



Eberhard-Leibnitz-Str.2
06217 Merseburg
Fachbereich Ingenieur- und
Naturwissenschaften

Zur Erlangung des Grades
eines
Master of Engineering (M.Eng.)
von Herrn Oliver Barthol

vorgelegte Masterarbeit

Thema: Konstruktiver Entwurf einer Räuchertrommel

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Wolf-Dietrich Knoll

Hochschule Merseburg

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Joachim May

Hochschule Merseburg

Drittprüfer: Dipl.-Ing.(FH) Karsten Scheibe

STAMAG GmbH Landsberg

Merseburg, den 30.11.2017

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Betreuern, Herrn Prof. Dr.-Ing. Knoll, Herrn May und Herrn Scheibe für die Ermöglichung der Masterarbeit und für Ihre hilfreichen Anregungen während der Bearbeitung des Themas.

Meinen Arbeitskollegen und Vorgesetzten danke ich ganz besonders für die Unterstützung und das Verständnis, gerade im letzten Abschnitt während der Bearbeitung meiner Masterarbeit.

Merseburg, den 30.11.2017

Sperrvermerk

Die vorliegende Arbeit beinhaltet interne vertrauliche Informationen der Firma STAMAG - Ersatzteil- und Industrievertrieb GmbH. Die Weitergabe des Inhalts der Arbeit im Gesamten oder in Teilen sowie das Anfertigen von Kopien oder Abschriften – auch in digitaler Form - sind ab dem Abgabedatum der Arbeit untersagt. Ausnahmen bedürfen der schriftlichen Genehmigung der Firma STAMAG - Ersatzteil- und Industrievertrieb GmbH.

Die Einsichtnahme ist nur dem Verfasser und den Betreuern erlaubt.

Merseburg, den 30.11.2017

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Zuhilfenahme unzulässiger Hilfsmittel angefertigt zu haben. Wörtliche oder dem Sinne nach übernommene Ausführungen sind gekennzeichnet, sodass Missverständnisse über die geistige Urheberschaft ausgeschlossen sind. Diese Arbeit war bisher noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung in gleicher oder ähnlicher Fassung.

Merseburg, den _____ Unterschrift: _____

Inhalt

1.	Einleitung.....	7
1.1.	Motivation	7
1.2.	Aufgabenstellung.....	8
2.	Nahrungsmittelveredelung in Form des Räucherns.....	9
2.1.	Traditionelles Räuchern	9
2.1.1.	Räuchersubstanzen und Rauchbestandteile.....	9
2.1.2.	Gesetzliche Grenzwerte.....	14
2.1.3.	Räucherarten.....	15
2.1.4.	Technische Verfahren.....	17
2.2.	Räuchern bei "Die Räucherwelt".....	19
2.2.1.	Aktuelles Verfahren	19
2.2.2.	Zukunft des Räucherns	21
3.	Projekt Räucherapparat.....	22
3.1.	Lastenheft.....	22
3.1.1.	Ist-Stand.....	23
3.1.2.	Festlegung und Optimierung der Rahmenbedingungen	24
3.1.3.	Anforderungsprofil.....	25
3.1.4.	Grundkonstruktion.....	26
3.1.5.	Messtechnik und Wartungsfreundlichkeit.....	28
3.2.	Konzepte für den Räucherapparat	30
3.2.1.	Konzept Wanne	30
3.2.2.	Konzept Rührapparat.....	31
3.2.3.	Konzept Trommel.....	34
3.3.	Gegenüberstellung der Konzepte	38
4.	Auslegungsberechnungen.....	41
4.1.	Behälterauslegung nach AD-Merkblättern der B-Serie.....	41
4.2.	Zusätzliche Komponenten für den Behälter	48
4.3.	Auslegung der Antriebskomponenten	58
4.4.	Auslegung der Tragenden Elemente	80
5.	Wirtschaftliche Betrachtung	89
6.	Weiteres Vorgehen	91
	Literaturverzeichnis.....	92

1. Einleitung

Schon vor Jahrhunderten entdeckten die Menschen die geschmackliche und konservierende Wirkung, welche der Rauch auf Lebensmittel besitzt. Hierbei wurden besonders schnell verderbliche Güter wie Fleisch und Fisch geräuchert, um sie auch in ferne Länder transportieren zu können oder bei Versorgungsengpässen dennoch zur Verfügung zu haben.

Heutzutage räuchert man die Lebensmittel hauptsächlich für den einzigartigen Geschmack, weil die Konservierung durch chemische Zusätze übernommen wurde. Dadurch geriet das traditionelle Räuchern über Buchenholz immer mehr in Vergessenheit. Vor fünf Jahren war dann jedoch die Geburtsstunde des Grundgedankens der Firma "Die Räucherwelt". Dieses Start Up Unternehmen entwickelte über mehrere Jahre die Geschäftsidee, den einzigartigen Geschmack von geräucherten Produkten für jedes Rezept und Gericht verfügbar zu machen und dies ganz ohne chemische Zusätze. Hierfür werden nämlich Salze, Zucker, Gewürze und Öle, welche als Geschmacksträger genutzt werden, traditionell über Buchenholz geräuchert.

1.1. Motivation

Die steigende Nachfrage nach geräucherten Produkten stellt die Firma "Die Räucherwelt" nun vor ungeahnte Herausforderungen. Dieser Trend ist durch das steigende Bewusstsein für gesunde Ernährung zu begründen, denn schonend geräucherte Lebensmittel bekommen ihren besonderen Geschmack, nicht wie andere Produkte, durch den Zusatz von Glutamaten, Geschmacksverstärkern, Farbstoffen oder künstliche Aromen, sondern durch die schadstoffarme Anlagerung von natürlichen Raucharomen. Mit Ihrer derzeitigen aufwendigen Methode der schonenden Räucherung, stoßen Sie nun nicht nur an Ihre körperlichen und personellen Kapazitäten, sondern auch an die produktionstechnischen Grenzen. Um weiterhin die Nachfrage abdecken zu können, ist eine neue Methode zu entwickeln, welche jedoch die Qualität der Produkte nicht verringern darf, damit die hohen Qualitätsanforderungen der Kunden weiterhin erfüllt werden können.

Hierfür ist es notwendig, einen Weg zu finden, um den traditionellen Beräucherungsprozess in eine technische Produktion zu überführen. Um dieses Ziel zu erreichen hat die Firma „Die Räucherwelt“ die STAMAG als Dienstleister beauftragt eine Planungsunterlage zu erarbeiten. Zu diesem Zweck sind in erster Linie die Randbedingungen und die Einflussfaktoren für den Prozess zu definieren. In Zusammenarbeit mit der Firma "Die Räucherwelt" ist ein Lastenheft zu erstellen, welches die benötigten Anforderungen und Wünsche an die technische Gestaltung zusammenfasst. Anschließend sind unter Berücksichtigung des erstellten Lastenheftes verschiedene Lösungskonzepte anzufertigen, welche technisch und wirtschaftlich bewertet werden müssen. Hieraus ist das optimale Konzept auszuwählen, welches es im nächsten Schritt zu berechnen und zu konstruieren gilt.

Das Ergebnis dieser Auslegungsrechnung und der dazugehörige konstruktive Entwurf stellen die Grundlage für den späteren Bau eines Prototyps dar.

1.2. Aufgabenstellung

2. Nahrungsmittelveredelung in Form des Räucherns

2.1. Traditionelles Räuchern

Die Geschichte des Räucherns geht in vielen Kulturen und Mythologien einher mit der Entdeckung des Feuers. So wird es überliefert, dass die Menschen neben der wärmenden Wirkung des Feuers auch die dabei entstehende Rauchentwicklung verschieden nutzten. Das Feuer wurde in erster Linie zum Zubereiten von Speisen, als Lichtquelle und zum Schutz vor wilden Tieren verwendet. Es ist anzunehmen, dass die Kunst des Räucherns zufällig entdeckt wurde, indem die Menschen Kräuter, Blätter und Hölzer ins Feuer warfen. Man erkannte, dass durch unterschiedliche Kräuter unterschiedliche Gerüche und Wirkungen erzielt werden können. Ebenfalls führt man die Entdeckung der konservierenden Wirkung von Rauch auf einen Zufall zurück. Felle und Fleischwaren faulten plötzlich nicht so schnell und blieben länger genießbar, wenn sie im Weg des abziehenden Rauches aufgehängt wurden. Somit konnte man auch im Winter auf frisch gehaltenes Fleisch als Nahrung zurückgreifen.

2.1.1. Räuchersubstanzen und Rauchbestandteile

Man erkannte bereits früh, dass man durch die Verbrennung von unterschiedlichen Hölzern ebenfalls andere Geschmacksaromen und Wirkungen erzielen konnte, sodass sich dementsprechend verschiedene Holzarten und Substanzen zum Räuchern herauskristallisierten. Die dabei enthaltenen Inhaltsstoffe beeinflussen den Räucherungsprozess, so können Obstbäume zum Beispiel eine fruchtige und süße Note bewirken, wobei Nadelhölzer ein sehr intensives und strenges Raucharoma hervorrufen. Je nach Geschmack und Wunsch werden die verschiedenen Holzarten für andere Nahrungsmittel verwendet. Eine kurze Auswahl ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Holzarten und deren Anwendungen [1]

<u>Holzart</u>	<u>Rauchgeschmack</u>	<u>Anwendungsbeispiele</u>
Ahorn	rauchig-milde, süßliche Note	Schwein, Geflügel, Forelle, Käse, Gemüse
Apfelbaum	mild fruchtig-herb	Schwein, Geflügel, Fisch, Käse, Gemüse
Buche	ausgewogen rauchig	alle Fleischsorten, Fisch, Rauchbier, Gemüse
Fichte	intensiv, streng	Schwarzwälder Schinken, Muscheln

Doch das Räuchern kann auch ganz anders genutzt werden. Neben der Verlängerung der Haltbarkeit von Lebensmitteln erkannte man auch die heilende Wirkung auf Körper & Geist und die Nutzung der entstehenden Duftnoten. Man verwendete verschiedene Kräuter und Rinden für die unterschiedlichsten Anwendungen. In früheren Kulturen räucherte man bei Opferzeremonien oder Ritualen zu Ehren der Götter und sendete ihnen damit wohltuende und gut riechende Düfte. In anderen Ländern suchte man mit Hilfe des Räucherns nach Heilung und wollte so im Einklang mit der Natur sein. [2]

Unter Räuchern versteht man die kurze oder langfristige Einwirkung von Rauch auf verschiedene Lebensmittel. Hierbei werden verschiedene Holzarten und Kräuter unvollständig verbrannt (Pyrolyse), um jeweils andere Aromen in den Nahrungsmitteln zu erhalten.

Was für Stoffe im Rauch durch das unvollständige Verbrennen enthalten sind, ist noch nicht vollständig geklärt. Chemiker vermuten, dass sich im Räucherrauch bis zu 10.000 verschiedene Stoffe befinden können, wobei bisher nur 1.000 Substanzen identifiziert wurden. [3]

Räucherrauch setzt sich aus verschiedenen festen, flüssigen und gasförmigen Komponenten zusammen, welche zu den verschiedensten organischen Stoffgruppen gehören. Man entdeckte bereits unterschiedliche *Paraffin-Kohlenwasserstoffe*, *Alkohole*, *Carbonyle*, *Säuren*, *Ester*, *Benzole*, *Phenole*, *aromatische Ringsysteme*, *Harze*, *Ruße* und *Asche*. Die Rauchzusammensetzung und somit auch die Rauchqualität hängt von mehreren Faktoren des Prozesses ab und variiert dadurch auch sehr stark. So besitzt die Holzart und -menge einen großen Einfluss, dementsprechend auch die Luftzufuhr, die Verschwelltemperatur und die resultierende Rauchttemperatur und -feuchtigkeit. Wie der Rauch im Verfahren strömungstechnisch geführt wird, spielt zusätzlich eine Rolle. [3]

Die Stoffgruppen wirken sich unterschiedlich auf die zu räuchernden Nahrungsmittel aus. Zunächst verändern beispielsweise die Phenole, Carbonyle und Lactone sowohl den Geschmack als auch den Geruch des Nahrungsmittels. Wobei die Carbonyle ebenfalls die Farbe beeinflussen. Die beiden wichtigsten Komponenten, welche den rauchigen Geschmack bewirken, heißen Guajakol und Syringol. Deren chemische Entstehung bei der Pyrolyse ist durch die folgenden Reaktionsschritte dargestellt. Beide Stoffe gehen aus dem Holzbestandteil Lignin hervor und sind in der Abbildung 1 dargestellt. [4]

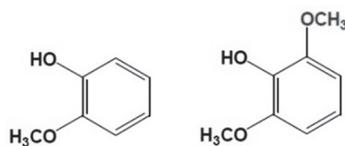


Abbildung 1: Guajakol und Syringol [4]

"Lignine bilden eine Gruppe von phenolischen Makromolekülen, die sich aus verschiedenen Monomerbausteinen zusammensetzen. Es handelt sich um feste Biopolymere, die in die pflanzliche Zellwand eingelagert werden und dadurch die Verholzung der Zelle bewirken." [5]

Zwei Monomerbausteine des Lignins, aus welchen dann Guajakol und Syringol entstehen können, sind Sinapin- und Ferulasäure. Diese beiden unterscheiden sich generell nur durch die zusätzliche OCH₃-Gruppe. Sinapinsäure ist in Abbildung 2 dargestellt.

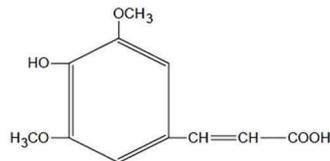
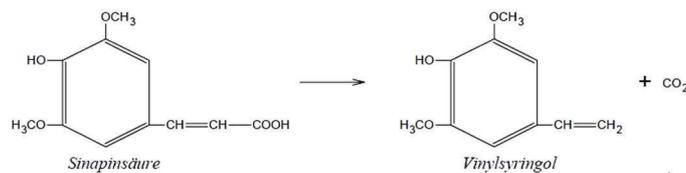


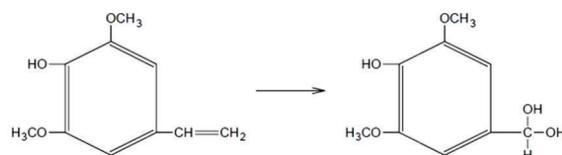
Abbildung 2: Sinapinsäure [6]

Während der Pyrolyse wird Schrittweise die (CH)₂COOH- Gruppe abgebaut. Dies wird durch die Abspaltung von CO₂, der mehrfachen Oxidierung und Kondensierung realisiert. Schematisch werden die Schritte in den folgenden Abbildungen dargestellt. [6]

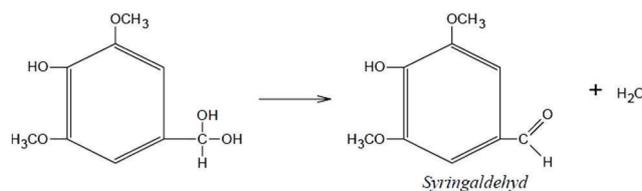
Zu erst wird CO₂ abgespalten wodurch aus den Sinapinsäure das Vinylsyringol erstellt wird.



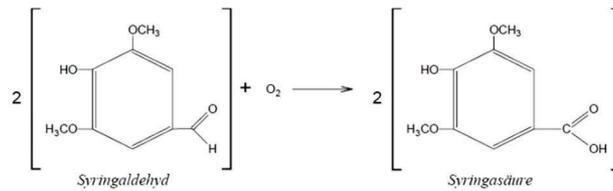
Das Vinylsyringol wird im nächsten Schritt oxidiert mit zwei O₂, durch welches wieder CO₂ abgeschieden wird und das noch übrige Kohlenstoffatom die zwei Wasserstoffatome in zwei Alkoholgruppen aufnimmt.



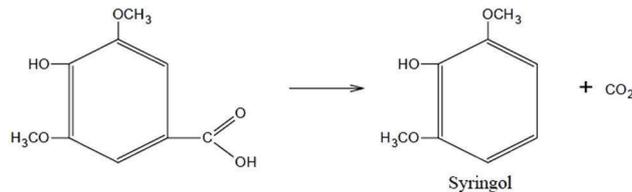
Im nächsten Schritt wird nun Wasser (H₂O) auskondensiert, wodurch aus den zwei Alkoholgruppen eine Aldehydgruppe entsteht, welches dann das Syringaldehyd darstellt. [6]



Eine erneute Oxidation des Aldehyds mit 0,5 O₂ bringt nun eine Säuregruppe hervor, welche wieder eine CO₂-Gruppe enthält.



Ein weiteres Mal CO₂ abtrennen bewirkt die Bildung des Syringols, welches im Räucherrauch ebenfalls nach diesen Reaktionsschritten gebildet wird. [6]



Analog dazu wird das in Abbildung 1 dargestellte Guajakol gebildet. Mit der wesentlichste Effekt des Räucherns ist der konservierende, sowohl mikrobieller, als auch antioxidativer Art. Die Entfernung von Mikroorganismen wird vor allem durch Aldehyde, Säuren und Phenole bewirkt, wobei die letztere Stoffgruppe auch antioxidativ wirkt. Kombinationen dieser Stoffgruppe mit Säuren und Aldehyden verhindern ebenfalls eine Oxidation von Nahrungsbestandteilen. In Tabelle 2 ist dies nochmal kurz zusammengefasst.

Tabelle 2: Wirkung des Räucherrauches [7]

Wirkung	Stoffgruppe
Konservierung - mikrobielle	Aldehyde, Säuren, Phenole
Konservierung - antioxidative	Phenole, Phenolaldehyde, Phenolsäuren
Raucharoma (Geschmack, Geruch)	Phenole, Carbonyle, Lactone
Räucherfarbe	Carbonyle, Phenolaldehyde
Textur	Aldehyde, Phenole, Säuren

Es fällt sofort auf, dass viele dieser Stoffgruppen schädlich, giftig, krebserregend oder anderen Eigenschaften zuzuordnen sind. Aber durch sehr strenge gesetzliche Auflagen ist der Verzehr von geräucherten Nahrungsmitteln unbedenklich. Die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte dürfen nicht überschritten und müssen deshalb regelmäßig kontrolliert werden. In so geringen Anteilen kann der Körper die Stoffe abbauen, umwandeln und ausscheiden.

Die Pyrolyse des Holzes läuft in vier verschiedenen Schritten ab, welche bei unterschiedlichen Temperaturstufen stattfinden. In der folgenden Tabelle 3 sind die einzelnen Schritte und deren dazugehörige Temperatur mit aufgelistet. Die einzelnen Pyrolyseschritte stellen dabei die Umwandlung der Hauptbestandteile von Holz dar. Deren Anteile sind ebenfalls in der Tabelle enthalten.

Tabelle 3: Pyrolyseschritte [6]

<u>Pyrolyseschritt</u>	<u>prozentualer Anteil</u>	<u>Temperaturniveau</u>
Trocknung des Holzes	100 %	<170°C
Pyrolyse von Hemicellulose	15 - 35 %	<260°C
Pyrolyse von Cellulose	40 - 55 %	<310°C
Pyrolyse von Lignin	28 - 41 %	<500°C

Die chemische Veränderung durch die Pyrolyse von beispielsweise Lignin zu Phenol ist schematisch im Folgenden dargestellt. Phenol ist neben den polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) mit die wichtigste Verbindungsklasse im Räucherrauch. Diese hat einen signifikanten Einfluss auf die Farbe und den Geschmack des Räucherguts. Phenol entsteht hier hauptsächlich aus Syringol und Guajakol. Beide sind ebenfalls wichtige Bestandteile des Rauches, deren Konzentrationen hängen jedoch von der Holzart (Laub- oder Nadelholz) ab.

2.1.2. Gesetzliche Grenzwerte

Die einzuhaltenden Grenzwerte für "Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe" PAK wurden durch die Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 der Kommission vom 19. Dezember 2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln erstmals definiert und mit der Verordnung (EU) Nr. 835/2011 der Kommission vom 19. August 2011 geändert. Mit dieser Verordnung wurden einige Grenzwerte herabgesetzt, d.h. die Anforderungen wurden erhöht. Mit der Verordnung (EU) 2015/1933 der Kommission vom 27. Oktober 2015 wurden weitere Lebensmittel in den Geltungsbereich aufgenommen und Grenzwerte festgelegt.

Diese PAK-Grenzwerte sind besonders wichtig für die Produktion der Firma "Die Räucherwelt". Denn besonders beim Räuchern entstehen die PAK, wobei die Anreicherung in den Produkten nicht erwünscht ist. In der Tabelle 4 sind die Grenzwerte, welche "Die Räucherwelt" betreffen könnten aufgelistet. Dies ist ein direkter Auszug aus der Verordnung.

Tabelle 4: Ausschnitt der Verordnung (EU) Nr. 835/2011

<u>Erzeugnis</u>		<u>Höchstgehalt (µg/kg)</u>	
		Benzo(a)pyren	Summe von Benzo(a)pyren, Benz(a)anthracen, Benzo(b)fluoranthren und Chrysen
...
6.1.4	geräuchertes Fleisch und geräucherte Fleischerzeugnisse	2,0	12
6.1.5	Muskelfleisch von geräucherten Fischen und geräucherten Fischereierzeugnissen(...)	2,0	12
6.1.6	geräucherte Sprotten und geräucherte Sprotten in Konservendosen(...)	5,0	30
6.1.7	Muscheln (geräuchert)	6,0	35
...
6.1.14	getrocknete Kräuter	10,0	50,0
6.1.15	getrocknete Gewürze, mit Ausnahme von Kardamom und geräucherter Capsicum spp.	10,0	50,0

Mit der Verordnung (EU) 2015/1933 der Kommission vom 27. Oktober 2015 sind auch nicht fetthaltige Lebensmittel enthalten. Da das Räuchern auch eine Form der Trocknung darstellt, sind auch die Produkte, wie Pfeffer und Paprika, der Firma "Die Räucherwelt" mit enthalten. In der Verordnung ist es auffällig, dass die Grenzwerte für die getrockneten Kräuter und Gewürze deutlich höher sind, als für die geräucherten Fleisch- und Fischerzeugnisse. Das liegt daran, dass man deutlich geringere Menge an Gewürzen zu sich nimmt als die eben erwähnten Nahrungsmittel. Dadurch führt man dementsprechend auch weniger PAK dem Organismus zu.

