viscosity(Water;T=T_m_17_18;P=p_w)

"5.2.7 Fließgeschwindigkeiten [m/s]"
    u[11]=V_dot[11]/(n_Gen*A[11])*convert(l/min-m^2;m/s)
    u[15]=V_dot[15]/(n_Kon*A[15])*convert(l/min-m^2;m/s)
    u[13]=V_dot[13]/(n_Abs*A[13])*convert(l/min-m^2;m/s)
    u[17]=V_dot[17]/(n_Ver*A[17])*convert(l/min-m^2;m/s)

"5.2.8 Reynoldszahl [/]"
    "!Laminar:                                      Re<2300
    Übergangabereich                                2300<Re<10^4
    Turbulent:                                      Re>10^4"

    Re_Gen=u[11]*d_i_Gen/(mu_Gen*v[11])
    Re_Kon=u[15]*d_i_Kon/(mu_Kon*v[15])
    Re_Abs=u[13]*d_i_Abs/(mu_Abs*v[13])
    Re_Ver=u[17]*d_i_Ver/(mu_Ver*v[17])

"5.2.9 Prandtlzahl"
    Pr_Gen=prandtl(Water;T=T_m_11_12;P=p_w)
    Pr_Kon=prandtl(Water;T=T_m_15_16;P=p_w)
    Pr_Abs=prandtl(Water;T=T_m_13_14;P=p_w)
    Pr_Ver=prandtl(Water;T=T_m_17_18;P=p_w)

"5.2.10 Prandtlzahl mit Wandtemperatur"
    Pr_Wi_Gen=prandtl(Water;T=T_W_Gen_i;P=p_w)
    Pr_Wi_Kon=prandtl(Water;T=T_W_Kon_i;P=p_w)
    Pr_Wi_Abs=prandtl(Water;T=T_W_Abs_i;P=p_w)
    Pr_Wi_Ver=prandtl(Water;T=T_W_Ver_i;P=p_w)

"5.2.11 Rohrreibungsbeiwert (Gl.27)"
    zeta_Gen=(1,8*log10(Re_Gen)-1,5)^(-2)
    zeta_Kon=(1,8*log10(Re_Kon)-1,5)^(-2)
    zeta_Abs=(1,8*log10(Re_Abs)-1,5)^(-2)
    zeta_Ver=(1,8*log10(Re_Ver)-1,5)^(-2)

"5.2.12 K-Faktor-Einfluss der Temp.-Abhängigkeit der Stoffwerte (Gl.40)"
    K_Fak_Gen=(Pr_Gen/Pr_Wi_Gen)^(0,11)
    K_Fak_Kon=(Pr_Kon/Pr_Wi_Kon)^(0,11)
    K_Fak_Abs=(Pr_Abs/Pr_Wi_Abs)^(0,11)
    K_Fak_Ver=(Pr_Ver/Pr_Wi_Ver)^(0,11)


"5.2.13Mittlere Nusselt Zahl"
    Nus_m_Gen=nusm(zeta_Gen;Re_Gen;Pr_Gen;d_i_Gen;L_Gen;Pr_wi_Gen;K_Fak_Gen)
    Nus_m_Kon=nusm(zeta_Kon;Re_Kon;Pr_Kon;d_i_Kon;L_Kon;Pr_wi_Kon;K_Fak_Kon)
    Nus_m_Ver=nusm(zeta_Ver;Re_Ver;Pr_Ver;d_i_Ver;L_Ver;Pr_wi_Ver;K_Fak_Ver)
    Nus_m_Abs=nusm(zeta_Abs;Re_Abs;Pr_Abs;d_i_Abs;L_Abs;Pr_wi_Abs;K_Fak_Abs)
```

"5.2.14 Wärmeleitfähigkeit Wasser"

lambda_Gen=**conductivity**(***Water***;***T***=T_m_11_12;***P***=p_w)
lambda_Kon=**conductivity**(***Water***;***T***=T_m_15_16;***P***=p_w)
lambda_Abs=**conductivity**(***Water***;***T***=T_m_13_14;***P***=p_w)
lambda_Ver=**conductivity**(***Water***;***T***=T_m_17_18;***P***=p_w)

"5.2.15 Innerer Wärmeübergangskoeffizient"

alpha_i_Gen=Nus_m_Gen*lambda_Gen/d_i_Gen
alpha_i_Kon=Nus_m_Kon*lambda_Kon/d_i_Kon
alpha_i_Abs=Nus_m_Abs*lambda_Abs/d_i_Abs
alpha_i_Ver=Nus_m_Ver*lambda_Ver/d_i_Ver

"5.3 UA-Werte"

"!Herleitung UA-Wert:
Q=A_i*alpha_i*(T_i-T_wi)
Q=2*pi*l*lambda/ln(da/di)*(T_wi-T_wa)
Q=A_a*alpha_a*(T_wa-T_a)
Q=UA*(T_i-T_a) -> T_i-T_a = T_m_log
=> UA=1/(1/(A_i*alpha_i)+ln(da/di)/(2*Pi*l*lambda)+1/(A_a*alpha_a)) -> UA-Wert pro Gang"

UA_Gen_b/n_Gen***convert**(kW/K;W/K)=1/(1/(A_i_Gen*alpha_i_Gen)+**ln**(d_a_Gen/d_i_Gen)/(2*Pi*L_Gen*lambda_Cu_Gen)+1/(A_a_Gen*alpha_a_Gen))

UA_Kon_b/n_Kon***convert**(kW/K;W/K)=1/(1/(A_i_Kon*n_Kon*alpha_i_Kon)+**ln**(d_a_Kon/d_i_Kon)/(2*Pi*L_Kon_ges*lambda_Cu_Kon)+1/(A_a_Kon*n_kon*alpha_a_Kon))

UA_Abs_b/n_Abs***convert**(kW/K;W/K)=1/(1/(A_i_Abs*n_Abs*alpha_i_Abs)+**ln**(d_a_Abs/d_i_Abs)/(2*Pi*L_Abs_ges*lambda_Cu_Abs)+1/(A_a_Abs*n_Abs*alpha_a_Abs))

UA_Ver_b/n_Ver***convert**(kW/K;W/K)=1/(1/(A_i_Ver*n_Ver*alpha_i_Ver)+**ln**(d_a_Ver/d_i_Ver)/(2*Pi*L_Ver_Ges*lambda_Cu_Ver)+1/(A_a_Ver*n_Ver*alpha_a_Ver))

A.2. EES Code - Berechnung 1-Stufige NH_3/H_2O AKM

```
"Diplomarbeit - Auslegung und Konstruktion einer H2O/LiBr Absorptionskältemaschine für den Laborunterricht"
"Matthias Mair-Zeininger, 2017"
"Berechnung: 1-stufige NH3/H2O Absorptionskältemaschine"

$UpdateGuesses
$TabStops 0,5 2 10 15 cm

"Function für mittlere Logarithmische Temperatur, mit Kontrolle auf Singularitäten"
Function tlm(T1;T2;T3;T4)
    Tgr=T1-T2
    Tkl=T3-T4
    if(Tgr=Tkl) Then
    tlm=Tgr
Else
    if(Tgr<0) or (Tkl<0) Then
    tlm=0
Else
    tlm=(Tgr-Tkl)/ln(Tgr/Tkl)
Endif
Endif
End

"Procedure für die Wärmetauscherberechnung mittels Wirkungsgrad"
Procedure etawt(eta;m_dot_c;m_dot_h;T_in_c;T_in_h;cph;cpc:T_out_h;T_out_c;Q_dot)
    C_dot_c=m_dot_c*cpc
    C_dot_h=m_dot_h*cph
    C_dot_min=min(C_dot_c;C_dot_h)
    Q_dot=eta*C_dot_min*(T_in_h-T_in_c)
    T_out_c=T_in_c+Q_dot/C_dot_c
    T_out_h=T_in_h-Q_dot/C_dot_h
End

 SI=2
```

"Inhaltsverzeichnis:
1. Eingabewerte
    1.1 Temperatur
    1.2 Dampfgehalt
    1.3 Massenstrom
    1.4 Ammoniakgehalt
    1.5 Wirkungsgrad
    1.6 Druck
    1.7 Zusammenhänge
    1.8 Logarithmische Temperaturdifferenz
    1.9 UA-Werte
    1.10 Wärmeströme

2. Bilanzen an den Komponenten
    2.1 Lösungsumpe
    2.2 Temperaturwechsler
    2.3 Generator
    2.4 Rektifikator
    2.5 Lösungsdrossel
    2.6 Kondensator
    2.7 Kältemitteldrossel
    2.8 Verdampfer
    2.9 Absorber

3 Leistungsdaten
    3.1 Coefficiency of Performance
    3.2 Lösungsumlaufrate
    3.3 Druckverhältnis

4. Stoffwerte
    4.1 Enthalpie
    4.2 Spezifisches Volumen
    4.3 Temperatur
    4.4 Ammoniakgehalt
    4.5 Dampfgehalt"

```
"1. Eingabewerte"

"1.1 Temperatur"
    "T[8]=40[°C]"                                   "Ausgangstemperatur Kondensator"
    "T[10]=8[°C]"                                   "Ausgangstemperatur Verdampfer"
    "T[1]=40[°C]"                                   "Ausgangstemperatur Absorber"

    T[15]=T[14]                                                                    "
Kühlwasserausgangstemp Absorber=KW-Eingangstemp Kondensator"
    T[11]=100[°C] "100°C"                           "Eingangstemperatur Heißwasser"
    "T[13]=25[°C]"  "25"                            "Kühlwassereingangstemp Absorber"
    T[17]=15[°C]                                    "Kaltwassereingangstemp Verdampfer"

    "T[18]=10[°C]"                                  "Ausgangstemperatur Kaltwasser"
    "T[16]=35[°C]"                                  "Ausgangstemperatur Kühlwasser"
    "T[12]=97[°C]"                                  "Ausgangstemperatur Heißwasser"
    "T[14]=32[°C]"                                  "Zwischentemperatur Kühlwasser"

"1.2 Dampfgehalt"
    x[1]=0                                          "Ausgang Absorber/ Eingang Pumpe"
    x[4]=0                                          "Ausgang Generator"
    x[7]=1                                          "Ausgang Kopf Rektifikationskolonne"
    x[8]=0                                          "Ausgang Kondensator"
    x[10]=1                                         "Ausgang Verdampfer"
    x[19]=1                                         "Ausgang Generator"
    x[20]=0                                         "Ausgang Sumpf Rektifikationskolonne"

"1.3 Massenstrom"
    "m[1]=0,007[kg/s]"                              "Massenstrom Lösungspumpe"
    m[11]=0,2[kg/s] "0,2"                           "Massenstrom Heißwasser"
    m[13]=0,2[kg/s] "0,2"                           "Massenstrom Kühlwasser"
    m[15]=m[13]
    m[17]=0,1[kg/s] "0,1"                           "Massenstrom Kaltwasser"

"1.4 Ammoniakgehalt"
    "DELTA_zeta_1_4=0,1"                            "Unterschied des Ammoniakgehalts zwischen
den beiden Lösungsströmen"
    zeta[7]=0,9996                                  "Ammoniakgehalt Ausgang Rektifikatior"

"1.5 Wirkungsgrad"
    eta_Pumpe=1,0                                   "Wirkungsgrad Lösungspumpe"
    eta_TW=0,8                                      "Wirkungsgrad Temperaturwechsler"

"1.6 Druck"
    p_w=110[kPa]                                    "Druck externe Wasserkreisläufe"

    p_H=pressure(NH3H2O;T=T[8];x=zeta[8];Q=x[8])    "Druck am Kondensatorausgang -
Kondensatortemperatur bestimmt Systemdurck im Hochtdruckteil"
    p[2]=p_H
    p[3]=p_H
    p[4]=p_H
    p[5]=p_H
    p[7]=p_H
    p[8]=p_H
    p[19]=p_H
    p[20]=p_H

    p_N=pressure(NH3H2O;T=T[10];x=zeta[10];Q=x[10])  "Druck am Verdampferausgang -
Verdampfertemperatur bestimmt Systemdruck im Niederdruckteil"
    p[1]=p_N
    p[6]=p_N
    p[9]=p_N
    p[10]=p_N

"1.7 Zusammenhänge"
    DELTA_zeta_1_4=zeta[1]-zeta[4]
```

```
"1.8 Logarithmische Temperaturdifferenz"
    T_LM_Gen=tlm(T[11];T[4];T[12];T[4])
    T_LM_Kon=tlm(T[8];T[16];T[8];T[15])
    T_LM_Ver=tlm(T[17];T[10];T[18];T[10])
    T_LM_Abs=tlm(T[6];T[14];T[1];T[15])

"1.9 UA-Werte"
    "UA-Werte wurden die selben verwendet wie sie für die H2O/LiBr AKM berechnet wurden"
    UA_Gen=0,1208[kW/K]
    UA_Kon=0,429[kW/K]
    UA_Ver=0,2701[kW/K]
    UA_Abs=0,2552[kW/K]

"1.10 Wärmeströme"
    Q_dot_Gen=UA_Gen*T_LM_Gen
    Q_dot_Kon=UA_Kon*T_LM_Kon
    Q_dot_Ver=UA_Ver*T_LM_Ver
    Q_dot_Abs=UA_Abs*T_LM_Abs

"2. Bilanzen an den Komponenten"

"2.1 Lösungsumpe"
    m[1]=m[2]                                          "Massenbilanz"
    zeta[1]=zeta[2]                                    "Ammoniakbilanz"
    w_p_spec=v[1]*(p[2]-p[1])/eta_Pumpe                "spezifische Pumpenarbeit"
    h[2]=h[1]+w_p_spec                                 "Energiebilanz"
    W_T_P=m[1]*w_p_spec                                "Pumpenarbeit"

"2.2 Temperaturwechsler"
    m[2]=m[3]                                          "Massenbilanz"
    m[5]=m[4]

    zeta[2]=zeta[3]                                    "Ammoniakbilanz"
    zeta[5]=zeta[4]

    cp_23=(h[2]-h[3])/(T[2]-T[3])                      "Wärmekapazitätsstrom"
    cp_45=(h[4]-h[5])/(T[4]-T[5])

     Call etawt(eta_TW;m[1];m[4];T[2];T[4];cp_45;cp_23:T[5];T[3];Q_dot_TW)  "Energiebilanz"

 "2.3 Generator"
    m[19]+m[4]=m[20]+m[3]                              "Massenbilanz"
    m[19]*zeta[19]+m[4]*zeta[4]=m[20]*zeta[20]+m[3]*zeta[3]   "Ammoniakbilanz"
    m[19]*h[19]+m[4]*h[4]=m[20]*h[20]+m[3]*h[3]+Q_dot_Gen     "Energiebilanz"
    Q_dot_Gen=m[11]*(h[11]-h[12])
    Q_dot_Gen=2[kW]

"2.4 Rektifikator"
    T[20]=T[19]
    zeta[20]=zeta[3]
    m[7]+m[20]=m[19]                                   "Massenbilanz"
    m[7]*zeta[7]+m[20]*zeta[20]=m[19]*zeta[19]         "Ammoniakbilanz"
    m[7]*h[7]+m[20]*h[20]+Q_dot_Rek=m[19]*h[19]        "Energiebilanz"

"2.5 Lösungsdrossel"
    m[5]=m[6]                                          "Massenbilanz"
    zeta[5]=zeta[6]                                    "Ammoniakbilanz"
    h[5]=h[6]                                          "Energiebilanz"

"2.6 Kondensator"
    m[7]=m[8]                                          "Massenbilanz"
    zeta[7]=zeta[8]                                    "Ammoniakbilanz"

    m[7]*(h[7]-h[8])=Q_dot_Kon                         "Energiebilanz"
    Q_dot_Kon=m[15]*(h[16]-h[15])
```

```
"2.7 Kältemitteldrossel"
    m[8]=m[9]                                                    "Massenbilanz"
    zeta[8]=zeta[9]                                              "Ammoniakbilanz"
    h[8]=h[9]                                                    "Energiebilanz"

"2.8 Verdampfer"
    m[9]=m[10]                                                   "Massenbilanz"
    zeta[9]=zeta[10]                                             "Ammoniakbilanz"

    m[9]*(h[10]-h[9])=Q_dot_Ver                                  "Energiebilanz"
    Q_dot_Ver=m[17]*(h[17]-h[18])

"2.9 Absorber"
    m[10]+m[6]=m[1]+DELTA_Massenstrom                            "Massenbilanz: Redundant mit Generator, abe
mit Fehlerterm (=0) zur Kontrolle"
    m[10]*zeta[10]+m[6]*zeta[6]=m[1]*zeta[1]+DELTA_Ammoniak      "Ammoniakbilanz: Redundant mit Generator,
aber mit Fehlerterm (=0) zur Kontrolle"

    m[10]*h[10]+m[6]*h[6]=m[1]*h[1]+Q_dot_Abs                    "Energiebilanz"
    Q_dot_Abs=m[13]*(h[14]-h[13])

"3 Leistungsdaten"
"3.1 Coefficiency of Performance"
    COP=Q_dot_Ver/Q_dot_Gen
"3.2 Lösungsumlaufrate"
    f=m[1]/m[7]                                                  "Lösungsumlaufrate: kg Dampf / kg
umgewälzte Lösung"
    f=11
"3.3 Druckverhältnis"
    r_P=p_H/p_N

"4. Stoffwerte"
 "4.1 Enthalpie"
    h[1]=enthalpy(NH3H2O;T=T[1];P=p[1];Q=x[1])                   "Annahme: flüssig gesättigt"
    h[4]=enthalpy(NH3H2O;x=zeta[4];P=p[4];Q=x[4])                "Annahme: flüssig gesättigt"
    h[7]=enthalpy(NH3H2O;x=zeta[7];P=p[7];Q=x[7])
    h[8]=enthalpy(NH3H2O;x=zeta[8];T=T[8];Q=x[8])
    h[10]=enthalpy(NH3H2O;x=zeta[10];T=T[10];Q=x[10])
    h[19]=enthalpy(NH3H2O;T=T[19];P=p[19];Q=x[19])
    h[20]=enthalpy(NH3H2O;x=zeta[20];P=p[20];Q=x[20])


    h[11]=enthalpy(Water;T=T[11];P=p_w)
    h[12]=enthalpy(Water;T=T[12];P=p_w)
    h[13]=enthalpy(Water;T=T[13];P=p_w)
    h[14]=enthalpy(Water;T=T[14];P=p_w)
    h[15]=enthalpy(Water;T=T[15];P=p_w)
    h[16]=enthalpy(Water;T=T[16];P=p_w)
    h[17]=enthalpy(Water;T=T[17];P=p_w)
    h[18]=enthalpy(Water;T=T[18];P=p_w)

"4.2 Spezifisches Volumen"
    v[1]=volume(NH3H2O;T=T[1];P=p[1];Q=x[1])

"4.3 Temperatur"
    T[2]=temperature(NH3H2O;P=p[2];h=h[2];x=zeta[2])
    T[3]=temperature(NH3H2O;P=p[3];h=h[3];x=zeta[3])
    T[4]=temperature(NH3H2O;P=p[4];x=zeta[4];Q=x[4])
    T[5]=temperature(NH3H2O;P=p[5];h=h[5];x=zeta[5])
    T[6]=temperature(NH3H2O;P=p[6];h=h[6];x=zeta[6])
    T[7]=temperature(NH3H2O;P=p[7];Q=x[7];x=zeta[7])
    T[9]=temperature(NH3H2O;P=p[9];h=h[9];x=zeta[9])
    T[20]=temperature(NH3H2O;P=p[20];x=zeta[20];Q=x[20])

"4.4 Ammoniakgehalt"
    zeta[1]=massfraction(NH3H2O;T=T[1];P=p[1];Q=x[1])
    zeta[19]=massfraction(NH3H2O;T=T[19];P=p[19];Q=x[19])
```

"4.5 Dampfgehalt"

x[6]=**quality**(***NH3H2O***;***P***=p[6];***h***=h[6];x=zeta[6])

x[9]=**quality**(***NH3H2O***;***P***=p[9];***h***=h[9];x=zeta[9])

A.3. Nachrechnung des Absorber-Verdampfer Behälters

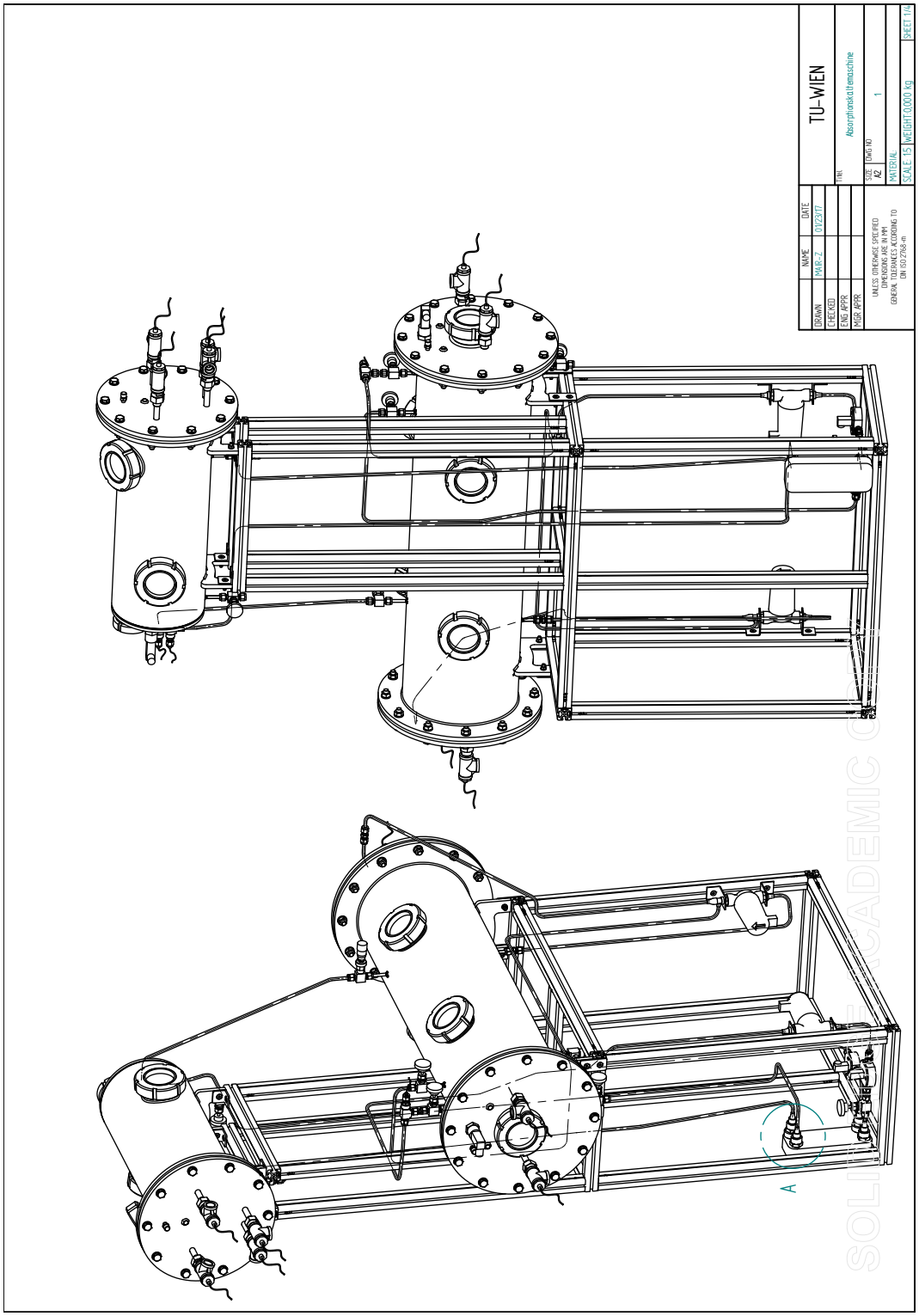
Um sicherzustellen, dass die als Behälter gewählten Edelstahlrohre den Druckbelastungen standhalten wird der Behälter nach *DIN EN 13445-3 Kap.8 - Schalen unter Außendruck* nachgerechnet. Da im Absorber-Verdampfer Behälter der größere Druckunterschied zur Umgebung herrscht und die längere Ausführung zu ungünstigeren Belastungen führt, wird nur dieser Behälter nachberechnet.

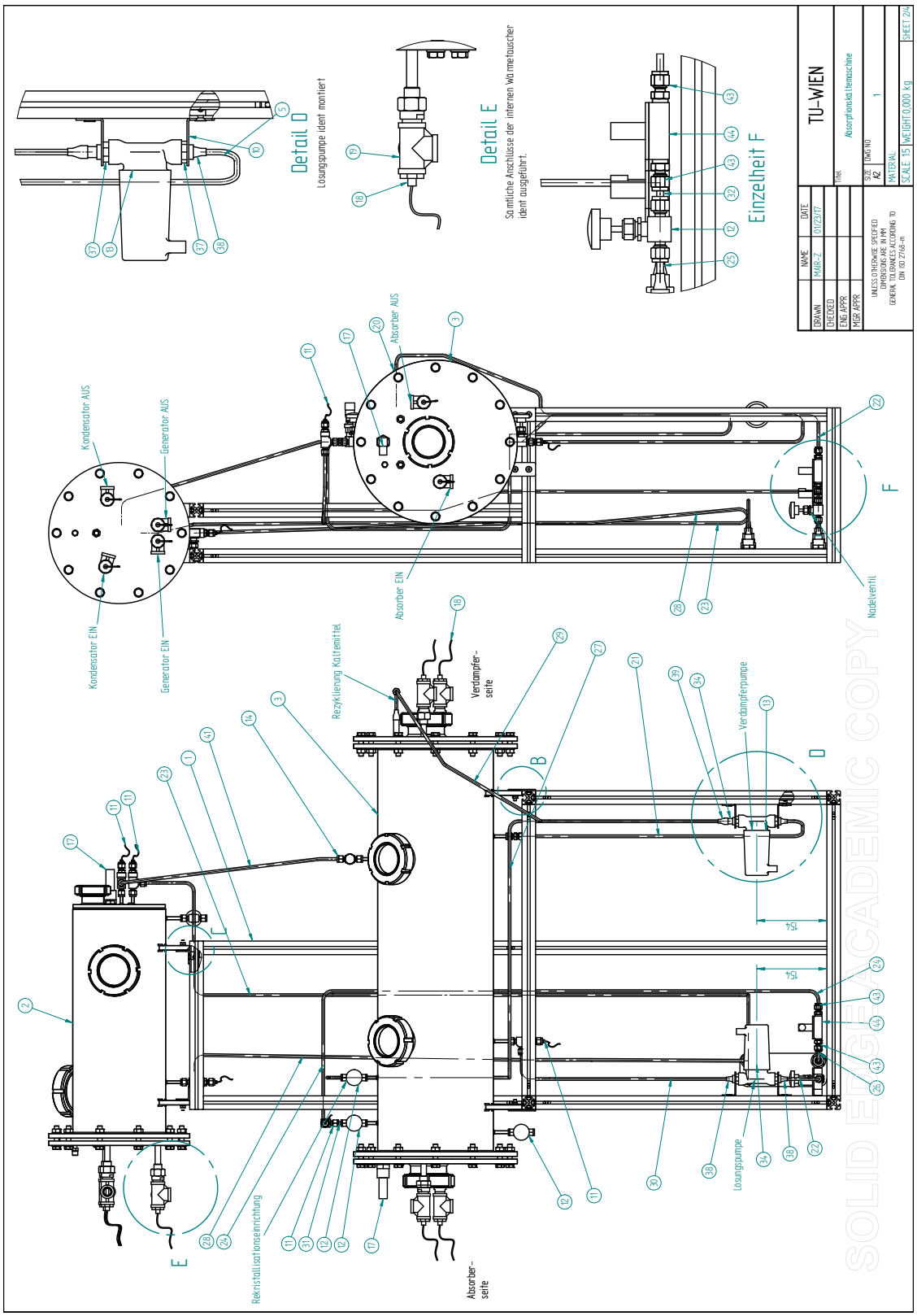
Material: Austenitischer Stahl 1.4301 (X5CrNi18-10)

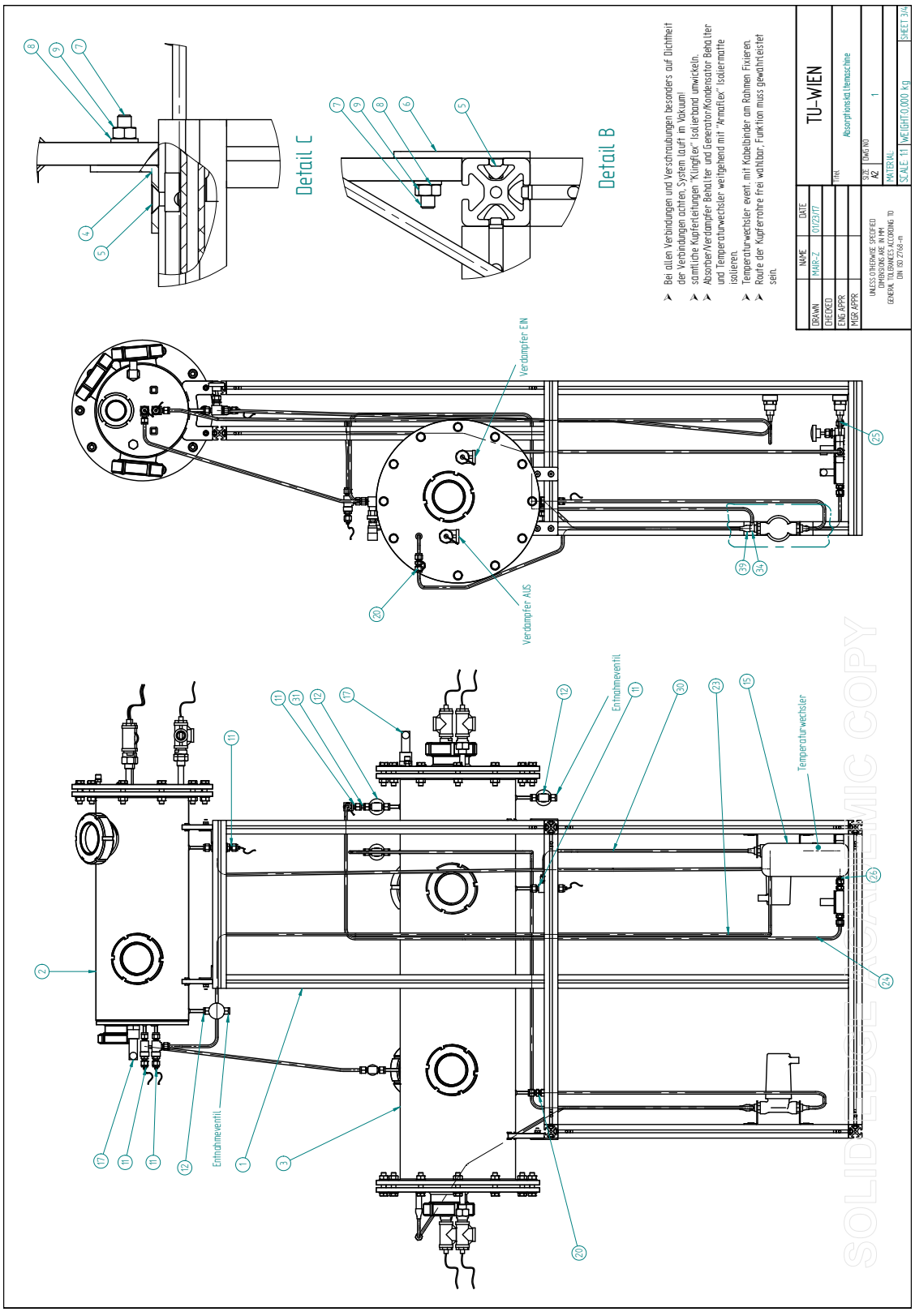
$R_{p0,2} = 360\ \frac{N}{mm^2}$	...Dehngrenze [20]
$L = 900\ mm$	...ungestützte Schalenlänge
$S = 1,5$	...Sicherheit für Auslegung
$R = 126\ mm$	...mittlerer Radius der Schale
$e_a = 2\ mm$	...Wandstärke der Schale
$E = 2 * 10^5\ \frac{N}{mm^2}$	...E-Modul
$\sigma_e = \frac{R_{p0,2}}{1,25} = 152\ \frac{N}{mm^2}$	...Nennelastizitätsgrenze für Schale (für austenitischen Stahl)
$p_y = \frac{sigma_e * e_a}{R} = 2,41\ \frac{N}{mm^2}$	...Druck bei dem die mittlere Umfagsspannung einer Zylinderschale in der Mitte zwischen den Versteifungen die Fließgrenze erreicht
$\epsilon = 0,00022$	...mittlere elastische Dehnung bei Versagen (Laut. Bild 8.5-3 [Norm 13445-3])
$p_m = \frac{E * e_a * \epsilon}{R} = 0,73\ \frac{N}{mm^2}$	...Theoretischer elastischer Beuldruck bei Versagen einer perfekten Zylinderschale
$\frac{p_m}{p_Y} = 0,301\ \frac{N}{mm^2}$ $\Rightarrow$ aus Bild 8.5-5 [Norm 13445-3]	$\frac{p_r}{p_y} = 0,21$
$\Rightarrow p_r = 0,52\ \frac{N}{mm^2} = 5,2\ bar$	...berechneter unterer Versagensdruck [21]

B. Technische Zeichnungen

B.1. Absorptionskältemaschine



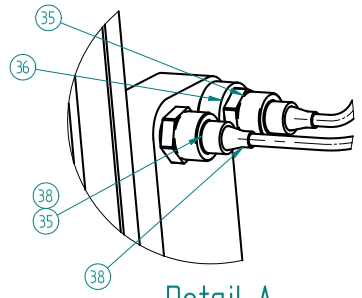

Detail D
Lösungspumpe ident montiert
Detail E
Sämtliche Anschlüsse der internen Wärmetauscher ident ausgeführt.
Einzelheit F
TU-WIEN
Absorptionskältemaschine
Kondensator AUS
Generator AUS
Absorber AUS
Kondensator EIN
Generator EIN
Absorber EIN
Nadelventil
Rektifikationseinrichtung
Rezyklierung Kältemittel
Verdampfer-seite
Absorber-seite
Verdampferpumpe
Lösungspumpe
154
SOLID EDGE ACADEMIC COPY


Detail C
Detail B
Bei allen Verbindungen und Verschraubungen besonders auf Dichtheit der Verbindungen achten, System läuft im Vakuum!
sämtliche Kupferleitungen "Klingflex" Isolierband umwickeln.
Absorber/Verdampfer Behälter und Generator/Kondensator Behälter und Temperaturwechsler weitgehend mit "Armaflex" Isoliermatte isolieren.
Temperaturwechsler event. mit Kabelbinder am Rahmen Fixieren.
Route der Kupferrohre frei wählbar. Funktion muss gewährleistet sein.
TU-WIEN
Absorptionskältemaschine
Verdampfer EIN
Verdampfer AUS
Entnahmeventil
Temperaturwechsler
SOLIDEDGE ACADEMIC COPY

Pos.	Anzahl	Titel	Norm/Abmessung	Dokumentnummer
1	1	Rahmen		1.1
2	1	Generator Kondensator		1.2
3	1	Absorber Verdampfer		1.3
4	4	Winkel 30	Item 6	IT 4
5	12	Befestigungssatz Winkel/Lasche	Item 6	IT 2
6	4	Lasche 30	Item 6	IT 3
7	8	Senkschraube mit Innensechskant	ISO 10642 -M6x25	
8	7	Scheibe V2A	ISO 7089-6-A2-200 HV	
9	8	Sechskantmutter V2A	ISO 4032-M6-A2	
10	4	Befestigungswinkel Pumpe	79x28x2	1.5
11	5	Temperaturmessstelle	6mm - 6mm	1.4
12	5	Nadelventil SS-1RS6MM	6mm-6mm	SL 1
13	2	Pumpe Grundfos UPS 15 14 B PM		PU
14	1	Dosierventil SS-6MG-MM-MH	6mm-6mm	SL 3
15	1	Plattenwärmetauscher HRALE		PWT
17	2	Drucktransmitter DT1	G 1/4"	ME 2
18	8	Einschraubfügler	G 1/2"-50mm	ME 3
19	8	T-Stück	1/2"	ECE 3130
20	2	Gerade Verschraubung SS-6M0-6	6mm-6mm	SL 2
21	1	VER aus ->PV ein	Φ6x1x750	R 2
22	1	PL aus -> DM ein	Φ6x1x140	R 2
23	1	TW aus -> GEN ein	Φ6x1x1860	R 2
24	1	DM aus -> TM ABS ein	Φ6x1x1580	R 2
25	1	NV aus -> TW ein	Φ6x1x30	R 2
26	1	TW aus-> DM ein	Φ6x1x90	R 2
27	1	PV aus -> RK ein	Φ6x1x1910	R 2
28	1	GEN aus -> TW ein	Φ6x1x1300	R 2
29	1	PV aus -> REZ ein	Φ6x1x1025	R 2

Pos.	Anzahl	Titel	Norm/Abmessung	Dokumentnummer
30	1	ABS aus-> PL ein	Φ6x1x530	R 2
31	1	TM ABS aus -> ABS ein	Φ6x1x30	R 1
32	1	DM aus -> NV ein	Φ6x1x29	R 1
34	1	T-Stück 10-6-10	EN 1254-1	KF 10
35	4	Lötverschraubung	1/2" IG x 12mm	ECE 7332
36	2	Reduzierstück	3/4" IG x 1/2"AG	ECE 3246
37	4	Lötverschraubung	1/2" AG x 12mm	ECE 7331
38	7	Reduziermuffe 12-6 i/i	EN 1254-1	KF8
39	1	Reduziermuffe 12-6 a/i	EN 1254-1	KF 7
41	1	KON aus -> VER ein	Φ6x1x540	R 2
43	4	Einschraubverschraubung SS-6M0-1-2RS	1/8"-6mm	SL 4
44	2	Durchflussmesser FCH-m-ALU		ME 4

- GEN...Generator
- KON...Kondensator
- ABS...Absorber
- VER...Verdampfer
- PV...Verdampferpumpe
- PL...Lösungspumpe
- NV...Nadelventil
- DM...Durchflussmesser
- REZ...Rezyklierung Kältemittel
- RK...Rekristallisationseinrichtung
- TW...Temperaturwechsler
- TM...Temperaturmessstelle



Detail A

SOLIDEDGE ACADEMIC COPY

	NAME	DATE
DRAWN	MAIR-Z	01/23/17
CHECKED		