2.1.3. Räucherarten

Man unterscheidet zwischen drei verschiedenen Räucherungsverfahren, welche sich im Allgemeinen vor allem erstmal in der vorherrschenden Temperatur des Räucherns unterscheiden. Daraus resultieren dann noch zusätzliche Abweichungen von Prozessgrößen der Verfahren. **So beeinflusst die Temperatur die Luftfeuchtigkeit des Rauches und je höher die Temperatur ist, desto höher ist auch die Anhaftungsrate der Stoffe an dem Räuchergut.** Dadurch sinkt dementsprechend die Behandlungsdauer deutlich. Die Verlängerung der Haltbarkeit ist aber an die Räucherzeit gebunden und verkürzt sich schlussendlich somit auch. Es muss jedoch unterschieden werden, zwischen der Rauchtemperatur in der Nutzung und der Bildung, da die Pyrolyse selbst, wie beschrieben, bei höheren Temperaturniveaus abläuft. Daraus lässt sich ableiten, dass nach der Rauchbildung noch verschiedene Vorgänge (Abkühlung, Kondensation, Filtration) ablaufen können.

Die drei Räuchervarianten nennt man dementsprechend 1. Kalt-, 2. Warm- und 3. Heißräuchern. Einen kurzen Überblick über die Merkmale der Verfahren soll die folgende Tabelle 5 liefern.

Tabelle 5: Räucherarten

<u>Randbedingung</u>	<u>Kalträuchern</u>	<u>Warmräuchern</u>	<u>Heißräuchern</u>
Temperatur	< 15 - 25°C	25 - 50°C	50 - 90°C
relative Luftfeuchte	<90%	50 - 85%	35 - 100%
Räucherzeit	bis zu mehreren Wochen	mehrere Stunden	5 bis 180 min
Haltbarkeit	bis zu 1 Jahr	mittlere Haltbarkeit	wenige Tage

Je nach Bedarf werden die unterschiedlichen Methoden angewandt. Wobei auch darauf geachtet werden muss, ob das Produkt die Verfahren aushält. Das Kalträuchern gilt sowohl physikalisch als auch chemisch als die schonendste Methode. Die Temperaturspanne wird für das Kalträuchern bis 15°C bei einigen Quellen beschrieben [8], andere wiederum beschreiben den Vorgang erst ab 15°C. Das Produkt ist weder großen Temperaturen ausgesetzt, noch lagern sich Schadstoffe schnell ab. **Die PAK-Moleküle besitzen bei niedrigeren Temperatur eine tendenziell kleinere Anlagerungstendenz als andere Raucharomen, selbst bei längerer Behandlungsdauer. Dadurch ist es möglich die geforderten Grenzwerte für den PAK-Wert einzuhalten.**

Für die weitere Prozessgestaltung soll das Kalträuchern Anwendung finden.

2.1.4. Technische Verfahren

Für die Realisierung einer technischen Räucherung existieren bereits verschiedene Verfahren, welche sich bereits bei der Rauchgaserzeugung unterscheiden. Je nach Verfahren, Räuchergut und Größenordnung verwendet man die einzelnen Verfahren.

Zum einen kann man die Rauchgaserzeugung ebenfalls in dem Räucherraum nutzen oder aber auch extern aufstellen. Den extern erzeugten Rauch müsste man dann über ein Verbindungsrohr oder ähnliches in den Raum leiten. Auf dem Weg kühlt sich der Rauch weiter ab, was besonders für das Kalträucherungsverfahren von Vorteil sein kann. Hiermit lässt sich eine zusätzliche Kühlungsleistung verringern. Wenn der Rauch warm oder heiß benötigt wird, empfiehlt es sich, die Rauchgaserzeugung in dem Räucherraum zu gestalten. Natürlich hängt dies noch von anderen Faktoren ab. In den Abbildung 3 und Abbildung 4 sind diese beiden Möglichkeiten schematisch dargestellt.

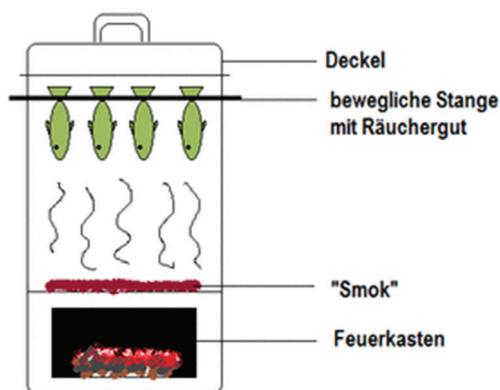


Abbildung 3: Interne Rauchgaserzeugung [9]

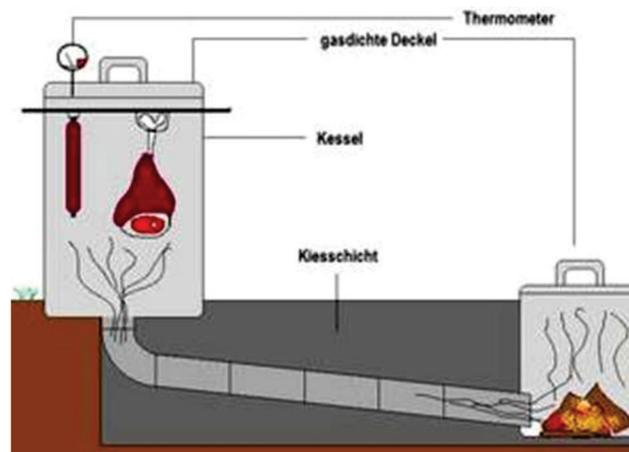


Abbildung 4: Externe Rauchgaserzeugung [9]

Je nach Verfahren ist es ebenfalls aus sicherheitstechnischen Gründen besser, die Rauchgaserzeugung extern zu gestalten, da man so mit den gefährlichen und schädlichen Gasen nicht in Verbindung kommt. Das Kalträuchern dauert um einiges länger als das Warm- und Heißräuchern, somit muss immer wieder Räuchersubstanz (Holz) nachgelegt werden. Wenn man dafür in den Raum muss, wird der Prozess gestört und man selber steht auch im direkten Rauch. Die Räucherungszeit beim Heißräuchern ist verhältnismäßig kurz, dadurch ist das Nachlegen von Holz möglicher Weise nicht nötig, wodurch man, um Platz und Kapazitäten zu sparen, die Rauchgaserzeugung in dem Räucherraum verwirklichen kann. Welche der Räucherarten genutzt wird, hängt von den Kundenwünschen und Produkthanforderungen ab.

Als mögliche Gestaltungsvarianten des Räucherraumes zählen eine Räucherammer, ein Räucherofen (-tonne) oder ein Smoker. Hauptunterscheidungsmerkmal ist die Größe der einzelnen Varianten, welche vor allem geschichtlich gewachsen ist, wobei es noch weitere Abweichungen voneinander gibt.

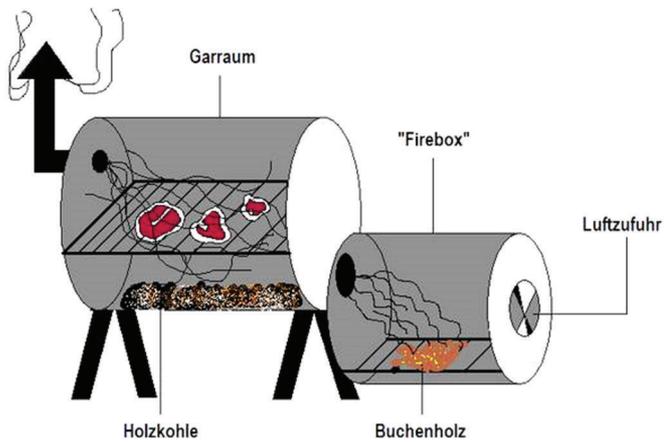


Abbildung 5: schematische Darstellung Smoker [9]



Abbildung 6: Beispiel eines Räucherofens [10]

Der Smoker (siehe Abbildung 5) ist eine spezielle Bauart und verbindet den Grill (linke Kammer) mit einem Räucherofen (rechte Kammer). Hierbei werden die entstehenden Rauchgase nach der Entstehung direkt in den nächsten Raum geleitet, wo über Holzkohle gegart wird. Dies kann auch beides unabhängig voneinander betrieben werden.

Dies ist generell nur in kleinen Varianten verfügbar und ist für Barbecue optimal geeignet. Jedoch bedient es durch die Kombination beider Methoden nur eine sehr kleine Produktschiene. Für gewöhnlich sind Gar- und Räucherungszeit auch unterschiedlich, was eine Herausforderung für das Handling darstellt.

In Abbildung 6 wiederum ist ein Beispiel eines Räucherofens abgebildet, an welchem man das System des Ofens gut erkennen kann. Unten ist eine Heiz- bzw. eine Zündquelle erkennbar, welche die Holzspäne zum Glimmen bringen soll. Diese erzeugen durch die ablaufende Pyrolyse die Rauchgase, welche dann aufsteigen und den gesamten Raum darüber einnehmen. Entstehendes Kondenswasser wird in einem Blech darüber aufgefangen, wodurch verhindert wird, dass es in die glimmende Glut tropft und wieder verdampfen würde. Das zu räuchernde Objekt kann in dem oberen Raum reingehängt oder gelegt werden. Der Rauch verlässt den Ofen über eine Öffnung an der Decke.

2.2. Räuchern bei "Die Räucherwelt"

"Die Räucherwelt" ist ein zertifiziertes Unternehmen, welches ökologische/biologische Räucherprodukte herstellt und vertreibt. Die Kontrolle wurde von der Bio - Kontrollstelle DE-ÖKO-070 durchgeführt und wird in regelmäßigen Abständen zertifiziert.

2.2.1. Aktuelles Verfahren

Wenn man die im Kapitel 2.1 beschriebenen Verfahren und Materialien mit den bei der Firma verwendeten vergleicht, erkennt man schnell, dass sich die Firma "Die Räucherwelten" an dem traditionellen Verfahren orientiert. Sie verwendet zur Rauchgaserzeugung in einem externen Apparat Buchen-, Kirsch- oder Apfelholzspäne für die Pyrolyse. Die Späne müssen jedoch immer manuell nachgelegt werden. Das entstehende Rauchgas wird mit Hilfe eines Ventilators mit Frischluft vermischt und über einen Schlauch in eine Räucherkammer geleitet. Zurück bleiben die nicht verbrannten Komponenten (Asche). In der Kammer befindet sich das zu räuchernde Gut auf mehreren Blechen mit den geschätzten Abmaßen von 0,8 x 0,3 m. Um zu verhindern, dass das entstehende Kondenswasser sich mit dem Räuchergut verbindet und deren Qualität dadurch erheblich vermindert, werden mehrere Bleche zum Auffangen und ableiten genutzt. In einem separaten Auffangbehälter wird das Kondensat gesammelt und muss regelmäßig entleert werden. Ganz zu verhindern, dass Kondenswasser an das Produkt gelangt, ist bisher nicht möglich. Das Rauchgas wird anschließend über einen Schornstein abgeführt und ungefiltert an die Umgebung abgegeben. Das gesamte Verfahren ist in der Abbildung 7 zusammengefasst.

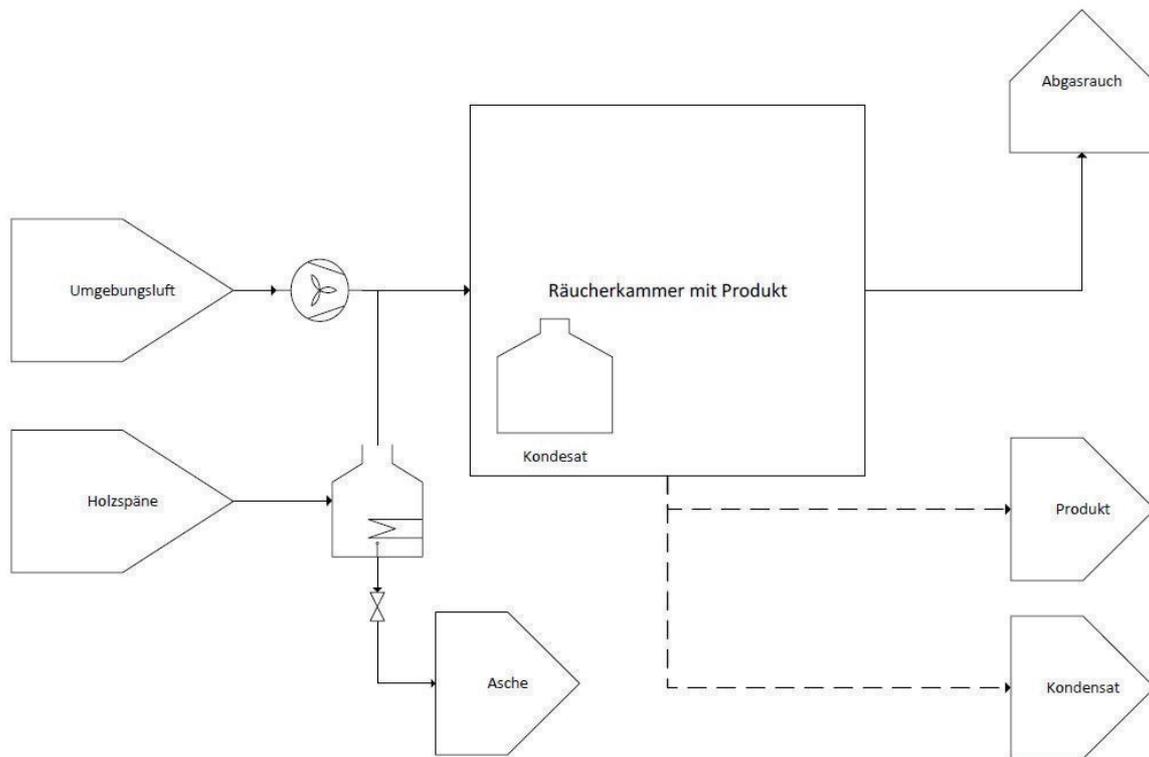


Abbildung 7: Fließbild des Räucherungsprozesses im Ist- Zustandes

Die Menge des abgeführten Rauchgases wird über den natürlichen Druckausgleich zur Atmosphäre geregelt. Dadurch herrscht in der Kammer maximal leichter Überdruck bei einer Temperatur von circa 20 °C. Dadurch kann das ablaufende Räucherverfahren zu dem Kalträuchern zugeordnet werden. Da dies zu den schonenden Verfahren zählt, muss für eine ausreichende Beräucherung des Produktes über eine längere Zeit geräuchert werden. Durch das schonende Räuchern werden derzeit PAK-Werte zwischen 10 und 20 µg/kg erreicht.

2.2.2. Zukunft des Räucherns

Bisher liegt die Firma "Die Räucherwelt" noch deutlich unter den vorgeschriebenen Grenzwerten, was Ihnen auch eine besondere Position am Markt verschafft, jedoch ist es anzunehmen, dass in Zukunft die Verordnung nochmals die Anforderungen an die Grenzwerte erhöht. Wenn die Grenzwerte bis auf die der Fleischerzeugnisse herabgesetzt werden, muss auch die Firma "Die Räucherwelt" den Prozess optimieren. Ein erster Schritt hierfür ist die Umsetzung des Zieles, die Kontrolle und die Überwachung über den Prozess zu erlangen. Dafür ist die technische Weiterentwicklung des Räuchervorganges durch den Räucherapparat notwendig. Es sollte eine Prozessoptimierung stattfinden, wodurch die PAK-Werte noch gesenkt werden könnten. Ebenfalls ist es wahrscheinlich, dass der Trend des steigenden Gesundheitsbewusstseins weiter anhält, wodurch die Nachfrage ebenfalls weiter steigen könnte. Um die Anforderungen dann noch bewältigen zu können, wird ein Räucherbehälter nicht ausreichen. Dafür wird eine Produktion der Behälter in Serie vorgeschlagen, welche dann durch einen Rauchgaskreislauf versorgt werden könnten. Mit einem optimierten, konstanten und geprüften Prozess, welcher weitere Kapazitäten aufweist, wäre es sogar möglich Großkunden zu bedienen.

Eine Möglichkeit, wie der soeben beschriebene Prozess in Zukunft aussehen kann ist in der folgenden Abbildung 8 dargestellt.

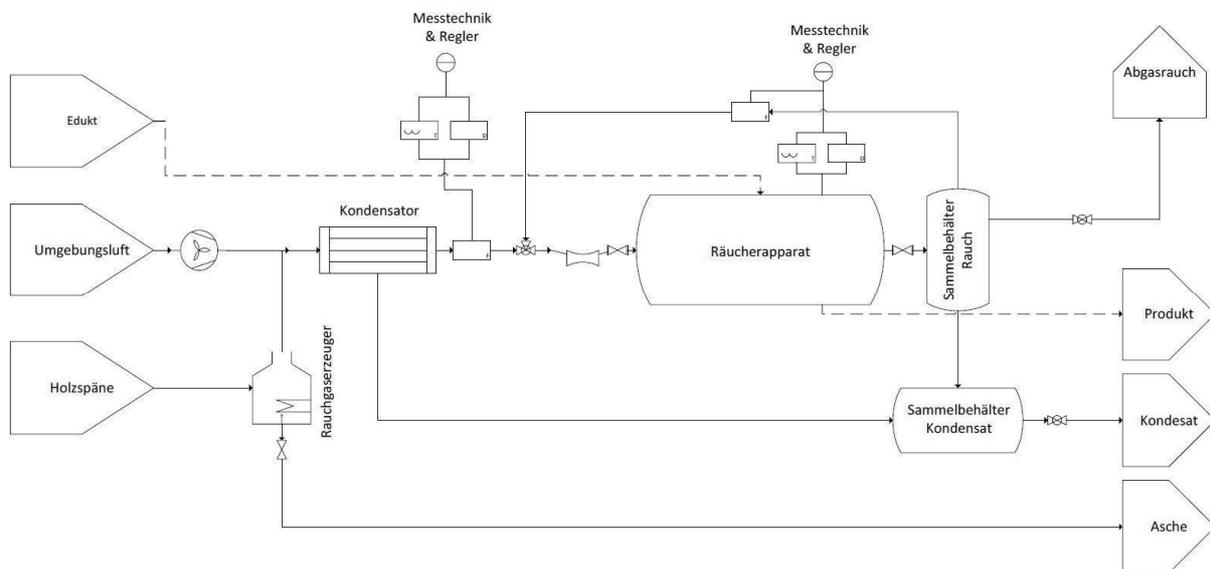


Abbildung 8: Mögliches Fließbild für zukünftige Räucherprozesse

3. Projekt Räucherapparat

3.1. Lastenheft

"Das Lastenheft ist eine Beschreibung von dem Soll-Zustand bzw. wie der Ist-Zustand abgeändert werden soll. Die Ziele müssen dabei von allen Projektmitarbeitern unmissverständlich nachvollzogen werden können." [11]

Im Lastenheft werden zunächst alle bekannten Bedingungen und Faktoren zum Ist-Zustand festgehalten und anschließend werden alle fachlichen Basisanforderungen für den Sollzustand vollständig festgelegt. Hierbei kann der Auftraggeber direkt seine Vorstellungen und Wünsche einfließen lassen. Es müssen die Ziele klar definiert werden, damit das Ergebnis den Erwartungen des Auftraggebers entsprechen kann.

Das Lastenheft dient somit dem Auftragnehmer zur Orientierung für die Gestaltung des umzusetzenden Projektes. Nebenbei handelt es sich gleichzeitig um die Kommunikationsbasis mit dem Auftraggeber, um während des Projektes weitere Fragen zu klären.

3.1.1. Ist-Stand

Am 1. Februar 2017 trat die Firma "Die Räucherwelt" als Start-up-Unternehmen an die STAMAG GmbH heran, mit dem Auftrag einen Räucherapparat auszulegen, welcher die Wettbewerbsfähigkeit der Firma sichern und ausbauen soll. Des Weiteren soll mit Hilfe des Behälters der Durchsatz erhöht werden und die Qualitätsanforderungen erhalten bleiben. Die Qualität ist besonders an einen geringen PAK-Wert gebunden. Die bisher erzielten niedrigen Messwerte werden besonders durch das schonende Räuchern bei circa 20°C und Umgebungsdruck erreicht. Der verwendete Rauch wird im Moment mit Hilfe eines kleinen Vergasers erzeugt, in welchem die Pyrolyse von Buchenholzspänen abläuft. Wahlweise werden auch Kirsch- und Apfelholzspäne verwendet. Die Gase werden mittels eines Föhns über einen Schlauch in die Kammer geleitet. Hier liegt auf mehreren 0,3 x 0,8 m Platten das zu räuchernde Produkt, welches in regelmäßigen Abständen gewendet werden muss, um von allen Seiten eine gleichmäßige Beräucherung zu erzielen. Das Rauchgas wird dann über einen Schornstein abgeführt. Das in der Kammer entstehende Kondenswasser wird aufgefangen und abgeleitet. Nähere Informationen sind derzeit nicht bekannt und konnten auch nicht erfasst werden. Ebenfalls ist die Kontinuität der Qualität der Produkte und somit die Prozessstabilität ungewiss.

Von einzelnen Analysen der Produkte ist bekannt, dass die PAK-Werte zwischen 10 und 20µg/kg Räuchergut beträgt. Der PAK-Wert ist die Summe von verschiedenen Schadstoffanteilen, zu welchen Asche, Benz(a)pyren, Benzo(a)anthracen, Benzo(b)fluoranthren und Chrysen gehören. Dies gilt es zu verringern und stabil auf einem Niveau zu halten. Weitere Angaben zum Produkt können von Seiten der Firma "Die Räucherwelt" bisher nicht getroffen werden, da Sie Ihre zu räuchernden Produkte von den Kunden geliefert bekommen.

3.1.2. Festlegung und Optimierung der Rahmenbedingungen

Der bereits genannte PAK-Wert stellt ein wichtigstes Qualitätsmerkmal der Räucherprodukte dar. In der folgenden Abbildung 9 sind in einem Ishikawa-Diagramm die wichtigsten Einflussfaktoren zusammengefasst.

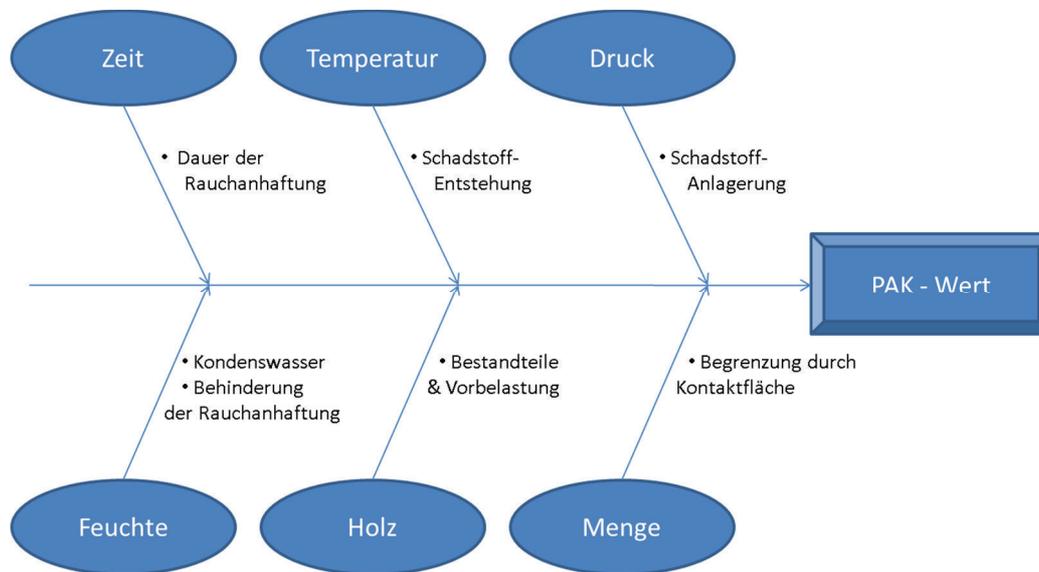


Abbildung 9: Ishikawa-Diagramm - Einflussfaktoren für den PAK-Wert

Durch die schonenden Temperaturen von 20°C (Optimum unbekannt) und den atmosphärischen Druck werden keine extremen Bedingungen in die Räucherkammer eingebracht. Jedoch wird durch die Pyrolyse eine hohe Luftfeuchtigkeit eingetragen. Diese, sowie auch das damit verbundene Kondenswasser ist vor dem Eintritt in den Behälter zu verringern. Eine höhere Luftfeuchtigkeit wirkt sich negativ auf die Beräucherung aus. Dies erzeugt dementsprechend eine längere Beräucherungsdauer. Ein weiterer Grund, das Kondenswasser zu verringern, stellen die möglichen schwerwiegenden Verklebungen des Produktes dar. Hierfür bietet sich das Kondensationsverfahren in einem vorgeschalteten Apparat an. So kann die relative Luftfeuchtigkeit von 95% auf bis zu 30 % reduziert werden. Die erwähnte Beräucherungsdauer liegt bisher bei sechs Tagen, was es zu verringern gilt. Aufgrund der langen Beräucherungszeit ist eine kontinuierliche Förderung des Gutes nicht dienlich.

Um den für die Produktion entstandenen Rauch und somit auch das Holz effektiver nutzen zu können, soll er über eine Rückführung mit frischem Rauch vermischt werden. Dadurch erzielt man in erster Linie einen kühleren und trockeneren Gesamtrauchstrom, welcher eine höhere Rauchkonzentration beinhaltet. Damit kommt es zu einer Verringerung der Emissionswerte, was in Zukunft wichtig werden wird, um die gesetzlichen Anforderungen weiterhin einhalten zu können. Hiermit ist dies dann ohne Probleme

möglich. Dafür ist Möglicherweise ein Sammelbehälter für den Rauch erforderlich. Angaben zum fördernden Luftmassenstrom können bisher nicht vom Auftragsgeber gemacht werden. Dieser soll später kontrolliert werden und regelbar sein, um das Optimum zu finden und einstellen zu können.

Die bereits erlangten Biozertifikate sind unabhängig von der Produktion und beziehen sich laut Aussage der Firma nur auf die Rauchgaserzeugung, bzw. auf das dafür verwendete Holz.

3.1.3. Anforderungsprofil

Um von dem arbeits- und zeitaufwändigen Prozess wegzukommen, soll nun zusätzlich eine Räucherapparatur entwickelt werden. Hierbei darf die Qualität des Produktes nicht gemindert werden.

In Anlehnung an die Wünsche des Auftraggebers und deren räumlichen Möglichkeiten ergeben sich maximale Abmessungen der Apparatur. So soll der Behälter maximal 2,5m lang sein und einen Durchmesser von 1m besitzen. Der Behälter soll horizontal angeordnet werden, wodurch eine größere Kontaktfläche zwischen Rauch und Gut erreicht werden kann. Hierbei soll der komplette Behälter aus Edelstahl nach EN 10020 gefertigt sein, damit er den Anforderungen der Lebensmittelindustrie gerecht wird. Ein möglicher zu verwendender Werkstoff wäre 1.4301 (X5CrNi18-10). Er ist ein rostfreier austenitischer Stahl, welcher aus 18 % Chrom und 10 % Nickel besteht. Der Stahl ist gegen Wasser, Wasserdampf, Luftfeuchtigkeit, Speisesäuren sowie schwache organische und anorganische Säuren beständig und bietet damit ein breites Anwendungsgebiet. Die Füllmasse des Behälters ist von der Dichte des verwendeten Produktes abhängig. Um wettbewerbsfähig und flexibel in der Produktion sein zu können, würde es den Wünschen der Auftraggeber entsprechen, wenn in der Trommel zwischen 100 und 300 kg Zucker geräuchert werden könnte. Die Beräucherung hängt im hohen Maße von der Kontaktfläche zum Rauch ab, da der Rauch sich auf das Produkt legen muss und dafür eine gewisse Zeit benötigt. 300 kg würden auf den bisher verwendeten Blechen eine Fläche von ~10 m² benötigen. Um annähernd diese Oberfläche und somit die Beräucherung zu erhalten, gilt es mit der Gestaltung des Innenraumes eine große Oberfläche zu erzeugen. In Verbindung damit wird der optimale Füllmengenanteil bisher auf 25 - 40 % geschätzt, wodurch auch eine ausreichende Umwälzung des Gutes gewährleistet wäre, welcher sich aber erst in der anschließenden Prozessoptimierung exakt ermitteln lassen wird. Für die Konstruktion des Innenraumes ist die Verwendung von Schaufelblechen, sternförmigen oder kleeblattförmigen Ausstülpungen möglich, wobei darauf geachtet werden muss, keine Verklebungen zu provozieren und das Räuchergut ebenfalls zu schonen. Mit der maximierten Fläche und der Kontrolle über die Prozessbedingungen sowie der Rauchkonzentration muss es das Hauptziel sein, eine kürzere Beräucherungsdauer als die bisherigen 6 Tage zu erreichen. Weitere Vergrößerungen der Kontaktfläche des Produktes mit dem Rauch werden gesucht.

3.1.4. Grundkonstruktion

Die ersten gemeinsamen Überlegungen der Firma „Die Räucherwelt“ mit der Firma „Stamag“ für einen technologischen Fortschritt im Bereich des Räucherns entstanden Anfang 2016. Festgehalten wurden die daraus entstandenen Konzeptideen in einer Handskizze welche in der Abbildung 10 dargestellt ist. Auf Basis dieser Überlegungen werden nun Konzepte erstellt, welche die gewünschten Aspekte beinhalten.

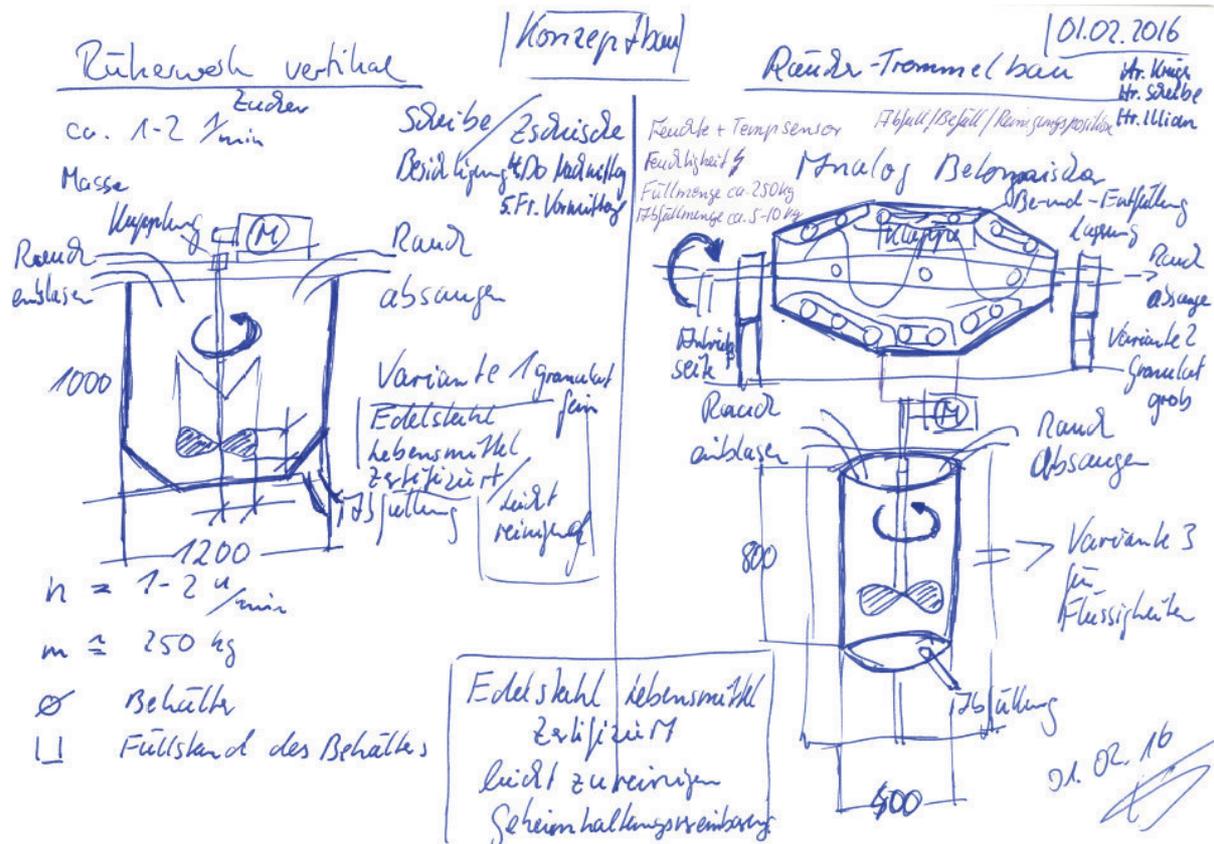


Abbildung 10: Ersten Konzeptüberlegungen

Neben der kontinuierlichen Förderung des Guts sind die Befüllung, Entleerung und Reinigung wichtige Aspekte. Um die Stillstandzeit zwischen den Chargen zu minimieren, ist eine zügige und portionierbare Entleerung der Trommel gewünscht, wobei dies über eine Öffnung am Ende der Trommel durch die geneigte Aufstellung realisiert werden könnte. Eine Realisierung dieser Vorgänge über eine Klappe wird nicht gewünscht, da der Auftraggeber damit bereits unangenehme Erfahrungen gemacht hat.

Durch eine mögliche Neigung der Apparatur müssen besondere Anforderungen an den Rahmen gestellt werden, da dieser die Last tragen und ebenso noch möglichen Schwingungen durch den Motor widerstehen muss. Die zu tragende Last kann bei einem hohen Füllgrad mit einem Medium höherer Dichte, inklusive des Gewichtes des Behälters, durchaus bis 1.300 kg betragen. Dafür muss der Rahmen

konstruiert und das Fundament gelegt werden. Das Fundament muss die Vier-Punkt-Belastung des Gewichtes inklusive mit Motor und Rahmen aushalten (ca. 1.500 kg). Hierfür muss womöglich eine Verstärkung montiert werden.

Der Antrieb einer Trommel wäre über Reibräder zu realisieren, zum Beispiel durch Reibräder der Firma Rotafrix®. Diese werden über eine Königswelle angetrieben, welche über eine Kette oder Riemen mit dem tiefer liegenden Motor verbunden sind. Womöglich ist eine Verwendung der Lager der SKF-Foodline (Lebensmittelverträgliche Produktserie) notwendig, da auch diese in Kontakt mit den Gewürzen kommen könnten und somit dafür ausgelegt sein müssen. Eine Drehzahlübersetzung der Reibräder zu der Trommel von 1:3 ins Langsame ist sinnvoll, wobei sich dadurch die Drehzahl der Reibräder und des Motors ergeben und die Getriebeübersetzung gering gehalten werden kann. Die Trommel soll mit einer Drehzahl von 2 bis 10 Umdrehungen pro Minute arbeiten, wobei dies stufenlos regelbar ausgelegt werden soll. Somit ergeben sich Drehzahlen von 10 bis 50 Umdrehungen pro Minute für den Motor und die Welle. Der Motor soll mit einer Netzspannung von 230/400V betrieben werden. Mit Hilfe der geringen Drehzahl soll eine schonende Rührung des Produktes gewährleistet werden, wodurch die Struktur der Medien erhalten bleiben soll.

Da der Behälter mit Lebensmitteln gefüllt wird, müssen die Dichtungen und Schmierstoffe dafür ausgelegt sein, die Lebensmittel nicht zu verunreinigen. Hierfür eignet sich ebenfalls die SKF-Foodline optimal. Dementsprechend müssen auch geeignete Reinigungsmittel verwendet werden, welche nicht mit den Schmierstoffen/Fetten reagieren dürfen und rückstandsfrei aus dem Behälter entfernt werden können. Um die Lager und den Motor bei der Reinigung nicht zu verunreinigen und somit Schäden zu provozieren, ist eine räumliche Trennung von Behälter und Gestell während der Reinigung gewünscht. Hierfür eignet sich der Antrieb durch die Reibräder ideal, da eine Trommel auf diese nur aufgelegt werden müsste. Um die Last des Behälters zu bewältigen und präzise einsetzen zu können, ist die Nutzung eines Hubmechanismus mit Hilfe von Tragösen zu bevorzugen. Um die Reibräder zu entlasten und somit deren Laufzeit zu verlängern, soll ein Teil des Gewichtes über zwei Lager an den jeweiligen Enden der Trommel getragen werden. Die beiden Lager werden ebenfalls an dem Rahmen befestigt. Die Rauchgas zu- und -abfuhr soll, um Kurzschlussströmung zu verhindern, ebenfalls über beide Enden des Behälters gestaltet werden. Dadurch bietet es sich an, die Lagerung als Hohlwelle zu gestalten, über welche das Rauchgas eingeleitet und auf der anderen Seite abgeführt werden kann.

3.1.5. Messtechnik und Wartungsfreundlichkeit

Um mit dem Behälter die geforderte Qualität der Produkte gewährleisten zu können, müssen die einflussnehmenden Prozessgrößen überwacht werden. Die wichtigsten Einflussfaktoren im Behälter, welche es zu kontrollieren gilt, sind Temperatur, Druck, Luftfeuchte und Luftmassenstrom. Hierfür sind verschiedene Sensoren einzusetzen, welche in den Behälter eingeführt werden müssen und eventuell Öffnungen benötigen. Um den zugeführten Luftmassenstrom wie gewünscht einstellen zu können, ist es ratsam, ein stufenlos regelbares Druckluftgebläse zu verwenden. Dadurch erhält man bei der Prozessoptimierung eine weitere Variable, um den Prozess beeinflussen zu können.

Damit Verluste des Produktes bei der Entleerung vermindert werden können, muss dieses leicht abzuführen sein, ebenfalls wäre eine Portionierbarkeit nützlich. Wenn die Feuchtigkeit des Rauchgases, wie im Kapitel 3.1.2 beschrieben, gesenkt werden könnte, wird sich dies auch auf zurückbleibende Verkrustungen und Verklebungen auswirken. Dadurch sinkt der Reinigungsaufwand und die Stillstandzeiten werden verkürzt. Des Weiteren sollten bei der Gestaltung des Innenlebens enge Zwischenräume und Toträume vermieden werden, wodurch es zu verringerten Ablagerungen des Gutes kommt. Des Weiteren ist es von Vorteil, wenn man den Behälter vom Antrieb trennt, denn dadurch sind beide unabhängig voneinander zu warten und zu reinigen. Auch bei der parallelen Verwendung von mehreren Trommeln wird sich die Flexibilität bewähren. Ebenso reduziert man das Risiko, dass der Motor vom Räuchergut oder Rauch beeinflusst wird, wodurch er nicht mehr vor explosionsgefährdeten Atmosphären geschützt werden muss. Damit reduziert sich ebenfalls der Wartungsaufwand.

Damit die Aufstellung variabel gestaltet werden kann, ist es dienlich, das Gestell mit Rädern zu versehen, dadurch ist eine räumliche Umgestaltung jederzeit möglich. Ein weiterer Vorteil beim Einsatz von Rädern ist, dass entstehende Vibrationen auch besser abgeführt werden können.

Eine Zusammenfassung der gewünschten Aspekte liefert die folgende Tabelle 6.

Tabelle 6: Zusammenfassung gewünschter Aspekte

Parameter	Bedingung
Drehzahl	Sehr gering, jedoch flexibel für die Anwendung
benötigter Raum	Gering und optimal wie möglich, da räumliche Bedingung begrenzt sind
Füllmasse	So groß wie möglich bei gleichbleibender Homogenisierung
Rauchgutzufuhr/ -abfuhr	Ohne Verluste, bequem und schonend für die Gesundheit realisierbar
Reinigung	Leichte und schnelle Reinigung um Standzeiten zu verkürzen.
Verklebungsrisiko/ Rückstand	Gering wie möglich, damit Verlustmenge minimiert werden kann
Durchmischungs- grad	Trotz geringer Drehzahl muss eine gute Durchmischung erreicht werden
Wartung	Mehrere Komponenten trennbar gestalten, damit Wartung und Reparatur von Einzelteilen möglich ist.
Sensorik	Prozesskontrolle muss gewährleistet werden
Flexibilität	Konstruktion soll für mehrere Anwendungsmöglichkeiten nutzbar sein

3.2. Konzepte für den Räucherapparat

Im folgenden Kapitel werden die Konzepte von für mögliche Räucherapparate gegenübergestellt, hierbei wird besonders auf die Vor- und Nachteile auf die gewünschte Anwendung eingegangen. Untersucht werden drei Hauptkonzepte, welche noch unterschiedlich viele Variationen bieten. Die drei Hauptkonzepte sind die Wanne, Rührbehälter und die rotierende Trommel.

3.2.1. Konzept Wanne

Für die Gestaltung des Räucherapparates in Form einer Wanne wird nur ein Konzept als realisierbar angesehen, wobei es sich hierbei um die Verwendung eines Ankerrührers handelt. Dieser Rührer wird als Pendel genutzt, welches immer wieder wandgängig in das Gut eintaucht und es beim Austritt mitnimmt, hierbei entsteht eine geringe Umwälzung. Gefahr besteht besonders darin, dass durch herunterlaufendes Kondenswasser das Räuchergut verklebt und am Ankerrührer anhaftet. Dadurch würde sich eine kompakte Masse bilden, welche mit dem Anker hin und her geschwenkt wird. Daher ist es möglich, dass das Räuchergut auch bis zum Deckel geschoben wird. Dies gilt es zu vermeiden.

Weil der Ankerrührer nur entlang der Wand fährt, ist eine große Füllmenge nicht zu bewältigen, wodurch die Wanne für die Massenproduktion entfällt.

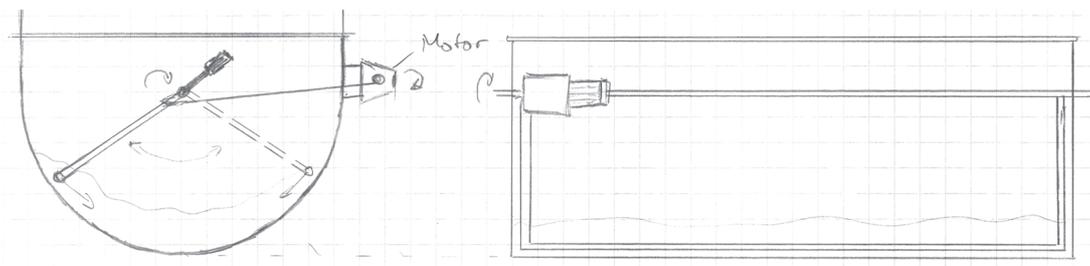


Abbildung 11: Konzept Wanne, eigene Darstellung

Die Wanne ist neben den Blechen im der Räucherammer jedoch der derzeitige Stand des Räucherungsprozesses bei der Firma "Die Räucherwelt". Diese ist aus Flexibilitätsgründen, Handhabung und Beräucherungsfläche für feste Produkte nicht zu empfehlen, wobei sie für Flüssigkeiten wie Öle dennoch eine Variante wäre. Hierbei würde sich eine Rauchgaseinleitung in das Öl über eine Rührerhohlwelle empfehlen.