ENG APPR		
MGR APPR		

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MM
GENERAL TOLERANCES ACCORDING TO
DIN ISO 2768-m

TU-WIEN

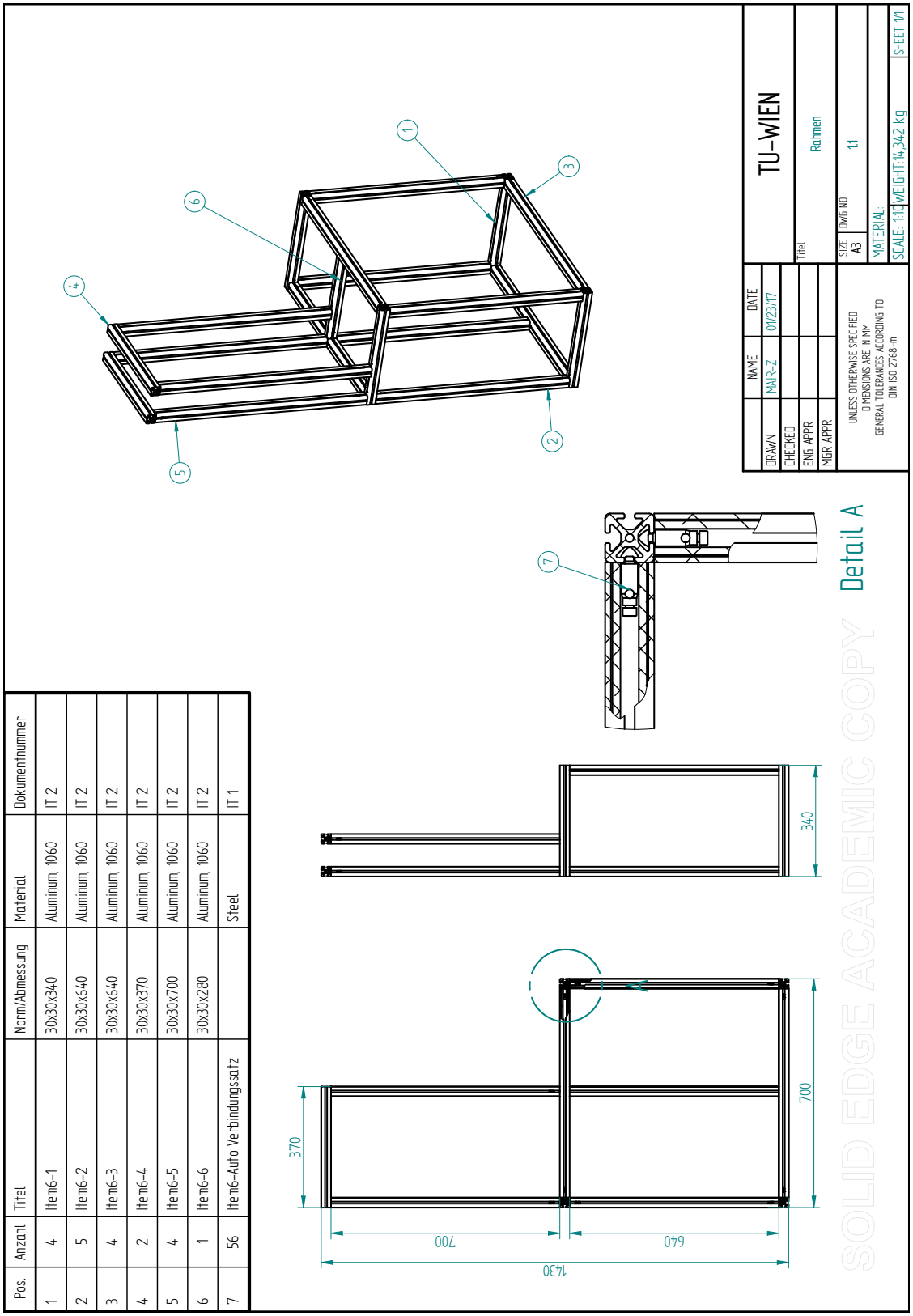
Titel: Absorptionskältemaschine

SIZE A3 | DWG NO 1

MATERIAL:

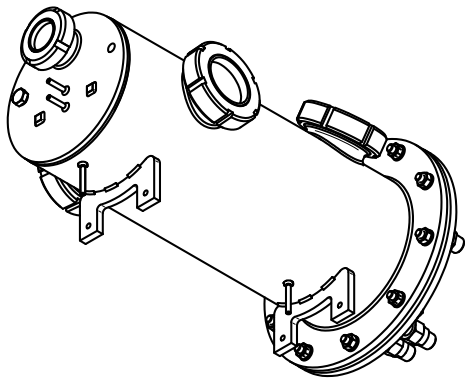
SCALE: 1:1 | WEIGHT:0,000 kg | SHEET 4/4

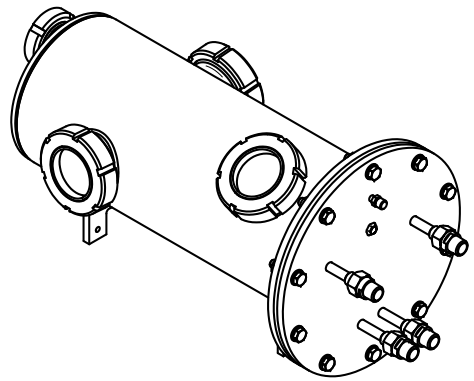
B.1.1. Rahmen



Pos.	Anzahl	Titel	Norm/Abmessung	Material	Dokumentnummer
1	4	Item6-1	30x30x340	Aluminum, 1060	IT 2
2	5	Item6-2	30x30x640	Aluminum, 1060	IT 2
3	4	Item6-3	30x30x640	Aluminum, 1060	IT 2
4	2	Item6-4	30x30x370	Aluminum, 1060	IT 2
5	4	Item6-5	30x30x700	Aluminum, 1060	IT 2
6	1	Item6-6	30x30x280	Aluminum, 1060	IT 2
7	56	Item6-Auto Verbindungssatz		Steel	IT 1

B.1.2. Generator-Kondensator





Pos.	Anzahl	Titel	Norm/Abmessung	Material	Dokumentnummer
1	1	Kondensator			1.2.3
2	1	Generator			1.2.2
3	1	Kondensatbecken			1.2.4
4	1	Flanschdichtung	EN 1514-1 DN200	EPDM	
5	1	Dichtring Gummi		Rubber	
6	20	Scheibe	ISO 7091-10-100 HV	Steel	
7	10	Sechskantschraube	ISO 4014-M10x45	Steel	
8	10	Sechskantmutter	ISO 4032-M10	Steel	
10	1	Scheibe V2A	ISO 7089-6-A2-200 HV	Stainless steel	
11	1	Sechskantmutter V2A	ISO 4032-M6-A2	Stainless steel	
12	1	Füllstandsrohr	Φ6x1x63	Copper	1.2.5
13	1	Schrader Ventil 6mm		Brass, yellow brass	V 1
14	1	Kupferdichtring	DIN 7603A 12-18-1	Copper	
15	1	Sechskantschraube V2A	ISO 4017-M12x12-A2	Stainless steel	
16	4	Lötverschraubung	1/2" AGx12mm		MF 1
17	1	Behälter Generator Kondensator		1.4301	1.2.1

	NAME	DATE
DRAWN	MAIR-Z	01/23/17
CHECKED		
ENG APPR		
MGR APPR		

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MM
GENERAL TOLERANCES ACCORDING TO
DIN ISO 2768-m

TU-WIEN

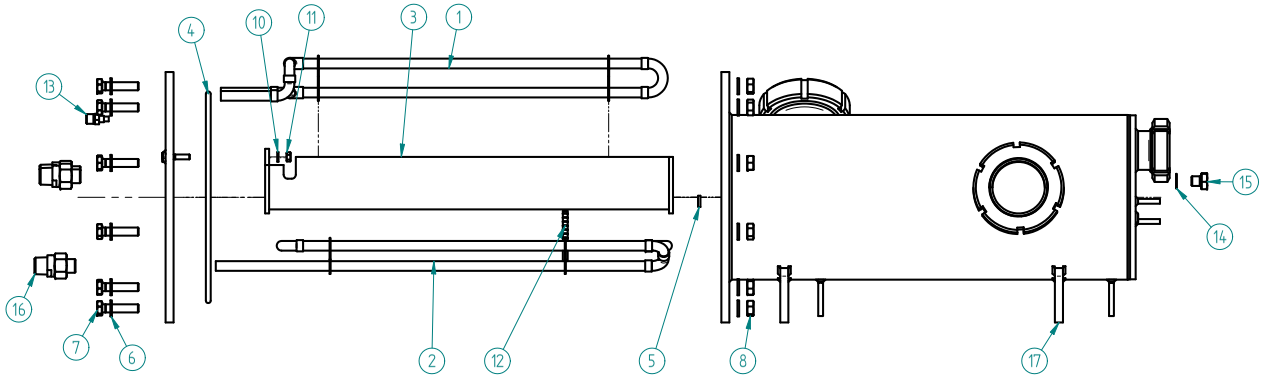
Titel: Generatror Kondensator

SIZE: A3 | DWG NO: 1.2

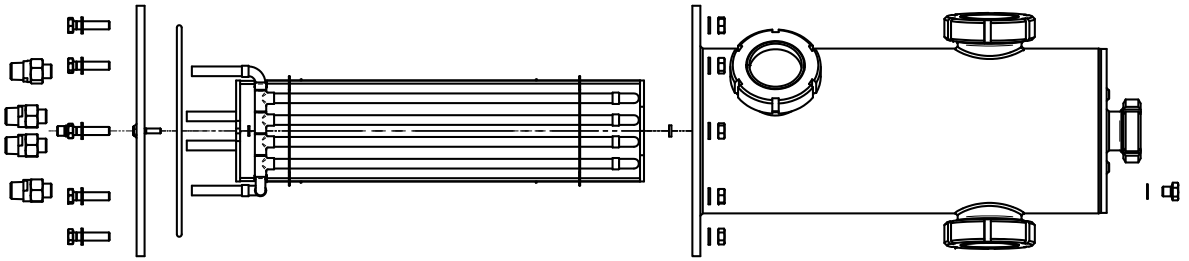
MATERIAL:

SCALE: 1:5 | WEIGHT:24,200 kg | SHEET 1/3

SOUND EDGE ACADEMIC COPY



Pos 5.: Bei Bedarf 2 oder mehr Stück einsetzen



Reihenfolge: (vor dem Löten testweise zusammenanbauen)

1. Generator (12) einlöten
2. Kondensator (1) einlöten (Einschubtiefe mit Kondensatbecken kontrollieren)
3. Schrader Ventil (13) einlöten
4. Lötverschraubungen (16) anlöten
5. Kondensatbecken (3) moniteren
6. Füllstandsroh (12) positionieren (bei Bedarf löten)
7. Gummidichtung (6) anbringen
8. Flanschdichtung (4)
9. Flansch montieren, Schrauben gleichmäßig, jeweils diagonal anziehen

SOLIDEDGE ACADEMIC COPY

	NAME	DATE
DRAWN	MAIR-Z	01/23/17
CHECKED		
ENG APPR		
MGR APPR		

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MM
GENERAL TOLERANCES ACCORDING TO
DIN ISO 2768-m

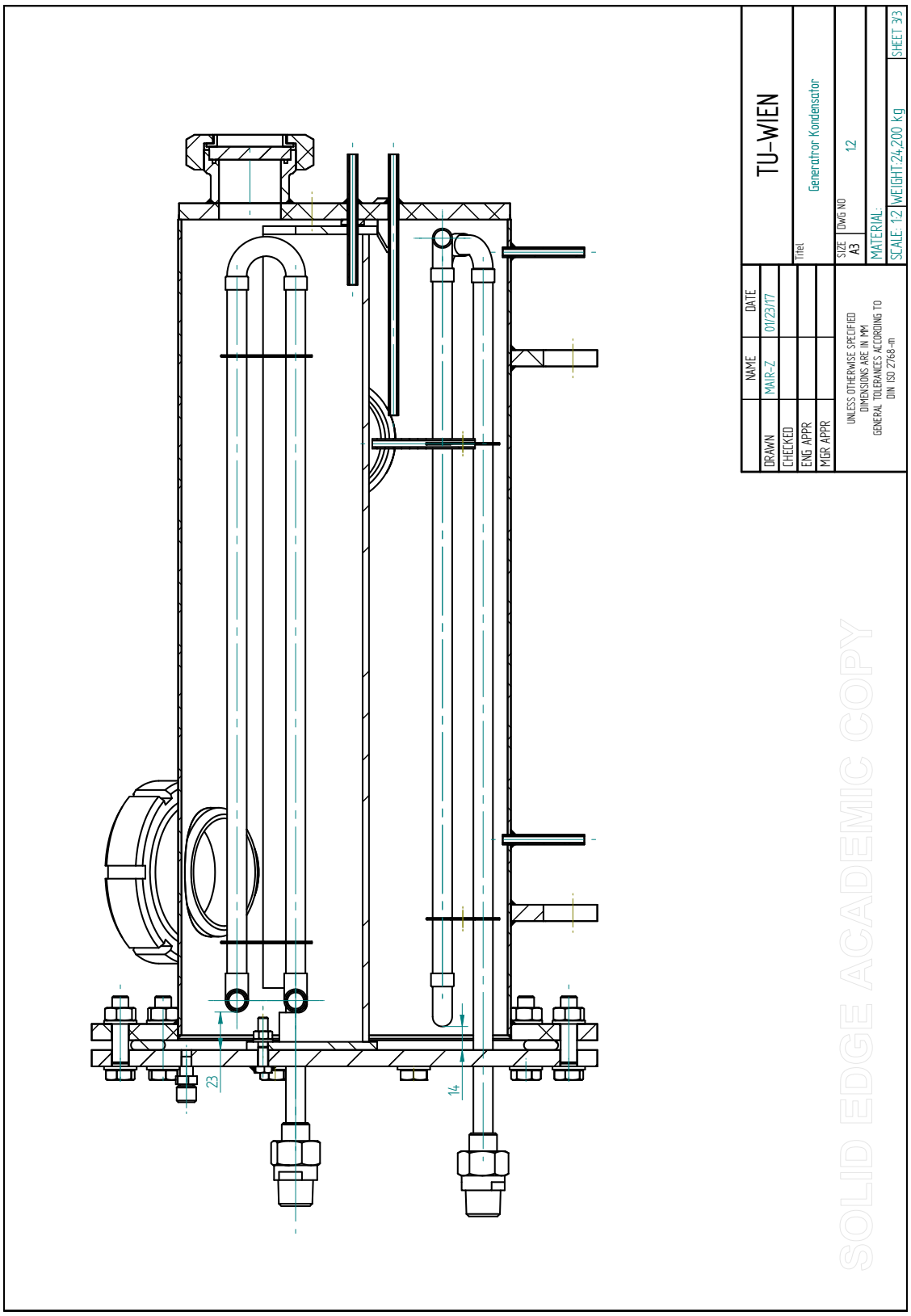
TU-WIEN

Titel: Generatror Kondensator

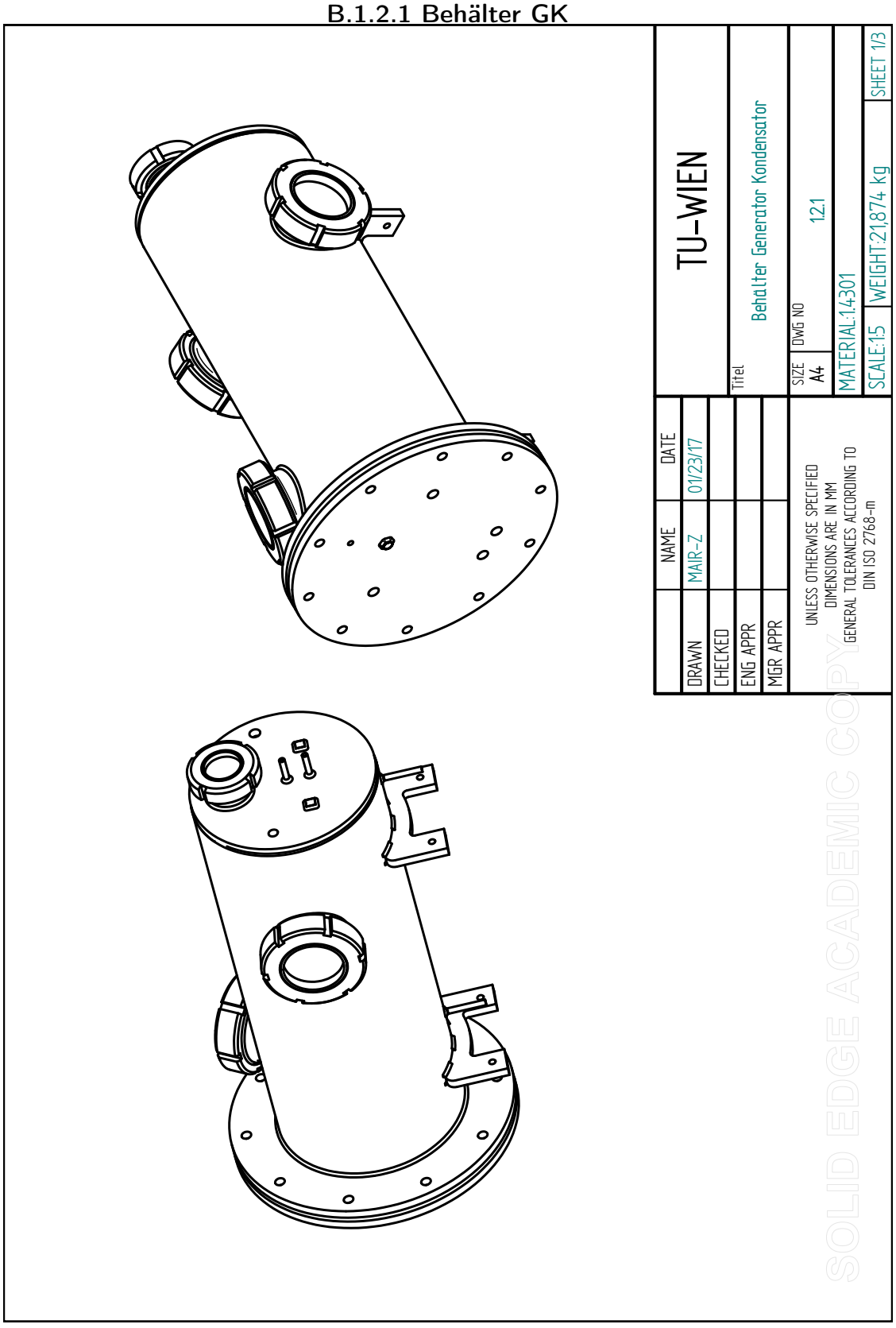
SIZE A3 | DWG NO 1.2

MATERIAL:

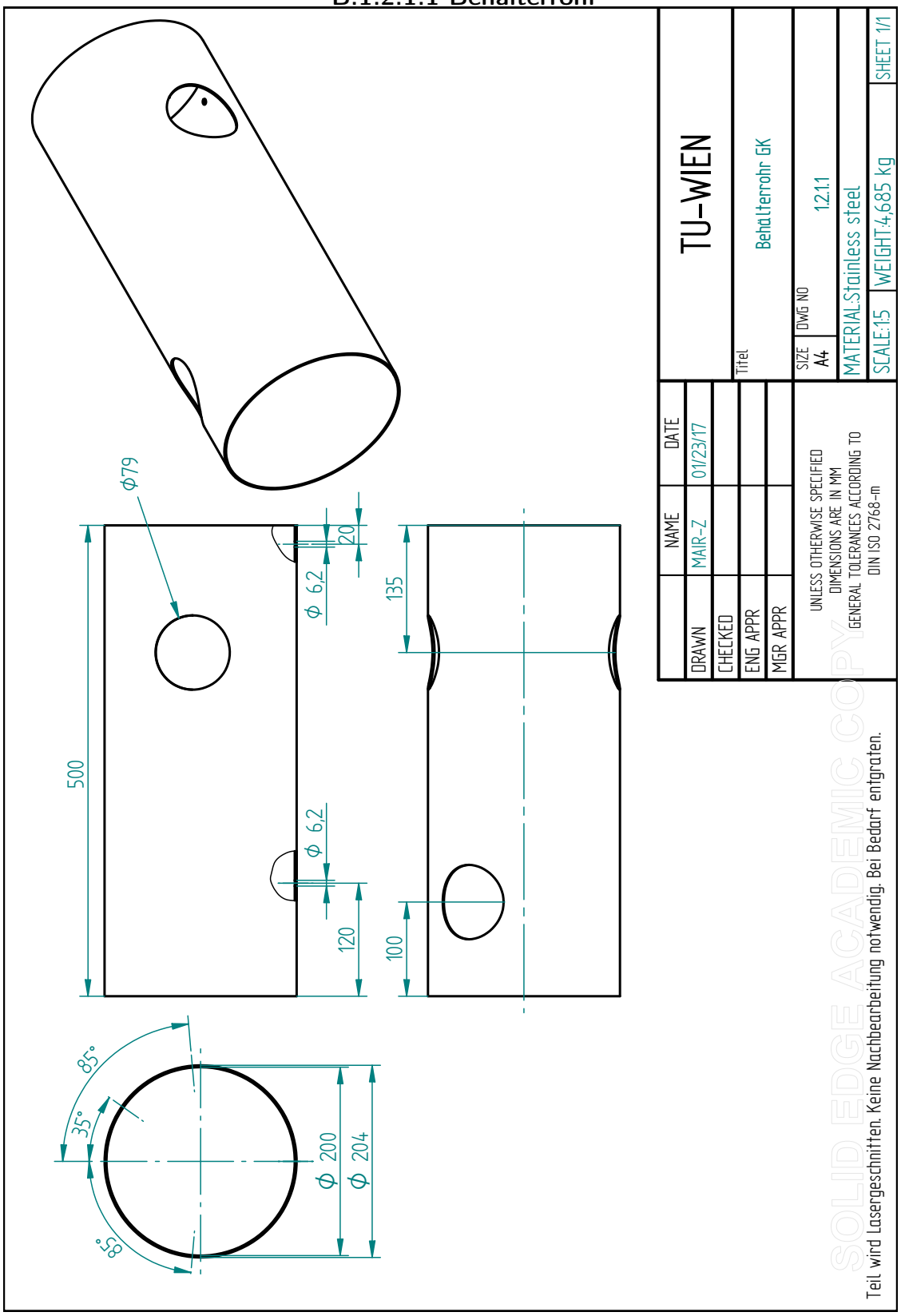
SCALE: 1:5 | WEIGHT:24,200 kg | SHEET 2/3


TU-WIEN
Titel
Generatror Kondensator
NAME
DATE
DRAWN
MAIR-Z
01/23/17
CHECKED
ENG APPR.
MGR APPR.
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MM
GENERAL TOLERANCES ACCORDING TO
DIN ISO 2768-m
SIZE
A3
DWG NO
12
MATERIAL:
SCALE: 1:2
WEIGHT:24,200 kg
SHEET 3/3
23
14
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

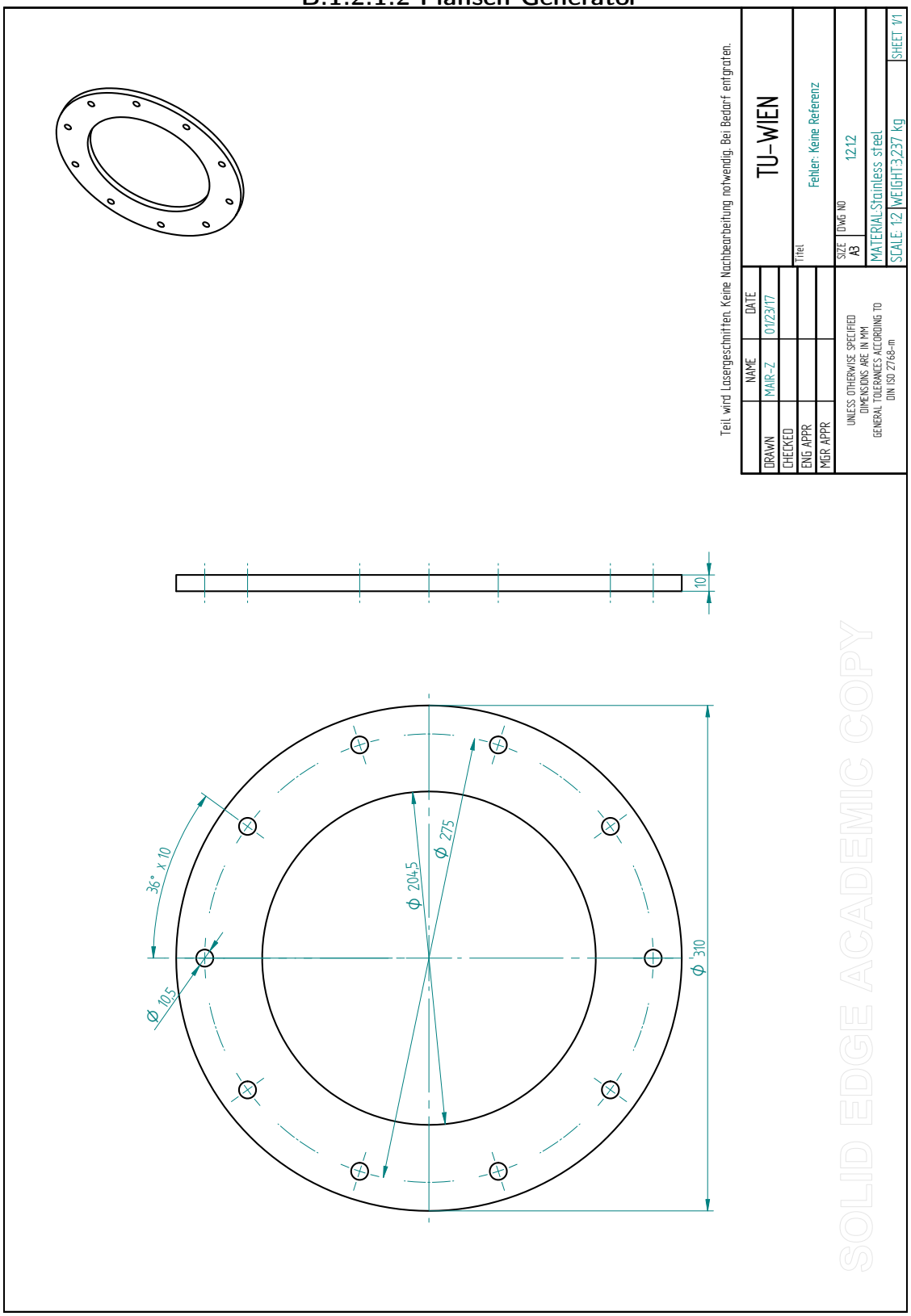
B.1.2.1 Behälter GK



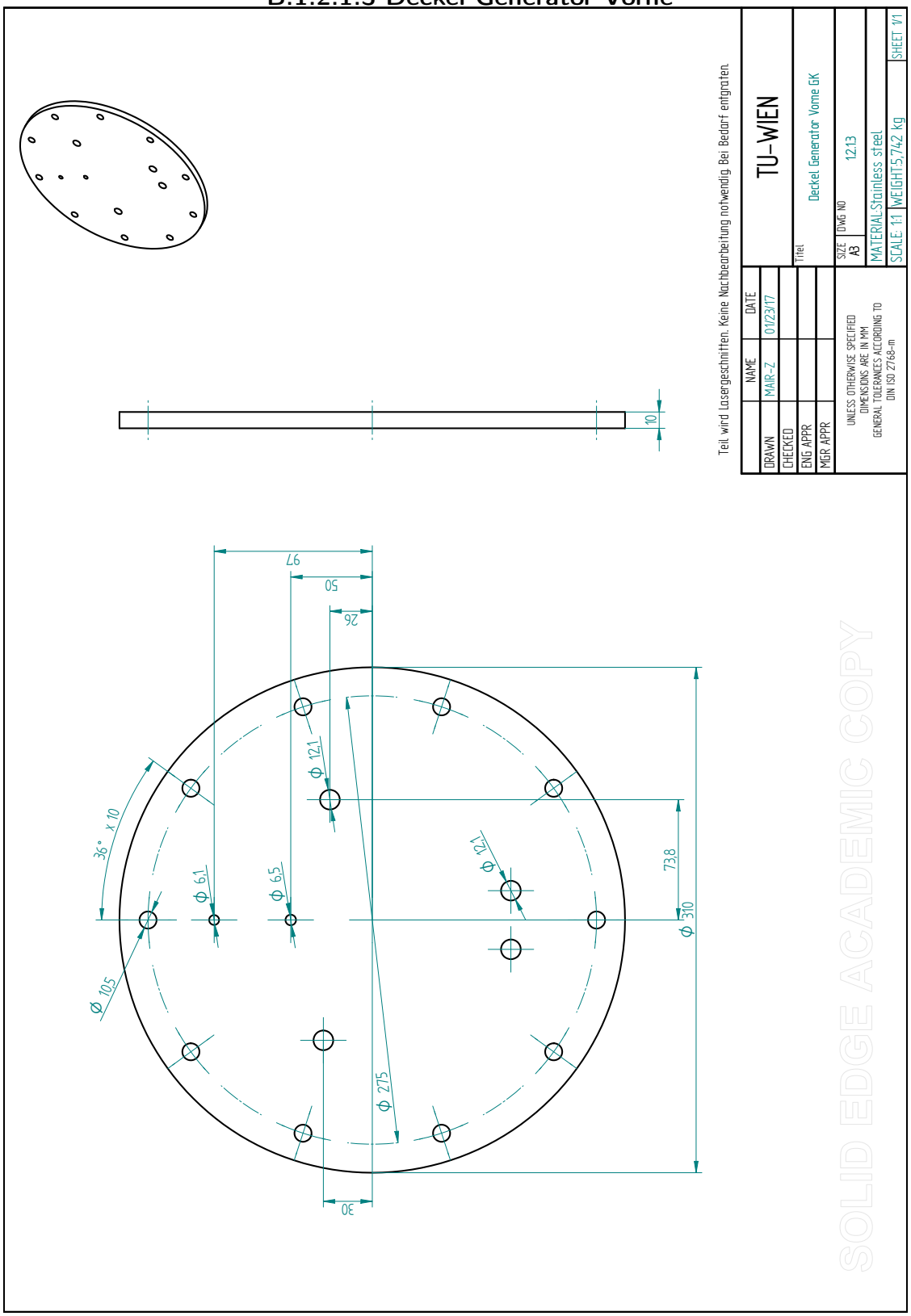
B.1.2.1.1 Behälterrohr



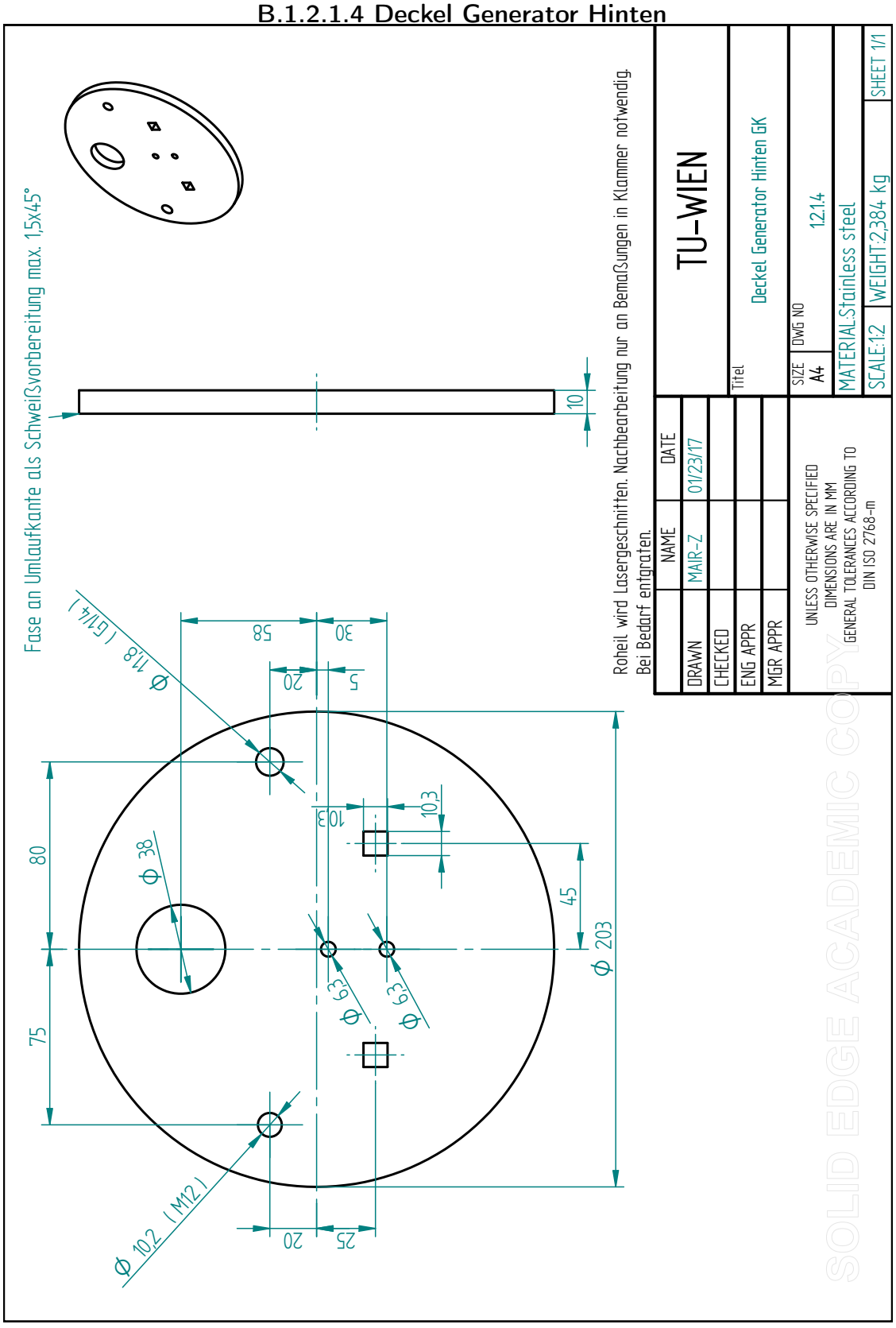
B.1.2.1.2 Flansch Generator



B.1.2.1.3 Deckel Generator Vorne

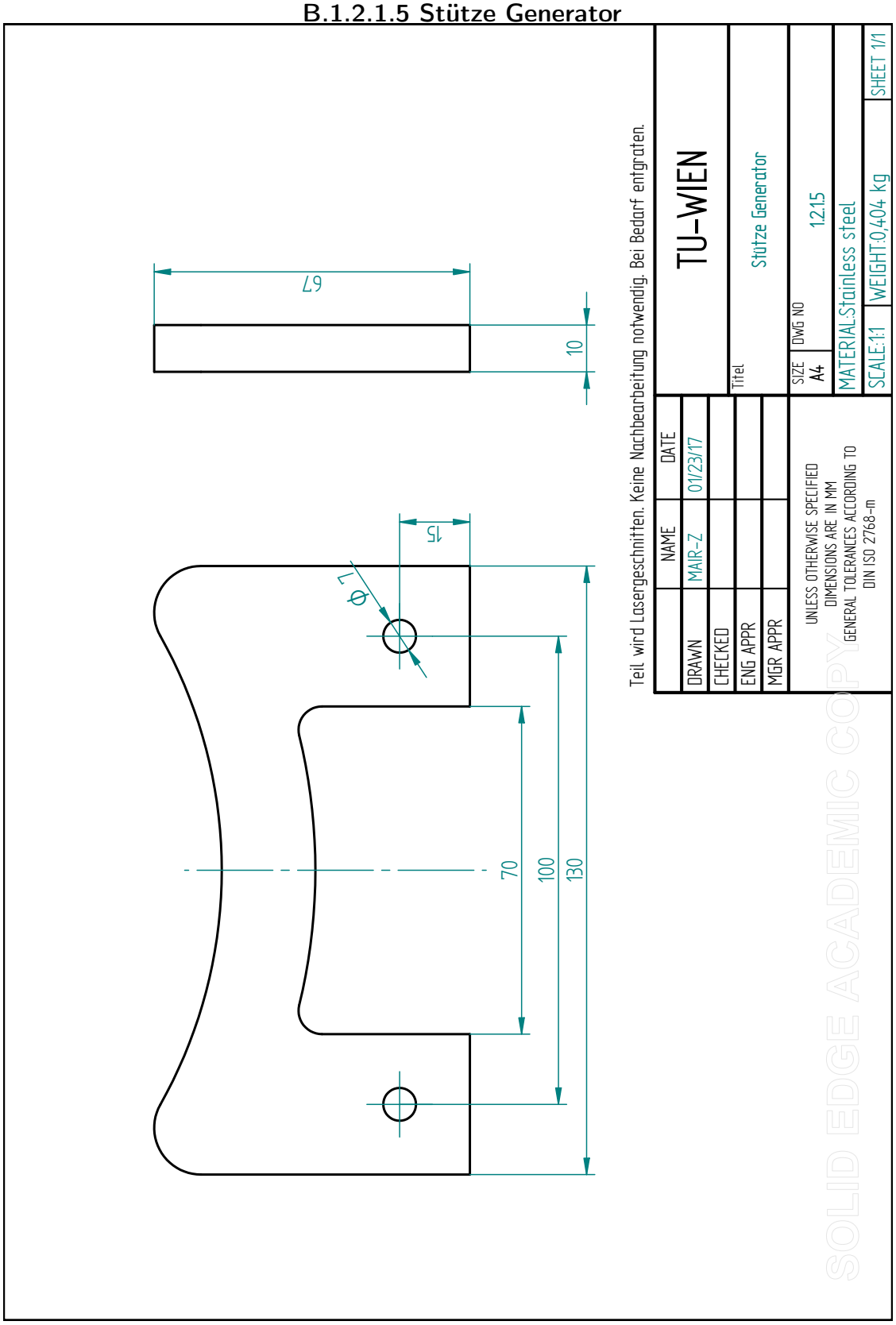


B.1.2.1.4 Deckel Generator Hinten

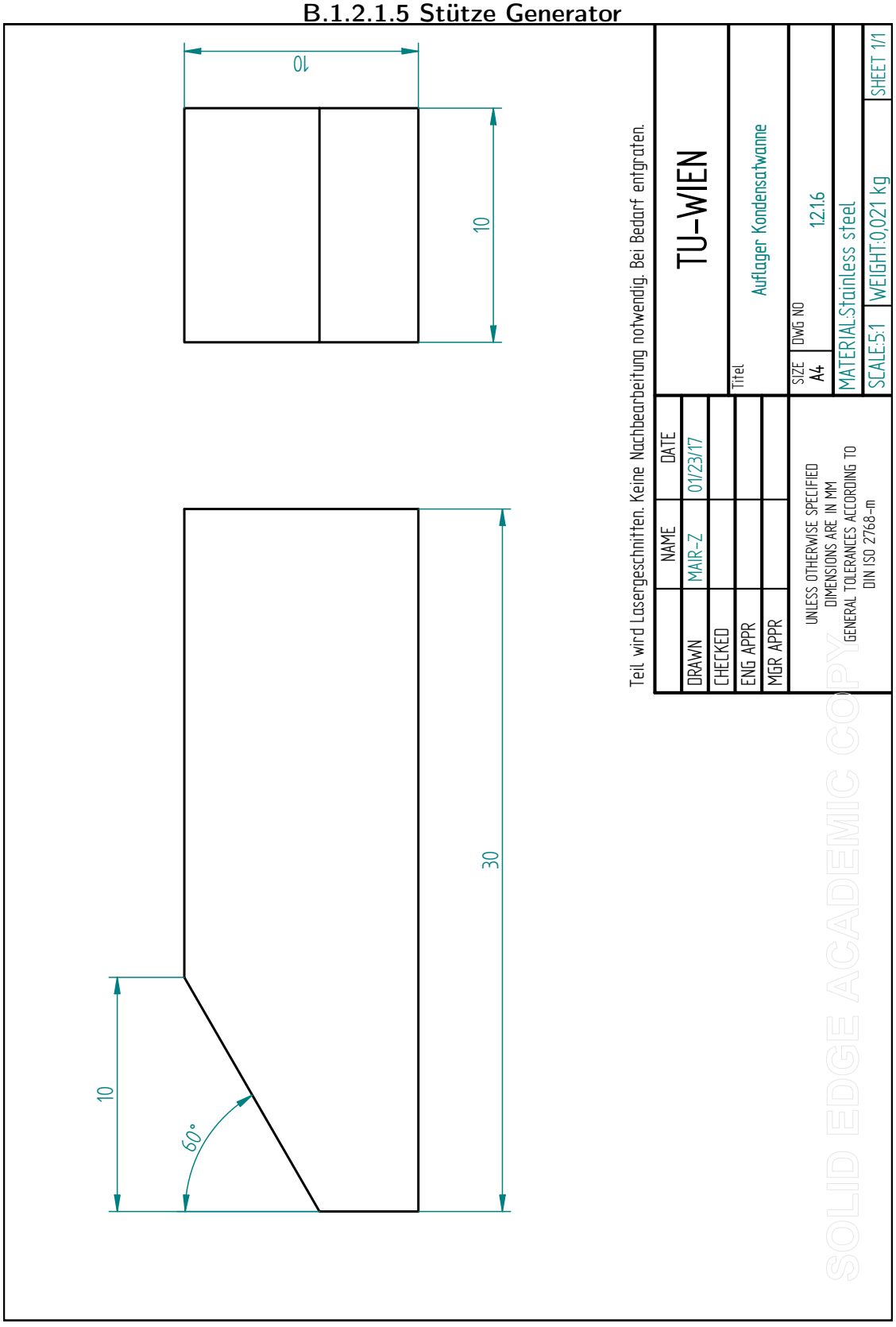


SOLID EDGE ACADEMIC COPY

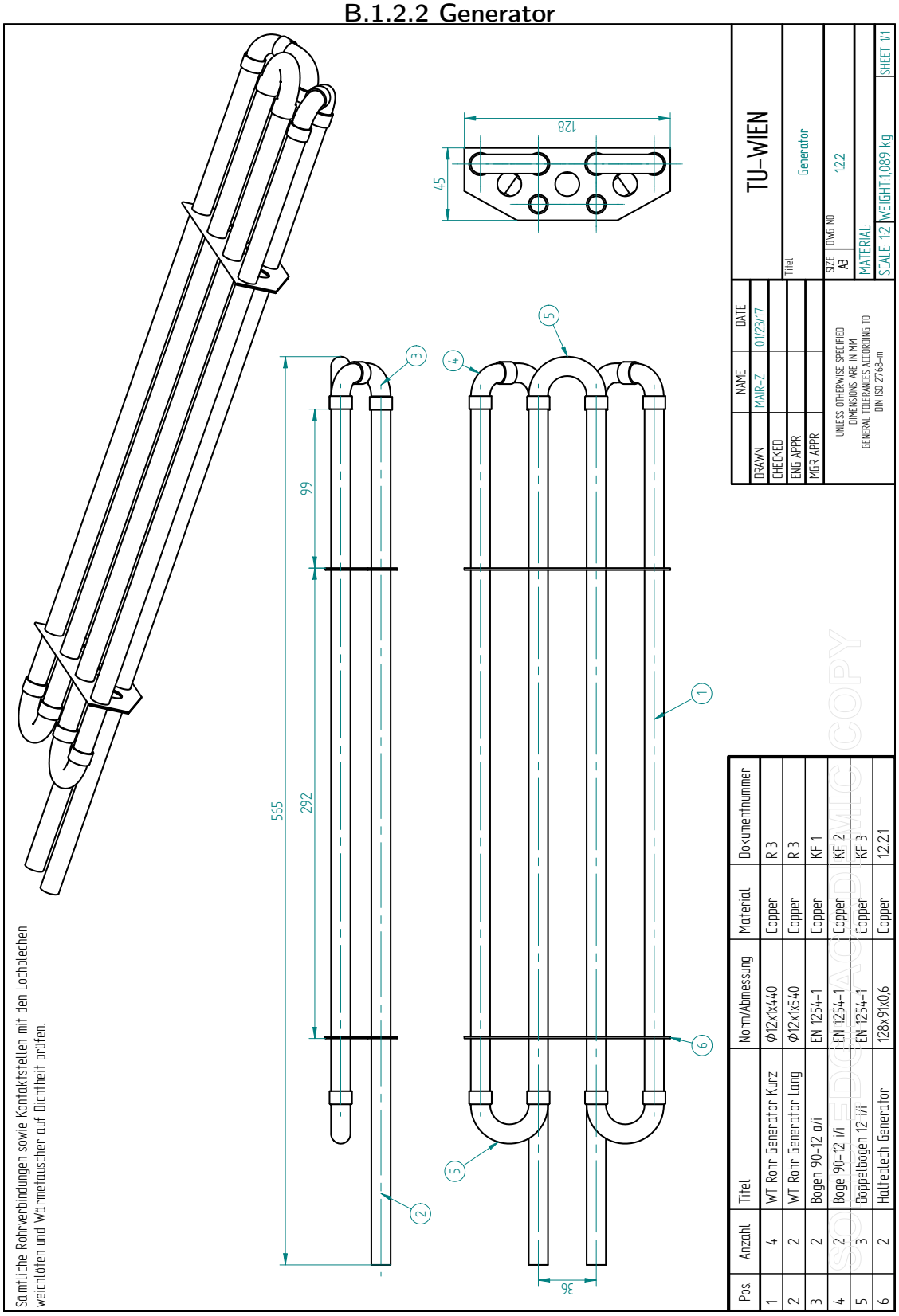
B.1.2.1.5 Stütze Generator



B.1.2.1.5 Stütze Generator



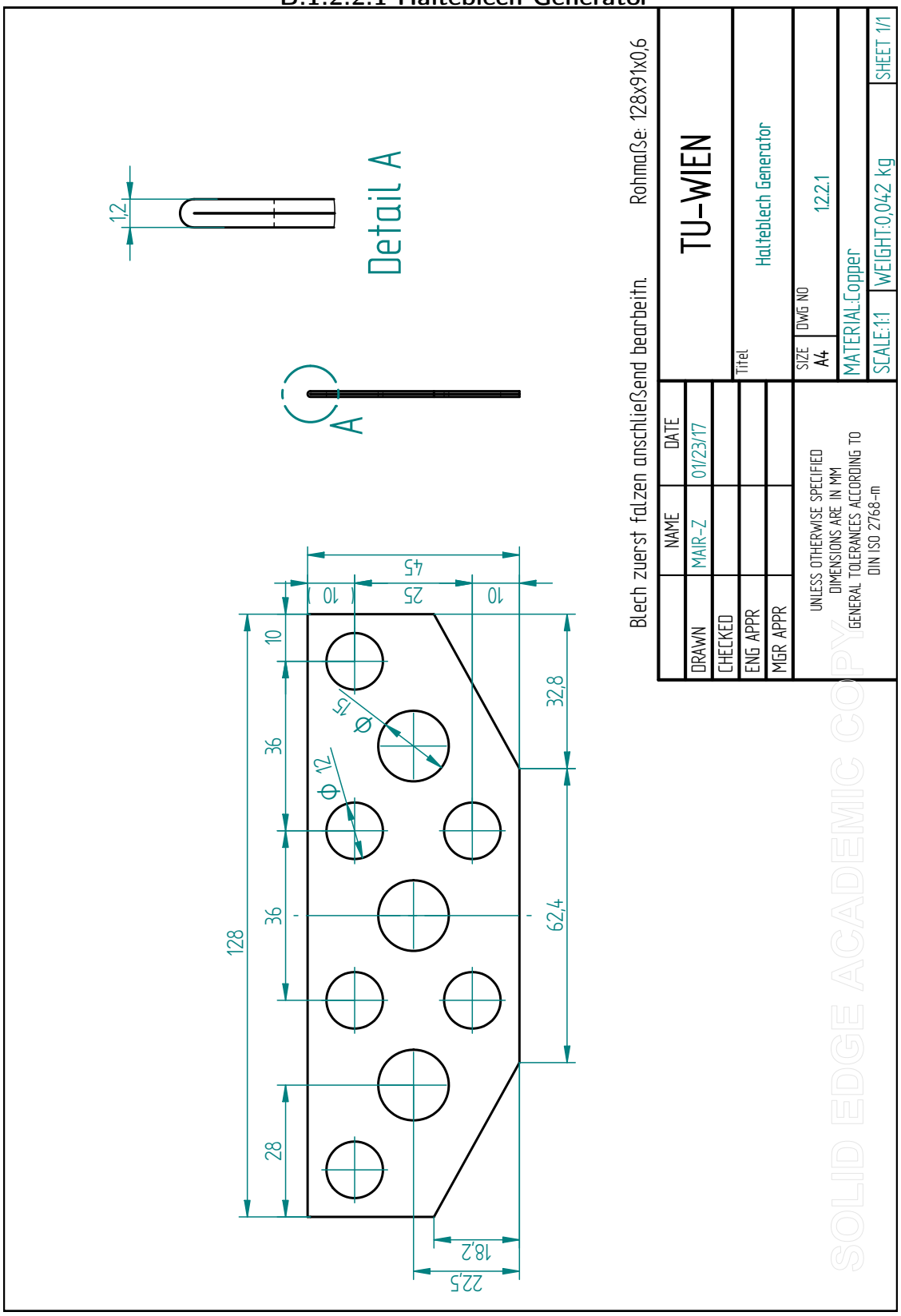
B.1.2.2 Generator



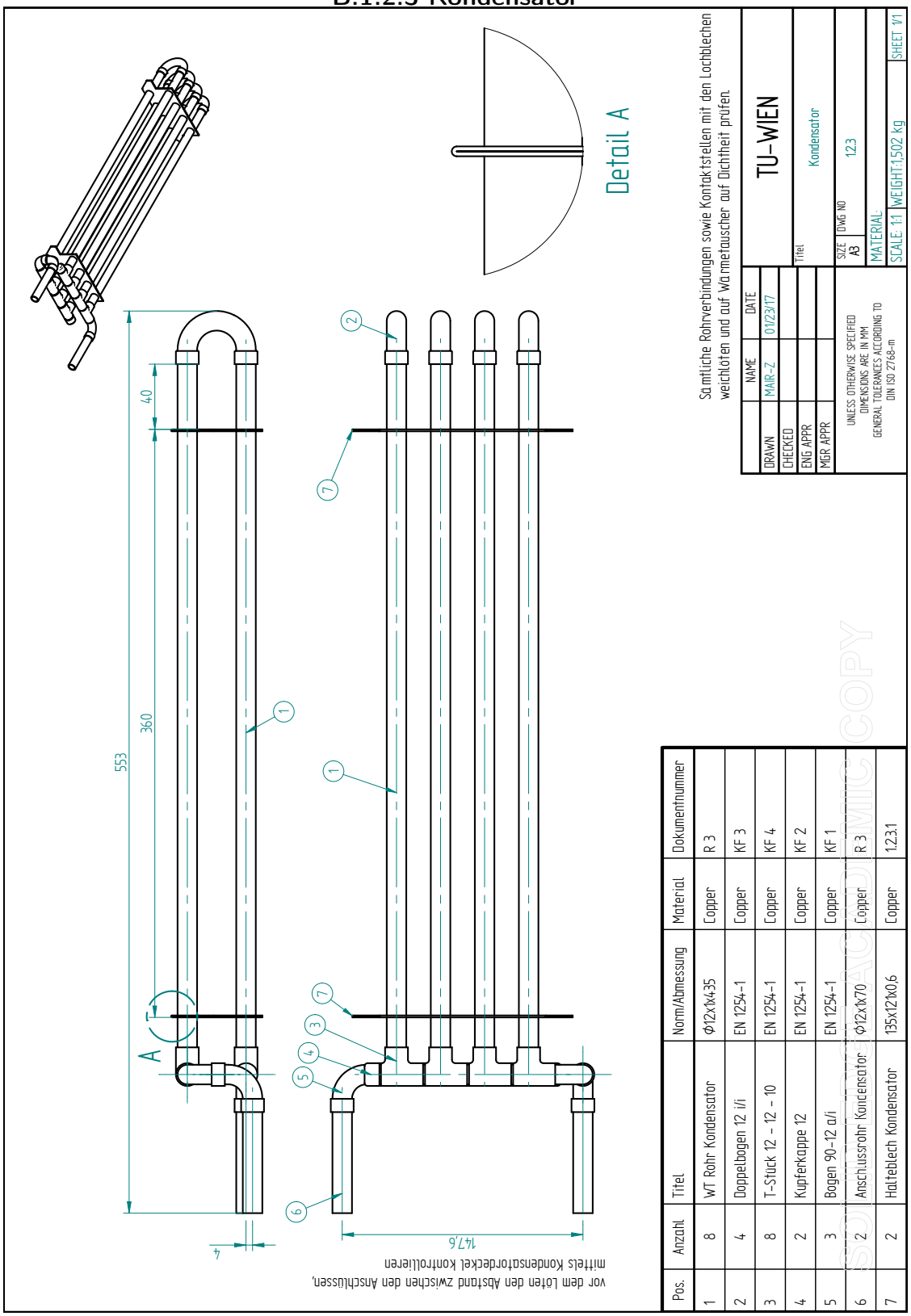
Pos.	Anzahl	Titel	Norm/Abmessung	Material	Dokumentnummer
1	4	WT Rohr Generator Kurz	Φ12x1x440	Copper	R 3
2	2	WT Rohr Generator Lang	Φ12x1x540	Copper	R 3
3	2	Bogen 90-12 a/i	EN 1254-1	Copper	KF 1
4	2	Boge 90-12 i/i	EN 1254-1	Copper	KF 2
5	3	Doppelbogen 12 i/i	EN 1254-1	Copper	KF 3
6	2	Halteblech Generator	128x91x0,6	Copper	12.2.1

SOLEDGE AGE DYNAMIC COPY

B.1.2.2.1 Halteblech Generator



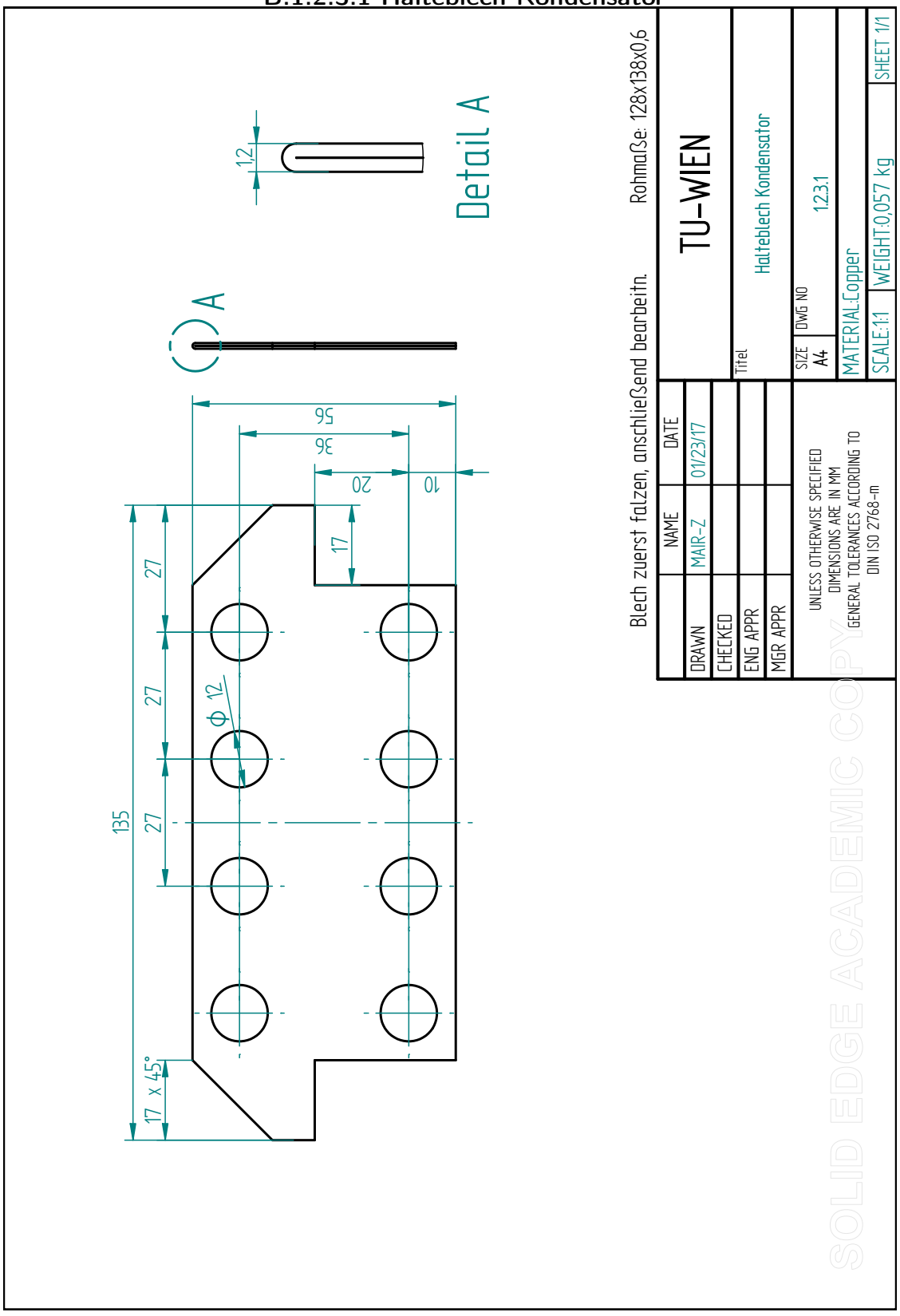
B.1.2.3 Kondensator



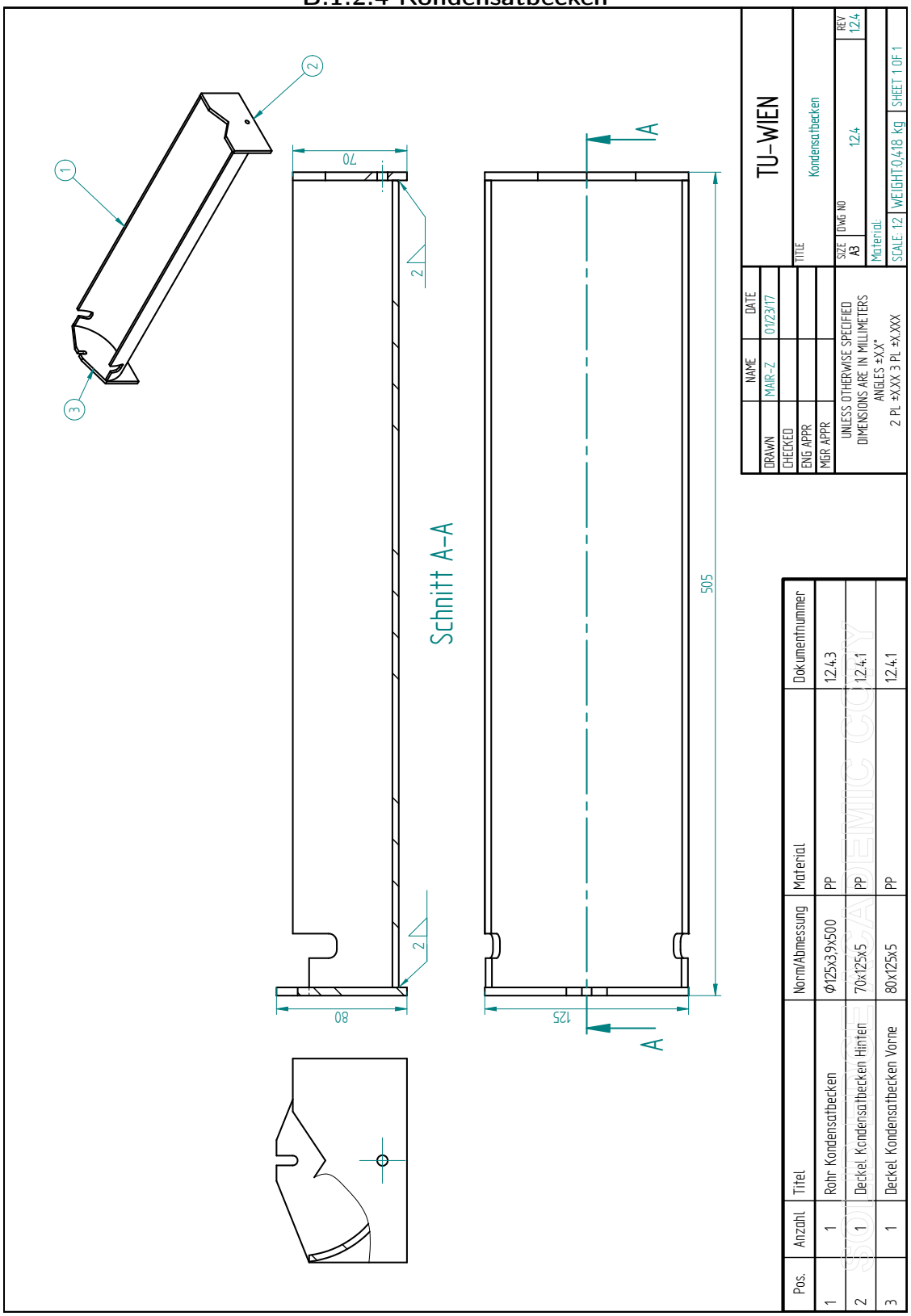
Pos.	Anzahl	Titel	Norm/Abmessung	Material	Dokumentnummer
1	8	WT Rohr Kondensator	Φ12x1x435	Copper	R 3
2	4	Doppelbogen 12 i/i	EN 1254-1	Copper	KF 3
3	8	T-Stück 12 - 12 - 10	EN 1254-1	Copper	KF 4
4	2	Kupferkappe 12	EN 1254-1	Copper	KF 2
5	3	Bogen 90-12 a/i	EN 1254-1	Copper	KF 1
6	2	Anschlussrohr Kondensator	Φ12x1x70	Copper	R 3
7	2	Halteblech Kondensator	135x121x0,6	Copper	1.2.3.1

SOLIDWORKS ACADEMIC COPY

B.1.2.3.1 Halteblech Kondensator

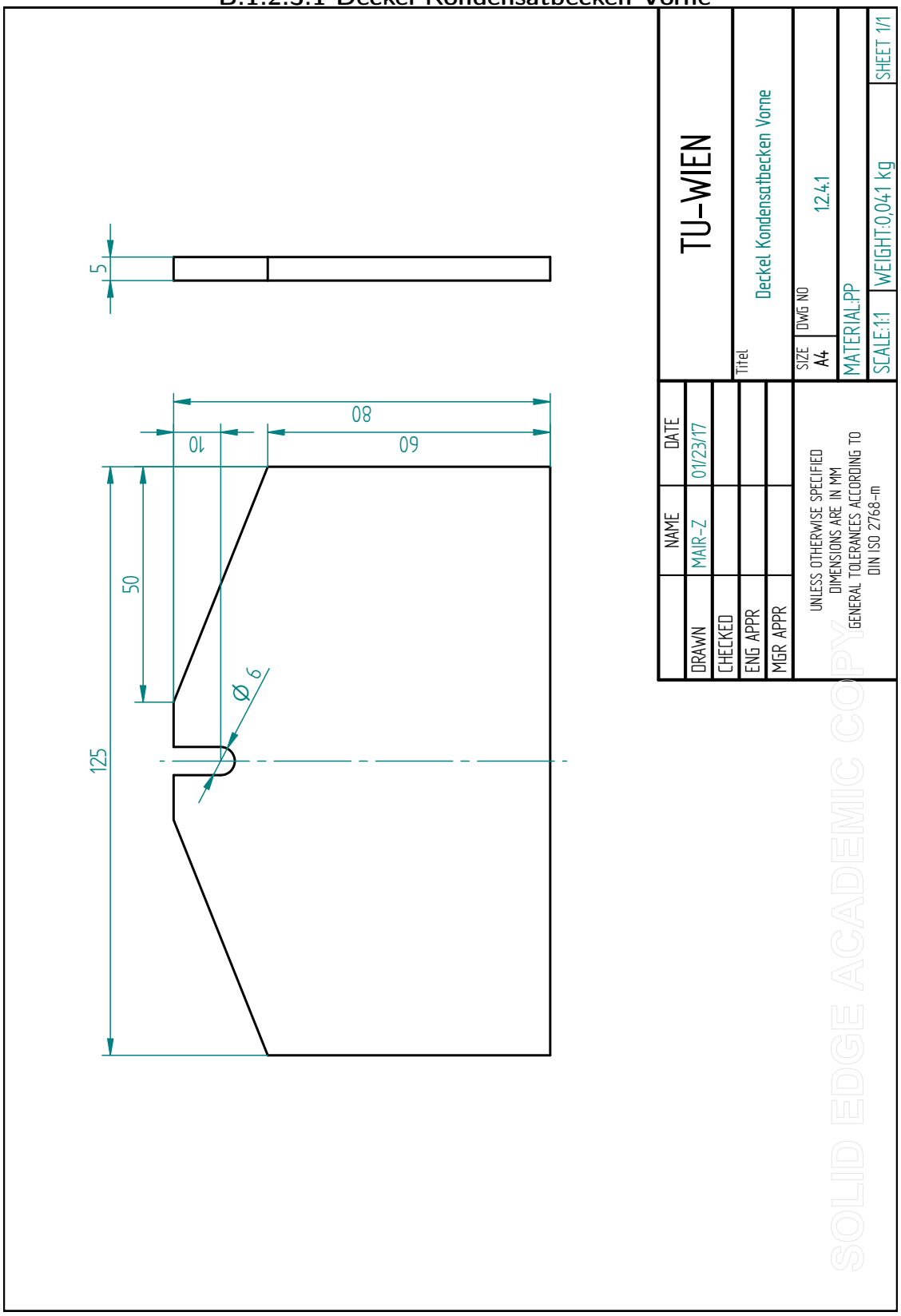


B.1.2.4 Kondensatbecken

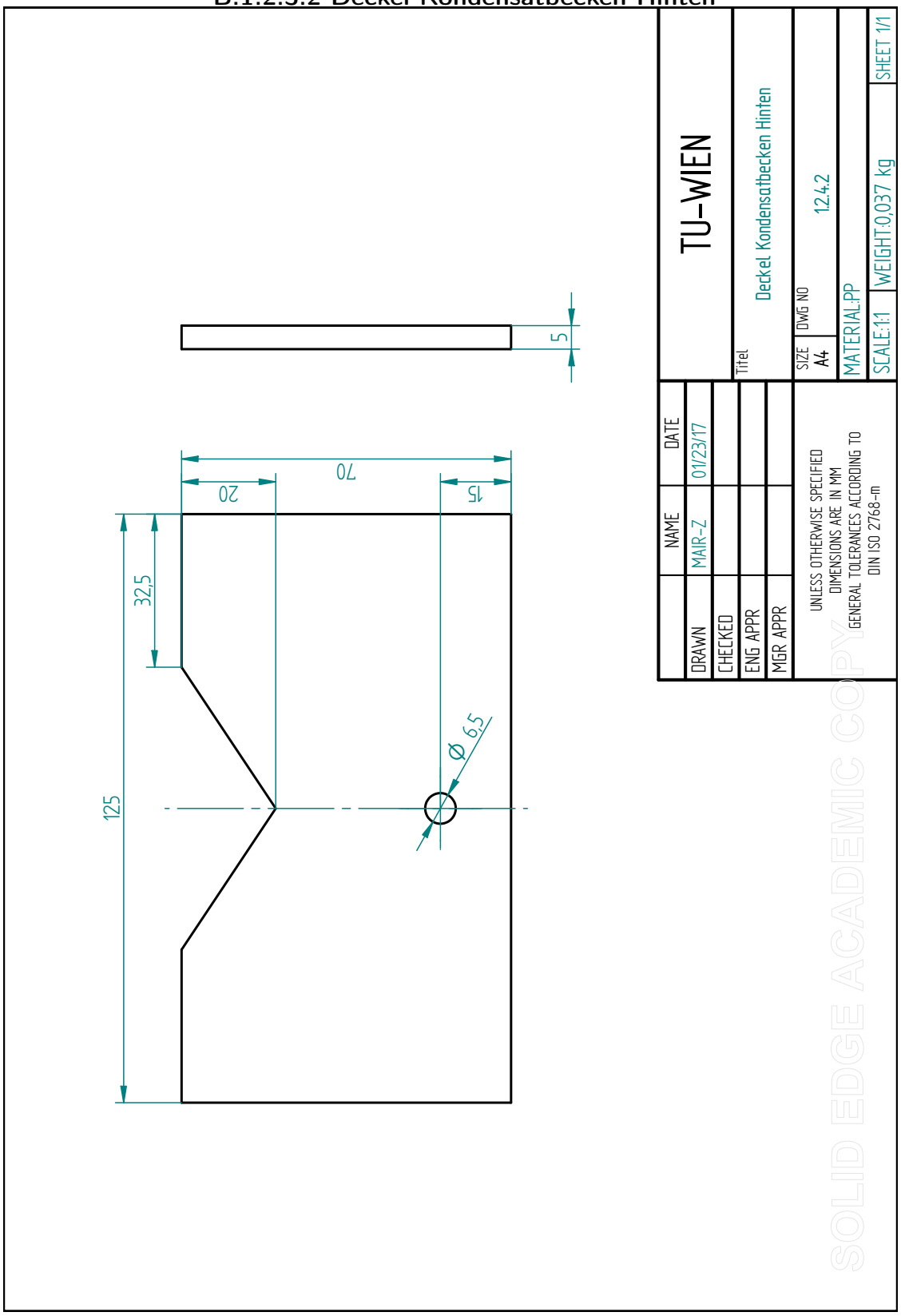


Pos.	Anzahl	Titel	Norm/Abmessung	Material	Dokumentnummer
1	1	Rohr Kondensatbecken	Ø125x3,9x500	PP	12.4.3
2	1	Deckel Kondensatbecken Hinten	70x125x5	PP	12.4.1
3	1	Deckel Kondensatbecken Vorne	80x125x5	PP	12.4.1