3.2.2. Konzept Rührapparat

Für die Homogenisierung eignet sich ein zylinderförmiger Behälter unter Einsatz eines rotierenden Rührorgans. Für den Rührapparat existieren mehrere Varianten, die vorgestellt und auf Tauglichkeit geprüft werden:

- Ankerrührer
- 1-gängiger Wendelrührer
- 2-gängiger Wendelrührer
- mehrere Schrägblattrührer
- mehrere Scheibenrührer

Einige Rührervarianten sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

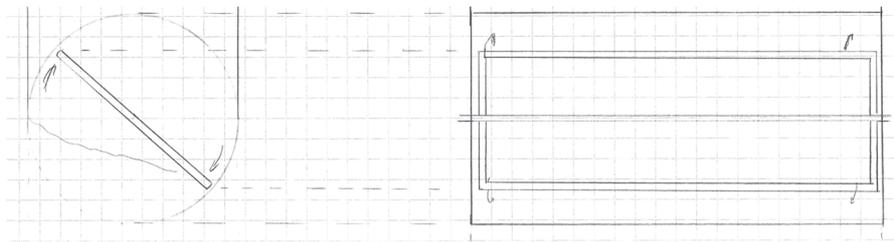


Abbildung 12: Konzept Ankerrührer, eigene Darstellung

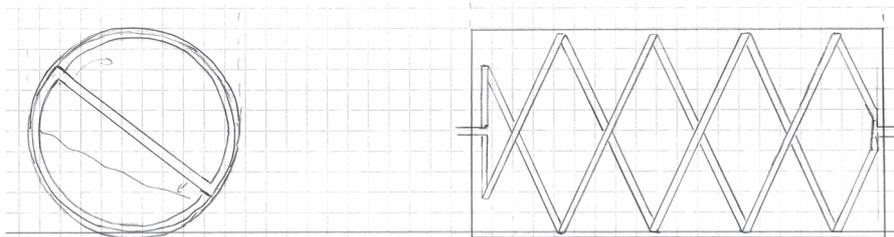


Abbildung 13: Konzept 1-gängiger Wendelrührer, eigene Darstellung

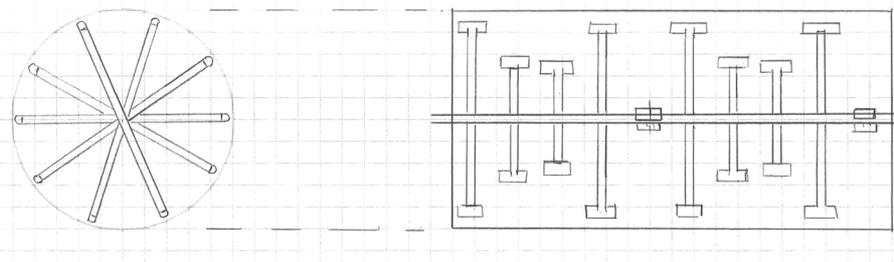


Abbildung 14: Konzept Scheibenrührer, eigene Darstellung

Der **Ankerrührer** stellt in erster Linie eine Erweiterung des Rührkonzeptes der Wanne dar, wobei nun die Umwälzung nur in einer Richtung stattfindet. Die Gefahr, dass verklebtes Gut an den Deckel getragen wird, ist hierbei nicht mehr vorhanden. Eine Aufteilung des Ankerrührers in mehrere kleine Rührer ist im Prinzip der Nutzung von mehreren **Scheibenrührern** gleichgestellt.

Ein Nachteil dieser beiden Methoden ist, dass die Durchmischung des Gutes bei höheren Drehzahlen nicht schonend ablaufen würde. Bei geringen Drehzahlen ist die Belastung jedoch zu vernachlässigen.

Um schonend Feststoffe zu rühren, empfiehlt sich ansonsten die Nutzung von schräggestellten Rührorganen. Dementsprechend würden sich **Wendel-** und **Schrägblattrührer** gut eignen. Ein Vorteil des Wendelrührers ist die entstehende Förderwirkung, welche für die Entleerung des Behälters genutzt werden kann. Hierdurch ist eine Portionierung zu realisieren, ohne den Behälter schief stellen zu müssen. Jedoch würde während des Betriebes das gesamte Gut in eine Ecke geschoben werden, was eine gleichmäßige Beräucherung erschweren würde. Dem entgegen wirken könnte man mit einem weiteren Wendelrührer, welcher das Gut in die andere Richtung fördert. Hierbei würde die zweite Wendel auf der ersten montiert werden und die gleiche Menge darüber axial zurückfördern, wie die erste Wendel hin. Durch die zusätzliche Wendel entsteht aber auch ein höherer Fertigungs-, Wartungs- und Reinigungsaufwand, welche mit zusätzlichen Kosten verbunden sind.

Ebenfalls mit höherem Aufwand und Kosten sind die beiden Varianten mit mehreren Schrägblatt- oder Scheibenrührern verbunden. Diese bieten jedoch eine deutlich größere Flexibilität für die spätere Prozessoptimierung, da man die Rührorgane leicht austauschen oder verändern kann. Hierbei sinkt jedoch durch die Staffelung der Kontaktfläche mit dem Gut das nötige Drehmoment für die Rührwelle.

Bei der Betrachtung des Verklebungsrisikos muss dies in Beziehung zur vorhandenen Behälteroberfläche gesehen werden. Denn daran kann sich das unerwünschte Kondensat bilden und letzten Endes zu den Verklebungen führen. Die Menge an Kondensat ist direkt proportional zu der Rauchfeuchtigkeit. Verklebungen und Anhaftungen müssen nach dem Räucherprozess entfernt werden. Die Reinigung erschwert sich mit zusätzlichen Kanten und Wicklungen dementsprechend mehr.

Ein Nachteil, den alle Rührer miteinander teilen, ist die unterste Schicht des zu beräuchernden Gutes, welche von keinem Rührer direkt mitgenommen werden kann, ohne das Gut zu zerkleinern.

Einen Überblick über die Einflussfaktoren soll die anschließende

Tabelle 7 liefern, wobei dies eine starke Vereinfachung darstellt.

Tabelle 7: Übersicht über Vor- und Nachteile der Rührervarianten

Aspekt	Anker- rührer	1-gängiger Wendelrührer	2-gängiger Wendelrührer	Mehrere Schrägblattrührer	Mehrere Scheibenrührer
Verklebungsrisiko	0	0	+	+	+
Rührwirkung	-	+	++	0	0
Gutverteilung	0	-	++	0	+
Montage/Fertigu.	+	+	0	-	-
Flexibilität	-	0	0	+	+
Reinigung	+	0	-	-	-
Wartungsaufwand	+	+	0	-	-
Kosten	+	+	0	-	-
GESAMT	+2	+3	+4	-2	-1

Die Entscheidung, ob eine Variante für einen Aspekt +/-0 (oder gar ++/--) bekommt, wird über die Effektivität des Vor- oder Nachteils entschieden und muss immer im Vergleich zu den anderen Varianten gesehen werden. Die Vor- und Nachteile sind im Anhang in der Tabelle 17 Tabelle 18 ausgewiesen. Aus dieser Übersicht lässt sich daher schlussfolgern, dass die Variante mit dem 2-gängigen Wendelrührer für das beste Rührerkonzept herangezogen werden sollte.

3.2.3. Konzept Trommel

Das Konzept Trommel bietet, wie bereits erwähnt, einige Vorteile gegenüber dem Konzept des Rührapparates. Zum ersten ist die Trommel vom Antrieb trennbar, was einige Vorteile für die Wartung, Reinigung, Befüllung und Entleerung mit sich bringt. Des Weiteren wird bei der Trommel das gesamte Räuchergut in Bewegung versetzt, sowie auch die für Rührer nicht erreichbare unterste Schicht.

Der größte Vorteil liegt in der Gestaltung des Innenlebens, da mit dieser die Durchmischung erzielt wird, aber auch die wichtige Vergrößerung der Ober-/Kontaktfläche des Gutes gelingt.

Mit der Installation eines Innenraumes steigt der aufzubringende Aufwand in Sachen Montage, Reinigung und Wartung. Wie sich das in den einzelnen Varianten auswirkt, wird nun genauer untersucht.

Der Vorteil, eine große Oberfläche zu bewirken, sollte in dem Konzept der Trommel besonders gewichtet sein, weil dadurch die Effektivität der Beräucherung der Produkte gesteigert werden kann. Dabei darf das Produkt nicht in der Trommel kleben bleiben und anschließend sollten sich Rückständen gut entfernen lassen. Die einfachste Methode der Trommel ist, sie ohne jegliche Einbaumaßnahmen zu betreiben. Dabei ist das Risiko von Anhaftungen am geringsten und der Aufwand und die Erreichbarkeit für die Reinigung und Wartung am besten. Hierbei ist jedoch sowohl der Durchmischungsgrad, als auch die zu beräuchernde Oberfläche des Gutes, im Vergleich zu der Anwendung mit Innenleben, sehr gering.

Im Vergleich dazu gibt es die Möglichkeit eine aus Maschen bestehende Trommel zusätzlich in den Behälter einzubringen. Hierbei könnte der Rauch ebenfalls von außen auf das Gut aufgebracht werden, wodurch sich die Kontaktfläche mehr als verdoppeln könnte. Jedoch besteht durch den Rauch und auch durch das Gut eine große Gefahr die Maschen zu verstopfen, wodurch der gewünschte Effekt der Beräucherung verhindert werden könnten. Abgesehen davon, das sowohl ein größerer Fertigungs- und Wartungsaufwand entsteht, stellt die anschließende Reinigung der Maschen eine zusätzliche Herausforderung dar.

Des Weiteren gibt es noch die Variante, bei welcher man Stromstörbleche also Förderbleche nutzen kann, um das Gut auf eine höhere Ebene zu heben. Dadurch erzeugt man in der Trommel eine Art Regale, auf denen das Gut ebenfalls in Kontakt mit Rauch steht. Dies gelingt einem bereits durch die Verwendung von simplen Blechen. Diese können auch gebogen sein, um das Gut länger zu halten. Die Möglichkeit das Anheben durch Taschen oder schaufelartigen Blechen zu realisieren besteht ebenfalls. Bei einer anderen Variante die Bleche anzuordnen, ist es möglich in der Trommel eine Kammerung hervorzurufen. So können Beispielsweise fünf Bleche so gegeneinandergestellt werden, dass ebenso fünf nutzbare Kammern entstehen. Dadurch würde eine starke Vergrößerung der Fläche hervorgerufen werden. Die erwähnten Varianten mit den geraden und gebogenen Blechen, sowie die mit den Taschen sind in den nachstehenden Abbildungen kurz dargestellt.

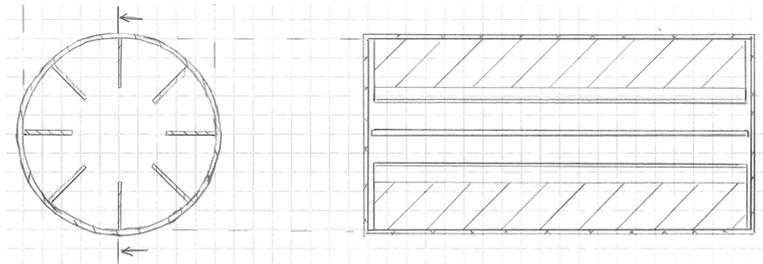


Abbildung 15: Konzept mit geraden Blechen

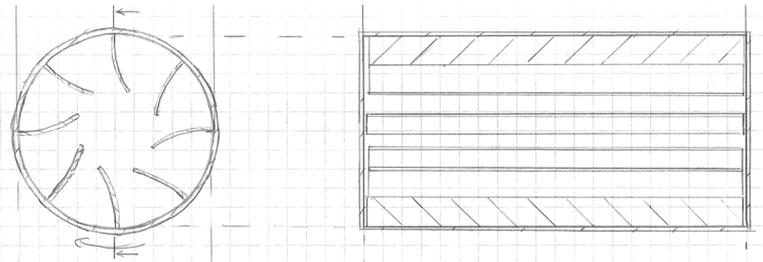


Abbildung 16: Konzept mit gebogenen Blechen

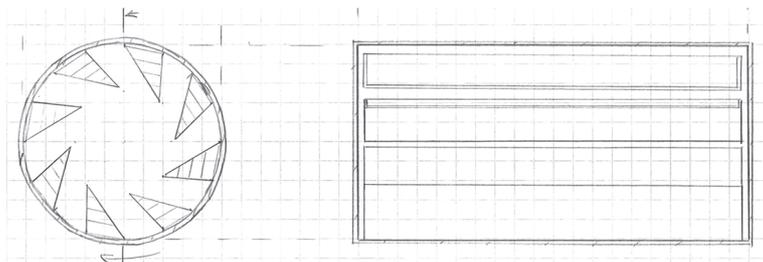


Abbildung 17: Konzept mit Taschen/ Schaufeln

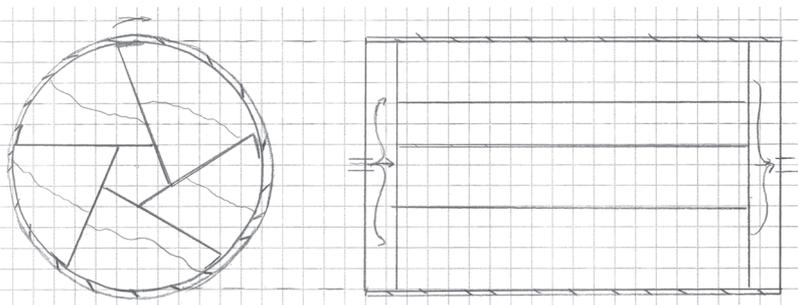


Abbildung 18: Konzept Kammerung

Bei diesen Varianten ist es wichtig, das Produkt so gut wie möglich auf den Blechen zu halten, jedoch ohne jegliche Problemstellen zu erzeugen. Als Problemstelle werden lokale Herausforderungen bezeichnet, welche die Struktur des Gutes beeinflussen oder Verklebungen provozieren. Die Struktur könnte durch zu starkes Herabfallen des Gutes, wie in einer Kugelmühle, zerkleinert werden.

So wird mit den simplen Blechen, wie bereits erwähnt, eine Vergrößerung der Oberfläche bewirkt, jedoch rutscht das Gut sehr zeitig wieder hiervon herunter, wodurch die Fläche nicht richtig wirken kann. Dafür ist die Methode einfach zu reinigen, zu warten und zu fertigen. Durch den 90° Winkel zwischen Trommelwand und Blech wird das Verklebungsrisiko geringgehalten.

Durch die Nutzung von **gebogenen Blechen**, wird das Gut weiter nach oben gehoben und bleibt somit länger auf den Blechen und der von der Trommelwand abgehende 90° Winkel geht nicht verloren. Allerdings sind diese Bleche mit einem größeren Fertigungs- und Reinigungsaufwand verbunden. Es besteht weiterhin die Gefahr, dass sich bei klebrigen Medien in dem Bogen des Bleches das Medium zusammenschiebt und aneinanderhaftet. Um eine ähnliche Förderhöhe zu erzielen ohne das Medium zusammen zu schieben, ist die Nutzung der erwähnten **Schaufeln** möglich. Obwohl diese nicht mehr im 90° Winkel von der Trommel abstehen und somit Verklebungen in dem engeren Winkel drohen. Ebenso entstehen bei der **Kammerung** eines zylindrischen Behälters Engstellen, welche die Verklebung fördern würden. Um die Gefahr der verschiedenen Verklebungen zu minimieren muss dem Rauch vorher so viel Feuchtigkeit, wie nur möglich entzogen werden. Die Einleitung des Rauches in jede einzelne Kammer stellt bei der Variante der Kammerung eine Herausforderung dar, weil verhindert werden sollte, dass das Produkt in die Rauchleitung gelangt oder diese sogar verstopft. Jedoch würde in den Kammern das Produkt schonender und im Ganzen auch besser durchmisch, da hierfür fünf kleinere Rührzentren verwendet werden. Hierbei wird dem Kugelmühleneffekt am besten entgegen gewirkt. Jedoch müssten die Kammern einzeln zu verschließen sein und über eine eigene Rauchzuführöffnung verfügen.

Um den Überblick über die Aspekte zu behalten, sind sie in der nachstehenden Tabelle 8 zusammengefasst und gewichtet.

Tabelle 8: Übersicht über Vor- und Nachteile der Trommelvarianten

Aspekt	ohne Einbauten	gerade Bleche	gebogene Bleche	Maschen	Kammerung
Oberflächen/-Nutzung	---	+	++	+++++	++++
Verklebungsrisiko	+	0	0	---	0
Rührwirkung	---	+	++	-	++
Montage/Fertigung.	++	+	0	--	-
Reinigung	++	0	0	---	0
Handling	++	+	0	+	-
Wartungsaufwand	+	0	0	-	0
Kosten	+	0	0	--	-
GESAMT	+3	+4	+4	-6	+3

Aus der Übersicht lässt sich schlussfolgern, dass die Varianten mit den geraden Blechen und den gebogenen Blechen gleichauf liegen. Da sich beide auch in der Herstellung, Darstellung und Handling sehr ähneln, wird das Konzept mit den geraden Blechen repräsentativ ausgewählt.

3.3. Gegenüberstellung der Konzepte

Die Gegenüberstellung der besten Varianten der drei Konzepte dient als Entscheidungshilfe, um bestimmen zu können, welches Konzept umgesetzt werden soll. Hierfür werden die durch die Konstruktion beeinflussten Parameter herangezogen und miteinander verglichen.

Ein variabler Betriebsparameter, welcher von der Konstruktion beeinflusst wird, ist die **Drehzahl**. Diese wird bei der Konstruktion des Konzeptes der Wanne begrenzt, damit das Räuchergut nicht bis zum Deckel gefördert wird. Bei der Verwendung eines Rührers oder einer Trommel kann die Drehzahl unabhängig von der Gestaltung des Apparates eingestellt werden.

Ein weiterer Faktor, welcher sich nur bei dem Konzept der Wanne negativ auswirkt, ist die **Füllmasse**. Die Füllmasse ist die zu bewältigende Menge, welche in dem Apparat geräuchert werden kann. Hierfür muss besonders die nötige Umwälzung gewährleistet sein, ansonsten wird das Produkt nicht gleichmäßig geräuchert. Da die Wanne nur mit dem Ankerrührer genutzt werden kann, wird bei zu großer Menge nur die äußere Schicht gewendet. Dies gilt nicht für die Trommel oder den Rührapparat. Diese benötigen jedoch zur Beräucherung des Produktes im Apparat mehr Rauch, da mehr Volumen eingenommen werden muss. Dementsprechend wird für die Pyrolyse auch mehr Holz bereitgestellt werden müssen. Das liegt daran, dass die Wanne nur einen halben zylindrischen Behälter darstellt, wobei die beiden anderen eine volle Zylinderform besitzen.

Wie bereits angedeutet, ist das Konzept der Wanne für einen hohen Grad der Durchmischung ungeeignet, da der Ankerrührer nur eine hin und her Bewegung der äußeren Schicht des Gutes bewirkt. Die beiden anderen Konzepte besitzen eine kontinuierliche Mischrichtung und optimierte Mischorgane, wodurch eine deutlich bessere Homogenisierung erreicht werden kann. Eine noch bessere Durchmischung des Räucherguts kann durch die Verwendung einer Trommel erreicht werden, da hierbei wie bereits erwähnt das gesamte Gut gleichzeitig bewegt wird.

Als nächstes steht die Bewertung für **die Zu- und Abfuhr** des Produktes an. Hierbei wird die bequeme, einfache und portionierbare Umsetzung bewertet. Durch die kontinuierliche Drehrichtung der Rührer- und Trommelkonzepte ist es möglich, eine Förderwirkung einzubauen, wodurch das Gut leicht entnommen und portioniert werden kann. Hierbei ist für das Konzept der Kammerung ein größerer Fertigungsaufwand nötig. Die Entleerung der Wanne stellt sich dabei mühselig und schwieriger heraus, da das Gut manuell entnommen werden muss. Da die Entnahme über den Deckel realisiert werden muss, wird hierbei jedoch weniger Platz bei der Aufstellung benötigt, wodurch das Konzept einen Vorteil gegenüber den anderen beiden besitzt. Für das Konzept des Rührers wird deutlich mehr Platz benötigt, um das Rührorgan aus dem Behälter herausziehen zu können. Die Trommel braucht lediglich Raum für die seitliche Öffnung, über welche die Apparatur befüllt und entleert wird.

Nach dem Entleeren der Apparatur steht immer eine **Reinigung** an, diese sollte ebenfalls einfach und schnell realisiert werden können, wobei die möglichen Rückstände und Verklebungen eine Rolle spielen. Hierfür soll die gesamte Apparatur für das Reinigungsmittel leicht erreichbar sein, aber auch anschließend einfach und ohne große Verschmutzungen und Aufwand abgeführt werden können. Beides kann bei der Wanne einfach realisiert werden, indem das Reinigungsmittel über den Deckel eingeführt wird und über einen Abfluss abgeleitet werden kann. Für die anderen beiden Konzepte gestaltet sich dies schwieriger, da das Reinigungsmittel über die seitliche Öffnung oder über einen zusätzlichen Zugang zum Behälter eingeleitet werden muss. Abgeleitet werden kann dies nur über die seitliche Öffnung. Die Menge des benötigten Reinigungsmittels richtet sich nach dem Verschmutzungsgrad des Behälters, welcher durch die nicht zu verwendenden Rückstände und Verklebungen bestimmt werden. Diese können durch die Konstruktion des Behälterinneren beeinflusst werden, wodurch sich wieder unterschiedliche Bewertungen ergeben. Das Konzept der Wanne weist das größte Verklebungsrisiko auf, da hier die geringste Umwälzung des zu räuchernden Produktes vorliegt und zudem kommt, dass das mögliche Kondensat, was die Verklebungen verstärkt, an der Behälterwand herabläuft und immer auf die gleiche Stelle trifft. Bei dem Konzept mit einem Rührer wird das Gut deutlich mehr bewegt, wodurch kleinere Verklebungen wieder gelöst werden können. Ebenfalls ist dadurch die Verteilung des entstehenden Kondensats besser. Am besten wird dies aber durch die Bewegung des gesamten Gutes gewährleistet, was durch die Drehung des Behälters, wie im Trommelkonzept, umgesetzt wird. Ein Nachteil für das Rührer- und Trommelkonzept liegt darin, dass zusätzliche Kanten und Umlenkungen in den Behälter eingebracht werden. In engen Kanten und Toträumen kann sich das Räuchergut besser festklemmen/ anlagern und anschließend verkleben. Um das zu verhindern, sollten 90° Winkel für die Bleche verwendet werden. Durch diese Bleche soll zudem eine Vergrößerung der Oberfläche des Gutes erreicht werden, welche die Kontaktfläche zum Rauch darstellt. Dadurch kann sie auch als Beräucherungsfläche bezeichnet werden. Da diese nur in der Trommel Verwendung findet, ist das ein besonderer Vorteil des Konzeptes gegenüber den anderen beiden.

Ein weiterer Vorteil der Bleche im Inneren ist, dass sie als Rührorgane mit der Trommel verbunden sind und somit kein separates Gerät darstellen, welches weiteren Wartungsaufwand mit sich bringen würde. Zusätzlich kann die Reinigung und Wartung von Antrieb und Trommel, wie bereits erwähnt durch den Modularen Aufbau des Konzeptes, voneinander getrennt, durchgeführt werden.

Ein Aspekt spricht jedoch für das Konzept der Wanne, denn um den Prozess kontrollieren zu können, müssen mehrere Prozessparameter im Inneren des Apparates gemessen werden. Die dafür nötige Sensorik muss installiert sein und darf den Betrieb nicht behindern. Dies ist bei der Verwendung einer Wanne kein Problem, jedoch kann der Rührer im Konzept Rührer ein Problem darstellen, sowie auch die selbst rotierende Trommel.

Um nach der Konstruktion etwas an dem Durchmischungskonzept verändern zu können, muss dafür die Möglichkeit bestehen, ohne größeren Aufwand Oberflächen, Rührwirkung, oder andere Parameter zu variieren. Die Möglichkeit besteht besonders bei der Nutzung eines Rührwerks, denn hierbei lassen sich ganz einfach die eingesetzten Rührorgane austauschen, was bei eingesetzten Blechen nur mit größeren Aufwand möglich ist. Das Konzept der Wanne bietet dahingehend keine wirklichen Möglichkeiten.

Die genannten Argumente sind für eine bessere Übersicht in der Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Übersicht über die Gegenüberstellung der Konzepte

Faktoren	Wanne	Rührer	Trommel
Drehzahl	-	+	+
Füllmasse	--	0	0
Füllmengenanteil	+	0	0
Durchmischungsgrad	-	+	++
Rauchgutzufuhr/-Abfuhr	--	++	++
Benötigter Raum	++	--	0
Reinigung	+	-	0
Verklebungsrisiko/ Rückstand	--	+	++
Oberflächenerweiterung	0	0	+++
Wartung	-	-	+
Sensorik	+	-	-
Flexibilität	-	+	0
Summe	-5	+1	+10

Aus der Gegenüberstellung der Varianten lässt sich schlussfolgern, dass das Konzept der Trommel mit Abstand am besten für die Gestaltung eines Räucherapparates geeignet ist. Hierbei wird der Prozess der Beräucherung optimal umgesetzt und bietet dabei gleichzeitig mehrere komfortable Serviceeigenschaften. Aufgrund dessen ist die Wahl, welches Konzept weiter verfolgt werden soll eindeutig.

4. Auslegungsberechnungen

Nachdem die Wahl des Konzeptes entschieden ist, gilt es nun sicher zu stellen, dass der Behälter während des Betriebes den Anforderungen gewachsen ist und den auftretenden dynamischen Belastungen standhält. Sobald die Wandstärke und für das Handling benötigte Komponenten definiert wurden, kann über die zu bewegende Masse die dafür erforderliche Antriebsleistung des Elektromotors ermittelt werden. Des Weiteren gilt es anschließend die zur Übertragung benötigten Komponenten hierfür auszuwählen.

4.1. Behälterauslegung nach AD-Merkblättern der B-Serie

In der DIN 28105: "Behälter mit zwei gewölbten Böden" werden die Hauptmaße und das dazugehörige Nennvolumen beschrieben. Demnach kann der Behälter für ein Nennvolumen von 1 m³ einen Außendurchmesser von 800 mm besitzen. Dabei beträgt die Länge des Behälters 2000 mm. Da dies den Möglichkeiten und Wünschen des Auftraggebers entspricht, wird der Behälter mit diesen Maßen definiert.

Nach AD-Merkblättern der B-Serie wird der Behälter nun berechnet. [12]

Im Merkblatt B0 werden zunächst die gängigsten Formelzeichen und deren Einheiten aufgelistet.

Hebelarm	a [mm]
Breite	b [mm]
Zuschlag Wanddickenunterschreitung	c1 [mm]
Abnutzungszuschlag	c2 [mm]
Durchmesser eines Ausschnitts eines Flansches	d [mm]
Außendurchmesser	da [mm]
Innendurchmesser	di [mm]
Teilkreisdurchmesser	dt [mm]
mittlerer Dichtungsdurchmesser	dD [mm]
breite Seite einer Rechteckigen Platte	e [mm]
schmale Seite einer Platte	f [mm]
Schweißnahtdicke	g [mm]
Höhe	h [mm]
Dichtungskennwert für Verformung	k0 [mm]
Dichtungskennwert Betriebszustand	k1 [mm]
Länge	l [mm]
Anzahl	n [-]
Berechnungsdruck	p [bar]
maximal zulässiger Druck	PS [bar]

Prüfdruck	PT [bar]
Radius allgemein	r [mm]
erforderliche Wanddicke	s [mm]
ausgeführte Wanddicke	se [mm]
Faktor Berechnungsspannung	v [-]
Abklinglänge	x [mm]
Schweißnahtfaktor	z [-]
Fläche	A [mm ²]
Berechnungsbeiwerte	C, Beta [-]
Durchmesser des Grundkörpers	D [mm]
Außendurchmesser Zylinderschale	Da [mm]
Innendurchmesser Zylinderschale	Di [mm]
Elastizitätsmodul bei Berechnungstemp	E [N/mm ²]
Kraft	F [N]
Flächenträgheitsmoment	I [mm ⁴]
Festigkeitskennwert bei Berechnungstemp	K [N/mm ²]
Formänderungswiderstand des Dichtungswerkstoffes bei Raumtemp	KD [N/mm ²]
Festigkeitswert bei 20°C	K20 [N/mm ²]
Moment	M [N*mm]
Radius einer Wölbung	R [mm]
Sicherheitsbeiwert beim Berechnungsdruck	S [-]
Sicherheitsbeiwert beim Prüfdruck	S' [-]
Sicherheitsbeiwert gegen Undichtigkeit	SD [-]
Sicherheitsbeiwert gegen Elastische Einbeulen beim Berechnungsdruck	SK [-]
Sicherheitsbeiwert gegen Einbeulen beim Prüfdruck	S'K [-]
Lastspielsicherheit	SL [-]
Widerstandsmoment	W [mm ³]
Hilfswert	Z [-]
Querkontraktionszahl	v [-]
Spannung	σ [N/mm ²]
Temperatur	T [°C]
Höhe Bord - gewölbter Boden	h1 [mm]
	h2 [mm]
	r_iK [mm]
Schweißnahtfaktor	z [-]

Der Berechnungsdruck entspricht im Allgemeinen dem maximal zulässigen Druck. Durch die Füllung des Behälters entstehen statische Drücke, welche nur berücksichtigt werden müssen wenn sie die Belastung auf die Wandung um mehr 5 % erhöhen. So wird im Behälter ein geringer Überdruck erwartet, jedoch mit unbekanntem Wert und nur minimal über dem atmosphärischen Druck. Aufgrund dessen, das die AD-Merkblätter für die Auslegung eines Druckbehälters (ab 1,5 bar) geltend sind, wird ein maximaler zulässiger Druck von 1,5 bar festgelegt.

Durch die Befüllung mit Feststoffen wird eine zusätzliche statische Kraft eingebracht. Als Feststoff wurde Salz festgelegt, da dies die höhere Dichte und somit die größere Belastung für die Wandung mit sich bringt. Die Füllhöhe wurde mit 50 % = 400 mm definiert.

$$p_{ges} = p + \rho \cdot g \cdot h = 0,15 \frac{N}{mm^2} + 2,160 \frac{kg}{mm^3} \cdot 10^{-6} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 400mm$$

$$p_{ges} = 0,1585 \frac{N}{mm^2} = 0,1585MPa = 1,585bar$$

Die Berechnungstemperatur ist für die Auswahl des Werkstoffes und für die Festlegung des Festigkeitskennwertes ausschlaggebend. Je nach Beheizungsart kommen zu der zulässigen Betriebstemperatur Zuschläge hinzu. Für einen unbeheizten Behälter gilt die maximale Betriebstemperatur. Da der Behälter jedoch mit Pyrolysegas beschickt wird, welche durch Umgebungsluft gefördert werden, kann die Temperatur des Gasgemisches schwanken. Aufgrund dessen wird die höchste Betriebstemperatur, nach AD-Merkblatt B0, zuzüglich mit 20 K festgelegt. Das ergibt nun eine Berechnungstemperatur von 45°C.

In dem AD-Merkblatt B0 wird ebenfalls noch für den Festigkeitskennwert K auf die AD 2000 Merkblättern der Reihe W verwiesen. Hierbei entspricht das K der Streckgrenze 0,2% bei der Berechnungstemperatur.

Kurzname	Werkstoff- nummer	Bruchdehnung A min. %	Zugfestigkeit R _m min. N/mm ²	Streckgrenze 0,2% R _{p0,2} min. N/mm ²	Streckgrenze 1% R _{p1,0} min. N/mm ²
X5CrNi18- 10	1.4301	45	500	190	225

Für 50°C beträgt die Streckgrenze interpoliert 173 N/mm². Nun steht die Festlegung des Sicherheitsbeiwertes an. Hierbei wird im AD-Merkblatt B0 in Tafel 2 und Tafel 3 in Art des Werkstoffes unterschieden. Für Walz- und Schmiedestähle wird der Sicherheitsbeiwert S in Höhe von 1,5 definiert.

Für die Fertigungstechnische Wanddickenunterschreitung gilt in Abhängigkeit der Wanddicke die Minustoleranz von -0,3 mm. Jedoch stellen austenitische Stähle die Ausnahme, weil bei Innendruck die Minustoleranz nicht zu berücksichtigen ist. Somit beträgt c₁ = 0mm.

Laut AD 2000 Merkblatt B0 - Kapitel 9.2.3 beträgt der Abnutzungszuschlag für austenitische Stähle c₂ = 0mm.

Die Zylinderschale des Behälters unter inneren Überdruck wird nach dem AD-Merkblatt B1 berechnet und gilt für Behälter die das Verhältnis von D_a zu D_i von 1,2 nicht überschreiten.

$$\frac{D_a}{D_i} = \frac{800}{796} = 1,005 \leq 1,2$$

Der Geltungsbereich der Berechnungsvorschriften der AD-Merkblätter wurde somit bestätigt.

$$s = \frac{D_a \cdot p}{20 \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2 = \frac{800mm \cdot 1,585bar}{20 \cdot \frac{173 \frac{N}{mm^2}}{1,5} \cdot 0,85 + 1,585bar} + 0mm + 0mm$$

$$s = 0,6462mm$$

$$\sigma_{zul} = \frac{K}{S} = \frac{173}{1,5} \frac{N}{mm^2}$$

Aus Fertigungsgründen ist die kleinste mögliche Wanddicke geschweißter Zylinderschalen auf 2 mm festgelegt. Aus den Berechnungen ist ersichtlich, dass diese Wanddicke mehr als ausreichend ist.

Die gewölbten Böden in Form von Klöpperböden werden nach dem AD-Merkblatt B3 berechnet. Hier muss ebenfalls der Geltungsbereich der nachstehenden Berechnung geprüft werden.

Beziehung / Bedingung	Berechnung	Prüfung
$R = D_a$	$R = 800mm$	-
$r = 0,1 \cdot D_a$	$r = 80mm$	-
$h_1 \geq 3,5 \cdot s_e$	$h_1 \geq 7mm$	
$h_2 = 0,1935 \cdot D_a - 0,635 \cdot s_e$	$h_2 = 153,53mm$	-
$0,001 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \leq 0,1$	$0,001 \leq 0,0025 \leq 0,1$	Ja

Die Berechnung der Wanddicke der Kalotte und Halbkugel erfolgt über die Formel des AD-Merkblattes B1 (für Zylindrische Behälterwände), mit $D_a = 2 \cdot (R + s_e)$

Ein weiterer Unterschied liegt darin, dass der Deckel aus einem Stück gefertigt wird und somit keine Schweißnähte besitzt. Dadurch wird der Wert für den Schweißnahtfaktor auf $v = 1$ gesetzt. Daraus folgt:

$$s = \frac{2 \cdot (R + s_e) \cdot p}{20 \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2 = \frac{2 \cdot (800 + 2\text{mm}) \cdot 1,585\text{bar}}{20 \cdot \frac{173 \frac{N}{\text{mm}^2}}{1,5} \cdot 1 + 1,585\text{bar}} + 0\text{mm} + 0\text{mm}$$

$$s = 1,101\text{mm}$$

Jedoch gilt auch hier die fertigungstechnische Mindestwanddicke von 2mm.

Die Wanddicke der Kreppe und des Halbkugelanschlusses wird auch über eine Formel aus dem AD-Merkblatt B3 berechnet.

$$s = \frac{D_a \cdot p \cdot \beta}{40 \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2$$

Hierfür wird ein Berechnungsbeiwert β benötigt, welches iterativ ermittelt werden kann. β wird über das Bild 8 im AD-Merkblatt abgelesen, wobei die Auswahl der Kurve über das Verhältnis zwischen Innendurchmesser eines Stutzens und des Außendurchmesser. Es wird eine Stutzen für die Rauchgaszuleitung und die Lagerung gebraucht, jedoch wird einen ausreichend kleinen Innendurchmesser besitzen, wodurch das Verhältnis rund Null ist.

$$\frac{d_i}{D_a} = \frac{10\text{mm}}{800\text{mm}} = 0,0125 ;$$

nach der Nullkurve ist die nächste verfügbare für 0,15. Dadurch bietet sich die Nullkurve eher an.

An der X-Achse wird das Verhältnis zwischen Behälterwanddicke und Außendurchmesser abgelesen, welches sich iterativ mit der Änderung der Wanddicke ändert.

$$\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} = \frac{2\text{mm}}{800\text{mm}} = 0,0025$$

$$\beta = 4$$

$$s = \frac{D_a \cdot p \cdot \beta}{40 \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2 = \frac{800\text{mm} \cdot 1,585\text{bar} \cdot 4}{40 \cdot \frac{173 \frac{N}{\text{mm}^2}}{1,5} \cdot 1 + 1,585\text{bar}} + 0\text{mm} + 0\text{mm}$$

$$s = 1,099\text{mm}$$

1.Iteration

$$\frac{s_e}{D_a} = \frac{1,099mm}{800mm} = 0,00137$$

$$\beta = 5,4$$

$$s = \frac{D_a \cdot p \cdot \beta}{40 \frac{K}{S} \cdot v + p} = \frac{800mm \cdot 1,585bar \cdot 5,4}{40 \cdot \frac{173 \frac{N}{mm^2}}{1,5} + 1,585bar}$$

$$s = 1,484mm$$

2.Iteration

$$\frac{s_e}{D_a} = \frac{1,484mm}{800mm} = 0,001855$$

$$\beta = 4,75$$

$$s = \frac{D_a \cdot p \cdot \beta}{40 \frac{K}{S} \cdot v + p} = \frac{800mm \cdot 1,585bar \cdot 4,75}{40 \cdot \frac{173 \frac{N}{mm^2}}{1,5} + 1,585bar}$$

$$s = 1,305mm$$

3.Iteration

$$\frac{s_e}{D_a} = \frac{1,305mm}{800mm} = 0,00163$$

$$\beta = 5,03$$

$$s = \frac{D_a \cdot p \cdot \beta}{40 \frac{K}{S} \cdot v + p} = \frac{800mm \cdot 1,585bar \cdot 5,03}{40 \cdot \frac{173 \frac{N}{mm^2}}{1,5} + 1,585bar}$$

$$s = 1,382mm$$

4. Iteration

$$\frac{s_e}{D_a} = \frac{1,382mm}{800mm} = 0,001728$$

$$\beta = 4,9$$

$$s = \frac{D_a \cdot p \cdot \beta}{40 \frac{K}{S} \cdot v + p} = \frac{800mm \cdot 1,585bar \cdot 4,9}{40 \cdot \frac{173 \frac{N}{mm^2}}{1,5} + 1,585bar}$$

$$s = 1,346mm$$

Da sich die erforderliche Wanddicke kaum noch ändert, wird die Berechnung nach der 4. Iteration beendet. Die erforderliche Wanddicke beträgt laut der Berechnungsvorschrift des AD-Merkblattes B3 $s=1,346mm$. Jedoch greift auch hier wieder die Mindestwanddicke von 2 mm aus Fertigungsgründen.

Zur Überprüfung der Ergebnisse wurde die Berechnung der benötigten Wandstärke nach DIN ebenfalls durchgeführt. Hierbei führte die Rechenvorschrift auf rund das gleiche Ergebnis hinaus. Aufgrund dessen ist die Richtigkeit des Ergebnisses von einer Mindestwandstärke von 2 mm bestätigt.

Welche Wandstärke letzten Endes gefertigt wird, hängt von den Möglichkeiten der Hersteller ab.

4.2. Zusätzliche Komponenten für den Behälter

Auslegung der tragenden Tragösen nach der DIN 28086

Es sind vier Tragösen vorgesehen, wobei zwei jeweils Paarweise verwendet werden. Dadurch wird die Gewichtskraft auf zwei Tragösenpaare gleichmäßig aufgeteilt. Um Raum zu sparen, werden diese für eine kurze Seilwinde ausgelegt, wodurch der maximal mögliche Winkel $\alpha=60^\circ$ definiert wird. Zu tragendes Gewicht ist mit einer befüllten Trommel gleich 1000 kg (200 kg Trommel mit rund 800 kg Inhalt). Der Sicherheitsfaktor wird wieder auf 1,5 festgelegt.

Dadurch ergibt sich die Gewichtskraft $F_G=14715\text{N}$. Diese wird auf die zwei Tragösenpaare aufgeteilt, wobei bei diesen beide gleichmäßig belastet werden (DIN 28086 Bild 4)

$$F_L = \frac{F_G}{(2 \cdot \cos \alpha)} = \frac{14715\text{N}}{(2 \cdot \cos 60^\circ)} = 7357,5\text{N}$$

Die Maximal tragbare Kraft pro Tragöse der Nenngrößenstufe 1 beträgt bei 20°C 19 kN (siehe Tabelle 4 DIN 28086). Dieser Grenzwert wird bei weitem Unterboten.