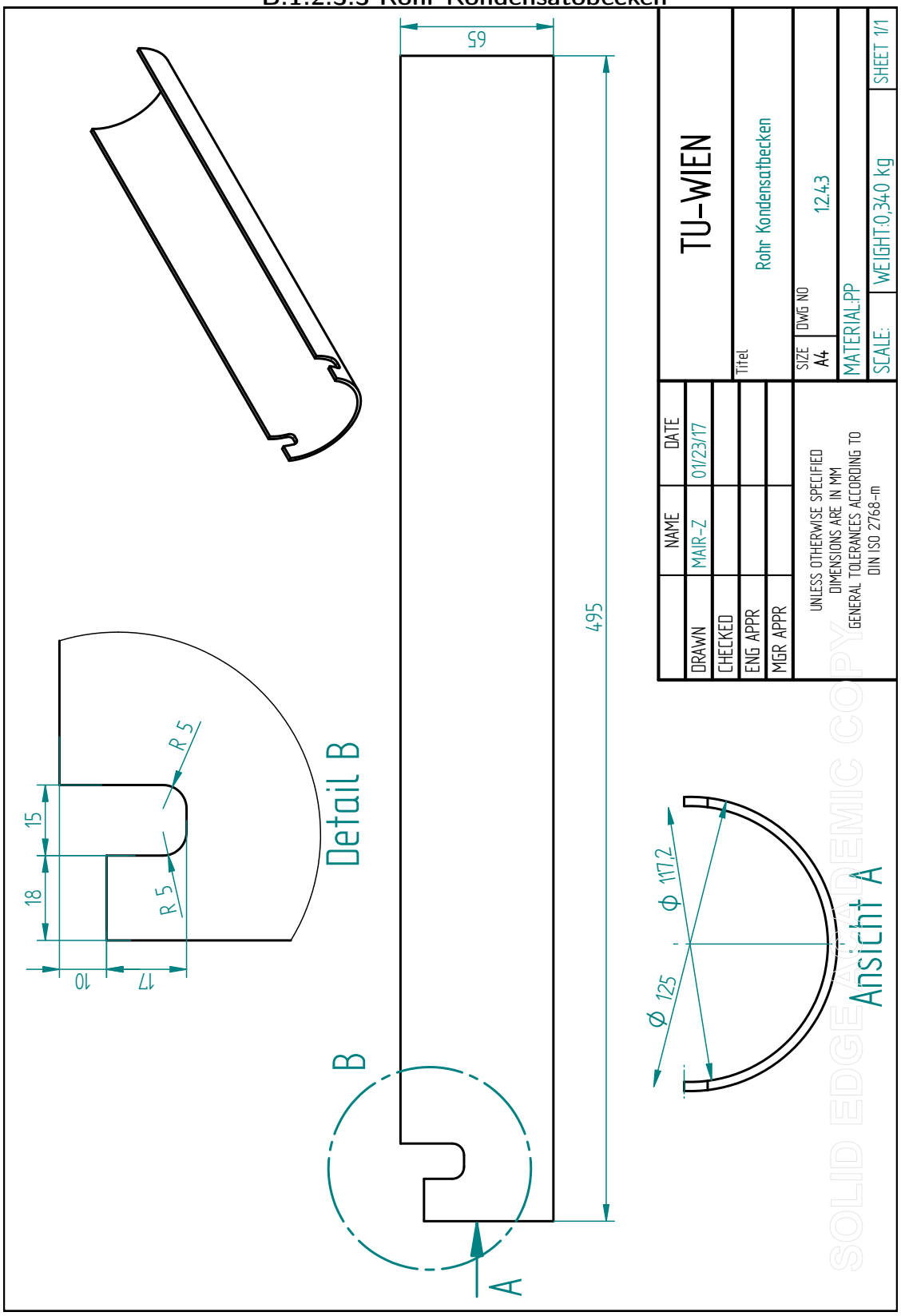
B.1.2.3.1 Deckel Kondensatbecken Vorne



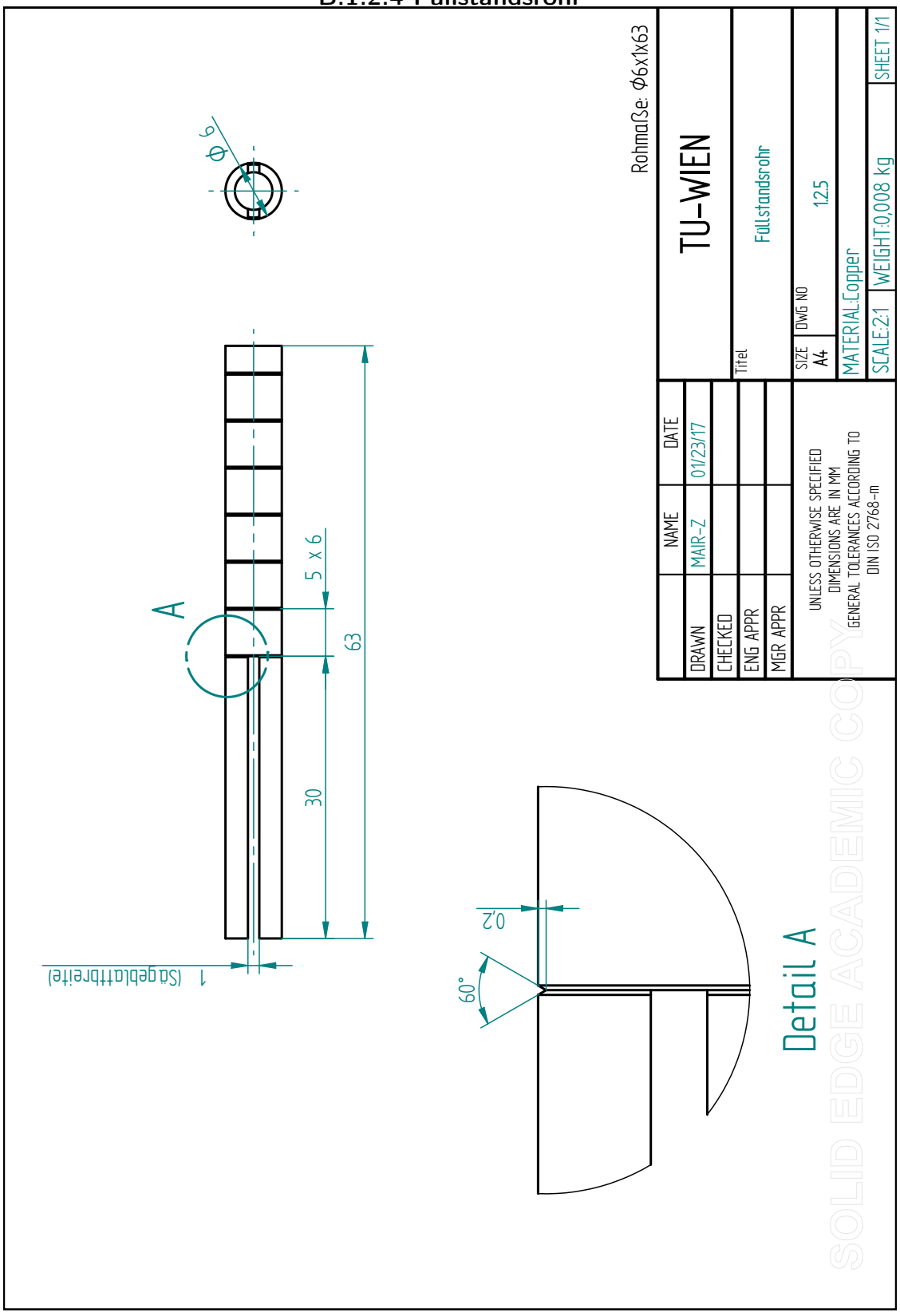
B.1.2.3.2 Deckel Kondensatbecken Hinten



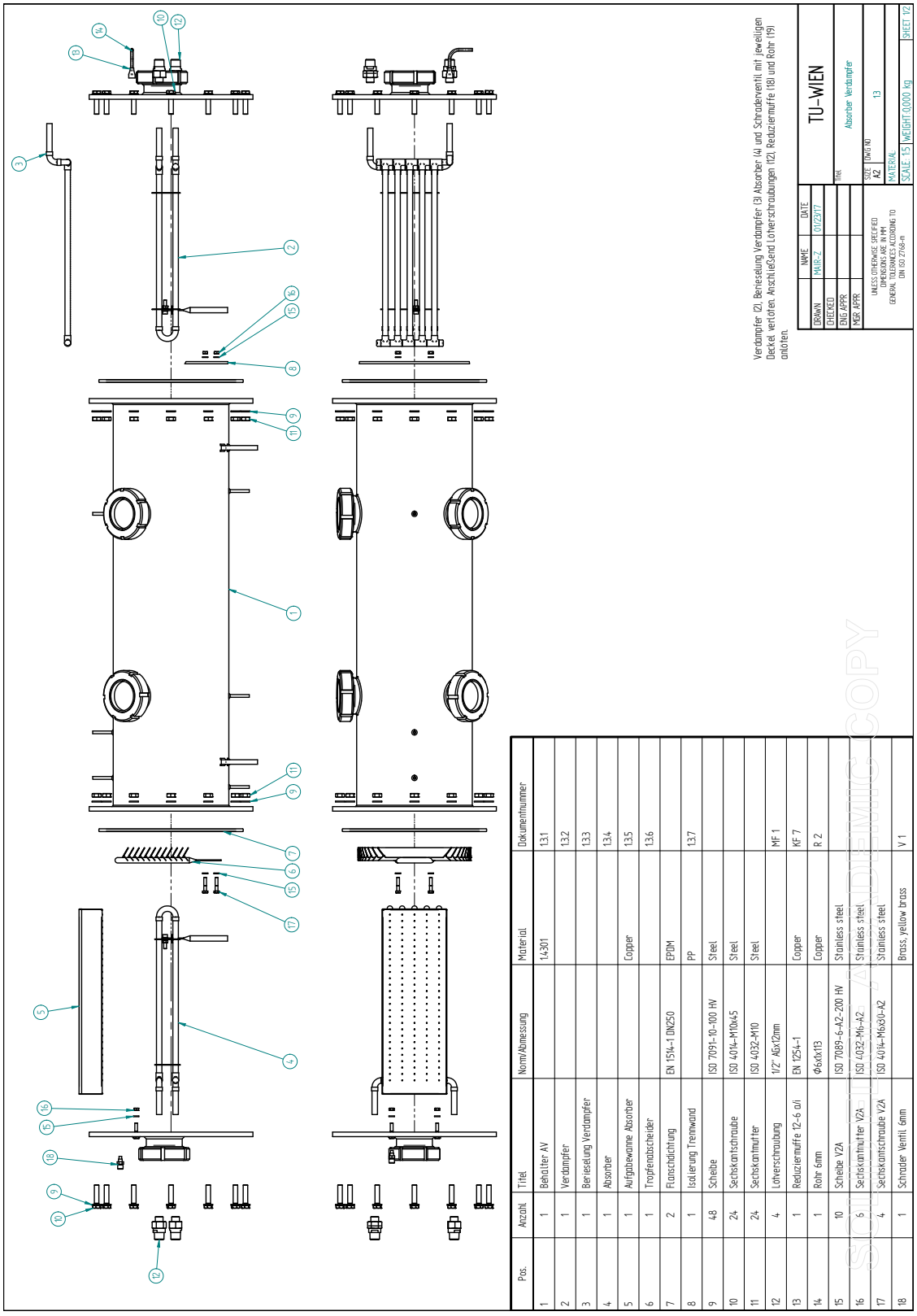
B.1.2.3.3 Rohr Kondensatobecken



B.1.2.4 Füllstandsrohr



B.1.3. Absorber-Verdampfer



Pos.	Anzahl	Titel	Norm/Abmessung	Material	Dokumentnummer
1	1	Behälter AV		1.4301	1.3.1
2	1	Verdampfer			1.3.2
3	1	Berieselung Verdampfer			1.3.3
4	1	Absorber			1.3.4
5	1	Auffangbewanne Absorber		Copper	1.3.5
6	1	Tropfenabscheider			1.3.6
7	2	Flanschdichtung	EN 1514-1 DN250	EPDM	
8	1	Isolierung Trennwand		PP	1.3.7
9	48	Scheibe	ISO 7091-10-100 HV	Steel	
10	24	Sechskantschraube	ISO 4014-M10x45	Steel	
11	24	Sechskantmutter	ISO 4032-M10	Steel	
12	4	Lotverschraubung	1/2" AGx12mm		MF 1
13	1	Reduziermuffe 12-6 o/i	EN 1254-1	Copper	KF 7
14	1	Rohr 6mm	Φ6x1x113	Copper	R 2
15	10	Scheibe V2A	ISO 7089-6-A2-200 HV	Stainless steel	
16	5	Sechskantmutter V2A	ISO 4032-M6-A2	Stainless steel	
17	4	Sechskantschraube V2A	ISO 4014-M6x30-A2	Stainless steel	
18	1	Schrader Ventil 6mm		Brass, yellow brass	V 1

Verdampfer (2), Berieselung Verdampfer (3) Absorber (4) und Schraderventil mit jeweiligen Deckel vertöten. Anschließend Lötverschraubungen (12), Reduziermuffe (18) und Rohr (19) anlöten.

	NAME	DATE
DRAWN	MAIR-Z	01/2017
CHECKED		
ENG APPR.		
MGR. APPR.		

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MM
GENERAL TOLERANCE ACCORDING TO DIN ISO 2768-m

TU-WIEN

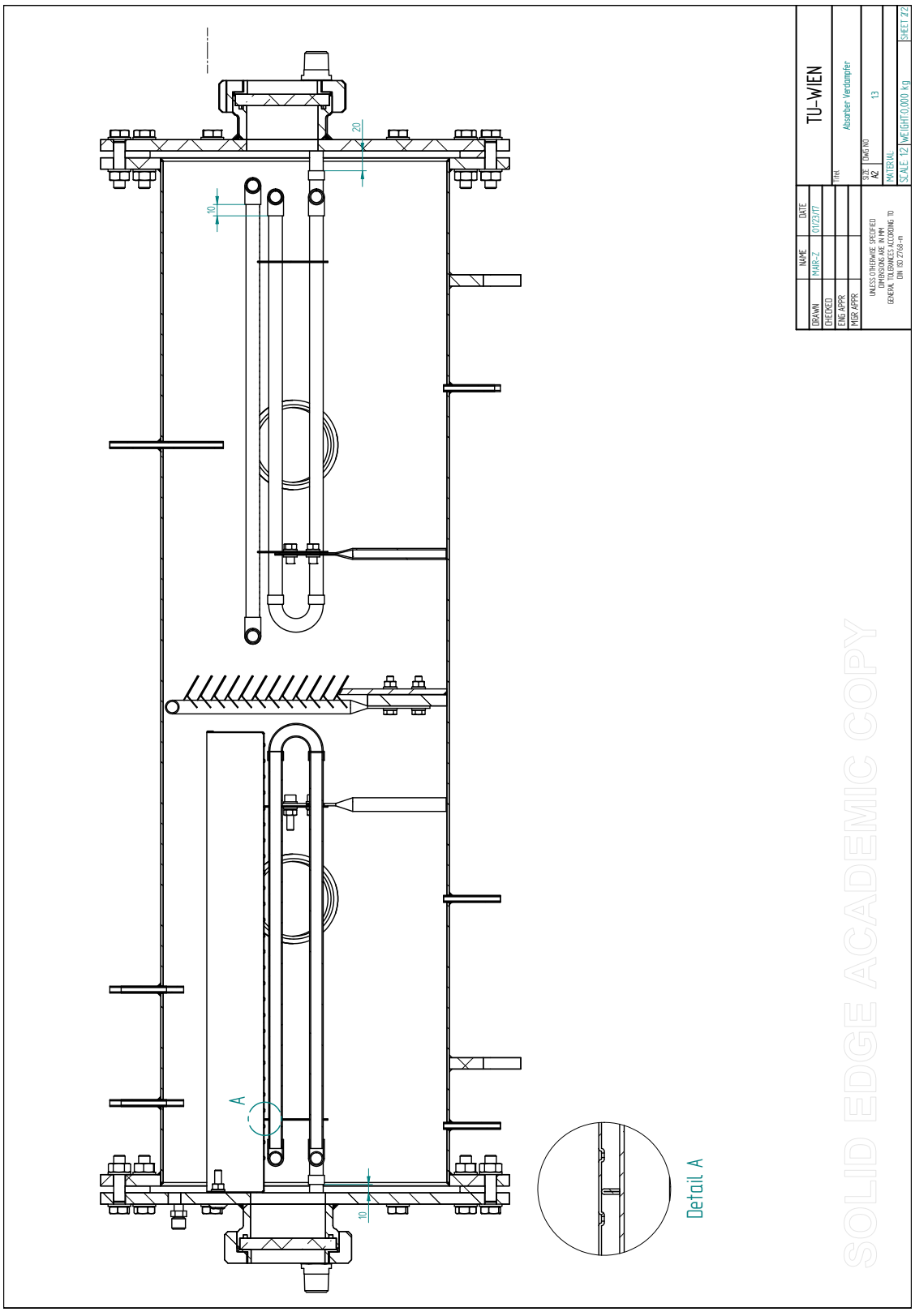
Absorber Verdampfer

SIZE: DWG NO. A2 13

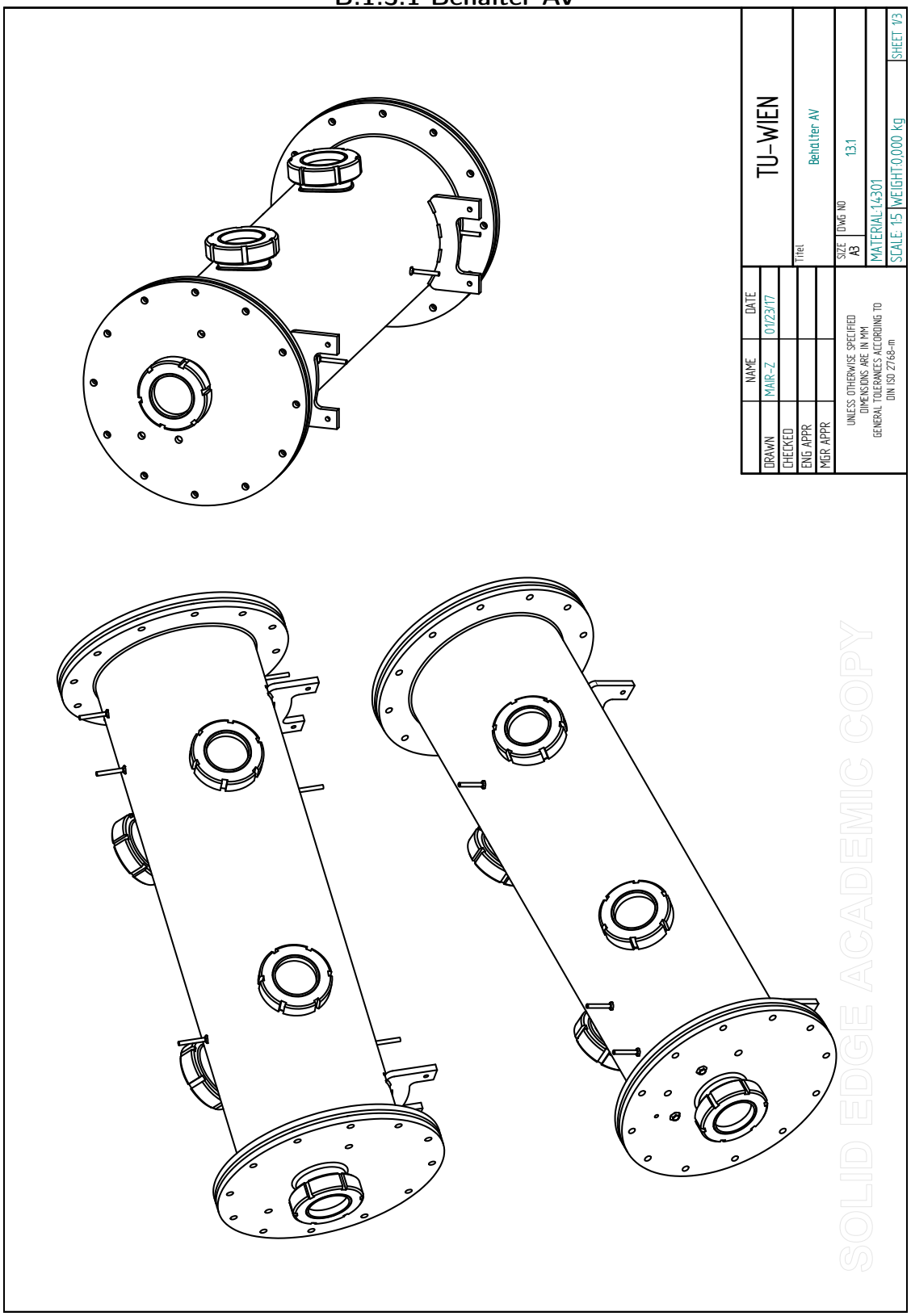
MATERIAL

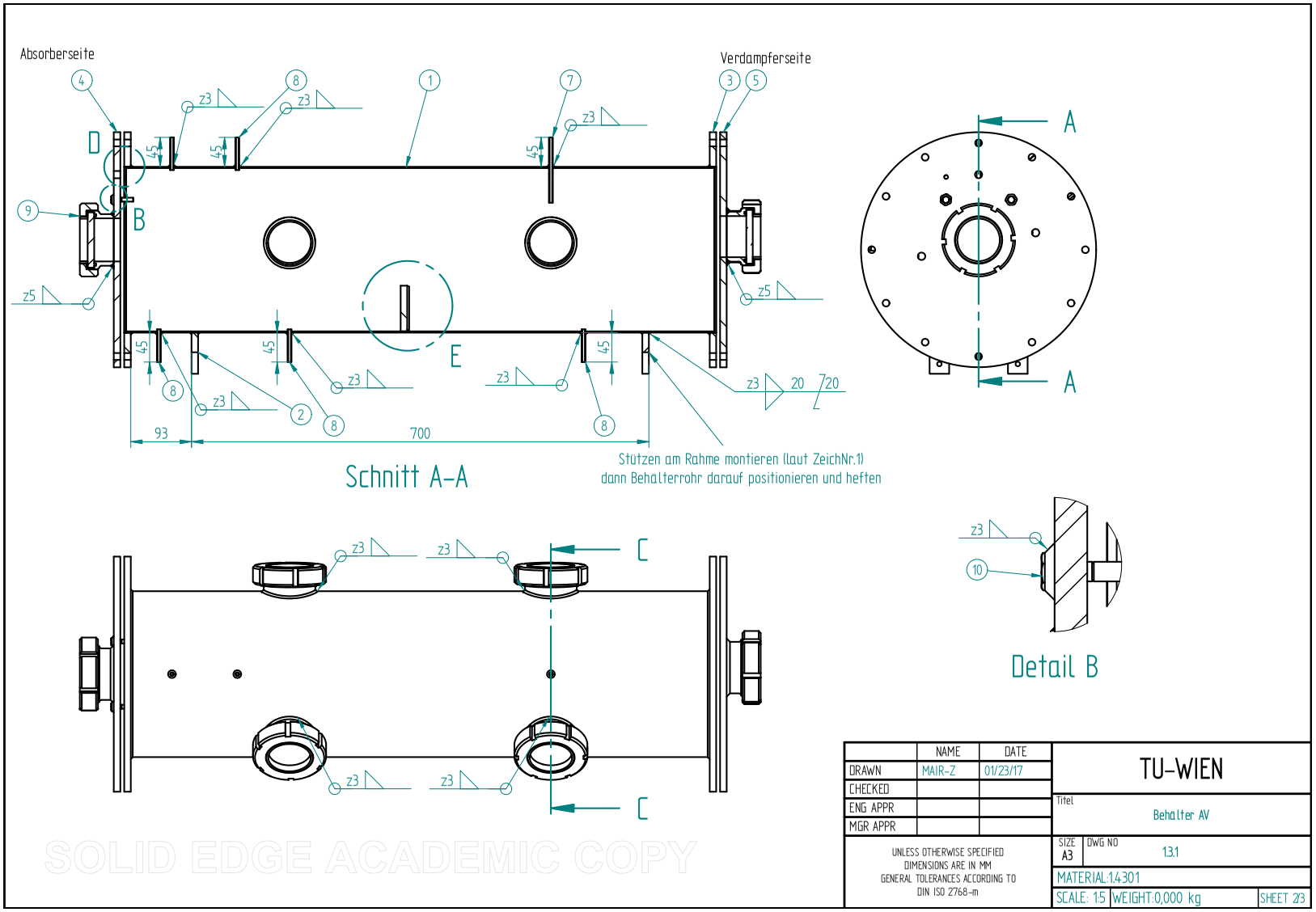
SCALE: 1:5 | WEIGHT: 0,000 Kg | SHEET 1/2

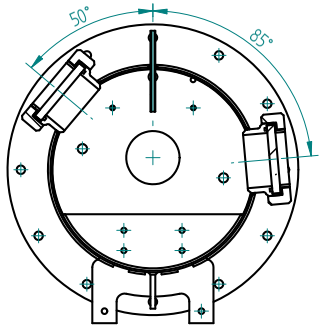
SCIENTIFIC COPY


TU-WIEN
Absorber Verdampfer
DRAWN
CHECKED
ENG APPR.
MGR APPR.
NAME
DATE
KMAR-Z
07/23/17
SIZE
A2
DWG NO
1.3
MATERIAL
SCALE: 1/2
WEIGHT: 0,000 Kg
SHEET 2/2
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MM
TOLERANCES ACCORDING TO
DIN ISO 2768-m
20
10
A
10
Detail A
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

B.1.3.1 Behälter AV

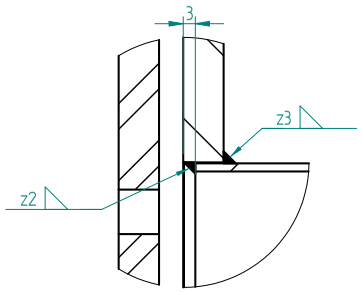



Absorberseite
Verdampferseite
Schnitt A-A
Stützen am Rahme montieren (laut ZeichNr.1)
dann Behalterrohr darauf positionieren und heften
Detail B
SOLID EDGE ACADEMIC COPY
TU-WIEN
Titel
Behälter AV
DRAWN MAIR-Z 01/23/17
CHECKED
ENG APPR
MGR APPR
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MM
GENERAL TOLERANCES ACCORDING TO
DIN ISO 2768-m
SIZE A3
DWG NO 1.3.1
MATERIAL:1.4301
SCALE: 1:5
WEIGHT:0,000 kg
SHEET 2/3



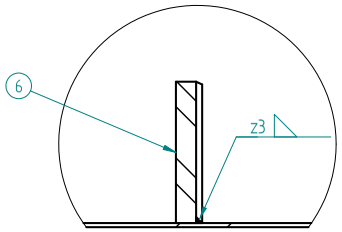
Schnitt C-C

Schaugläser nur so weit wie nötig in Öffnung schieben
(vor dem Schweßen demontieren und nur Schauglasrohr anschweißen)



Detail D

Flansch auf Verdampferseite
ident befestigt.



Detail E

Pos.	Anzahl	Titel	Norm/Abmessung	Material	Dokumentnummer
1	1	Behälterrohr AV		Stainless steel	1.3.1.1
2	2	Stütze Absorber		Stainless steel	1.3.1.2
3	2	Flansch		Stainless steel	1.3.1.3
4	1	Deckel Absorber		Stainless steel	1.3.1.4
5	1	Deckel Verdampfer		Stainless steel	1.3.1.5
6	1	Trennwand		Stainless steel	1.3.1.9
7	1	Anschlussrohr Kältemittel	Φ6x1x100	Stainless steel	R 1
8	5	Anschlussrohr Lösung	Φ6x1x50	Stainless steel	R 1
9	6	Schauglas DN65			SG 2
10	2	Sechskantschraube V2A	ISO 4014-M6x30-A2	Stainless steel	

SOURCE EDGE ACADEMIC COPY

	NAME	DATE
DRAWN	MAIR-Z	01/23/17
CHECKED		
ENG APPR		
MGR APPR		

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MM
GENERAL TOLERANCES ACCORDING TO
DIN ISO 2768-m

TU-WIEN

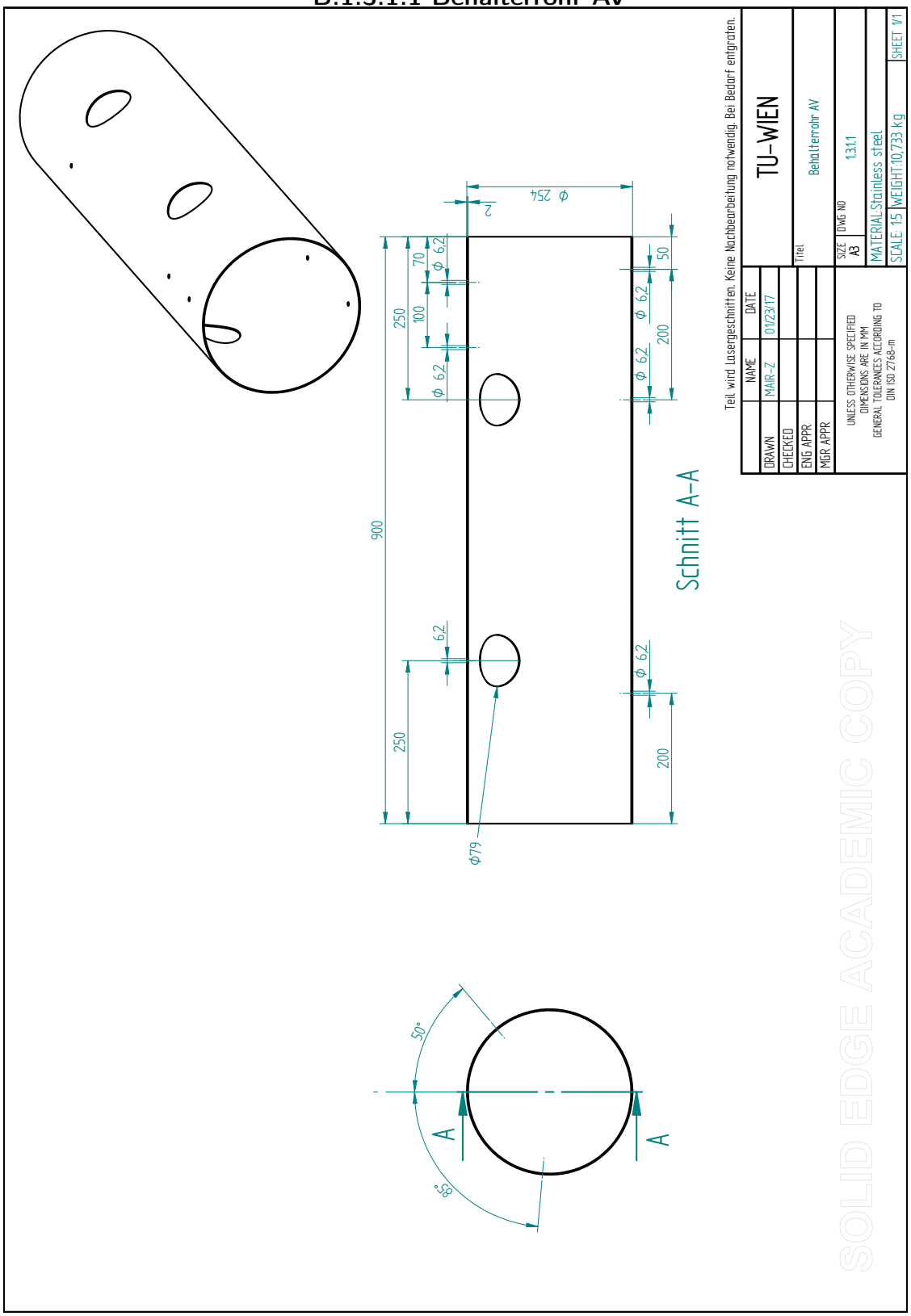
Titel: Behälter AV

SIZE A3 | DWG NO 1.3.1

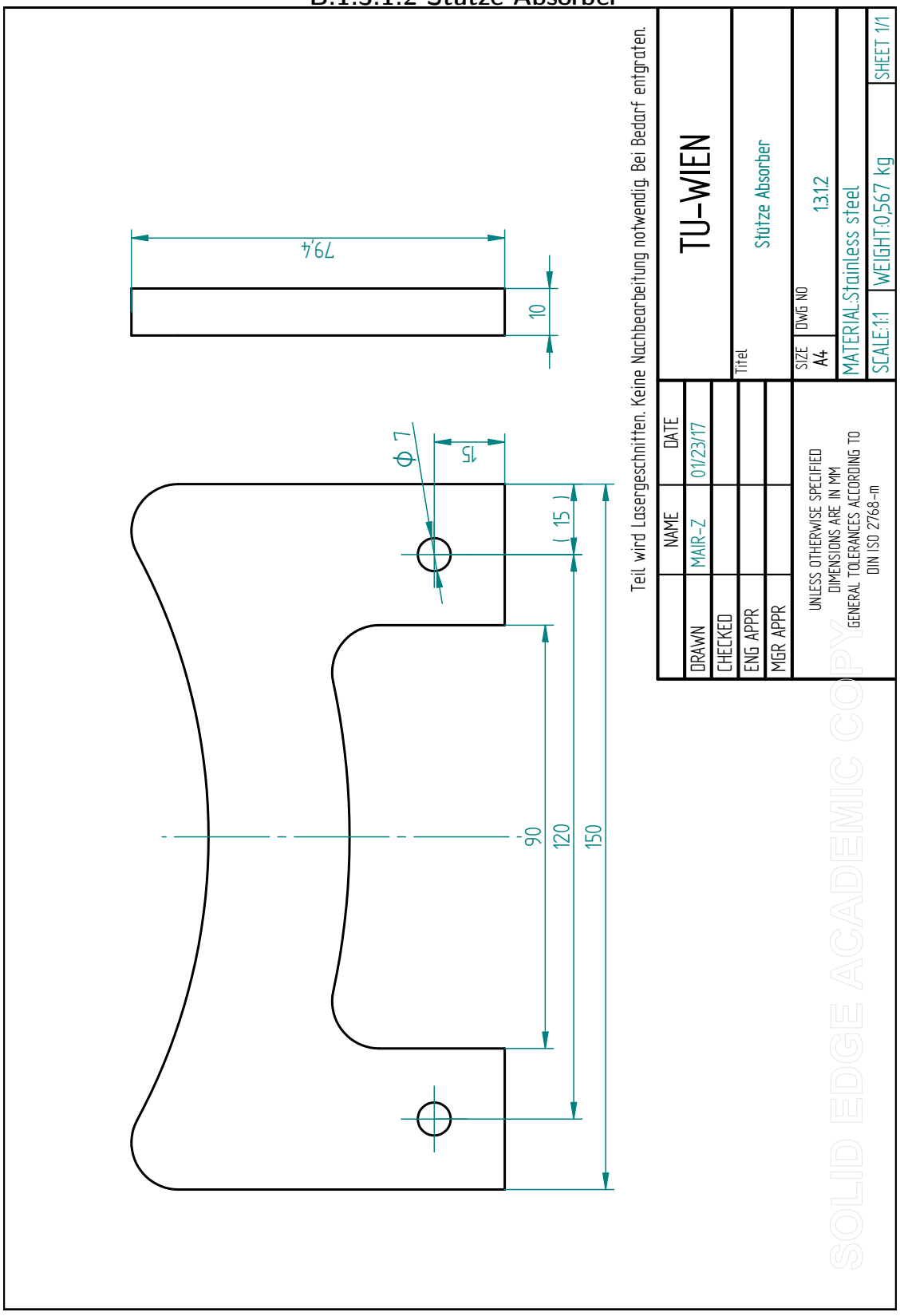
MATERIAL:1.4301

SCALE: 1:1 | WEIGHT:0,000 kg | SHEET 3/3

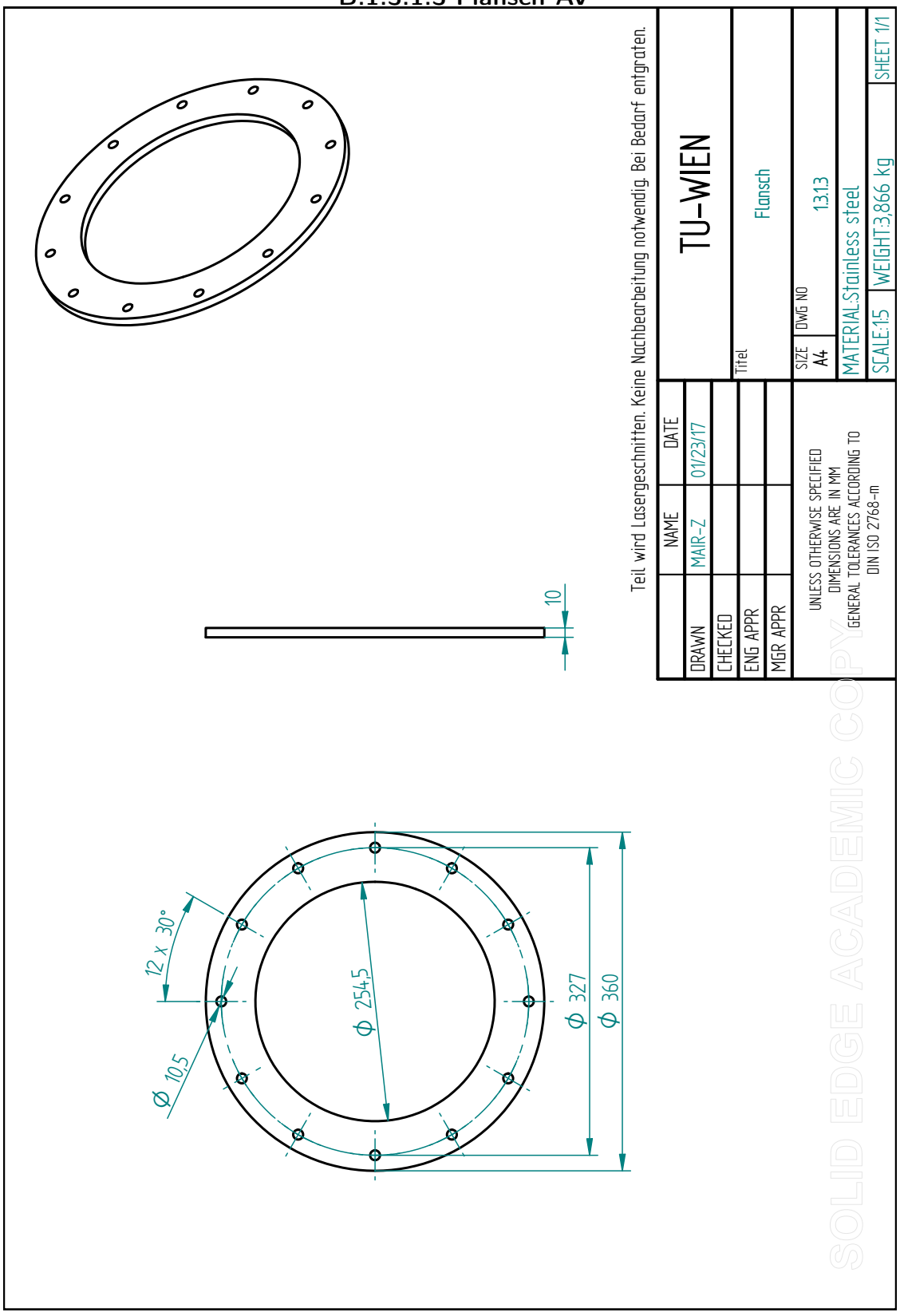
B.1.3.1.1 Behälterrohr AV



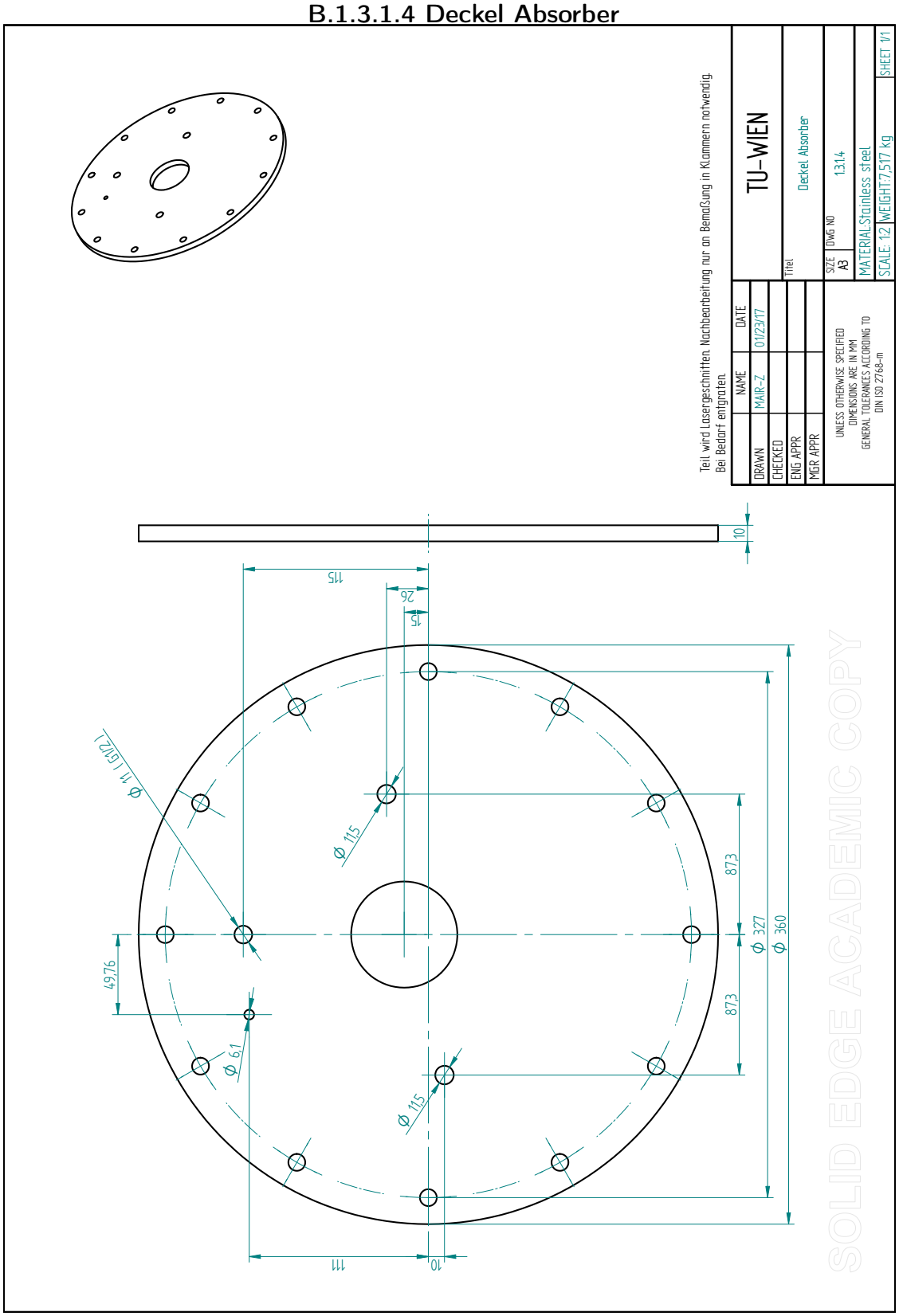
B.1.3.1.2 Stütze Absorber



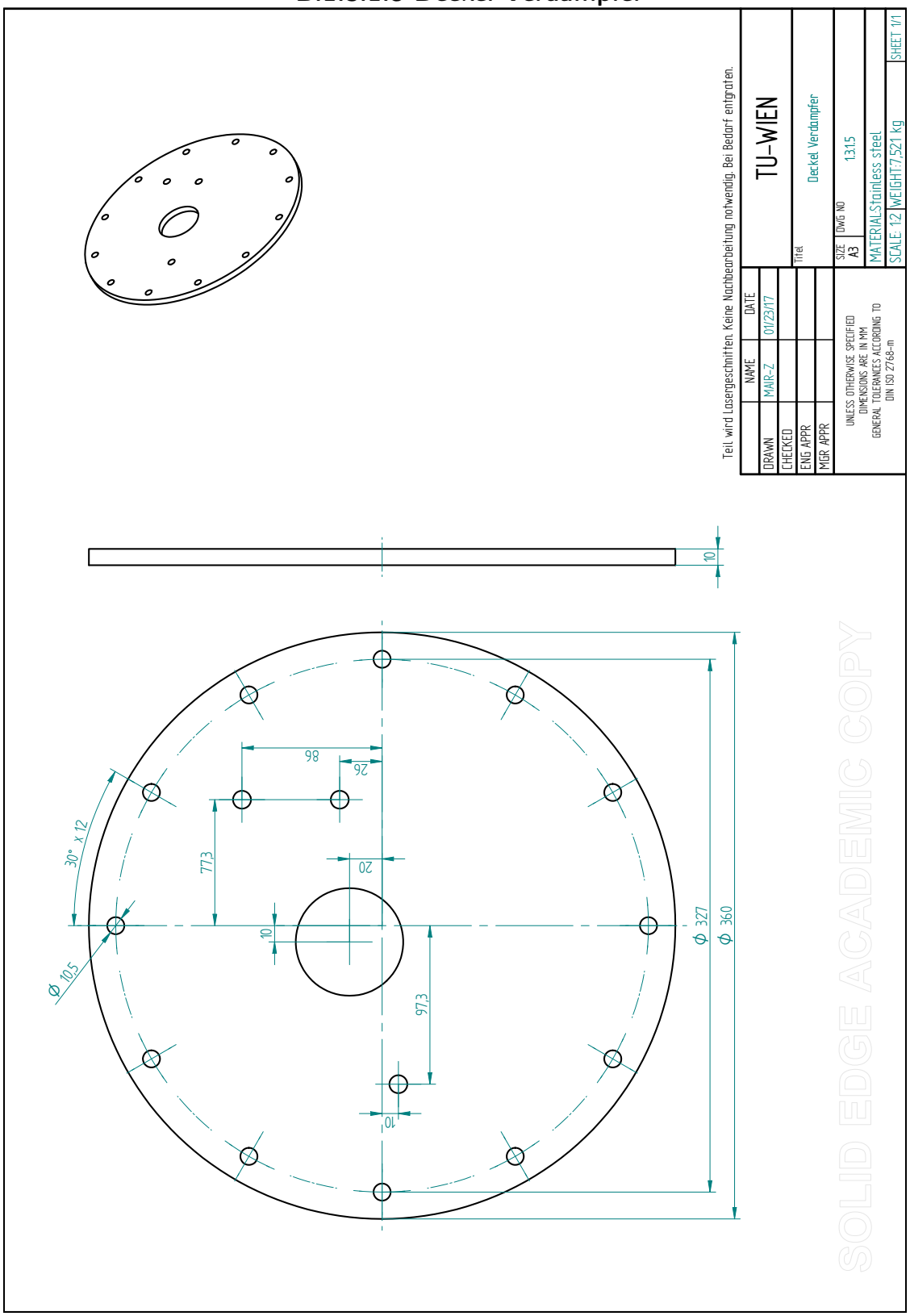
B.1.3.1.3 Flansch AV



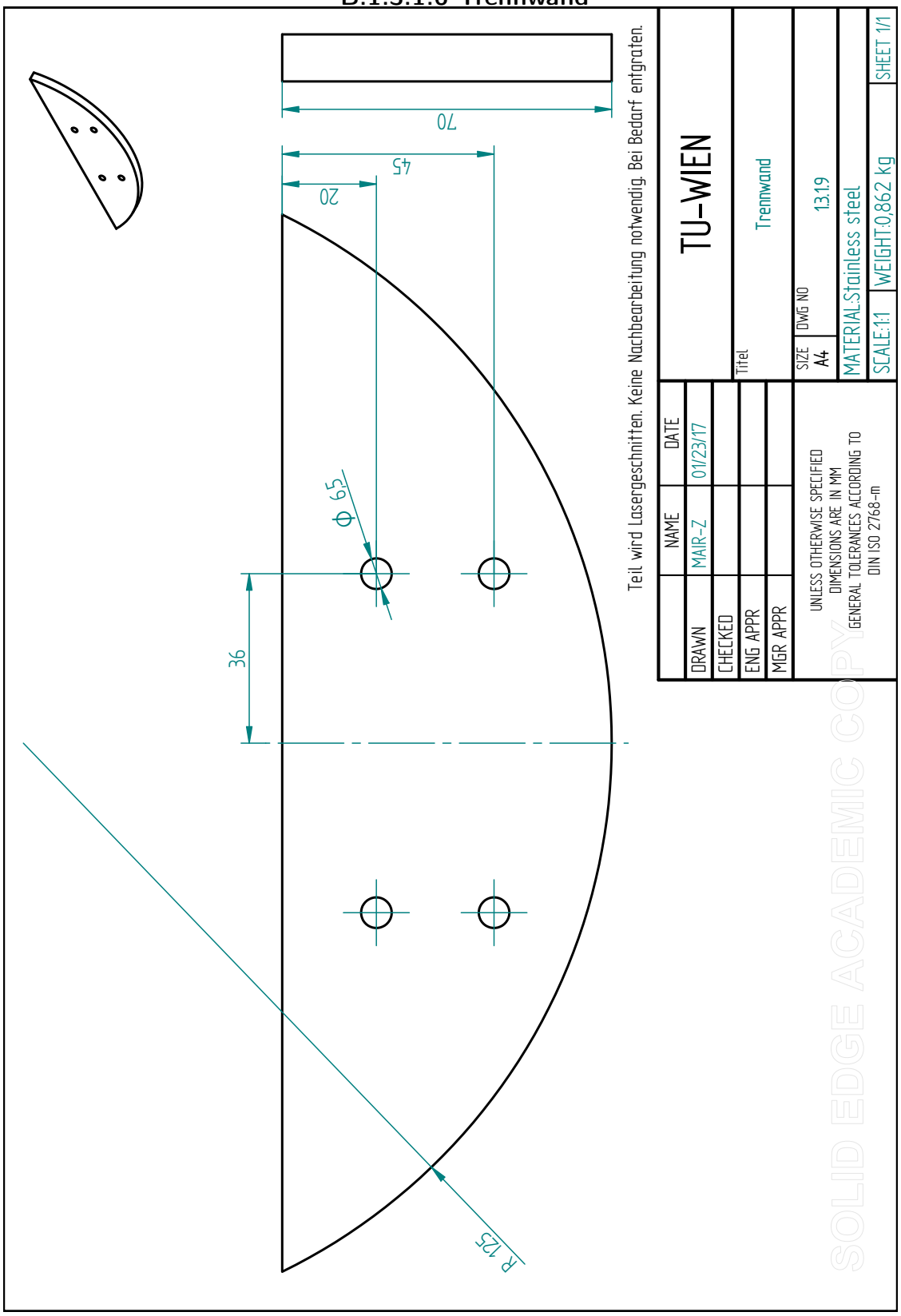
B.1.3.1.4 Deckel Absorber



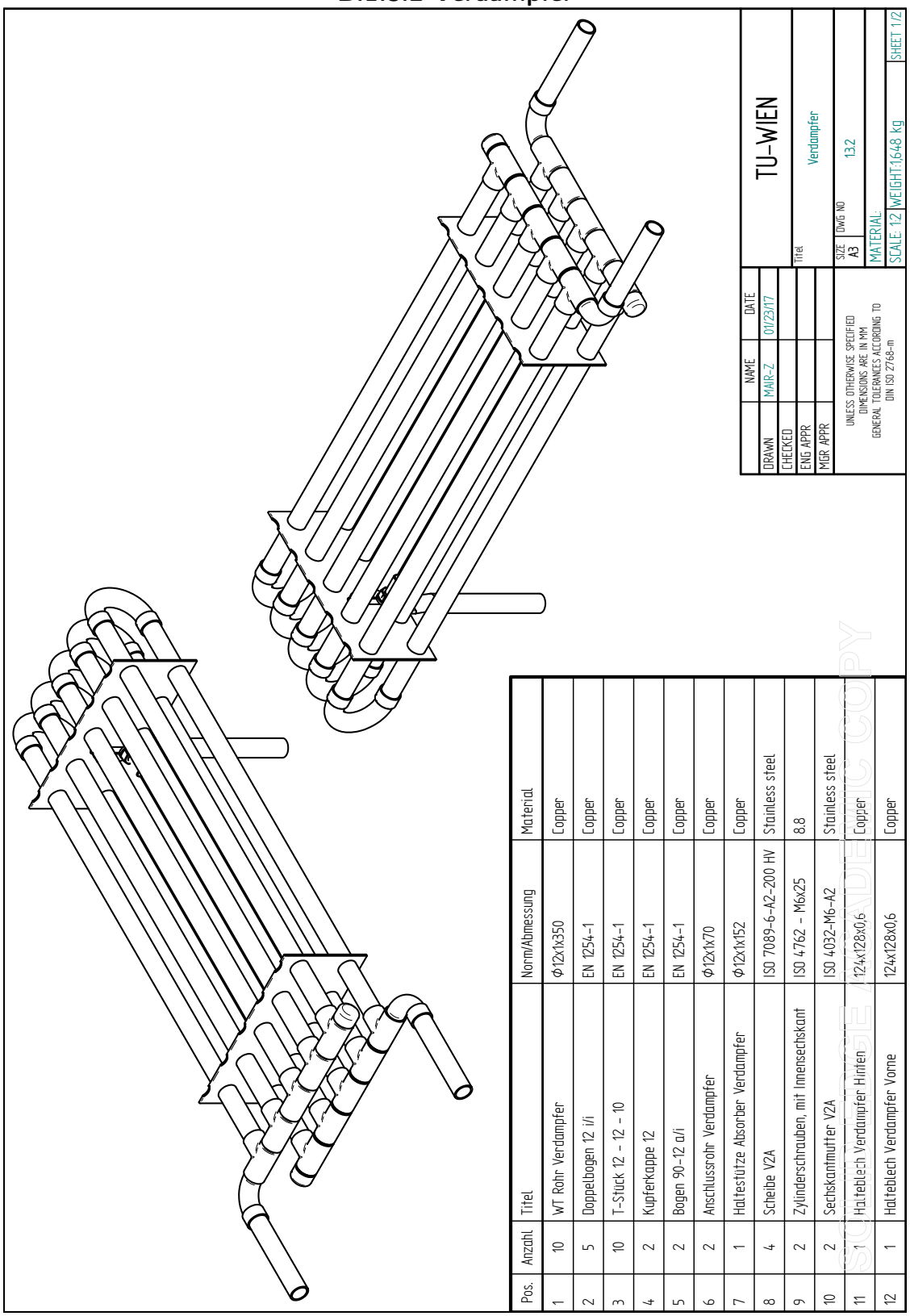
B.1.3.1.5 Deckel Verdampfer



B.1.3.1.6 Trennwand

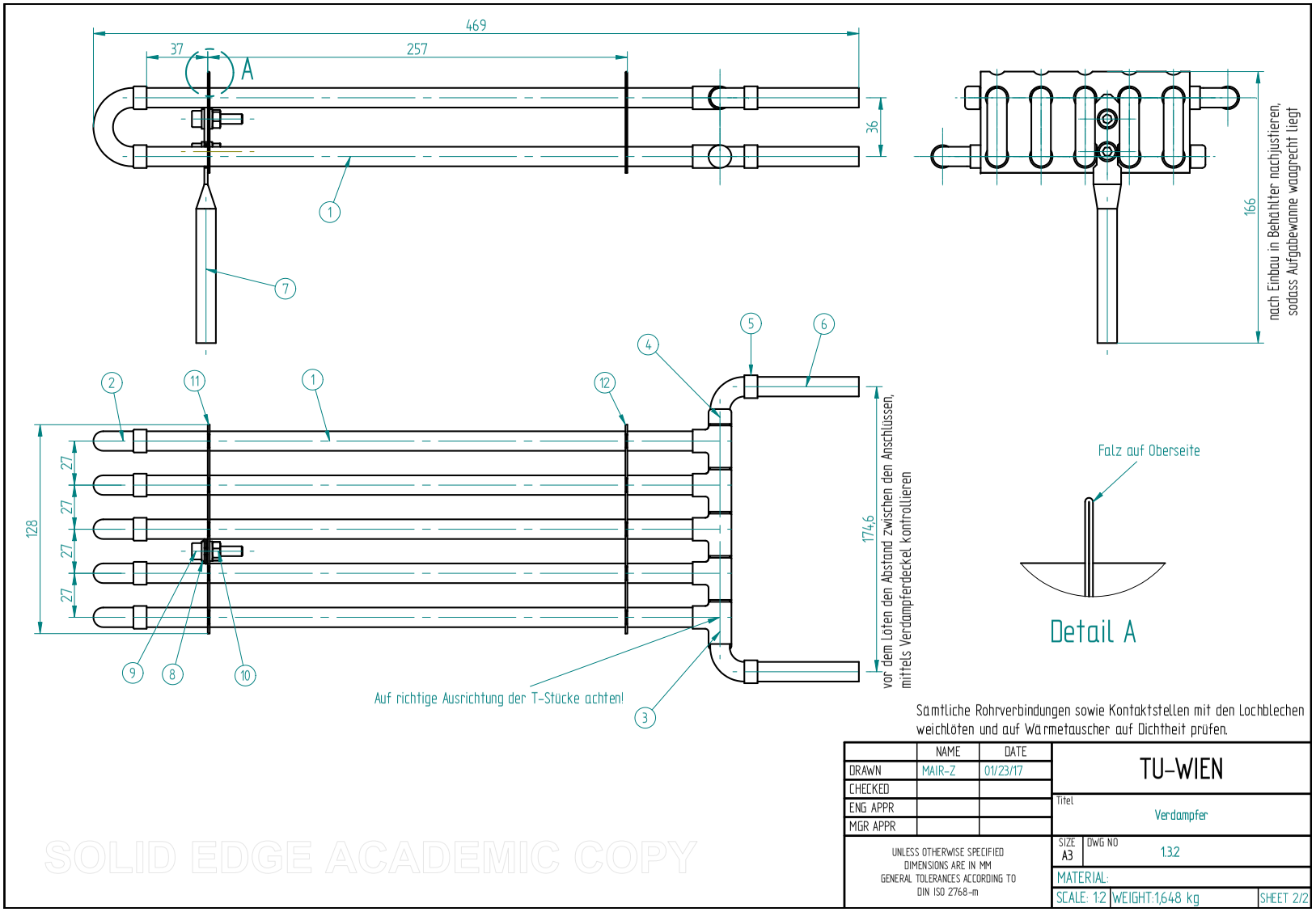


B.1.3.2 Verdampfer



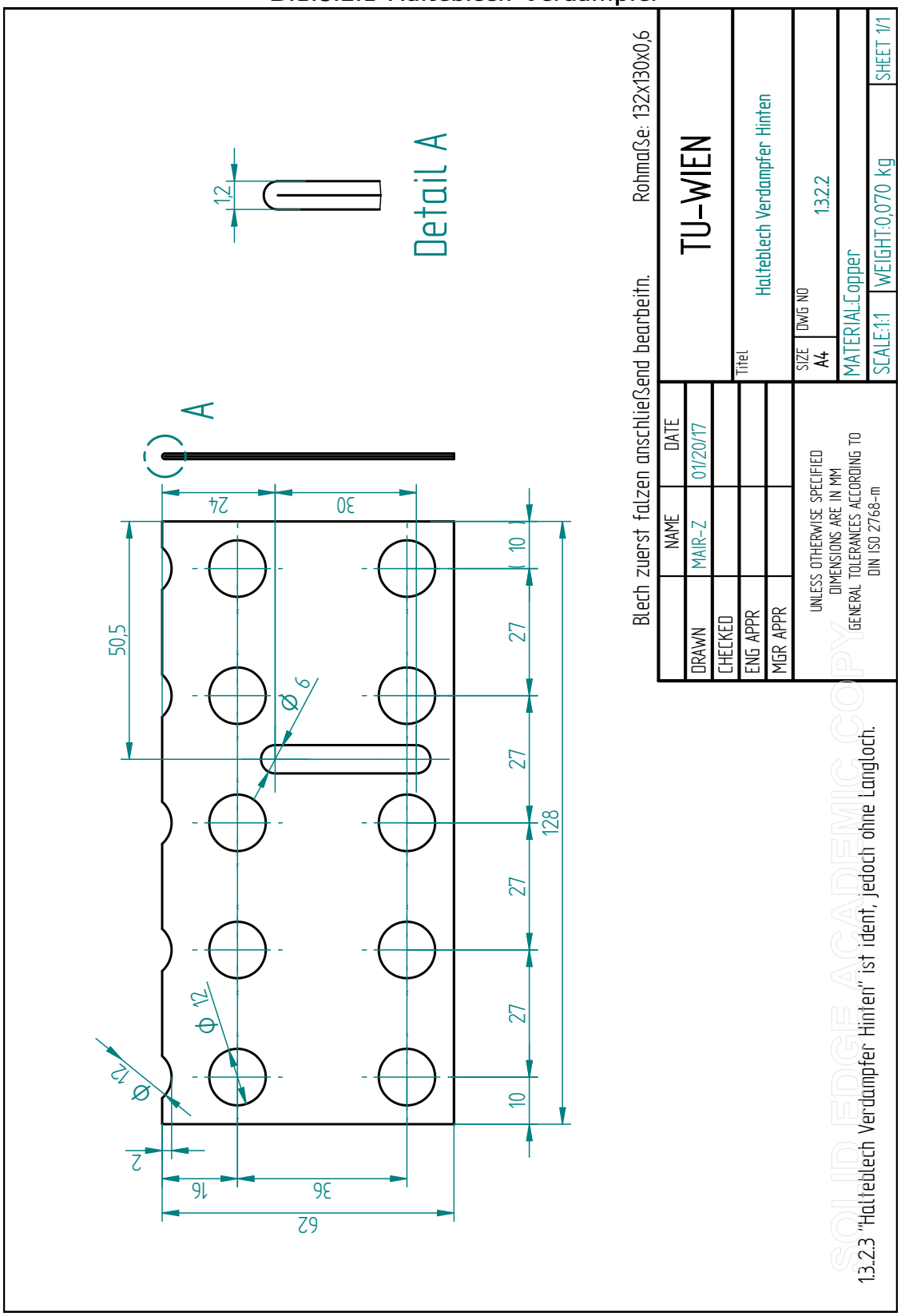
Pos.	Anzahl	Titel	Norm/Abmessung	Material
1	10	WT Rohr Verdampfer	Φ12x1x350	Copper
2	5	Doppelbogen 12 i/i	EN 1254-1	Copper
3	10	T-Stück 12 - 12 - 10	EN 1254-1	Copper
4	2	Kupferkappe 12	EN 1254-1	Copper
5	2	Bogen 90-12 a/i	EN 1254-1	Copper
6	2	Anschlussrohr Verdampfer	Φ12x1x70	Copper
7	1	Haltestütze Absorber Verdampfer	Φ12x1x152	Copper
8	4	Scheibe V2A	ISO 7089-6-A2-200 HV	Stainless steel
9	2	Zylinderschrauben, mit Innensechskant	ISO 4762 - M6x25	8.8
10	2	Sechskantmutter V2A	ISO 4032-M6-A2	Stainless steel
11	1	Halteblech Verdampfer Hinten	124x128x0,6	Copper
12	1	Halteblech Verdampfer Vorne	124x128x0,6	Copper

SCHOOL OF ENGINEERING ACADEMIC COPY

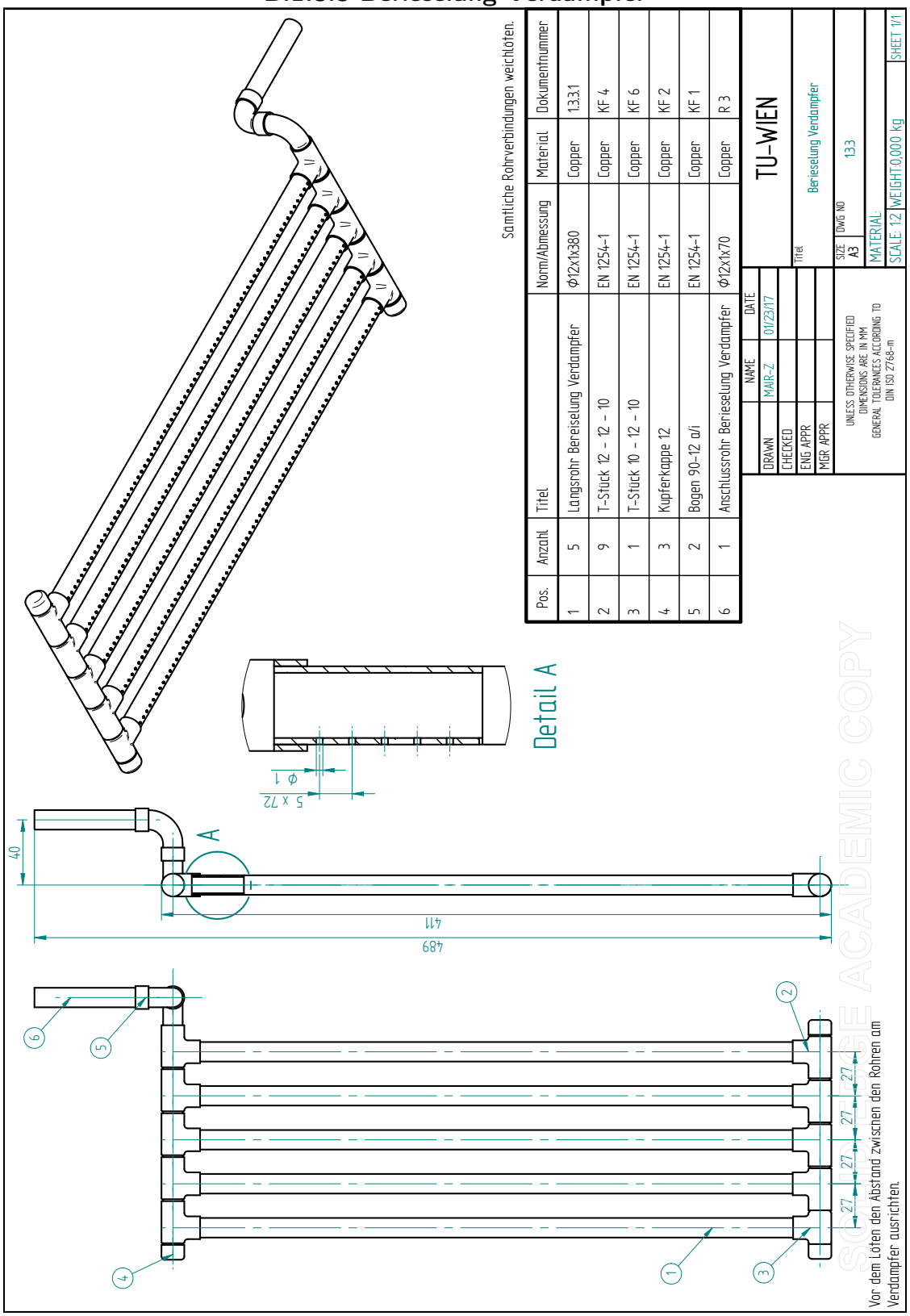


SOLID EDGE ACADEMIC COPY

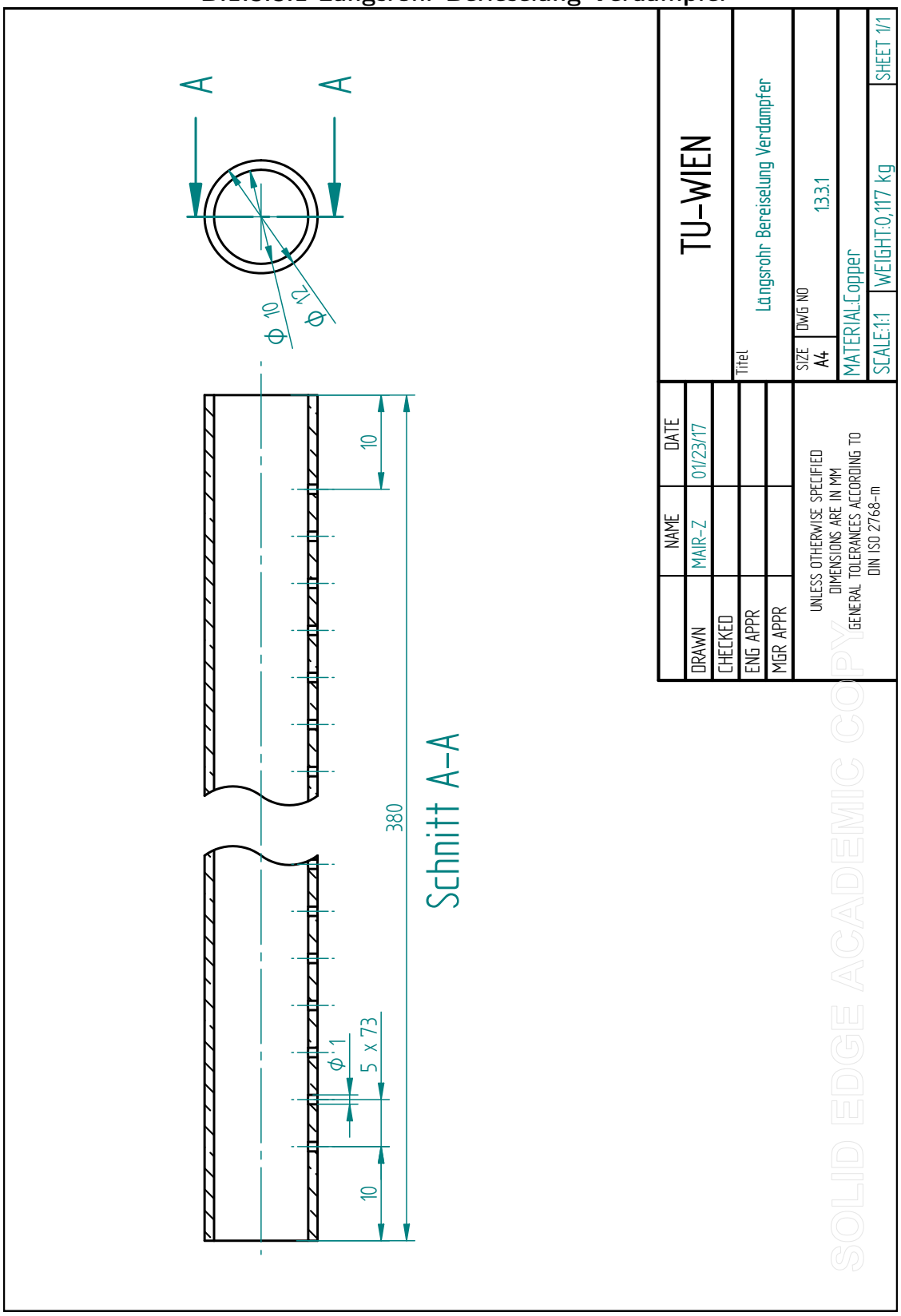
B.1.3.2.1 Halteblech Verdampfer



B.1.3.3 Berieselung Verdampfer



B.1.3.3.1 Längsrohr Berieselung Verdampfer



B.1.3.4 Absorber

Pos.	Anzahl	Titel	Norm/Abmessung	Material	Dokumentnummer
1	10	WT Rohr Absorber	Φ12x1x350	Copper	R 3
2	5	Doppelbogen 12 i/i	EN 1254-1	Copper	KF 3
3	10	T-Stück 12 - 12 - 10	EN 1254-1	Copper	KF 4
4	2	Kupferkappe 12	EN 1254-1	Copper	KF 2
5	2	Bogen 90-12 a/i	EN 1254-1	Copper	KF 1
6	2	Anschlussrohr Absorber	Φ12x1x60	Copper	R 3
7	1	Haltestütze Absorber Verdampfer	Φ12x1x152	Copper	1.34.2
8	1	Halteblech Absorber Hinten	Φ12x1x153	Copper	1.34.1
9	1	Halteblech Absorber Vorne	128x130x0,6	Copper	1.34.1
10	4	Scheibe V2A	ISO 7089-6-A2-200 HV	Stainless steel	BEF 4
11	2	Zylinderschrauben mit Innensechskant	ISO 4762 - M6x25	8.8	BEF 2
12	2	Sechskantmutter V2A	ISO 4032-M6-A2	Stainless steel	BEF 3

	NAME	DATE
DRAWN	MAIR-Z	01/23/17
CHECKED		
ENG APPR		
MGR APPR		

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MM
GENERAL TOLERANCES ACCORDING TO
DIN ISO 2768-m

TU-WIEN

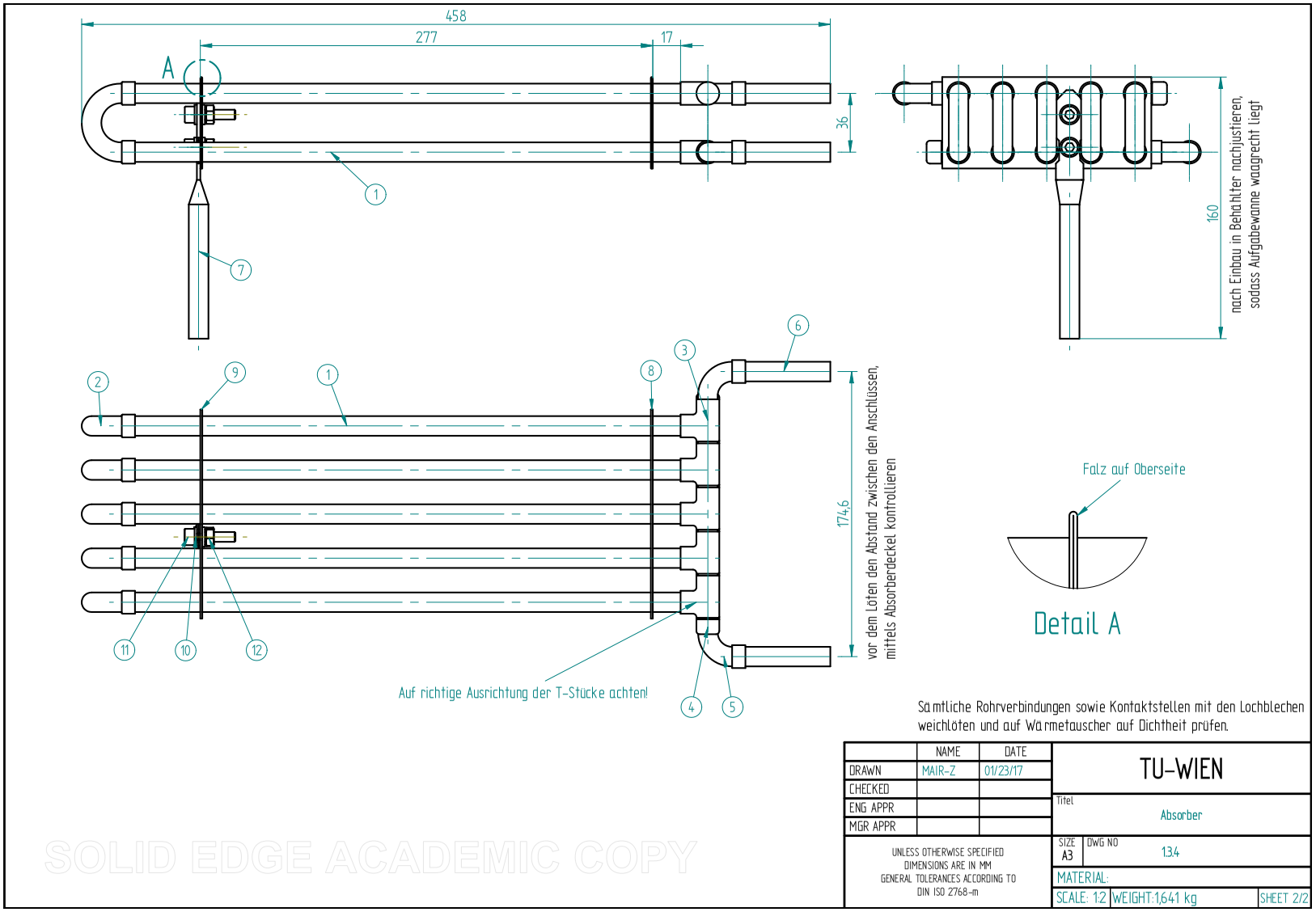
Titel: Absorber

SIZE A3 | DWG NO 13.4

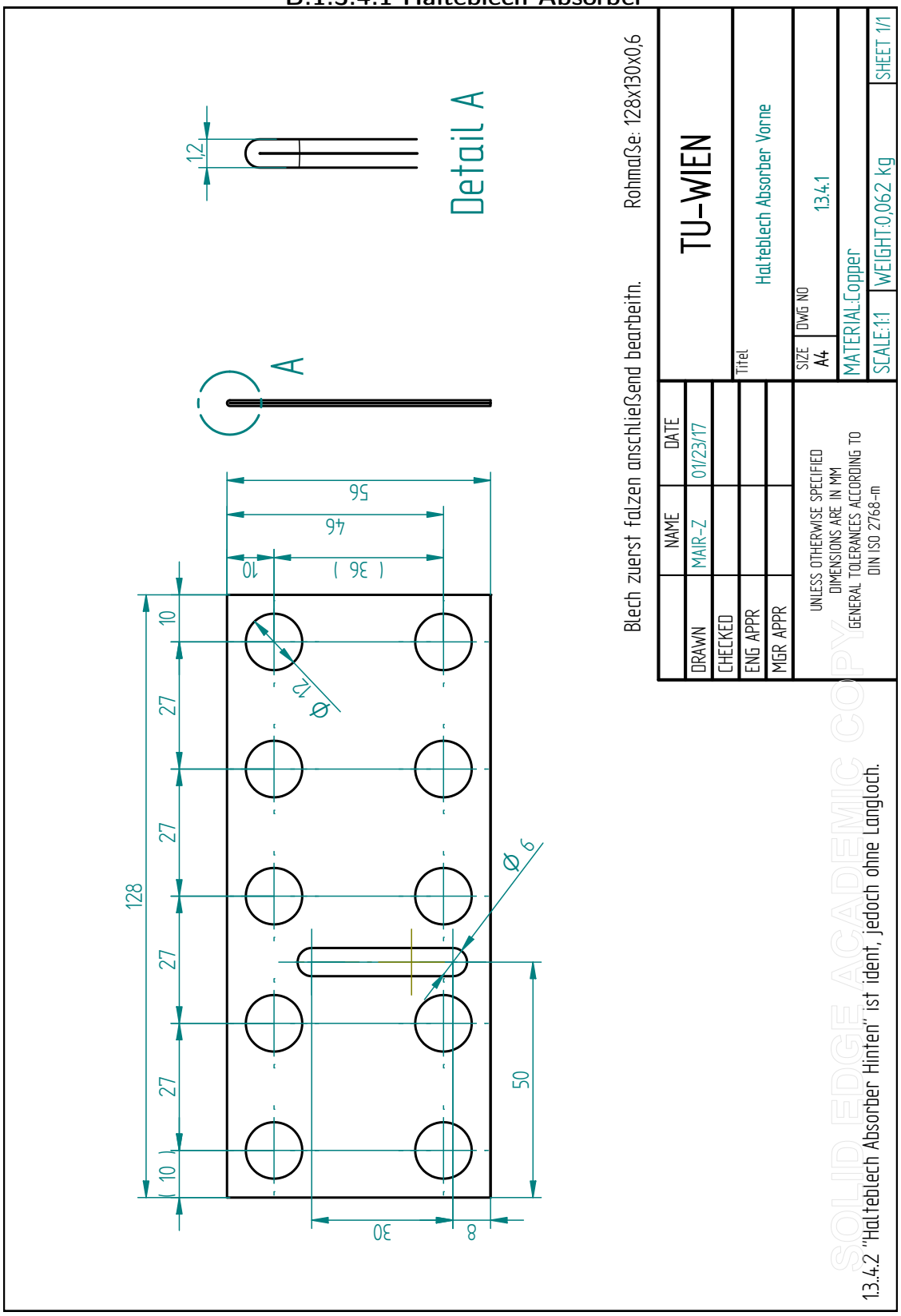
MATERIAL:

SCALE: 1:2 | WEIGHT:1,64 1 kg | SHEET 1/2

COPY

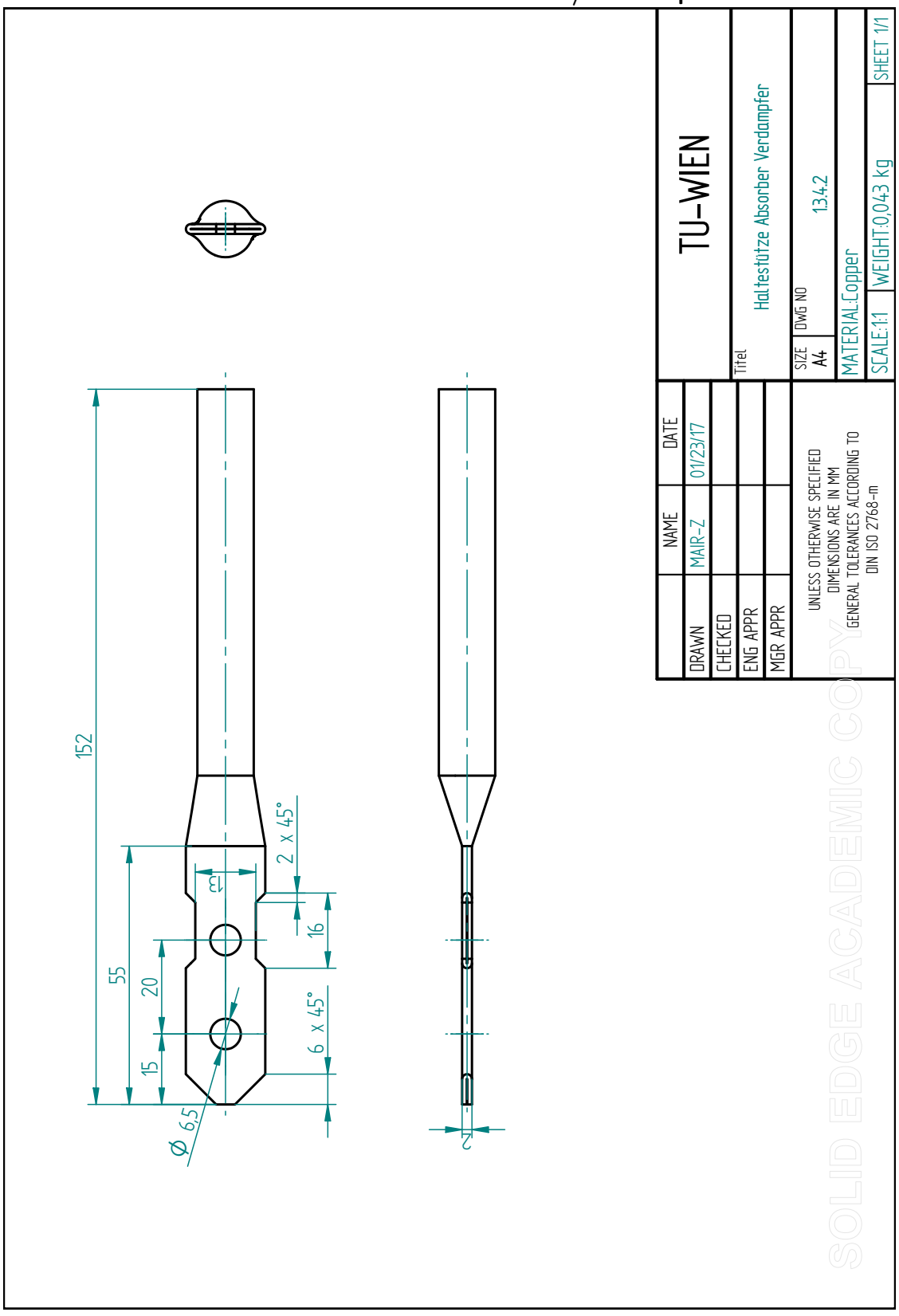

458
277
17
A
36
1
7
160
nach Einbau in Behälter nachjustieren,
sodass Aufgabewanne waagrecht liegt
6
3
2
9
1
8
174,6
vor dem Löten den Abstand zwischen den Anschlüssen,
mittels Absorberdeckel kontrollieren
11
10
12
Auf richtige Ausrichtung der T-Stücke achten!
4
5
Falz auf Oberseite
Detail A
Sämtliche Rohrverbindungen sowie Kontaktstellen mit den Lochblechen
weichlöten und auf Wärmetauscher auf Dichtheit prüfen.
NAME
DATE
DRAWN
MAIR-Z
01/23/17
CHECKED
ENG APPR
MGR APPR
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MM
GENERAL TOLERANCES ACCORDING TO
DIN ISO 2768-m
TU-WIEN
Titel
Absorber
SIZE
A3
DWG NO
13.4
MATERIAL:
SCALE: 1:2
WEIGHT:1,641 kg
SHEET 2/2
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

B.1.3.4.1 Halteblech Absorber

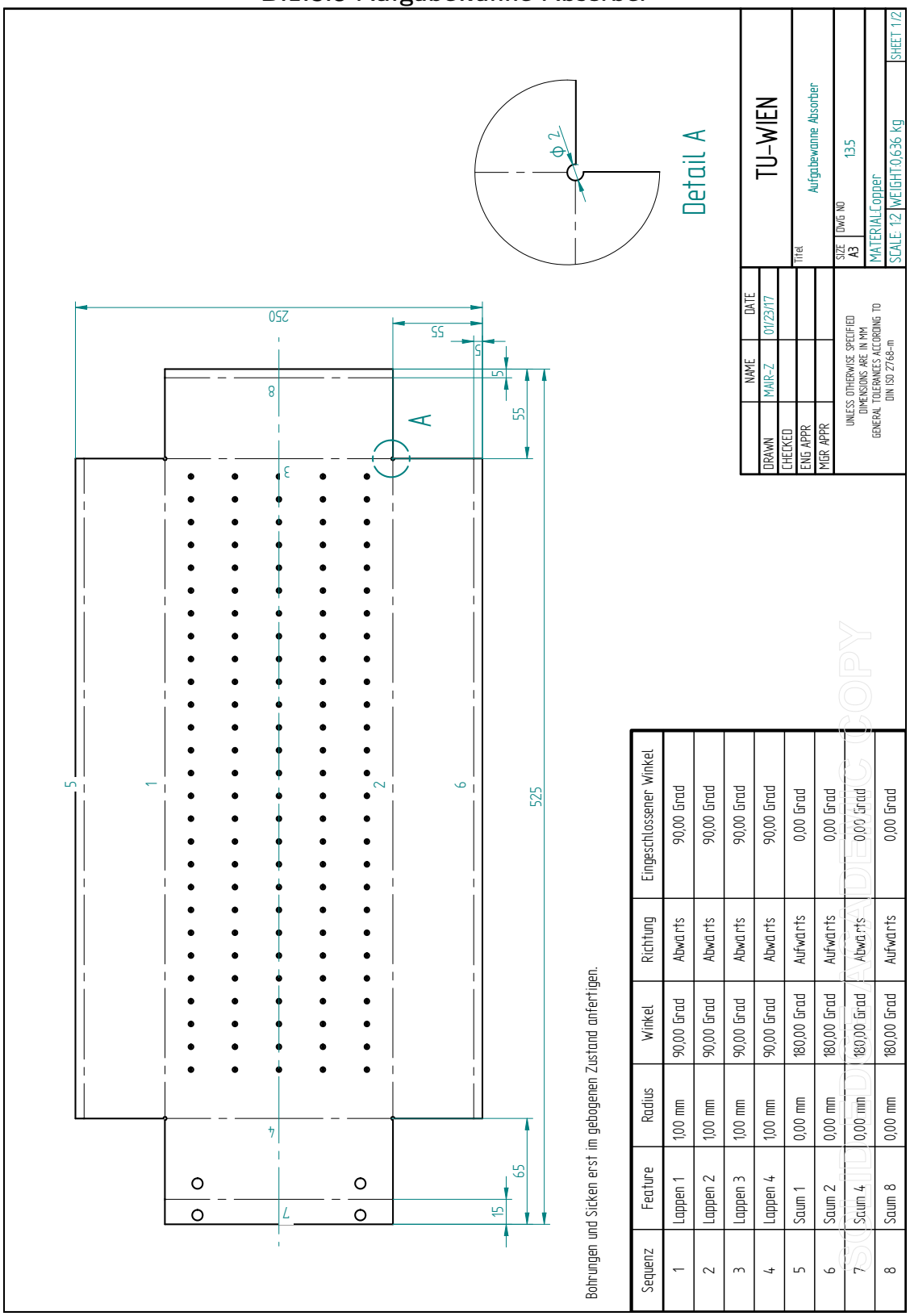


13.4.2 "Halteblech Absorber Hinten" ist ident, jedoch ohne Langloch.

B.1.3.4.2 Haltestütze Absorber/Verdampfer



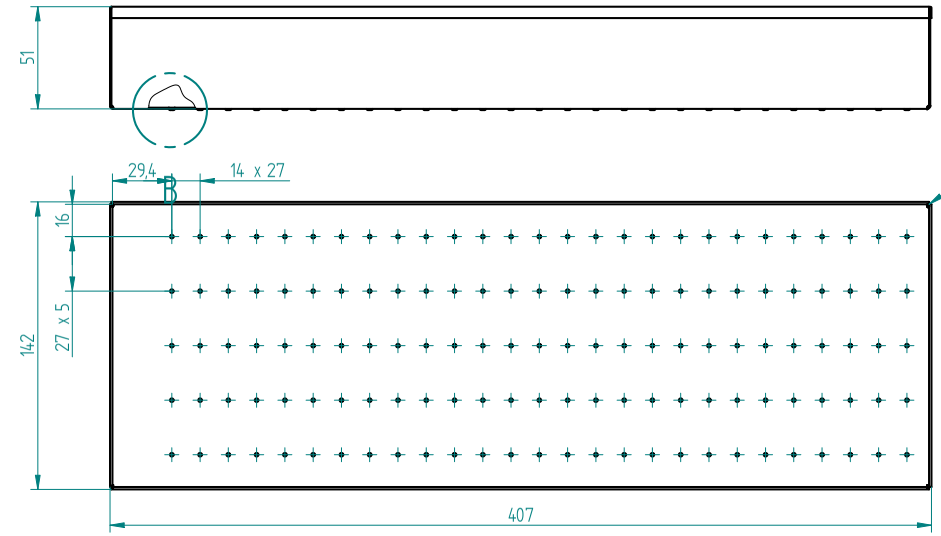
B.1.3.5 Aufgabewanne Absorber

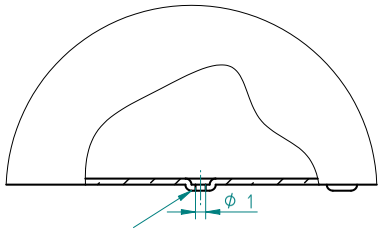


Bohrungen und Sicken erst im gebogenen Zustand anfertigen.

Sequenz	Feature	Radius	Winkel	Richtung	Eingeschlossener Winkel
1	Lappen 1	1,00 mm	90,00 Grad	Abwärts	90,00 Grad
2	Lappen 2	1,00 mm	90,00 Grad	Abwärts	90,00 Grad
3	Lappen 3	1,00 mm	90,00 Grad	Abwärts	90,00 Grad
4	Lappen 4	1,00 mm	90,00 Grad	Abwärts	90,00 Grad
5	Saum 1	0,00 mm	180,00 Grad	Aufwärts	0,00 Grad
6	Saum 2	0,00 mm	180,00 Grad	Aufwärts	0,00 Grad
7	Saum 4	0,00 mm	180,00 Grad	Abwärts	0,00 Grad
8	Saum 8	0,00 mm	180,00 Grad	Aufwärts	0,00 Grad

SCHILLER DIGITAL ACADEMIC COPY





Detail B

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	NAME	DATE
DRAWN	MAIR-Z	01/23/17
CHECKED		
ENG APPR		
MGR APPR		

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MM
GENERAL TOLERANCES ACCORDING TO
DIN ISO 2768-m

TU-WIEN

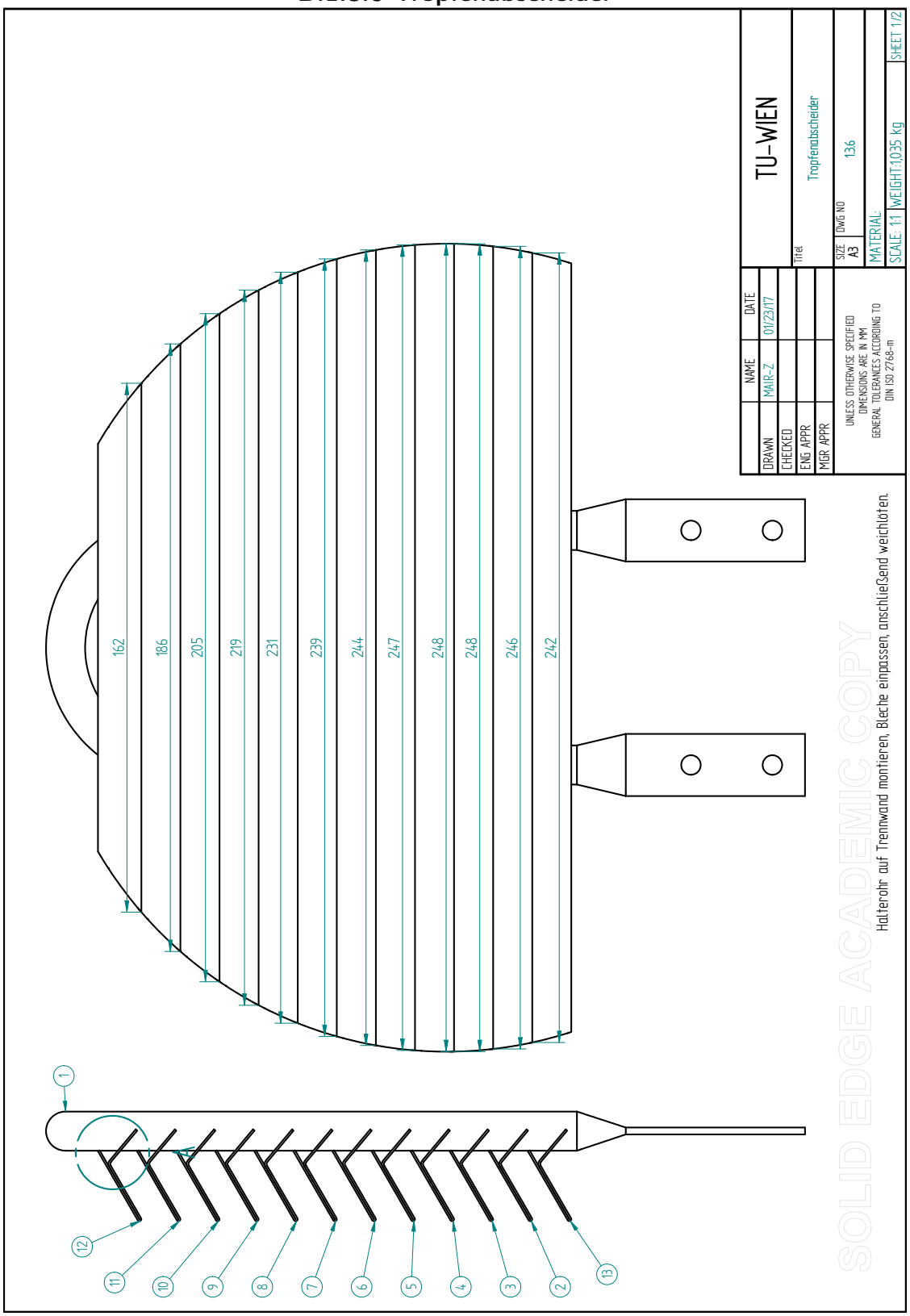
Titel: Aufgabewanne Absorber

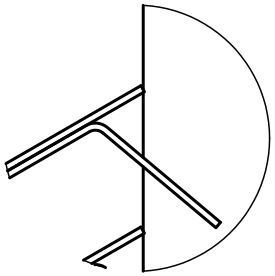
SIZE A3 | DWG NO 13.5

MATERIAL: Copper

SCALE: 1:2 | WEIGHT: 0,636 kg | SHEET 2/2

B.1.3.6 Tropfenabscheider





Detail A

Pos.	Titel	Anzahl	Norm/Abmessung	Material	Dokumentnummer
1	Halterohr Tropfenabscheider	1		Copper	1.3.6.1
2	Blech Tropfenabscheider	1	246	Copper	1.3.6.2
3	Blech Tropfenabscheider	1	248	Copper	1.3.6.2
4	Blech Tropfenabscheider	1	248	Copper	1.3.6.2
5	Blech Tropfenabscheider	1	247	Copper	1.3.6.2
6	Blech Tropfenabscheider	1	244	Copper	1.3.6.2
7	Blech Tropfenabscheider	1	239	Copper	1.3.6.2
8	Blech Tropfenabscheider	1	231	Copper	1.3.6.2
9	Blech Tropfenabscheider	1	219	Copper	1.3.6.2
10	Blech Tropfenabscheider	1	205	Copper	1.3.6.2
11	Blech Tropfenabscheider	1	186	Copper	1.3.6.2
12	Blech Tropfenabscheider	1	162	Copper	1.3.6.2
13	Blech Tropfenabscheider	1	242	Copper	1.3.6.2

	NAME	DATE
DRAWN	MAIR-Z	01/23/17
CHECKED		
ENG APPR		
MGR APPR		

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MM
GENERAL TOLERANCES ACCORDING TO
DIN ISO 2768-m

TU-WIEN

Titel: Tropfenabscheider

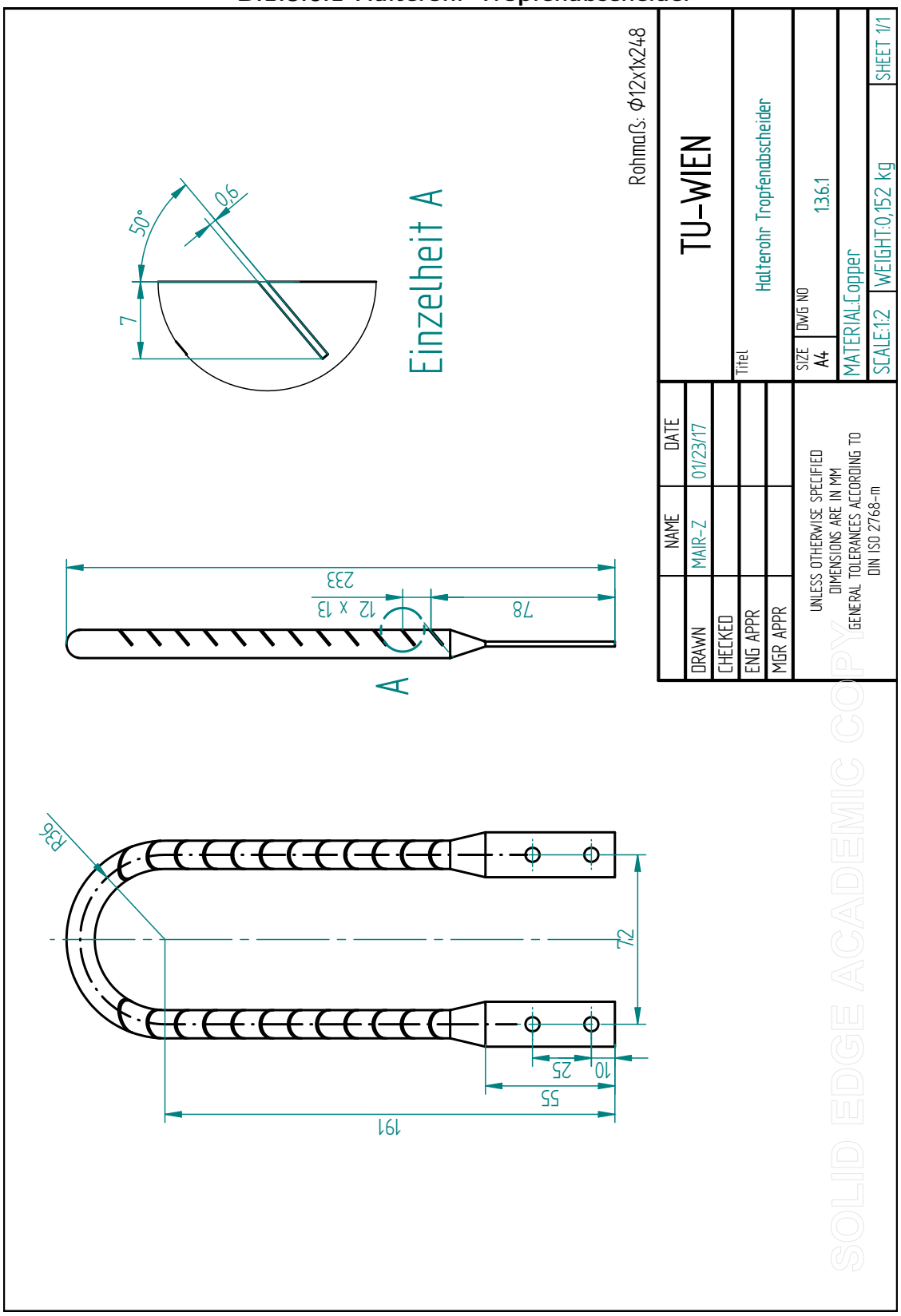
SIZE A4 | DWG NO 1.3.6

MATERIAL:

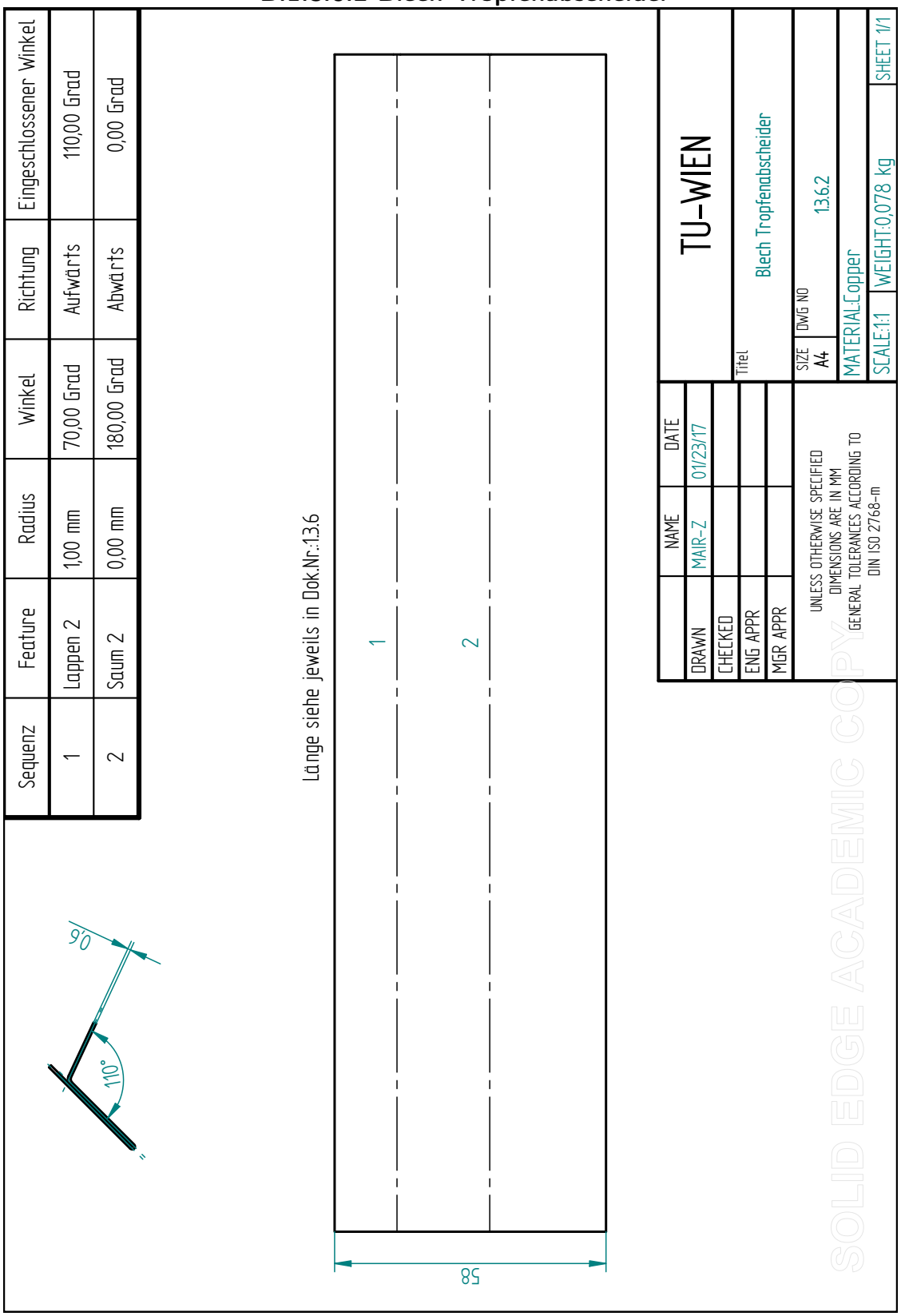
SCALE:1:1 | WEIGHT:1,035 kg | SHEET 2/2

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

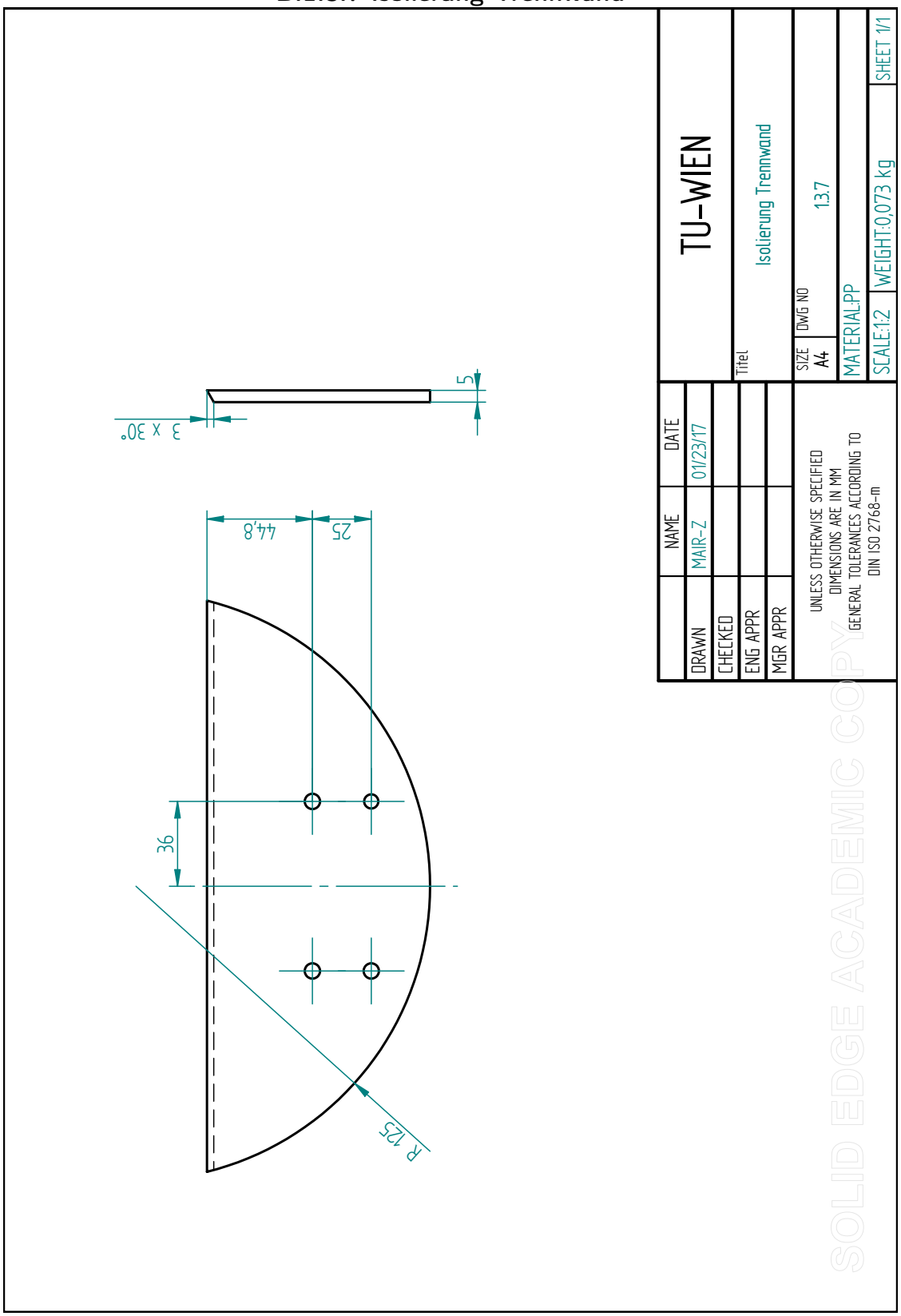
B.1.3.6.1 Halterohr Tropfenabscheider



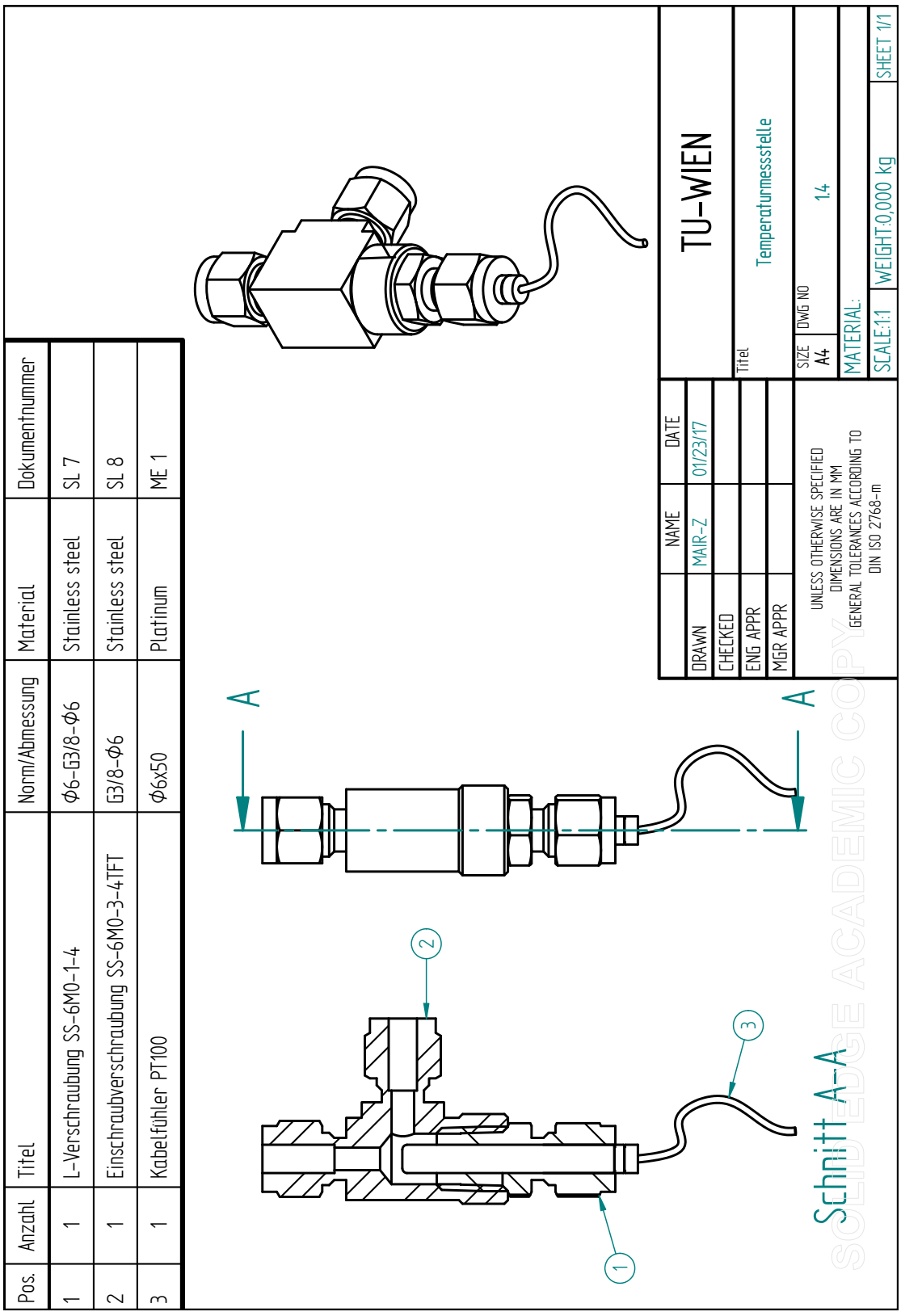
B.1.3.6.2 Blech Tropfenabscheider



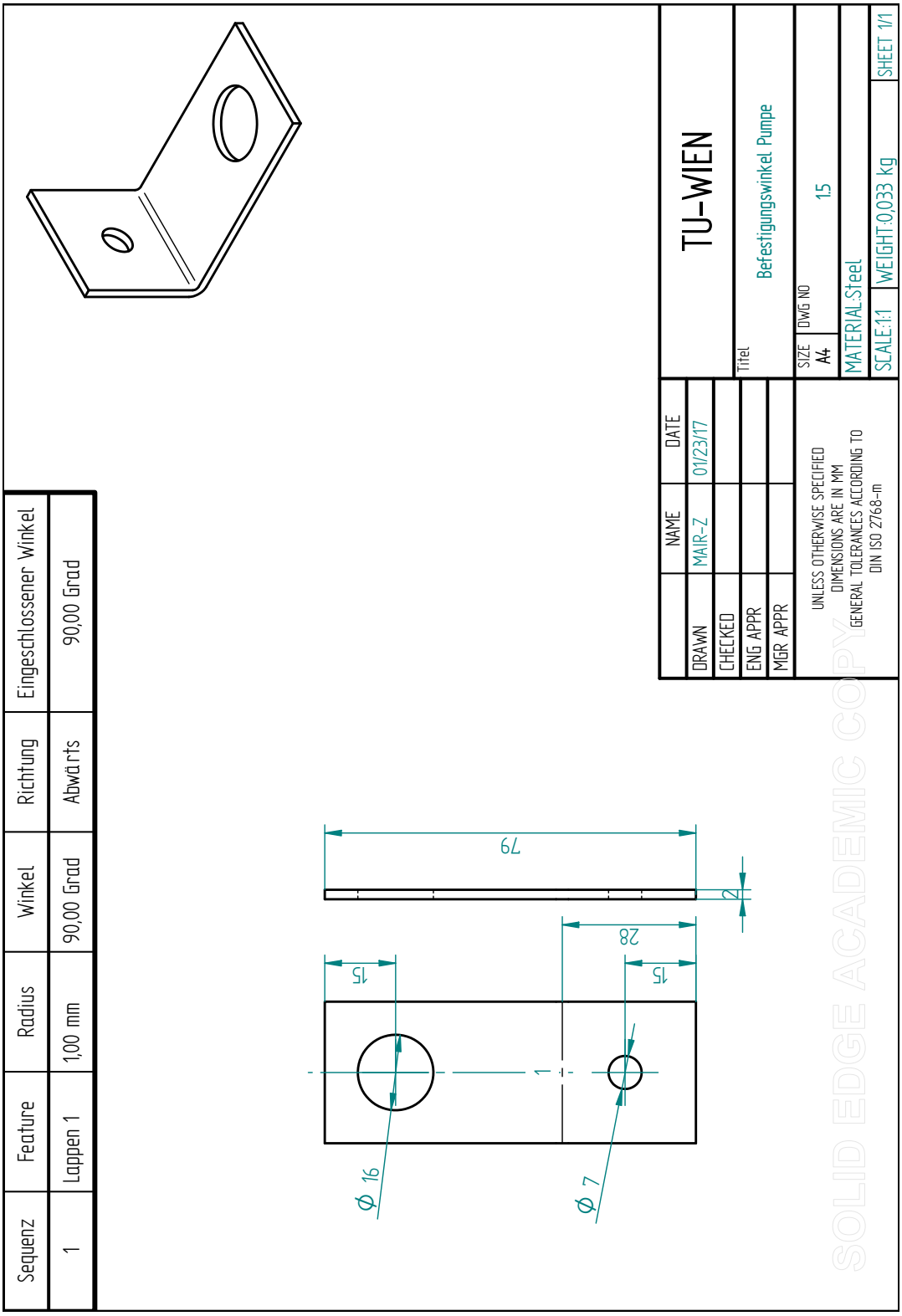
B.1.3.7 Isolierung Trennwand



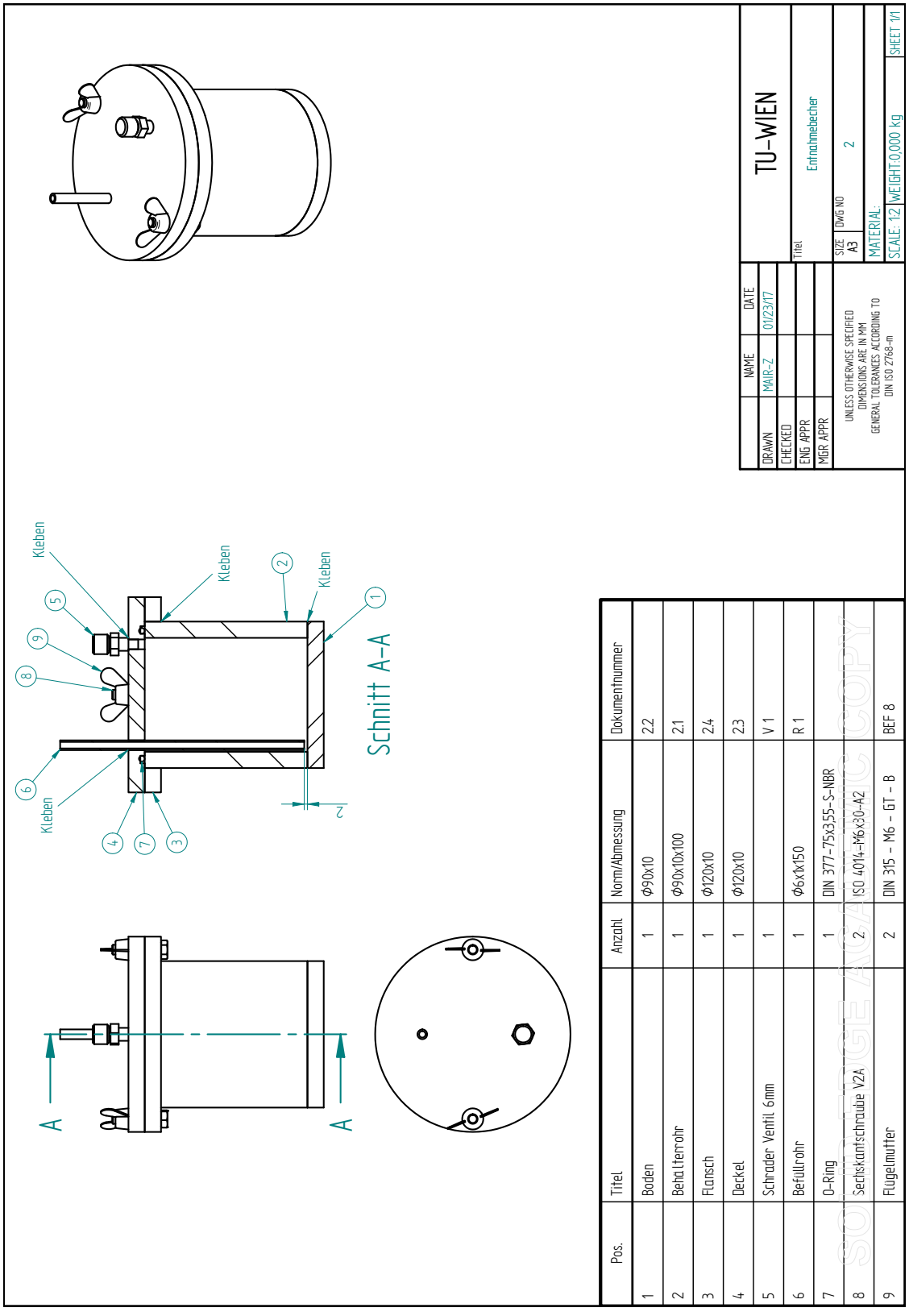
B.1.4. Temperaturmessstelle



B.1.5. Befestigungswinkel Pumpe



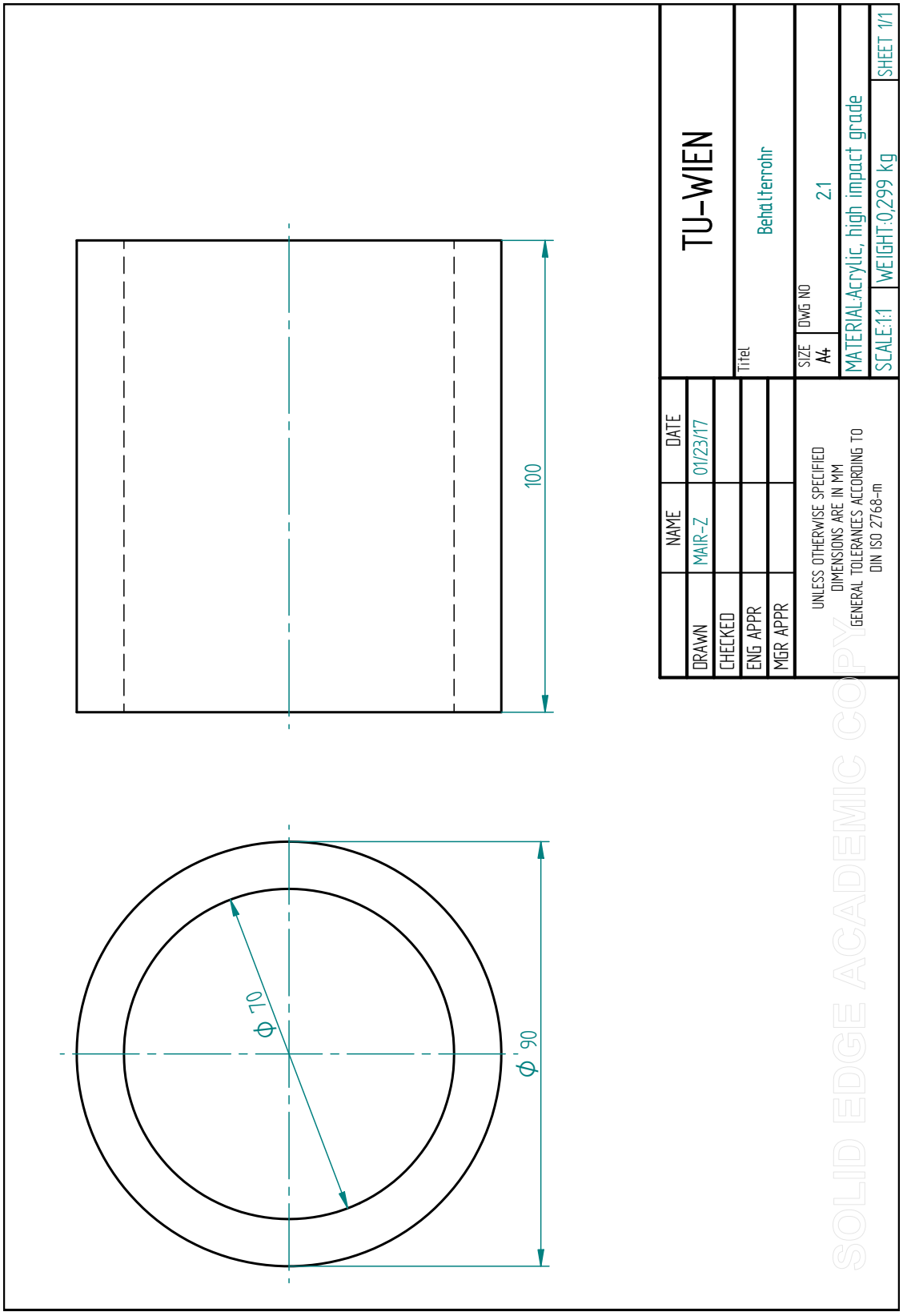
B.2. Entnahmebecher



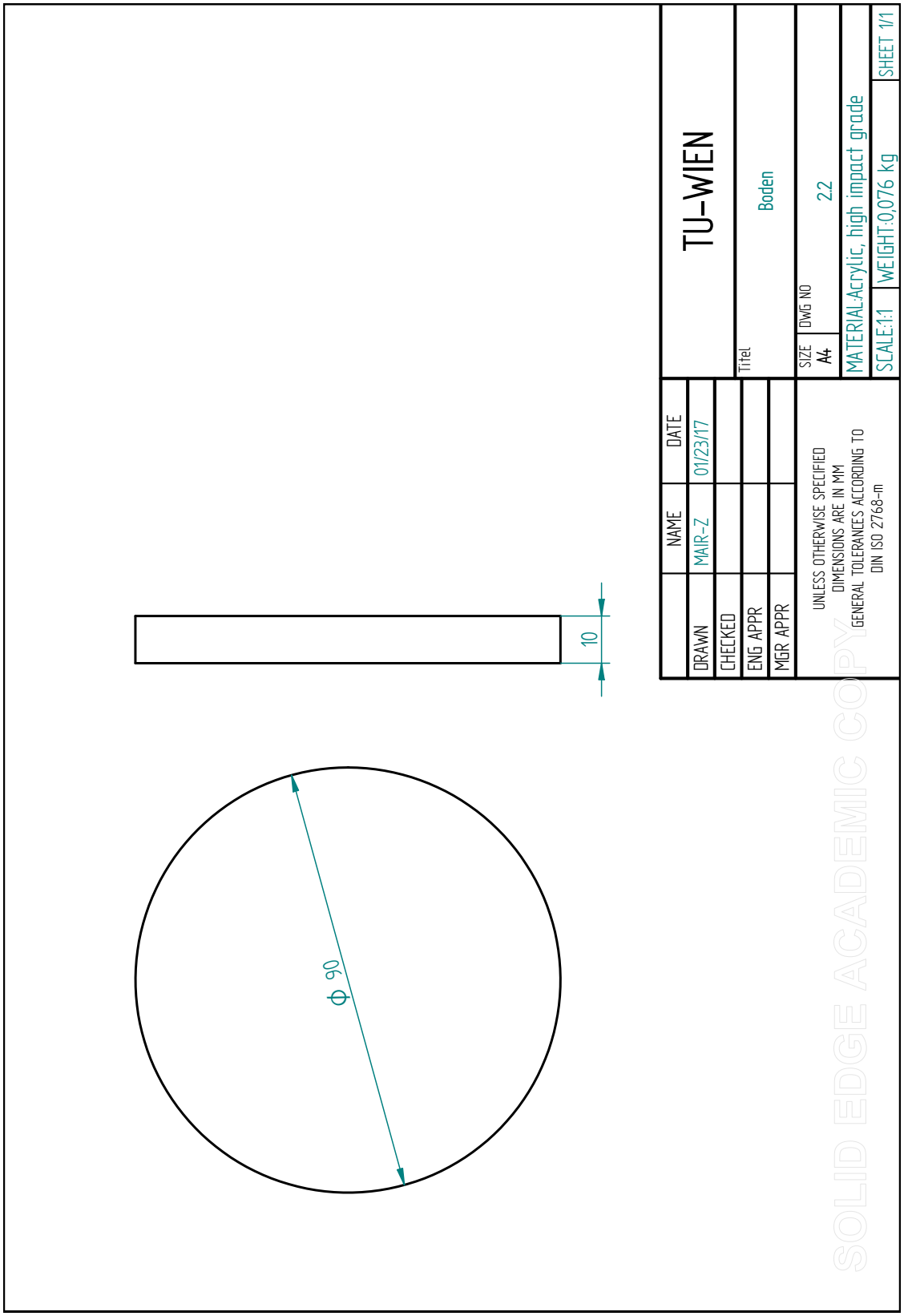
Pos.	Titel	Anzahl	Norm/Abmessung	Dokumentnummer
1	Boden	1	Φ90x10	2.2
2	Behälterrohr	1	Φ90x10x100	2.1
3	Flansch	1	Φ120x10	2.4
4	Deckel	1	Φ120x10	2.3
5	Schrader Ventil 6mm	1		V 1
6	Befüllrohr	1	Φ6x1x150	R 1