Maximale Schäkkelkräfte:

$$F_{Se} = \frac{F_{Ge}}{(2 \cdot \cos \alpha)} = \frac{14715\text{N}}{(2 \cdot \cos 60^\circ)} = 7357,5\text{N}$$

$$F_{Se} = 7357,5\text{N} < 50.000\text{N} = F_S$$

F_S nach der Tabelle 3 der DIN 28086

$$F_{Le} = F_{Se}$$

Maximale Tragösenkraft

$$F_{Ge} = 7357,5\text{N} < 19.000\text{N} = F_G$$

F_G nach Tabelle 4

$$F_{Gg} = F_G \cdot \frac{K_{Lg}}{240} = 19.000N \cdot \frac{173 \frac{N}{mm^2}}{240 \frac{N}{mm^2}}$$

$$F_{Gg} = 13.695,8N$$

Verstärkungsblech s_2 :

Der Kraftehöhungsfaktor W wird durch den Kraftangriffswinkel β festgelegt, welcher sich auf die Symmetrieachse der Tragöse bezieht. Solange der Kraftangriffswinkel β geringer ist als 60° , beträgt $W = 1$. Ebenfalls wird ein Stoßfaktor von $\gamma=1,6$ hinzugefügt, um gegen mögliche Stoßbelastungen abzusichern.

$$s_2 = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{F_{Le} \cdot W \cdot \gamma}{K_{Vg}}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{7357,5N \cdot 1 \cdot 1,6}{173 \frac{N}{mm^2}}}$$

$$s_2 = 4,12mm \approx 5mm$$

Dies stimmt jedoch nur mit der Vorgabe der DIN 28086 überein, wenn die erhöhte Wandstärke von 3mm eingesetzt wird.

$$s_e \leq s_2 \leq 1,5s_e$$

$$3mm \leq s_2 \leq 4,5mm (\approx 5mm)$$

Kehlhahtdicke a_1 und a_2

$$a_1 \geq 0,7 \cdot s_{1\min} ; \text{ mit } s_{1\min} = \min(s_1; s_2) = \min(10mm; 5mm)$$

$$a_2 \geq 0,7 \cdot s_{2\min} ; \text{ mit } s_{2\min} = \min(s_2; s_e) = \min(5mm; 3mm)$$

$$\text{Daraus ergeben sich } a_1 \geq 0,7 \cdot 5mm = 3,5mm \text{ und } a_2 \geq 0,7 \cdot 3mm = 2,1mm$$

Maximale Apparatebodenbeanspruchung

Für diese Berechnung wird ein geometrischer Zwischenwert A eingeführt, welcher von der Tragösen-Nenngröße beeinflusst wird. Mit dem Innenradius der Behälterwand, an welcher die Tragösen befestigt werden und der Behälterwanddicke ohne jegliche Zuschläge kann man den Zwischenwert U ermitteln.

$$U = \frac{A}{\sqrt{R \cdot s_0}} = \frac{59}{\sqrt{400\text{mm} \cdot 2\text{mm}}}$$

$$U = 2,09$$

In dem man den Graphen des Bildes 6, für $U = 2,09$ extrapoliert, erhält man den Kraftbeiwert $f = 21,5$. Hiermit lässt sich nun die vom Apparateboden aufnehmbare maximale Kraft F_B im Bereich der Tragöse ermitteln. Hierzu nutzt man die Formel:

$$F_B = \frac{f \cdot s_{02} \cdot K_{B\vartheta}}{\gamma} = \frac{21,5 \cdot (2\text{mm})^2 \cdot 173 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,6} = 9298,75\text{N}$$

Folgende Bedingung muss mit F_B erfüllt werden.

$$F_{Le} \leq \frac{F_B}{W} \quad \hat{=} \quad 7357,5\text{N} \leq \frac{9298,75\text{N}}{1}$$

Maße einer Tragöse in mm:

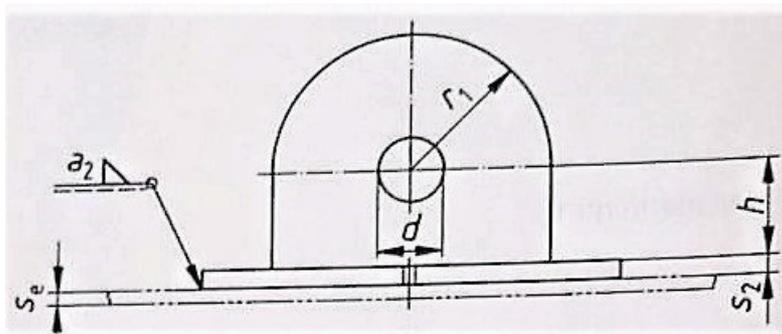


Abbildung 19: Tragöse nach DIN 28086 (Bild 1)

Nenngröße	b	d	h	l	r ₁	r ₂	s ₁	s ₂
1	90	38	55	170	55	20	10	5

Daraus ist erkennbar, wie weit eine Tragöse mit diesen Maßen von der Trommel abstehen würde. Da jedoch die Reibräder als einziges die Trommel von den tragenden Wellen fernhalten, muss gewährleistet werden, dass diese nicht miteinander kollidieren.

Der Durchmesser eines Reibrades beträgt 250 mm, welcher 180 mm größer ist als die besagte Welle. Das bedeutet, dass die Reibräder die Trommel 90 mm anheben. Vergleicht man dies nun mit den Abmessungen der Tragöse nach DIN 28086 werden mindestens 115 mm benötigt. Deshalb muss eine andere Variante gefunden werden.

Um die Trommel dennoch auf das Gestell setzen zu können, werden einklappbare Tragösen verwendet, welche die zu tragende Lasten ebenfalls bewältigen können. Solch eine ist in Abbildung 20 dargestellt. Durch eine Haltefeder wird das Anschlagselement nach der Montage in angelegter Position bleiben.

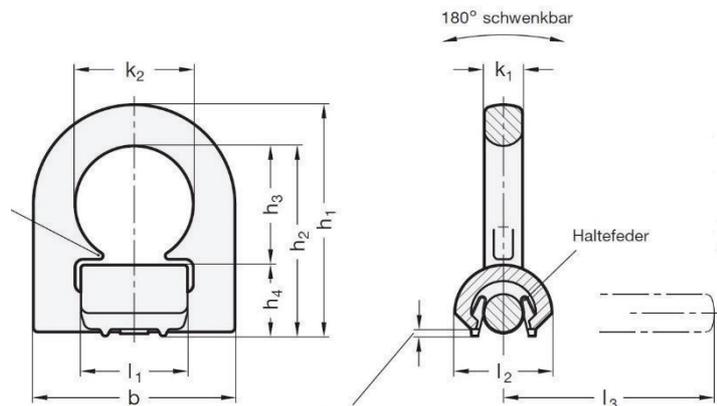


Abbildung 20: Schwenkbare Tragöse [13]

Um die im Abschnitt 4 berechneten Komponenten sinnvoll zu einem geschlossenen Behälter zu verbinden und die im Lastenheft beschriebenen Bedingungen zu erfüllen, sind jedoch noch einige zusätzlichen Komponenten nötig.

Ebenso die bereits ausführlich besprochenen Bleche, welche die gewünschte Durchmischung und Beräucherung der Produkte fördern sollen. Diese sollen mit Gewindebolzen versehen sein, welche durch für sie vorgesehenen Löcher im Behälter gesteckt werden und von außen festgeschraubt werden. Damit die Gewindebolzen nicht bei Belastung abbrechen und die Bleche lose im Inneren liegen, werden die Gewindebolzen in für sie vorgesehene Lücken festgeschweißt. Diese Stellen sollen 30 mm tief in das Blech eingeklickt werden.

Es gilt daher zu überprüfen, ob die Schweißnaht der auftretenden Last überhaupt standhält. Dafür wird das auftretende Biegemoment ermittelt, was bei vollem Betrieb durch das Produkt hervorgerufen wird. Bei voller Last wiegt das Produkt 864 kg. Dies bedeutet, dass ein 200 mm Blech in einer 800 mm Trommel dementsprechend $\frac{1}{4}$ heben wird. Es werden somit 216 kg über 200 mm gehoben.

$$M_b = \frac{F \cdot l}{2} = \frac{216 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,2 \text{ m}}{2} = 211,896 \text{ Nm}$$

Für den Stahl wird ein $R_e = R_{p0,2} = 190 \text{ N/mm}^2$ definiert, wodurch die zulässige Biegespannung ebenfalls bestimmt ist. Sie entspricht nämlich der Streckgrenze dividiert mit dem Sicherheitsfaktor 1,5.

$$\delta_{bzul} = \frac{R_{p0,2}}{\nu} = \frac{190 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,5} = 126,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Durch die nun bekannten Daten kann das erforderliche axiale Widerstandsmoment bestimmt werden. Dies definiert sich über zu schweißende Fläche, wodurch die Verbindung der Komponenten hergestellt wird.

$$W_{erf} = \frac{M_b}{\delta_{bzul}} = \frac{211896 \text{ Nmm}}{126,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 1672,819 \text{ mm}^3$$

Dieses muss vom Betrag her geringer sein, als das hervorgerufene axiale Flächenträgheitsmoment durch die 30 mm ausgeklickte Lücke.

$$W_{ges} = W_x + W = \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot 2 \cdot n + \frac{\pi \cdot d^3}{32} \cdot n = \frac{30 \text{ mm} \cdot (6 \text{ mm})^2}{6} \cdot 2 \cdot 5 + \frac{\pi \cdot (8 \text{ mm})^3}{32} \cdot 5$$

$$\underline{\underline{W_{ges} = 2051,327 \text{ mm}^3 \geq 1672,819 \text{ mm}^3 = W_{erf}}}$$

Mit Hilfe dieser Rechnung ist bewiesen, dass die verwendete Schweißnaht zur Befestigung der Bolzen an den Blechen an fünf Stellen mit der Länge von 30 mm ausreichend ist.

Des Weiteren wird erbeten, dass der Deckel einfach und schnell demontiert werden kann, sodass der Entleerungsprozess so zügig wie möglich beginnen kann. Dabei ist bei einem horizontal liegenden Behälter dieser Größe eine Schraubverbindung über Flansche unhandlich und zu Zeitaufwendig. Ein Grund dafür ist, dass der Deckel während der Demontage zusätzlich gelagert bzw. gehalten werden müsste. Damit dies jedoch nicht nötig ist, wird ein zusätzlicher Ring am Zylinder angeschweißt, welcher in erster Linie eine Auflagefläche für den Deckel bietet, aber auch eine Versteifung des Behälters bewirkt. Dieser Ring wird zusätzlich mit einer Nut versehen, welche für eine O-Ringdichtung nach DIN ISO 3601 vorgesehen ist. Die DIN ISO 3601 besteht aus fünf teilen, welche auch den Einbauraum des O-Ringes (Nuttiefe und -breite) definiert.

Nachdem der Deckel auf dem angeschweißten Ring gesetzt wurde, muss sichergestellt werden, dass dieser nicht wieder herunter fallen kann. Um das zu realisieren werden zweiteilige Spannverschlüsse am Deckel und Zylinder befestigt, welche selbst bei kleiner Baugröße bereits ausreichend große Spannkraft aufbauen. In der Abbildung 21 ist ein solcher Verschlussspanner in der Edelstahlvariante dargestellt. Die Verschlussspanner werden an hergestellten und festgeschweißten Blöcken verschraubt.



Abbildung 21: Edelstahl Verschlussspanner [14]

Aufgrund der Prozessüberwachung und der einfachen und schnellen Probennahme vom Räuchergut wird des Weiteren eine zusätzliche seitliche Klappe am Behälter vorgesehen. Diese Klappe wird ebenfalls auf einen gefertigten Auflagering aufgesetzt und soll mit Hilfe von den eben beschriebenen Verschlussspannern verschlossen werden. Die Klappe wird jedoch an einer Seite mit zwei Scharnieren gehalten, welche an dafür vorgesehenen Bohrungen am Zylinder festgeschraubt werden.

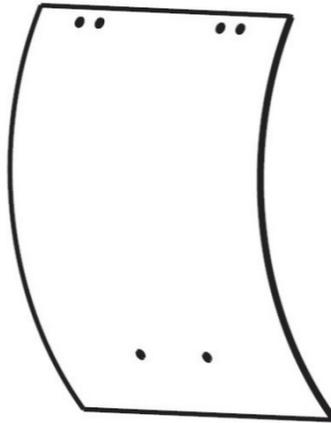


Abbildung 22: Seitlicher Deckel mit Bohrungen für Scharniere und Griff

Der seitliche Deckel ist in der Abbildung 22 nochmals kurz dargestellt. Hierbei erkennt man zwei weitere Bohrungen, welche für den Griff vorgesehen sind. Auch dieser wird mit Schrauben am seitlichen Deckel befestigt.

Das selbige wird am Klöpperboden-förmigen Behälterdeckel vorgenommen, wobei hier symmetrisch in einem schulterbreiten Abstand zwei Griffe angebracht werden. In der Mitte der beiden Griffe wird, wie auch am Behälterboden, ein Stutzen festgeschweißt, welcher als Rauchzu- und -ableitung fungiert. Mit Hilfe einer Drehbaren Kupplung ist es nun möglich den dafür vorgesehenen Schlauch zu befestigen. Für diesen Zweck eignen sich besonders gut die sogenannten Feuerwehrcupplungen des Types Storz [15]. Diese besitzen eine schnelle und sichere Verbindung und sind durch Gleitlager gegeneinander noch Drehbar. Dadurch ist eine Rotation der Trommel möglich, obwohl diese noch mit den rauchführenden Schläuchen verbunden ist.

Alle dafür benötigten Durchgangslöcher für Schrauben, welche nicht für die Befestigung mit einem Gewinde vorgesehen sind, werden nach der DIN EN 20273 mit der Toleranzklasse Mittel (H13) gefertigt.

Die Rotation wird durch einen Elektromotor mit Getriebe angetrieben, welcher seine Leistung über mehrere Antriebs Elemente auf die Trommel überträgt. Die letzten Elemente sind Reibräder, welche in einem späteren Kapitel noch ausgelegt werden. Jedoch erfordern diese eine zusätzliche Lauffläche als Verstärkung, damit eine Beschädigung/Einbeulung des Behälters vermieden werden kann. Ebenfalls sollte jeweils ein Begrenzungsring vorhanden sein, damit die Trommel nicht vom Gestell herunterläuft. Diese Laufflächen werden am Behälter festgeschweißt und somit dauerhaft fixiert.

Dichtungen

Durch die benötigten Bohrungen und Öffnungen in der Behälterwand, besteht nun erhöhte Gefahr der Undichtigkeit. Damit die möglichen Leckagestellen gestopft und alle Öffnungen richtig verschlossen werden können, sind verschiedene Dichtungen dringend erforderlich. Wie bereits bei dem erwähnten Auflagering für den Deckel, ist bei dieser Komponente ein O-Ring vorgesehen. Dieser wird aus handelsüblichen Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) gefertigt. Er weist eine gute Quellbeständigkeit gegenüber den in der Pyrolyse gebildete Organischen Stoffen auf und kann im Bereich der Lebensmittelindustrie verwendet werden. [16]

Mit dem selbigen Werkstoff soll die seitliche Klappe abgedichtet werden, wobei man hier auf dem dafür vorgesehenen Auflageblech eine Klebedichtung anbringen kann. Diese bewirkt einen luftdichten Verschluss durch die Anpresskraft des Spannverschlusses.

Die noch kritischen Stellen bilden die Bohrungen in der Behälterwand, welche jedoch von verschiedenen Bauteilen mit Schraubverbindungen genutzt werden. Hierfür werden Gewindedichtfäden verwendet, welche man einfach vor dem Verschrauben um das Gewinde wickeln kann. Der Faden passt sich durch den wirkenden Druck an und bildet eine luftdichte Verbindung.

Messtechnik

Es wurde die Überwachung der Prozessparameter im Behälter gewünscht. Jedoch ist dies nicht über ein MSR-Stutzen realisierbar, wenn dieser nicht mittig sitzt. Bei einem nicht zentrisch sitzenden MSR-Stutzen würden sich die Messfühler und deren Kabel während des Betriebes mitdrehen und eine Gefahr für Mensch und Technik darstellen.

Aufgrund dessen muss zu Kabellosen Messgeräten und Messfühlern gegriffen werden. Diese können deshalb auch durch den Auftraggeber nachträglich noch angebracht werden. Die Überwachung der Rauchzusammensetzung kann während der Rauchzuleitung über den Schlauch gemessen werden.

Gewichtsbestimmung der anzutreibenden Masse

Die anzutreibende Masse wird größten Teils von der Trommel und deren Füllung vorgegeben. Die zu beräuchernden Medien werden vom Auftragsgeber generell durch dessen Produktpalette definiert, welche mit Salz, Zucker, Pfeffer und Paprika feststeht. Durch bekannte Dichten kann eine erste Hochrechnung vorgenommen werden, wie viel Masse in die Trommel eingegeben wird.

Da die Dichten von Pfeffer und Paprika stark variieren kann und daher als unbekannt angenommen werden müssen, wird die Auslegung für Salz mit $2,16 \text{ g/cm}^3$ vorgenommen. Dieses besitzt die größere Dichte gegenüber Zucker, $1,26 \text{ g/cm}^3$.

Wie bereits festgelegt, verfügt die Trommel über ein nutzbares Gesamtvolumen von 1 m^3 , wobei eine ideale Füllmenge von 40 % definiert wurde. Daraus folgt ein $V_{\text{Medium}} = 0,4 \text{ m}^3$.

$$m_{\text{Medium}} = \frac{\rho_{\text{Medium}}}{V_{\text{Medium}}} = \frac{2,16 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}}{400 \text{ dm}^3} = 864 \text{ kg}$$

Das Gewicht der leeren Trommel setzt sich aus Mantel, Deckel, Innenleben und außenliegenden Komponenten, wie Tragösen, Führungsringe und Anschlüssen zusammen. Nach der zugehörigen Berechnung der benötigten Wanddicken im Kapitel 4.1 kann über die vom Hersteller angegebene Dichte, für den Stahl 1.4301, das Gewicht ermittelt werden. Die Wanddicke beträgt laut der Berechnungen nach DIN 13445-3 und AD-Merkblättern für den gesamten Behälter 2 mm.

Anhand der Auslegungsberechnung nach den AD 2000 – Merkblättern steht das Gewicht der Trommel generell fest. Aus mehreren Gründen wird die Wandstärke jedoch auf 3 mm festgelegt. Zum einen wird die Trommel nicht fest verankert und es besteht die Möglichkeit, dass sie Stößen ausgesetzt ist. Des Weiteren verringert sich der Fertigungstechnische Aufwand bei einer geringeren Wandstärke. Übrige Komponenten, wie beispielsweise die Verstärkungsbleche und die Gestaltung des Innenlebens können durch die Volumina der einzelnen Bauteile überschlägig berechnet werden.

Hinzu kommen die bereits erwähnten zwei Verstärkungsbleche, welche als Kontaktfläche mit den Reibrädern dienen soll. Da diese die gesamte Last der gefüllten Trommel getragen wird, ist eine Verstärkung der Wandung nötig. Ebenfalls muss die axiale Belastung bei einer möglichen Schiefstellung des Systems ausgeglichen werden. Dafür wird ein Tragring jeweils an den Verstärkungsringen angebracht, damit die Trommel nicht von den Verstärkungsringen herunterlaufen kann.

Die Gestaltung des Innenlebens durch die geraden oder gebogenen Bleche bringt ebenfalls einen erheblichen Anteil des Gewichtes. Hinzu kommt das Masse von vier Tragösen und den verschiedenen Griffen, Scharniere und Spannverschlüsse für den seitlichen und vorderen Deckel.

Tabelle 10: Übersicht über die anzutreibenden Massen

	Mantel	Böden	4x Durchmischungs- blech	2x Verstärkungs- ring	Deckel	Klappe
Masse [kg]	90	15	60	28	20	5

	Auflagefläche Deckel	Auflagefläche Klappe	Zwei Stützen	Medium
Masse [kg]	6,5	2	0,6	864,0

Für die Auslegung der Antriebselemente wird zu bewegende Masse benötigt. In der Tabelle 11 werden diese kurz überschlagen und zusammengefasst. Unter Antriebselemente zählen alle Komponenten, welche vom Motor bewegt werden müssen, damit die Trommel letzten Endes rotieren kann.

Tabelle 11: Relevante Lasten zur Auslegungsberechnung

	<u>Masse [kg]</u>
Befüllter Behälter	1091
Antriebskomponenten	200
Summe der Massen	1291
Auslegungsgewicht	1936,5

Zur Vereinfachung wird für den Motor die zu bewegende Masse auf **2000 kg** gesetzt. Mit dem Sicherheitsfaktor von 1,5 sollte ausreichend Reserve vorhanden sein für mögliche Änderungen

4.3. Auslegung der Antriebskomponenten

Elektromotor

Das Konzept der Trommel basiert darauf, dass wir den Behälter um die eigene Achse rotieren lassen. Damit sich die Trommel letzten Endes dreht und die Rauchkonzentration für das gesamte Gut homogen hält, muss der Antrieb dementsprechend ausgelegt werden, welcher die nötige Leistung und Drehmoment aufbringen kann. Die niedrigen Drehzahlen könnte ein Elektromotor nur in Verbindung mit einem großen und schweren Getriebe aufbringen. Die direkte Verbindung des Elektromotors mit der Antriebswelle, mit Hilfe einer Kupplung, ist deshalb nicht dienlich, da der Motor Aufgrund des Gewichtes extra gelagert oder die Antriebswelle auf eine unangenehme Arbeitshöhe herabgesetzt werden müsste. Damit das Getriebe eine niedrigere Übersetzung haben kann und somit kleiner und leichter werden würde, werden zusätzliche Übersetzungsstufen eingebaut. Dies wird mit Hilfe der Wahl von unterschiedlich großen Zahnscheiben realisiert. Gleichzeitig kann die Antriebseinheit um Platz zu sparen nun unter der Trommel angeordnet werden. Im folgenden Abschnitt wird die Drehzahl überschlägig aus den Produktdaten der Zahnscheiben und Reibräder ermittelt.

Die Trommel soll mit einer Drehzahl von rund $n_T = 5$ rpm bewegt werden, wodurch sich eine Reibrad Drehzahl über das Verhältnis der Durchmesser abschätzen lässt.

$$i = \frac{n_T}{n_{RR}} = \frac{d_{RR}}{d_T} \quad i = \frac{5 \text{ rpm}}{n_{RR}} = \frac{250}{800} \quad n_{RR} = \frac{5 \frac{1}{\text{min}} \cdot 800 \text{ mm}}{250 \text{ mm}} = 16 \frac{1}{\text{min}}$$

Das bedeutet, dass sich die an der Welle befestigte Zahnriemenscheibe ebenfalls mit dieser Geschwindigkeit dreht. Mit Hilfe der Wahl der Riemenscheiben ist es auch noch möglich eine Übersetzung ins schnelle zu bewirken. Für die erste Auslegung wird diese Übersetzung mit $i_{Riemen} = 3$ festgelegt. Dadurch ergibt sich eine Drehzahl für die zweite Zahnriemenscheibe und somit auch für die abgehende Drehzahl des Motors von rund 48 Umdrehungen pro Minute.

Es wird von einem Motor für die Netzspannung von 230/400 Volt mit einer Frequenz von 50 Hz ausgegangen. Dadurch ergibt sich eine Normdrehzahl des Motors von rund 1450 Umdrehungen pro Minute. Um nun auf die Abgangsdrehzahl von 48 zu kommen, wird ein Getriebe eingesetzt welches eine Übersetzung von $i_{Getriebe} = 29$ besitzt.