7	O-Ring	1	DIN 377-75x3,55-S-NBR	
8	Sechskantschraube V2A	2	ISO 4014-M6x30-A2	
9	Flügelmutter	2	DIN 315 - M6 - GT - B	BEF 8

SOLVENDIGE AGAINST COPY

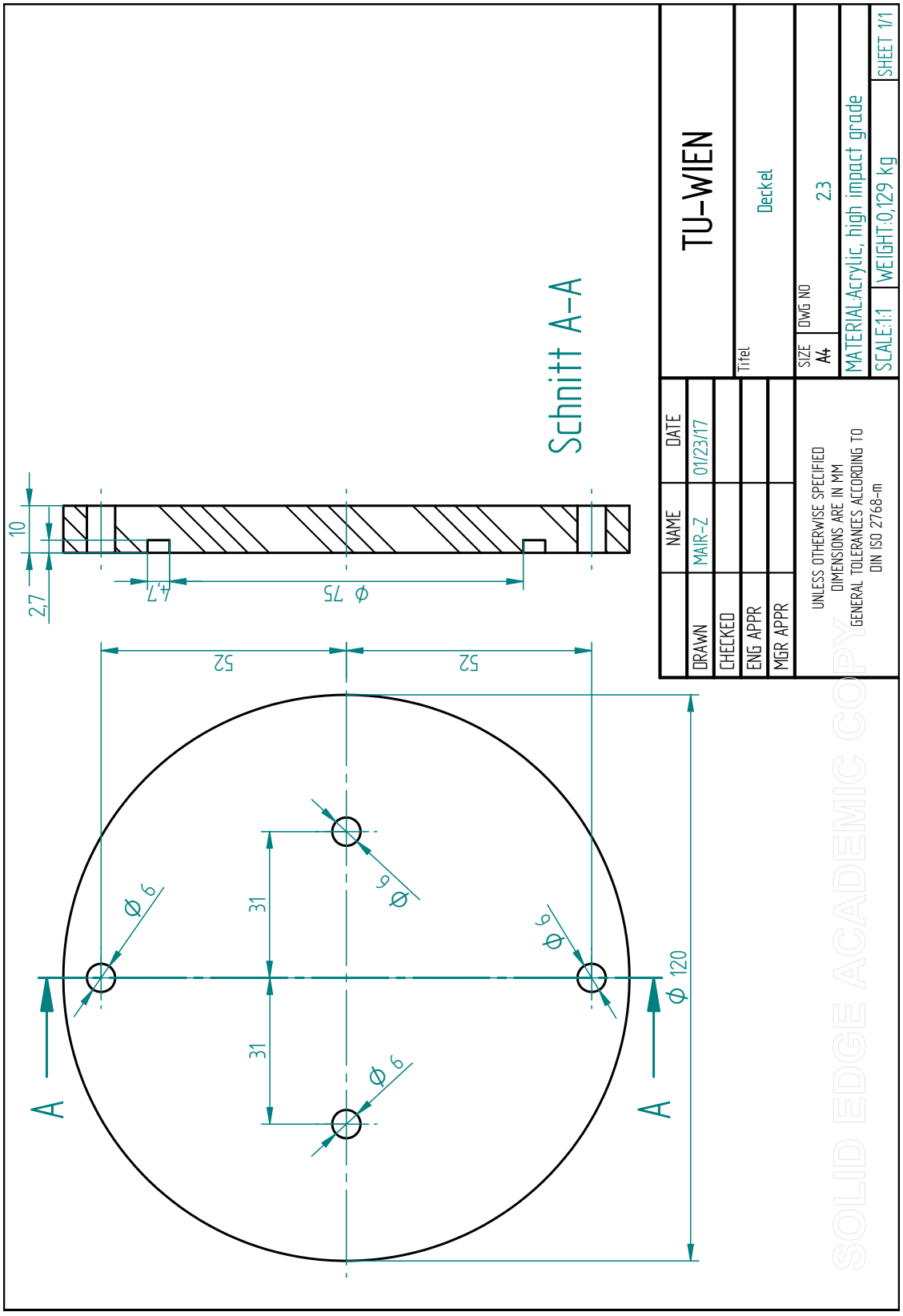
B.2.1. Behälterrohr



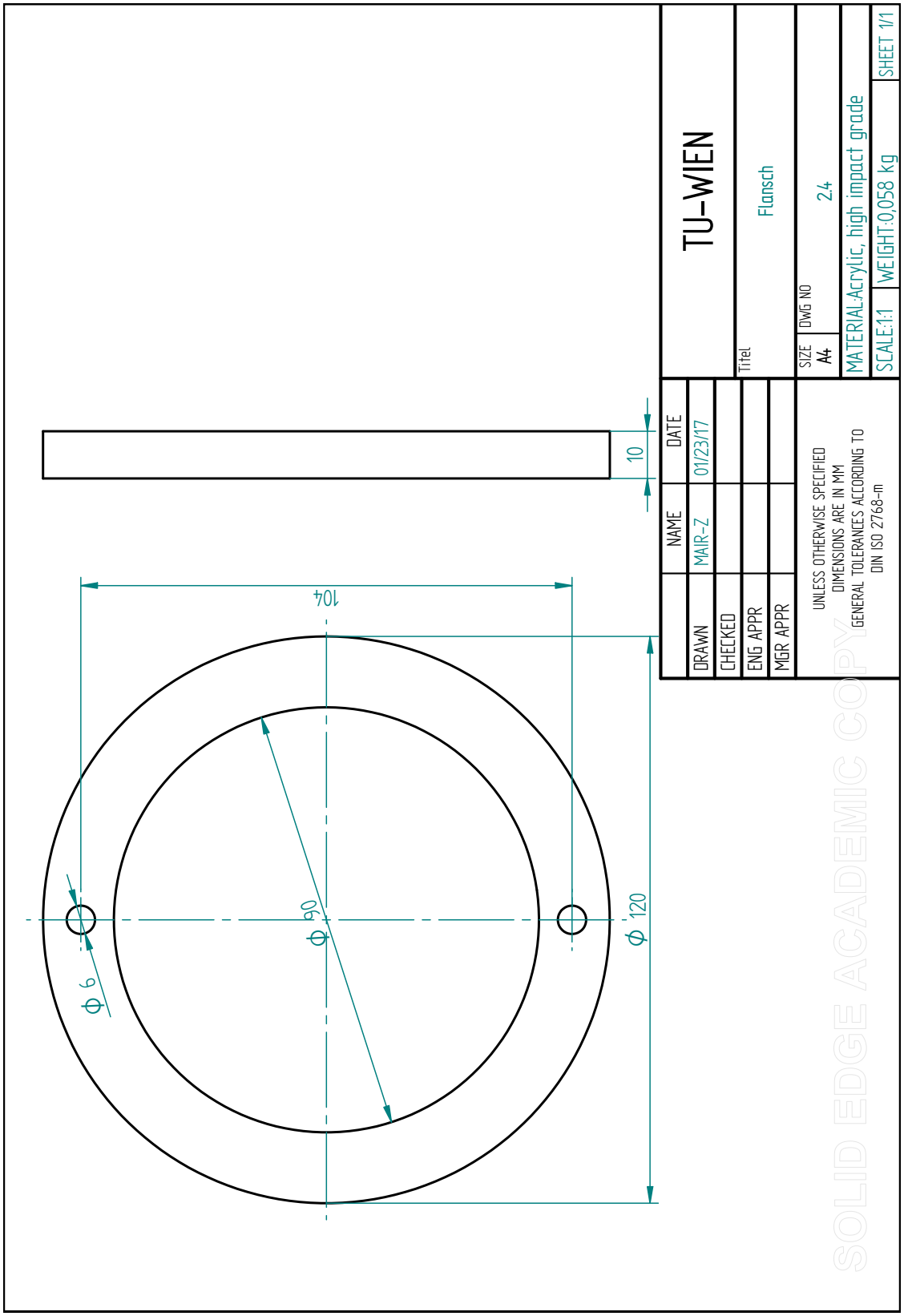
B.2.2. Boden


10
ϕ 90
TU-WIEN
Titel
Boden
SIZE
A4
DWG NO
2.2
MATERIAL:Acrylic, high impact grade
SCALE:1:1
WEIGHT:0,076 kg
SHEET 1/1
NAME
DATE
DRAWN
MAIR-Z
01/23/17
CHECKED
ENG APPR
MGR APPR
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MM
GENERAL TOLERANCES ACCORDING TO
DIN ISO 2768-m
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

B.2.3. Deckel

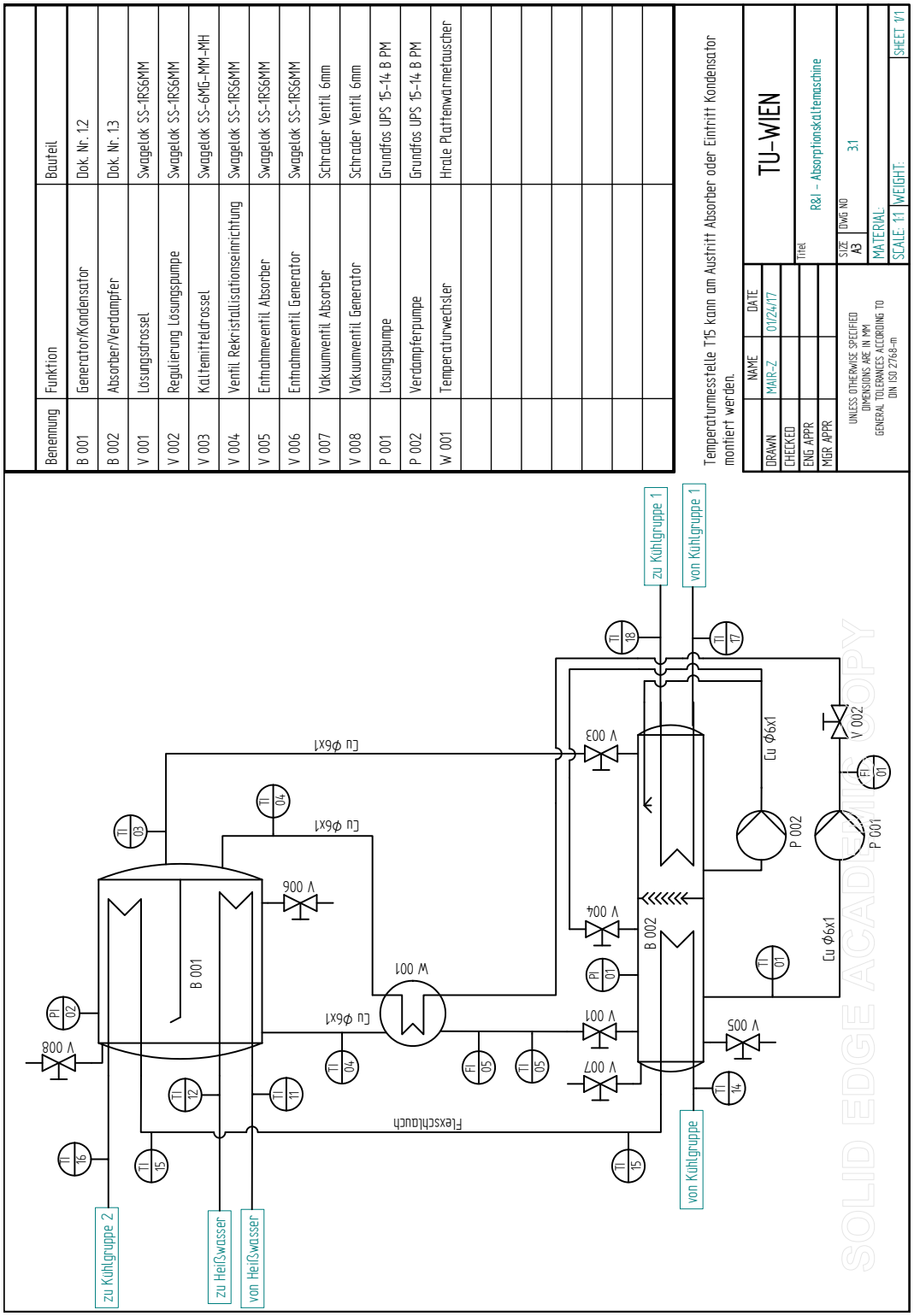

Schnitt A–A
TU-WIEN
Titel
Deckel
SIZE A4
DWG NO 2.3
MATERIAL:Acrylic, high impact grade
SCALE:1:1
WEIGHT:0,129 kg
SHEET 1/1
NAME
DATE
DRAWN MAIR-Z 01/23/17
CHECKED
ENG APPR
MGR APPR
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MM
GENERAL TOLERANCES ACCORDING TO
DIN ISO 2768-m
SOLID EDGE ACADEMIC COPY
10
2,7
4,7
ϕ 75
52
52
31
31
ϕ 6
ϕ 6
ϕ 6
ϕ 6
ϕ 120
A
A

B.2.4. Flansch

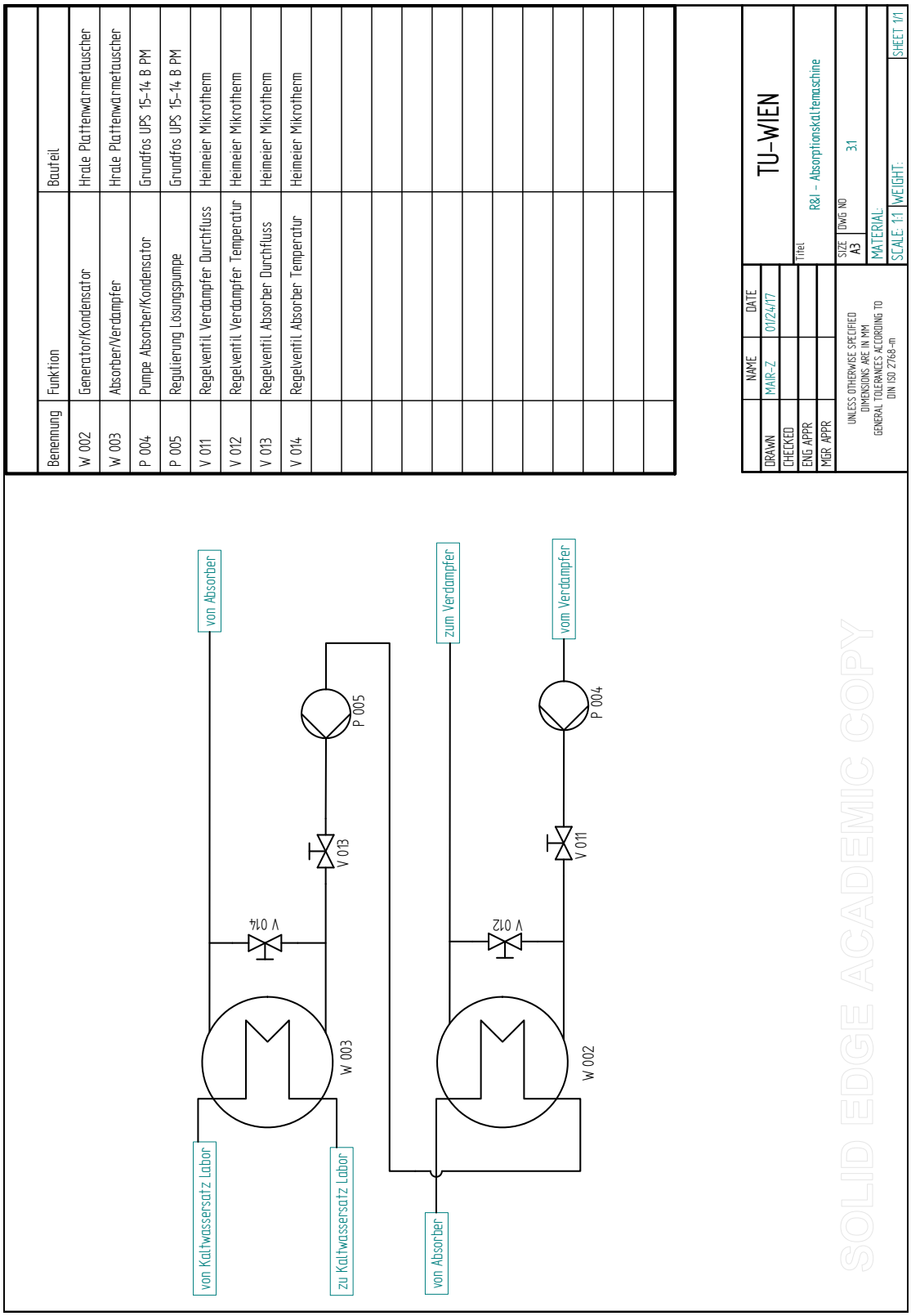

TU-WIEN
Titel
Flansch
SIZE A4
DWG NO
2.4
MATERIAL:Acrylic, high impact grade
SCALE:1:1
WEIGHT:0,058 kg
SHEET 1/1
NAME
DATE
DRAWN
MAIR-Z
01/23/17
CHECKED
ENG APPR
MGR APPR
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MM
GENERAL TOLERANCES ACCORDING TO
DIN ISO 2768-m
10
104
Φ 90
Φ 120
Φ 6
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

C. RI - Fließschemata

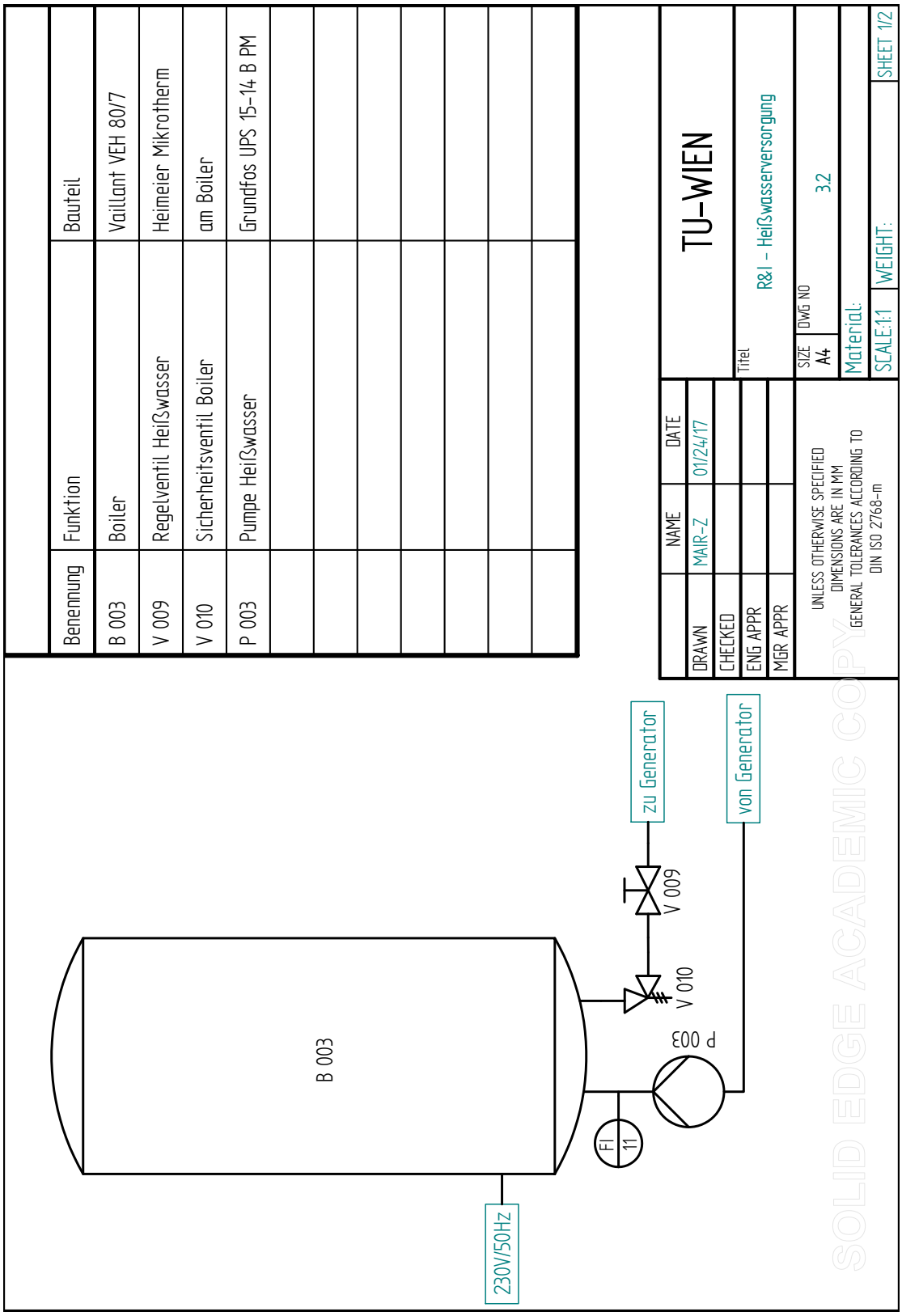
C.1. RI - Absorptionskältemaschine



C.2. RI - Kühlgruppe



C.3. RI - Heißwasserversorgung



		Lieferant	Stk.	Benennung	€/Stk.	Preis	Link	DB. Nr:	Anmerkung
1	1	Amazon	1	Cu-Rohr 6x1mm [10m]	€ 29,61	€ 29,61	Link		Verrohrung AKM
2	1	Bavariatradeex	2	Fuel Flowmeter FCH-m-ALU-IND, Series FCH-m-ALU, Q= 0,015 - 1,0 LPM	€ 164,82	€ 329,64	Link	5	Volumenstrommessung Lösungskreislauf
	2		3	Water Flowmeter, Compact FCH-C-Ms-N (Brass), Q= 0,5- 30 LPM	€ 80,68	€ 242,04	Link	9	2xKühlgruppe 1xHeißwasser
3	1	BS Nova	1	54%-Lithiumbromid Lösung 28.8L=18kg (11,1€/kg +150€ Spedition)	€ 349,80	€ 349,80	Link	80	Arbeitsmittel benötigte Menge +Extra
4	1	Ebay	2	Isolierung ARMAFLEX AF EA-B1 10 mm dick 1m² Endlos Selbstklebend	€ 15,40	€ 30,80	Link	24	Isolierung Behälter+Wärmetauscher
5	1	ece-Armaturen	12	Art.3130 T-Stück 1/2" - Messing	€ 3,09	€ 37,08	Link	10	4xKühlgrupe 8xWT-Anschluss
	2		12	Art.7331 Lötverschraubung 1/2" AG x 12mm - Messing	€ 5,60	€ 67,20	Link	11	8xWT-Anschluss, 4xPumpe AKM
	3		6	Art.3246 Reduktion 3/4" IG x 1/2" AG	€ 2,21	€ 13,26	Link	12	6x für PlattenWT
	4		4	Art.7332 Lötverschraubung 1/2" IG x 12mm	€ 6,05	€ 24,20	Link	13	4xfür LösungsWT
	5		6	Art.3331 Holländer Verschraubung 1/2" IG x AG	€ 5,30	€ 31,80	Link	14	6xKühlgruppe
	6		2	Art.3280 Doppelnippel 1/2" AG - Messing	€ 1,21	€ 2,42	Link	15	2x Kühlgruppe
	7		2	Art.3336 Holländer Verschraubung 1/2" AG x AG	€ 6,40	€ 12,80	Link	16	2x Kühlgruppe
	8		1	Art.3330 Holländer Verschraubung 1/2" IG x IG	€ 15,88	€ 15,88	Link	85	Heißwassergruppe
6	1	Haberkorn	2	PP-Platte 40mm 80x125	€ 8,00	€ 16,00	Link		Kondensatwanne (75x125+80x125)
	2		1	PP-Platte 40mm (240x100)	€ 10,00	€ 10,00	Link		Trennwandisolierung (240x100)
	2		3	Plexiglas Seitenplatte (1960x550x4mm)	€ 40,00	€ 120,00	Link		Verglasung für Heißwasserschutz
	2		1	Plexiglas Deckel (550x550x4mm)	€ 10,00	€ 10,00	Link		Verglasung für Heißwasserschutz
	1		1	Plexiglas für Entnahmestation	€ 30,00	€ 30,00	Link		lt. Zeichnung
7	1	Hornbach	1	KG 2000 Rohr DN 125 Länge: 1,00m	€ 7,70	€ 7,70	Link	69	Kondensatwanne
	2		7	Cu- Rohr 12x1mm Halbhart Stange 2,5m	€ 8,90	€ 62,30	Link		16,51m reine Länge
	3		1	Flexschlauch 1/2"AG -1/2"AG 1000mm	€ 8,00	€ 8,00	Link		Absorber aus - Kondensator ein
	4		1	Flexschlauch 1/2"AG -1/2"AG 2500mm	€ 20,00	€ 20,00	Link		Kondensator aus - Kühlgruppe ein
	5		1	Flexschlauch 1/2"AG -1/2"AG 2000mm	€ 18,00	€ 18,00	Link		Kühlgruppe aus - Absorber ein
	6		2	Flexschlauch 1/2"AG -1/2"AG 1000mm	€ 8,00	€ 16,00	Link		Kühlgruppe - Verdampfer
	7		1	Flexschlauch 1/2"AG -1/2"AG 500mm	€ 8,00	€ 8,00	Link		Kühlgruppe WTA-WTB
	8		2	Flexschlauch 1/2"AG -1/2"AG 4000m	€ 40,00	€ 80,00	Link		Heißwasser - Generator

		Lieferant	Stk.	Benennung	€/Stk.	Preis	Link	DB. Nr:	Anmerkung
8	1	Innoweld	1	Gehäuserohr Absorber					
	2		1	Gehäuserohr Generator	€ 359,90	€ 359,90	Link	40	Gehäuserohr mit sämtlichen Laserschnitten
	3		2	Flansch Absorber		€ -			
	4		1	Flansch Generator		€ -			
	5		1	Deckel Generator Hinten		€ -			Aus Innenteil Flansch
	6		1	Deckel Generator Vorne		€ -			
	7		1	Trennwand		€ -			
	8		2	Stütze Generator		€ -			
	9		1	Stütze Absorber		€ -			
	10		1	Deckel Absorber		€ -			
	11		1	Deckel Verdampfer		€ -			
	12		3	Auflager Kondensatorwanne Hinten		€ -			
	13		1	Löttest		€ 470,33		53	
9	1	Kälte Shop	3	Schraderventil 6mm	€ 2,63	€ 7,89	Link		Vakuumventil zum Absaugen 2xAKM , 1x Entnahmebecher
10	1	Kupferking	1	Kingflex - Selbstklebendes Tape 50x3mm, 10m	€ 10,90	€ 10,90	Link	2	Isolierung 6mm Kupferrohr
	2		2	Reduzier-Muffe 12-6 mm / 5243 a/i (VE 5 Stk)	€ 3,45	€ 6,90	Link	30	4xLösungsWT, 3x Pumpen AKM