Der nächste Schritt gilt der Berechnung des nötigen Drehmomentes um die Trommel in die gewünschte Rotation zu bringen. Hierfür wird die zu bewegende Masse herangezogen und eine Abtriebswelle für den Motor ausgewählt, welche dies bewerkstelligen soll.

Es wird, wie zuvor mit einem Sicherheitsfaktor für die Masse gerechnet, damit die Trommel bei anderen Medien und mehr Inhalt dennoch genutzt werden kann. Dadurch wird der Motor für eine Masse von zwei Tonnen ausgelegt und soll mit einer Antriebswelle von 40 mm Stärke versehen sein.

Die nachstehenden Formeln und Berechnungen basieren auf dem Grundwissen der Physik.

$$M_{Motor} = F \cdot s = F \cdot \frac{d_{Motor}}{2} = 19620N \cdot 0,02m = 392,4Nm$$

Da das größte Drehmoment jedoch im Anfahren des Motors benötigt wird, um die Haftreibung der Komponenten überwinden zu können, muss hierfür ein Faktor für die Auslegung eingeführt werden. In der Regel beträgt der Faktor $f_{Anfahr} = 1,5$.

Dadurch ergibt sich ein benötigtes Anfahrtdrehmoment von M_{Anfahr} .

$$M_{Anfahr} = M_{Motor} \cdot f_{Anfahr} = 392,4Nm \cdot 1,5 = 588,6Nm$$

Mit Hilfe des ermittelten Drehmomentes kann nun die tatsächlich benötigte Leistung bestimmt werden.

$$P = 2 \cdot \pi \cdot M_{Anfahr} \cdot n = 2 \cdot \pi \cdot 588,6Nm \cdot \frac{50}{60 \frac{s}{min} \cdot min} = 3081,9W$$

Aufgrund dessen, das auf ein Normmotor zurückgegriffen werden soll, muss die nächst größere Leistungsstufe ausgewählt werden. In diesem Fall wird ein 4 kW Motor benötigt. Dieser bringt dementsprechend ein anderes Drehmoment auf. Mit Umstellen der oberen Gleichung kann auch das vorhandene Drehmoment ermittelt werden.

$$M_{4kW} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{4000W}{2 \cdot \pi \cdot \frac{50}{60s}} = 763,9Nm$$

Somit sind alle relevanten Eckdaten für die Auswahl des Elektromotors definiert und können nun für die weiteren Berechnungen des Antriebssystems herangezogen werden.

Ein Elektromotor mit 4 kW Leistung entspricht einer 4 poliger IEC-Normmotorengröße von 112M. Zur Berechnung nutzen wird die Maße der Abgangswelle des Getriebes, da dieses dem IEC Normmotor nachgeschaltet ist.

Mit der nun feststehenden Motorengröße wird eine Verstellmöglichkeit für den Spannweg des Antriebsriemens gesucht. Um den Riemen zu spannen, muss eine oder beide Zahnscheiben bewegt werden, damit sich der Achsabstand vergrößert. Weil die Antriebswelle an die Lagerung und somit an das Gestell gebunden ist, kommt nur die Bewegung der motorseitigen Zahnscheibe in Frage. Um den Motor zum Spannungsaufbau zu bewegen, wäre eine Verschiebung in Y- und in X-Richtung denkbar. Man muss jedoch den wirtschaftlichen und Handhabungsfaktor bedenken. Hierbei ist eine Verschiebung in Y-Richtung mit Hilfe eines hydraulischen Hubs nicht wirtschaftlich genug und mit Schrauben die Höhenverschiebung zu aufwendig. In X-Richtung empfiehlt sich die Nutzung von Motorspannschienen, welche durch zwei Schrauben die Verschiebung bewirken. Diese müssen exakt eingestellt sein, können aber mit einfachen Mitteln verstellt werden. Diese gibt es für die verschiedenen Motorengrößen und müssen dementsprechend ausgewählt werden. In unserem Fall ist es für die Motorengröße 112M.



Abbildung 23: Motorspannschienen für genormte Motoren der Motorengröße 112 [14]

Die entsprechenden Motorspannschienen sind paarweise erhältlich und werden aus Stahl gefertigt. Sie ähneln der DIN 42923 und sie sind für die Leistung und Größen der I.E.C. Normmotoren bestimmt.

Auslegung eines Zahnriemens von Gates

Für die Schwingungs- und Stoßfreie Übertragung der Leistung zum Antreiben der Trommel kann ein Zahnriemen verwendet werden.

C1	1,7	Grundbelastung
C2	0,0	Übersetzungszuschlag
C3	1,7	Gesamtbelastungsfaktor

Für die Berechnung werden wieder verschiedene Belastungsfaktoren c_x eingeführt, durch welche die gegebenen Betriebsbedingungen und zusätzlichen Annahmen mit betrachtet werden. Der Faktor c_1 steht für die Grundbelastung und wird über durch Betriebsdauer und Umgebungsbedingungen beeinflusst. Für einen gleichmäßigen Lauf mit einer täglichen Betriebsdauer von mehr als 16 h wird ein Wert von $c_1 = 1,7$ festgelegt. [17]

Damit das Getriebe eine geringere Übersetzung zu erbringen hat, wird bereits mit Hilfe der Reibräder und den Zahnriemen die Drehzahl des Antriebes verringert. Aus diesem Grund wird eine Übersetzung von $i = 3$ ins langsame mit den zu wählenden Zahnrädern bewirkt. Bei einer Übersetzung ins schnelle muss ein Übersetzungszuschlag dazu addiert werden, wobei dies in diesem Fall nicht nötig ist ($c_2 = 0,0$).

Die Summe der eben genannten Faktoren bilden den Gesamtbelastungsfaktor c_3 .

$$c_3 = c_1 + c_2 = 1,7 + 0,0 = 1,7$$

Dieser Faktor wird mit der vorgegebenen Motorleistung multipliziert um die für die Auslegung benötigte Berechnungsleistung zu erhalten.

$$P_B = P \cdot c_3 = 4kW \cdot 1,7 = 6,8kW$$

Es wird von einem reinen Gummi-Riemen abgesehen und auf einen PolyChain® Riemen mit Carbon-Faser-Verstärkung zurückgegriffen, da dieser chemisch und mechanisch beständiger ist. Er wird aus einem Verbund von Materialien hergestellt, welche von einer Nylonschicht ummantelt werden. Noch hinzukommt, dass Aufgrund der resultierenden hohen Steifigkeit weniger Weg zum Spannen des Riemens nötig ist. Da die zu übertragende Leistung feststeht, kann nun auch die Breite und Teilung des Riemens über Herstellerdaten empfohlen werden. So ergeben sich nach dem Konstruktion und Designvorschriften des Herstellers GATES® und den darin enthaltenen Diagrammen folgende Wahl. Es wird ein Riemen mit einer 14er Teilung empfohlen, welcher eine Breite von 37mm beträgt. Über die festgelegte Übersetzung soll jetzt eine geeignete Zahnradpaarung gewählt werden. Der gewählte Riemen ist in der Abbildung 24 kurz dargestellt.



Abbildung 24: PolyChain Carbon Riemen [18]

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{d_g}{d_k} = \frac{n_{Motor}}{n_{Reibrad}} \rightarrow 3 = \frac{112}{38} = \frac{496,3mm}{166,5mm} = \frac{51 \frac{1}{min}}{17 \frac{1}{min}}$$

Durch die Größe der festgelegten Zahnscheiben kann ein empfehlenswerter Bereich für den Achsabstand a berechnet werden.

$$a > 0,5 \cdot (d_k + d_g) + 15mm = 0,5 \cdot (166,5mm + 496,3mm) + 15mm = 346,4mm$$

$$a < 2 \cdot (d_k + d_g) = 2 \cdot (166,5mm + 496,3mm) = 1325,7mm$$

$$346,4mm \leq a \leq 1325,7mm$$

In dem angegebenen Bereich kann ein Wert für den Achsabstand a beliebig gewählt werden. Es muss hierbei darauf geachtet werden, welcher Wert a für die Konstruktion am dienlichsten ist. In diesem Fall wird $a=500mm$ gesetzt, da dies der Höhe des Gestells in etwa entspricht. Dies entspricht jedoch nur einer vorzeitigen Schätzung. Der tatsächliche Wert wird später berechnet.

Durch den Achsenabstand und die Größe der Zahnräder kann die Wirklänge des Zahnriemens berechnet werden. Anhand der Wirklänge ist es möglich die tatsächliche Länge des Riemens zu wählen.

$$l_{wirk} \approx 2 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot (d_g + d_k) + \frac{(d_g - d_k)^2}{4 \cdot a}$$

$$l_{wirk} \approx 2 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot (496,3mm + 166,5mm) + \frac{(496,3mm - 166,5mm)^2}{4 \cdot 500mm}$$

$$l_{wirk} \approx 2095,6mm \Rightarrow 2100mm$$

Über die tatsächliche Länge des Zahnriemens, ist es möglich den richtigen Achsenabstand C zu ermitteln. Zur Vereinfachung der Berechnung wird eine Zusatzvariable K eingeführt, welche anschließend genutzt wird um den Achsenabstand zu bestimmen. [18]

$$K = \frac{L_{wirk}}{4} - \frac{\pi}{8} \cdot (d_{wg} + d_{wk}) = \frac{2100}{4} - \frac{\pi}{8} \cdot (496,3mm + 166,5mm)$$

$$K = 264,7mm$$

$$a_{ges} = K + \sqrt{\frac{K^2 - (d_{wg} - d_{wk})^2}{8}} = 264,7mm + \sqrt{\frac{(264,7mm)^2 - (496,3mm - 166,5mm)^2}{8}}$$

$$a_{ges} = 502,3mm$$

Da die Wahl der Zahnräder und Ihre Durchmesser nun getroffen wurde, muss überprüft werden, ob die Anzahl der gleichzeitig angreifenden Zähne groß genug ist. Ist die berechnete Anzahl zu gering, verringert sich dementsprechend auch die übertragbare Leistung. Diese ist maximal, wenn 6 oder mehr Zähne gleichzeitig in den Riemen eingreifen.

$$z_e = z_k \cdot \left(0,5 - \frac{(d_g - d_k)}{6 \cdot a_{ges}} \right) = 38 \cdot \left(0,5 - \frac{(496,3 - 166,5)}{6 \cdot 502,3mm} \right)$$

$$z_e = 14,8 \geq 6$$

Die Berechnung ergab eine eingreifende und somit gleichzeitig wirkende Zahnzahl von rund 14 Zähnen, welche deutlich größer ist als die mindestens benötigten sechs Zähne.

Damit ein solcher Riemen die Leistung vom Motor auf die Welle übertragen kann, muss dieser richtig gespannt werden. Das technische Handbuch gibt über den notwendigen Stellweg dafür genaue Vorgaben. So wird eine Mindestspannung von 220 lb (Pfund) vorgegeben und die empfohlene Installationsspannung kann berechnet werden.

Für die vorgesehene Montage und mögliche Wechsel des Riemens muss ein möglicher Verstellweg vorgesehen sein. Durch zwei Varianten der Gestaltung der Zahnräder, existieren dementsprechend auch zwei Möglichkeiten dies zu realisieren.

Minimalwert für Montage (eine Zahnscheibe mit Bordscheibe)	Minimalwert für Montage (beide Zahnscheiben mit Bordscheiben)
mm	Mm
31,2	50,0

Aus Kostengründen werden eine Zahnscheibe mit Bordscheiben und eine ohne Bordscheibe angewendet, dadurch steht der nötige Verstellweg von 31,2 mm fest. [17]

Der Hersteller gibt für den ausgewählten Zahnriemen von einer Breite von 37 mm eine übertragbare Leistung für verschiedene Drehzahlen an. Für 50 Umdrehungen pro Minute extrapolieren wir dementsprechend einen übertragbaren Wert von 10,0 kW. Mit unterschiedliche Längen des Riemens ändert sich diese ebenfalls, wodurch ein Längenfaktor eingeführt wird. Für eine Riemenlänge von 2100 mm gilt der Faktor $l = 0,96$.

$$P_U = P_N \cdot l = 10,0kW \cdot 0,96$$

$$P_U = 9,6W$$

Die somit ermittelte übertragbare Leistung muss größer sein als die anfangs ermittelte Berechnungsleistung.

$$P_U = 9,6kW \geq 6,8kW = P_B$$

Damit ist bewiesen, dass der ausgewählten Zahnriemen mit den beiden Zahnscheiben die benötigte Leistung übertragen kann.

Die Bezeichnung der ausgewählten Zahnriemen und -scheiben sind in der zusammengefasst.

Zahnriemen	Zahnscheibe klein	Zahnscheibe groß
Poly Chain Carbon PCC 14MGT-2100-37	14MX-38S-37	14MX-112S-37
	TB 2517-40	TB 3020-70

Für die Montage auf den entsprechenden Wellen stehen durch die Wahl der Zahnscheiben ebenfalls die dafür vorgesehenen Taper-Spannbuchsen fest. Diese werden in der Zahnscheibe und auf der Welle festgespannt. Übertragen wird die Leistung jedoch über eine Passfeder, welche in einer Nut nach DIN sitzt.

Die in den nachstehenden Abbildung 25, Abbildung 26 und Abbildung 27 abgebildeten Komponenten sind die kleine und große Zahnscheibe, sowie die zur Befestigung benötigte Taperspannbuchse. Diese ist von der Bauform für beide Zahnscheiben gleich, unterscheidet sich jedoch aber von der Größe und der Bohrung für die Welle.



Abbildung 25: PolyChain Zahnscheibe mit 38 Zähne
[18]



Abbildung 26: PolyChain Zahnscheibe mit 112 Zähnen
[18]



Abbildung 27: Taperspannbuchse [14]

K	Längenfaktor
P_N	Standard-Übertragungsleistung
$P_{\dot{U}}$	Übertragungsleistung
a_{ges}	Achsabstand
z_e	Zahneingriffsfaktor
l	Längenfaktor
d_g	Durchmesser große Zahnscheibe
d_k	Durchmesser kleine Zahnscheibe
z_1	Zähnezahl kleine Zahnscheibe
z_2	Zähnezahl große Zahnscheibe
P_B	Berechnungsleistung
l_{wirk}	Wirklänge Zahnriemen

Auslegung der Antriebswelle

Wie bereits erwähnt sind die antreibenden Reibräder auf einer Welle befestigt, welche für die zu tragende Last dementsprechend ausgelegt sein müssen. Hierfür werden die Lagerreaktionen ermittelt und die vorherrschenden Biege- und Torsionsmomente berechnet. Die Welle mit der Anordnung der Lasten ist in der Abbildung 28 dargestellt. [19]



Abbildung 28: Grafische Darstellung der Welle

Die zuvor ermittelten Gewichte geben die Kräfteinwirkungen auf die Welle vor, wodurch sich vier verschiedene Kräfte in Y-Richtung ergeben. Das Gewicht der Trommel wird von vier Reibrädern getragen, welche auf zwei Wellen befestigt wurden. Zusätzlich muss die Kräfteinwirkung durch die Spannung und das Gewicht des Zahnriemens und des Zahnrads als weiterer Kräfteinwirkung mit betrachtet werden (ganz rechts in der Abbildung). Das Eigengewicht der Welle kann vernachlässigt werden, da es deutlich kleiner als die anderen Belastungen ist.

Die hervorgerufenen Kräfte werden mit dem Formelzeichen Q_n betitelt. Es werden für die Berechnungen keine Strecklasten verwendet, dadurch werden die Lasten so einberechnet, als ob sie punktuell auftreten. Dies führt zu einer zusätzlichen Sicherheit in der Auslegung.

Tabelle 12: Aufzunehmende Lasten

n	Kraft Q_n [N (kg)]	Wirklänge x_n [m]
Trommel – Reibrad (1)	4905 (500)	0,16
Trommel – Reibrad (2)	4905 (500)	0,16
Zahnrad (3)	11589	0,05

Da keine Belastungen in X – Richtung auftreten, muss das Festlager dahingehend keine Kräfte aufnehmen. Um jedoch für eine thermische Ausdehnung ausgelegt zu sein, ist es sinnvoller das Lager B als Festlager zu definieren. Dadurch ist die Antriebsseite fixiert. In Y – Richtung wirken alle aufgelisteten Kräfte, welche von den beiden Lagern A und B aufgenommen werden müssen. Dementsprechend ergibt sich für die Berechnung des Gleichgewichtes folgende Formel.

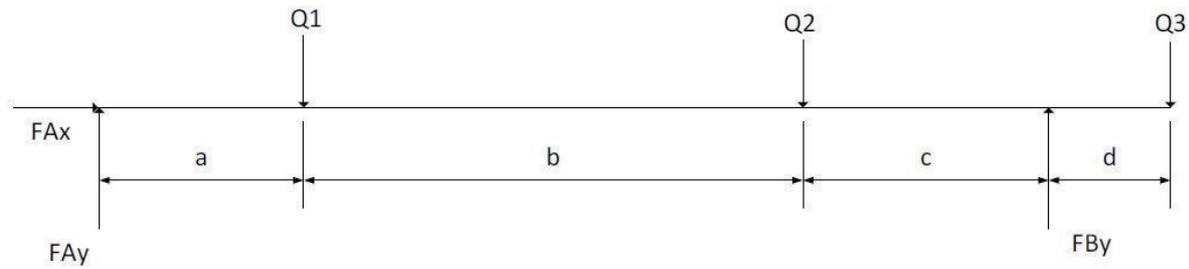


Abbildung 29: Kraftübersicht Antriebswelle

$$\uparrow F_{Ay} + F_{By} - (Q_1 + Q_2 + Q_3) = 0$$

Um zu berechnen, welche Lasten die beiden Lager exakt jeweils aufnehmen müssen, wird eine weitere Gleichung benötigt. Die nachstehende Gleichung behandelt die Lasten aus dem Blickpunkt des Lagers A.

$$\overset{A}{\curvearrowright} Q_1 \cdot (a + 0,5 \cdot r_1) + Q_2 \cdot (a + b + r_1 + 0,5 \cdot r_2) - F_{By} \cdot (a + b + c + r_1 + r_2) + Q_3 \cdot (a + b + c + d + r_1 + r_2 + z) = 0$$

Mit Hilfe dieser Gleichung kann F_{By} ermittelt werden und in die obere erste Formel eingesetzt werden. Dadurch erhält man F_{Ay} . In den nachfolgenden Abbildungen ist für die Vollständigkeit F_{Ax} repräsentativ für die Axialen auftretenden Kräfte dargestellt. Ist jedoch in allen Fällen gleich Null.

Durch ansetzen von vier theoretischen Schnitten ist es nun möglich den Querkrafts- und Biegespannungsverlauf zu bestimmen. Zur Überprüfung werden die Schnitte von beiden Seiten betrachtet, welche jedoch zum selben Ergebnis führen müssen.

Ausgehend von der berechneten Lagerkraft F_{Ay} können nun die lokal angreifenden Kräfte stufenweise ermittelt werden. Durch selbiges Vorgehen wird das lokal resultierende Biegemoment ermittelt.

Tabelle 13: Berechnete Lagerkräfte

n	Kraft F_n [N]	Wirklänge x_n [m]
Lager A	3724,77	0,0699
Lager B	17674,23	0,0699

Für die Punktuell ansetzenden Kräfte werden die Wirkflächen der Lasten auf die Abstände a, b, c und d aufgeteilt. Daraus ergeben sich für die Schnittberechnungen folgende Maße.

	Wirklängen [mm]	Schnittmaße [mm]
a	180	260
r1	160	0
b	950	1110
r2	160	0
c	180	260
d	116	166
z	50	0

Erster Schnitt von links:

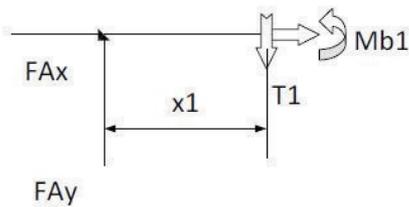


Abbildung 30: Erster Schnitt von links - Zwischen Lager A und Reibrad 1

$$\uparrow F_{Ay} - T_1 = 0$$

$$T_1(0m \leq x_1 \leq 0,26m) = 3724,77N$$

$$\curvearrowright F_{Ay} \cdot \frac{x_1^2}{2} - M_{b1} = 0$$

$$M_{b1}(0m \leq x_1 \leq 0,26m) = 3724,77N \cdot 0,26m$$

$$M_{b1}(x_1 = 0m) = 0Nm \quad M_{b1}(x_1 = a = 0,26m) = 968,44Nm$$

Die Ergebnisse zeigen, dass im ersten Abschnitt nur die Lagerkraft von A_Y anliegt, welche mit zunehmender Länge x_1 zu einem steigendem Biegemoment führt. Dieses ist am Startpunkt (Lager A) gleich Null.

Zweiter Schnitt von links:

Genau wie für den ersten Schnitt, wird nun für den zweiten Schnitt vorgegangen, wobei sich das Biegemoment über die Länge x_2 nun verändert.