	3		1	Reduzier-Muffe 12- 6 mm / 5240 i/i (VE 5 Stk)	€ 3,25	€ 3,25	Link	31	2x Rezkl Verdampfer
	4		1	Reduzier-T-Stück 10-6-10 mm / 5130 (VE 2 Stk)	€ 3,28	€ 3,28	Link	32	1x Kristallisatiosschutz
	5		2	CU Kappe 12 mm / 5301 (VE 5 Stk)	€ 4,65	€ 9,30	Link	64	Wärmetauscher (9Stk)
	6		9	Cu Doppelbogen 12 mm / 5060 (VE 2 Stk)	€ 1,64	€ 14,76	Link	65	Wärmetauscher (17Stk)
	7		19	Cu Reduzier-T-Stück 12-12-10 mm / 5130 (VE 2 Stk)	€ 3,28	€ 62,32	Link	66	Wärmetauscher (37Stk)
	8		1	Cu Reduzier-T-Stück 10-12-10 mm / 5130 (VE 2 Stk)	€ 2,74	€ 2,74	Link	67	Wärmetauscher (1Stk)
	9		3	CU Bogen 12 mm / 90 Grad / 5001a i/a (VE 5 Stk)	€ 2,05	€ 6,15	Link	68	Generator
	10		1	Bogen 12 mm / 90 Grad / 5002a i/i (VE 5 Stk)	€ 1,40	€ 1,40	Link	70	Wärmetauscher (2Stk)
	11		1	Vakuumpumpe VPA-1S R32 40 l/min	€ 104,90	€ 104,90	Link	82	nur falls keine Vorhanden
	12		1	Prüfarmatur WK-P3602B	€ 44,03	€ 44,03	Link	83	Zum Evakuieren und Befüllen
11	1	Lief. Werkstatt	34	Sechskantschraube mit Schaft M10x45 ISO 4014	€ 0,50	€ 17,00			Verschraubung Flansche
	2		34	Sechskantmutter M10 ISO4032 / DIN 934	€ 0,20	€ 6,80			
	3		68	Unterlegscheibe 11mm ISO7089 /DIN125A	€ 0,10	€ 6,80			
	4		8	Senkschraube DIN 7991 M6x25	€ 0,50	€ 4,00			Verschieden (teilweise in AKM -> V2A)
	5		11	Mutter M6 V2A	€ 0,50	€ 5,50			Verschieden (teilweise in AKM -> V2A)

		Lieferant	Stk.	Benennung	€/Stk.	Preis	Link	DB. Nr:	Anmerkung
	6		8	Innensechskantschraube DIN 912 V2A	€ 0,50	€ 4,00			Verschieden (teilweise in AKM -> V2A)
	7		20	Unterlegscheibe 6mm ISO7089 /DIN125A V2A	€ 0,30	€ 6,00			Verschieden (teilweise in AKM -> V2A)
	8		1	Sechskantschraube mit Gewinde bis Kopf M12x12 ISO4017 V2A	€ 0,50	€ 0,50			Dichtungsschraube Füllstutzen
	9		1	Kupferdichtung 12x18x1 DIN7603A	€ 0,50	€ 0,50			Dichtung Füllschraube
	10		5	Sechskantschraube mit Schaft M6x30 ISO4014 V2A	€ 0,50	€ 2,50			Befestigung Kondensatbecken, Absorberwanne, Entnahmestation
	11		4	Befestigung Pumpe Winkel Blech 30x80x2mm	€ 0,50	€ 2,00			Befestigungswinkel Pumpe
	12		2	Gummidichtung 6x14x3mm	€ 0,50	€ 1,00			Dichtung Kondensatabfluss
	13		1	V2A Rohr 6x1mm x 2000mm	€ 10,00	€ 10,00			Diverse Anschlussrohre
	14		2	Flügelmutter M6 DIN315 -M6-GT-B	€ 0,10	€ 0,20			Verschluss Entnahmestation
	15		1	O-Ring DIN 37-75x3,55-S-NBR	€ 0,10	€ 0,10			Dichtung Entnahmestation
12	1	Mair-Z		Winkel Tropfenabscheider (2x101,5 1x85,1)	€ -	€ -			2717mm reine Länge
	2		1	Aufgabewanne Absorber	€ -	€ -			Nachbearbeitung lt. Zeichnung
13	1	Petzold	0,1	WT-Lochbleche CU-Blech 0,6mm Halbhart [m^2]	€ 81,04	€ 9,72	Link		Rohmaße laut Zeichnung
14	1	Pumpendiscounter.de	5	Grundfos UPS 15-14 B BM Zirkulationspumpe / Trinkwasserpumpe	€ 99,90	€ 499,50	Link	7	1xLösung, 1xVerdampfer,2xKühlgruppe, 1xHeizwasser
15	1	pumpen-heizung.de	5	Mikrotherm von IMI Heimeier Ausf: Durchgang G1/2 Art.Nr: 0122.02.500	€ 18,19	€ 90,95	Link	8	4xKühlgruppe 1x Heißwasser
16	1	Sensorshop24	2	DRUCKTRANSMITTER – DT1 mit G1/4'' Ausführung 13: -1-3bar	€ 79,99	€ 159,98	Link	3	Druckmessung Abs/Gen
	2		8	EINSCHRAUBFÜHLER 50MM MIT G1/2" GEWINDE BIS 105°C	€ 13,50	€ 108,00	Link	4	Temperaturmessung Ext Wasserkreisläufe
	8		5	KABELFÜHLER 6 X 50MM, BIS 105°C PT100A 2m 3-Leiter	€ 10,70	€ 53,50	Link	23	Tempfühler AKM
17	1	shop.aluprofile.com	12	Item Profil 6 30x30 schwer 6m Stange	€ 8,97	€ 107,64	Link		Rahmen 10,94 reine Länge
	2		13	Item Profil 6 30x30 schwer 6m Stange Preis/Meter	€ 8,97	€ 116,61	Link		Profile für Heißwasserschutz
	3		56	Item Automatik-Verbindungssatz 6, verzinkt	€ 2,00	€ 112,00	Link		Verbindung Rahmenteile
	4		4	Item Lasche 6 30 schwarz	€ 1,18	€ 4,72	Link		Befestigung Absorber

		Lieferant	Stk.	Benennung	€/Stk.	Preis	Link	DB. Nr:	Anmerkung
	5		12	Item Befestigungssatz 6 für Winkel 6 und Lasche 6 schwarz	€ 0,64	€ 7,68	Link		Befestigung Abs, Gen, Pumpenwinkel
	6		4	Item Winkel 6 30 schwarz	€ 2,34	€ 9,36	Link		Befestigung Generator
18	1	Swagelok	1	Feindosierventil für mittleren Durchfluss, Cv 0,04, MS,6mm, Mikrometerkopf	€ 214,56	€ 214,56	Link	17	1x Verdampfer Drossel
	2		5	Regulier-und Absperrnadelventil, Edelstahl, 6mm, Cv 0,37, Regulierspindel	€ 106,20	€ 531,00	Link	18	1x Rekrist.Einrichtung, 1x Pumpenregelung, 1xAbs. Drossel 2x Entnahme
	3		5	Gerade Einschraubverschr., Edelstahl, 6 mm - 1/4 Zoll NPT-AG durchgebohrt	€ 11,04	€ 55,20	Link	19	5x Durchführung Thermoelement
	4		2	Gerade Verschraubung Edelstahl, 6mm Rohverschraubung	€ 17,28	€ 34,56	Link	20	2xRezykl. Verdampfer
	5		5	L-Aufschraubverschr., Edelstahl, 6 mm - 1/4 Zoll NPT-IG	€ 50,88	€ 254,40	Link	22	5x Mess L-Stück Thermoelement
	6		4	Gerade Einschraubverschr., Edelstahl, 6 mm - 1/8 Zoll ISO-AG zylindrisch,	€ 14,64	€ 58,56	Link	23	4x für Flowmeter
19	1	Wagnerinox	9	Stirnschauglas DN65 V2A	€ 49,56	€ 446,04	Link	38	Schaugläser Verdampfer Absorber
	2		1	Stirnschauglas DN40 V2A	€ 31,08	€ 31,08	Link		Schauglas Generator Hinten
	3		1	Flachdichtung für Flanschverbindungen aus EPDM mit Stahleinlage DN200 PN6	€ 10,21	€ 10,21	Link	54	Dichtung für Generator
	4		2	Flachdichtung für Flanschverbindungen aus EPDM mit Stahleinlage DN250 PN6	€ 11,72	€ 23,45	Link		Dichtung für Verdampfer und Absorber
20	1	Wiltec	3	Edelstahl Wärmetauscher B3-12-10 10 Platten Plattenwärmetauscher max. 22 kW	€ 29,58	€ 88,74	Link	6	1x Lösungswärmetauscher + 2x Kühlgruppe
21	1	Vaillant	1	VEH 80/7 exclusive	€ 837,60	€ 837,60	Link	84	Boiler für Heißwasser
					Summe:	€ 6.632,54			

Literatur

[1] BGBl. II Nr. 429/2011 Anhang I.

[2] Fragen aus der Praxis - Gasbalast an Vakuumpumpen. Die Kälte + Klimatechnik(11-2008):30–31.

[3] https://www.vaillant.at/privatanwender/produkte/elostor-exclusive-12224.de_at.html (eingesehen am 20.01.2016).

[4] http://www.btflowmeter.com (eingesehen am 25.01.17).

[5] http://www.fchart.com/ees/ (Eingesehen am: 08.01.2017).

[6] http://www.item24.at (eingesehen am 24.01.2017).

[7] http://www.kaeltetechnik-shop.at/Schraderventil-6mm (eingesehen am 27.01.2017).

[8] http://www.wagnerinox.at/Stirnschauglas-DN65-V2a#&gid=1&pid=1 (eingesehen am 25.01.2017).

[9] http://www.wiltec.de/haustechnik-garten-warmetauscher-halterungen/edelstahl-plattenwaermetauscher-gelotet-kupfer/10-platten-warmetauscher-edelstahl-hrale.html (eingesehen am 25.01.2017).

[10] www.grundfos.com (eingesehen am 24.01.2017).

[11] www.sensorshop24.de (eingesehen am 25.01.2017).

[12] www.swagelok.com (eingesehen am 25.01.2017).

[13] R. a. A.-C. E. American Society of Heating. *ASHRAE handbook: fundamentals*. ASHRA, Atlanta, GA., 1989. OCLC: 19862835.

[14] H. D. Baehr and S. Kabelac. Thermodynamik des Heizens und Kühlens. In *Thermodynamik*, pages 569–608. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.

[15] A. Beutler. *Stoff- und Wärmeübergang bei der Rieselfilmabsorption am horizontalen Rohr*. Dissertation, Technische Universität München, München, 1997.

[16] B. Brandt. Korrosionsverhalten ausgewählter Werkstoffe in Lithiumbromid-Lösung für den Anwendungsfall Absorptionskältemaschinen. *Materials and Corrosion*, 55(7):536–542, July 2004.

[17] G. Cerbe and G. Wilhelms. *Technische Thermodynamik: theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen ; mit 40 Tafeln, 130 Beispielen, 137 Aufgaben und 181 Kontrollfragen*. Hanser, München, 16., aktualisierte aufl edition, 2011. OCLC: 846154356.

[18] F. Cosenza and G. Vliet. Absorption in falling water/LiBr films on horizontal tubes. *ASHRAE Trans*, 96(1):693–701, 1990.

[19] R. DiGuilio, R. Lee, S. Jeter, and A. Teja. Properties of Lithium Bromide-Water Solutions at High Temperatures and Concentrations - II Density and Viscosity. *ASHRAE Transactions*, 96(1):702–708, 1990.

[20] DIN EN 10088-3:2014-2. *Nichtrostende Stähle - Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung.*

[21] DIN EN 13445-3: 2016-12. *Unbefeuerte Druckbehälter - Teil 3: Konstruktion.*

[22] E. Estiot. *Behältersieden von wässriger Lithiumbromidlösung.* Dissertation, Technische Universität München, München, 2009.

[23] K. E. Herold, R. Radermacher, and S. A. Klein. *Absorption chillers and heat pumps.* CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, second edition edition, 2016.

[24] O. Ibrahim and S. Klein. Thermodynamic Properties of Ammonia-Water Mixtures. *ASHRAE Transactions*, 99(2):1495–1502, 1993.

[25] B. P. Kremer and H. Bannwarth. *Einführung in die Laborpraxis.* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014.

[26] R. Lee, R. DiGuilio, S. Jeter, and A. Teja. Properties of Lithium Bromide-Water Solutions at High Temperatures and Concentrations - I Thermal Conductivity. *ASHRAE Transactions*, 96(1):709–714, 1990.

[27] J. Pátek and J. Klomfar. A computationally effective formulation of the thermodynamic properties of LiBr–H2o solutions from 273 to 500k over full composition range. *International Journal of Refrigeration*, 29(4):566–578, June 2006.

[28] J. Rodríguez-Muñoz and J. Belman-Flores. Review of diffusion–absorption refrigeration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30:145–153, 2014.

[29] M. Ronald, J. Harms, S. Kujak, L. Nguyen, and T. Travers. Vapor/liquid separator for an absorption chiller, June 2003. US Patent 6,572,689.

[30] VDI e. V., editor. *VDI-Wärmeatlas.* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-19981-3.

[31] W.Bälz & Sohn GmbH & Co. *Technische Beschreibung Hummel.* http://www.baelz.de/dwnld.php?=SID&pdflink=Kaelte/TechnischeBeschreibung-_Hummel.pdf&titel=Technische%20Beschreibung%20Hummel (heruntergeladen am 13.7.16).

[32] A. Wohlfeil. *Wärme- und Stoffübertragung bei der Absorption an Rieselfilmen in Absorptionskälteanlagen.* Number 78 in Forschungsberichte des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins. Dt. Kälte- und Klimatechn. Verein, Hannover, 2009. OCLC: 552082504.

[33] Z. Yuan and K. Herold. Thermodynamic Properties of Aqueous Lithium Bromide Using a Multiproperty Free Energy Correlation. *HVAC&R Research*, 11(3):377–393, July 2005.

[34] Z. Yuan and K. E. Herold. Specific Heat Measurements on Aqueous Lithium Bromide. *HVAC&R Research*, 11(3):361–375, July 2005.