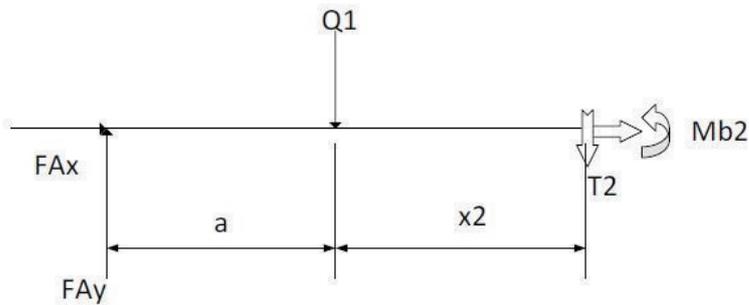


Abbildung 31: Zweiter Schnitt von links - Zwischen Reibrad 1 und Reibrad 2

$$\uparrow F_{Ay} - T_2 - Q_1 = 0$$

$$T_2(0m \leq x_2 \leq 1,11m) = 3724,77N - 4905N$$

$$T_2(0m \leq x_2 \leq 1,11m) = -1180,23N$$

$$\curvearrowright F_{Ay} \cdot (x_2 + a) - M_{b2} - Q_1 \cdot x_2 = 0$$

$$M_{b2}(0m \leq x_2 \leq 1,11m) = 3724,77N \cdot (1,11m + 0,26m) - 4905N \cdot 1,11m$$

$$M_{b2}(x_2 = 0m) = 968,44Nm$$

$$M_{b2}(x_2 = b = 1,11m) = -341,61Nm$$

Dritter Schnitt von links:

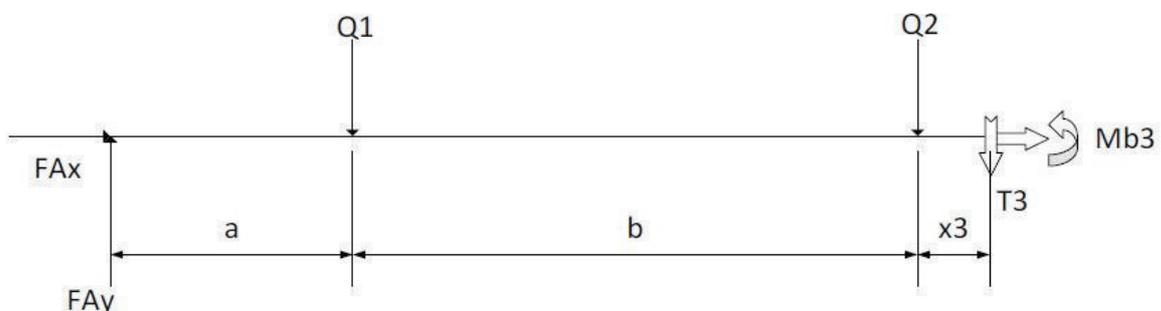


Abbildung 32: Dritter Schnitt von links - Zwischen Reibrad 2 und Lager B

$$\uparrow F_{Ay} - T_3 - Q_1 - Q_2 = 0$$

$$T_3(0m \leq x_3 \leq 0,26m) = 3724,77N - 4905N - 4905N$$

$$T_3(0m \leq x_3 \leq 0,26m) = -6085,23N$$

$$\curvearrowright F_{Ay} \cdot (x_3 + a + b) - M_{b3} - Q_1 \cdot (x_3 + b) - Q_2 \cdot x_3 = 0$$

$$M_{b3}(0m \leq x_3 \leq 0,26m) = 3724,77N \cdot (0,26 + 1,11 + 0,26)m - 4905N \cdot (0,26 + 1,11)m - 4905N \cdot 0,26m = 0$$

$$M_{b3}(x_3 = 0m) = -341,61Nm$$

$$M_{b3}(x_3 = c = 0,26m) = -1923,77Nm$$

Vierter Schnitt von links:

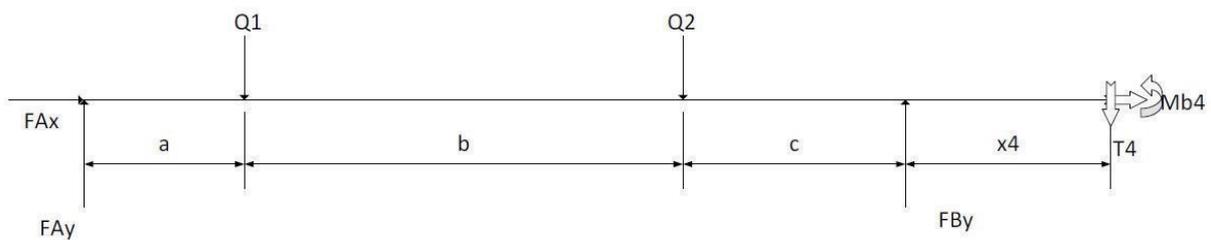


Abbildung 33: Vierter Schnitt von links - Zwischen Lager B und Zahnrad

$$\uparrow F_{Ay} - T_4 - Q_1 - Q_2 + F_{by} = 0$$

$$T_4(0m \leq x_4 \leq 0,166m) = 3724,77N - 4905N - 4905N + 17674,23N$$

$$T_4(0m \leq x_4 \leq 0,166m) = 11589N$$

$$\curvearrowright F_{Ay} \cdot (x_4 + a + b + c) - M_{b4} - Q_1 \cdot (x_4 + b + c) - Q_2 \cdot (x_4 + c) + F_{by} \cdot x_4 = 0$$

$$M_{b4}(0m \leq x_4 \leq 0,166m) = 3724,77N \cdot (0,166 + 0,26 + 1,11 + 0,26)m$$

$$- 4905N \cdot (0,166 + 1,11 + 0,26)m - 4905N \cdot (0,166 + 0,26)m + 17674,23N \cdot 0,166m$$

$$M_{b4}(x_4 = 0m) = -1923,77Nm$$

$$M_{b4}(x_4 = d = 0,166m) = 0Nm$$

Die Berechnung ist aus Sicht der einen Richtung nun abgeschlossen und wird nun durch das selbige Verfahren aus der anderen Richtung noch einmal durchgeführt. Die Ergebnisse sollten bei korrekter Berechnung identisch sein.

Die Ermittelten Werte sind aus beiden Richtungen identisch und somit als korrekt anzusehen. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Zusammenfassung der Berechneten Werte

Position	Erster Schnitt		Zweiter Schnitt		Dritter Schnitt		Vierter Schnitt	
	Zwischen Lager A und Reibrad 1		Zwischen den Reibrädern		Zwischen Reibrad 2 und Lager B		Zwischen Lager B und Zahnscheibe	
Querkraft [N]	3724,77	3724,77	-1180,23	-1180,23	-6085,23	-6085,23	11589,00	11589,00
Biegemoment [Nm]	0,00	968,44	968,44	-341,61	-341,61	-1923,77	-1923,77	0,00
Länge [m]	0,000-0,260		0,260-1,370		1,370-1,630		1,630-1,796	

Anknüpfend an die Bestimmung der Querkraft- und des Biegemomentenverlaufs, gilt es das Maximum des Biegemomentes zu ermittelt. Hierfür muss die Stelle x_i bestimmt werden, bei welcher die Querkraft Null beträgt. In diesem Fall existieren zwei Nullstellen, welche sich bei den Wirkflächen des Reibrad 1 und dem Lager B befinden. Dies ist in Abbildung 34 gut zu erkennen. Da diese Flächen als punktuelle Stellen vereinfacht wurden, sind die Extremwerte genau an diesen Stellen.

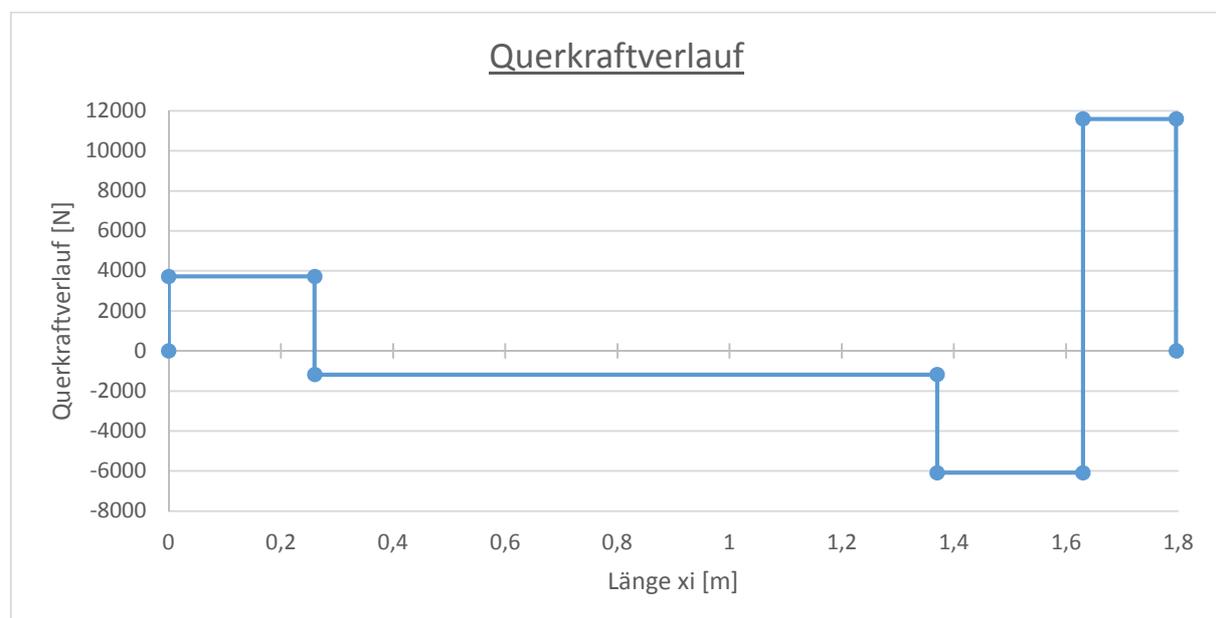


Abbildung 34: Querkraftverlauf über die Gesamtlänge der Antriebswelle

Aus der Tabelle 14 können die entsprechenden Biegemomente für diese Stellen abgelesen und verglichen werden. Dabei entscheidet es sich nun im direkten Vergleich zwischen den beiden, welches den größeren Betrag hat und somit das Maximum des Biegemomentes darstellt.

$$|M_{b_2}(x_i = 0,26m)| = 968,44Nm < 1923,77Nm = |M_{b_3}(x_i = 1,63m)|$$

$$M_{b_{\max}} = 1923,77Nm$$

Dieser Wert wird in die Gleichung für den zweiten Schnitt eingesetzt. Der Verlauf des Biegemomentes ist für die Nachvollziehbarkeit nochmals in der Abbildung 35 dargestellt.

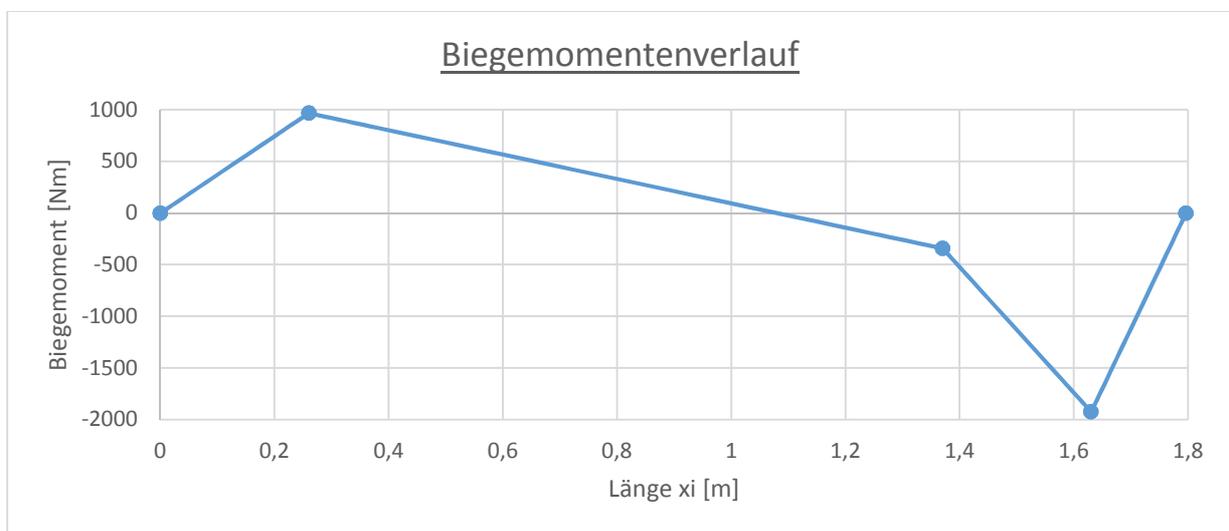


Abbildung 35: Biegemomentenverlauf über die Gesamte Länge der Antriebswelle

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{b_{\max}}}{\frac{\pi}{32} \cdot d^3} = \frac{1923,774Nm}{\frac{\pi}{32} \cdot (0,07m)^3} = 57129449,14 \frac{N}{m^2} \hat{=} 57,13 \frac{N}{mm^2}$$

Zusätzlich zum Biegemoment wirkt durch die übertragene Antriebsleistung des Motors ein Torsionsmoment auf die Welle, welches bei der Auslegung berücksichtigt werden muss . [20]

$$M_t = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{4000W}{2 \cdot \pi \cdot \frac{17,4 \text{ min}^{-1}}{60 \frac{s}{\text{min}}}} = \frac{4000W}{2 \cdot \pi \cdot 0,29s^{-1}} = 2196,35Nm$$

Um zu überprüfen, ob der gewählte Durchmesser der Antriebswelle für die vorhandene Belastung ausreichend ist, muss die zulässige Spannung größer sein als die resultierende Gesamtspannung. Die nachfolgende Formel zeigt den Zusammenhang dieser beiden Spannungen. Das benötigte τ kann über das Torsionsmoment bestimmt werden.

$$\sigma_{zul} \geq \sigma_{V4} = \sqrt{(\sigma_{max}^2 + 3 \cdot \tau^2)}$$

$$\tau = \frac{M_t}{W_t} = \frac{M_t}{\frac{\pi}{16} \cdot d_w^3} = \frac{2196,35 Nm}{\frac{\pi}{16} \cdot (0,07m)^3} \quad \tau = 32611975 \frac{N}{m^2} \hat{=} 32,61 \frac{N}{mm^2}$$

Die zulässige Spannung wird durch das verwendete Material und der ausgewählten Sicherheit definiert. [21]

$$\sigma_{zul} = R_{p0,2} \cdot S = 190 \frac{N}{mm^2} \cdot 1,5 = 126,67 \frac{N}{mm^2}$$

$$126,67 \frac{N}{mm^2} = \sigma_{zul} \geq \sigma_{V4} = \sqrt{(\sigma_{max}^2 + 3 \cdot \tau^2)}$$

$$126,67 \frac{N}{mm^2} = \sigma_{zul} \geq \sigma_{V4} = \sqrt{\left(\left(57,13 \frac{N}{mm^2} \right)^2 + 3 \cdot \left(32,61 \frac{N}{mm^2} \right)^2 \right)}$$

$$\underline{\underline{126,67 \frac{N}{mm^2} = \sigma_{zul} \geq \sigma_{V4} = 80,34 \frac{N}{mm^2}}}$$

Damit ist bewiesen, dass der ausgewählte Durchmesser für die Anwendung ausreichend ist.

Der minimal erforderliche Durchmesser kann durch umstellen der Gleichungen ermittelt werden.

$$\text{Hierfür wird } \sigma_{zul} = \sigma_{V4} = 126,67 \frac{N}{mm^2}$$

$$126,67 \frac{N}{mm^2} = \sqrt{\left(\left(\frac{M_{bMax}}{\frac{\pi}{32} \cdot d_w^3} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{M_t}{\frac{\pi}{16} \cdot d_w^3} \right)^2 \right)}$$

$$d^6 = \frac{32^2 \cdot M_{bMax}^2 + 3 \cdot 16^2 \cdot M_t^2}{\pi^2 \cdot \left(126,67 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2} \right)^2}$$

$$\underline{\underline{d = 0,0605m \hat{=} 60,5mm}}$$

Durch Aufrunden auf die nächst größere verfügbare Lagergröße erhält man den ausgewählten **Wellendurchmesser von 70 mm**, wodurch die Richtigkeit somit bestätigt ist.

Für die Kraftübertragung wird die Antriebswelle mit einer Nut versehen, welche für eine Passfeder nach DIN 6885 Form A vorgesehen ist.

Die Berechnung der Gegenwelle würde mit einem kleineren Ergebnis ausfallen, da an dieser Welle keine Last durch den Riemen aufgebracht wird. Ebenfalls greifen die Lasten annähernd symmetrisch durch die Reibräder auf der Welle an und dies auch in gewisser Nähe zum Lager, wodurch ebenfalls eine 70 mm Welle mehr als ausreichend ist für die Anwendung.

M_T	Torsionsmoment
P	Zu übertragende Leistung
n	Drehzahl
d	Wellendurchmesser
M_{bx}	Biegemoment an Stelle x
τ	Torsionsspannung
σ_{zul}	Zulässige Spannung
σ_{max}	Maximale Biegemomentenspannung
σ_{V4}	Resultierende Gesamtspannung
T_x	Querkraft an Stelle x

Berechnung der Reibräder

Über die nun ermittelte Masse können die antreibenden Reibräder ausgelegt werden, welche das letzte Glied in der Übertragung der Antriebsleistung ist. Die Firma Rotafrifix® stellt für Trommelantriebe Reibräder her. Diese bestehen aus einem Metallkern und dem darauf montierten Reibring, welcher verschiedenen Kautschuksorten bestehen kann.

Für die Auslegung stellt Rotafrifix® definierte Berechnungsvorschriften zur Verfügung. Mit Hilfe der Formeln kann gewährleistet werden, dass die resultierende Anpresskraft für die Übertragung der Leistung ausreichend ist. Ebenfalls gilt es zu überprüfen, ob die Reibringe die Last auf Dauer auch standhalten. [22]

Gegebene Bedingungen:

	Drehzahl Trommel (n_T)	5 rpm
	Leistung Motor (P)	4000 W
	Oberfläche Laufbahn	Trocken mit leichten Verunreinigungen
	Betriebsdauer und Bedingung	24 h/d; ohne Stoßbelastungen
	Trommelgewicht (m_T für F_T)	1093,3kg (x 1,5 Sicherheitsfaktor)
	Trommeldurchmesser d_T	800 mm
	Winkel zur Antriebswelle α_1	69°
	Winkel zur Gegenwelle α_2	69°
	Erste Wahl Reibräder	250/75-140 Je viermal

In der Praxis haben sich Reibräder mit einem Steuerwinkel größer als 30° bewährt und wiesen dabei eine besonders lange Standzeit auf. Weil man herausgefunden hat, je größer der Anstellwinkel gewählt wird, desto größer ist die hervorgerufene Anpresskraft. Aufgrund dessen wird ein Winkel von 69° gewählt. Die entstehende Anpresskraft wird wie folgt berechnet. [22]

$$F_T = 1093,3 \text{ kg} \cdot 1,5 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 16088,4 \text{ N}$$

$$F_A = \frac{F_T}{\frac{\sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{\sin \alpha_2} + \cos \alpha_1} = \frac{1093,3 \text{ kg} \cdot 1,5 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\frac{\sin 69^\circ \cdot \cos 69^\circ}{\sin 69^\circ} + \cos 69^\circ}$$

$$F_{\text{Antrieb}} = F_{\text{Gegen}} = 22446,8 \text{ N}$$

Da die Winkel α_1 und α_2 gleich groß sind, ergibt sich dementsprechend dieselbe Anpresskraft für die Gegenwelle.

Die Drehzahl der Trommel soll regelbar sein, wobei die Maximale Drehzahl auf fünf Umdrehungen pro Minute festgelegt wird. Über die obere Grenze wird die maximale Anpresskraft für Reibringe festgelegt.

Da eine bestimmte Drehzahl für die Trommel definiert wurde, müssen die Reibräder und der Antriebsriemen danach ausgelegt werden. Über die Drehzahlübersetzung wird danach auch die benötigte Drehzahl des Motors ermittelt. Die erste Übersetzungsstufe entsteht durch die Wahl der Größe der Reibringe.

$$i = \frac{n_T}{n_{RR}} = \frac{d_{RR}}{d_T}$$

Laut Hersteller sind Übersetzungen von eins zu sieben in der Praxis möglich, jedoch kann ein kleineres Rad dementsprechend nur eine kleinere Last tragen. Mit der Wahl eines Reibrades mit $d_{RR} = 250 \text{ mm}$ entsteht eine Übersetzung von $i = 3,478$.

$$i = \frac{n_{RR}}{5 \text{ min}^{-1}} = \frac{800 \text{ mm}}{250 \text{ mm}} = 3,2$$

Daraus folgt eine Drehzahl für das Reibrad von. $n_{RR} = 34,78 \text{ min}^{-1}$

Mit der nun ermittelten Drehzahl und Durchmesser des Reibrades, wird dementsprechend auch die Umfangsgeschwindigkeit definiert.

$$v = \frac{\pi \cdot d_{RR} \cdot n}{60 \cdot 10^3} = \frac{\pi \cdot 250 \text{ mm} \cdot 16 \text{ min}^{-1}}{60 \cdot 10^3} \cdot \frac{\text{m} \cdot \text{min}}{\text{mm} \cdot \text{s}}$$

$$v = 0,2094 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dividiert man die Motorleistung durch die berechnete Umfangsgeschwindigkeit, ergibt dies die am Mantel ansetzende Kraft, die Umfangskraft.

$$F_U = \frac{P}{v} = \frac{4000W}{0,2094 \frac{m}{s}} = 19098,6N$$

Um diese Kraft letzten Endes effektiv zum Antreiben der Trommel nutzen zu können, muss von der Trommel eine ausreichend große Anpresskraft F_A auf die Reibräder bewirkt werden. Die benötigte Anpresskraft kann mit Hilfe von mehreren Faktoren ermittelt werden. Durch die Faktoren werden Einflüsse, wie die Betriebsbedingungen, die aufeinander reibenden Materialien und die Übersetzung berücksichtigt. Der letzte Einfluss auf die benötigte Anpresskraft F_N wird über den Walkfaktor c_1 beschrieben.

$$c_1 = \frac{1}{\sqrt[3]{1 + \frac{d_{RR}}{d_T}}} = \frac{1}{\sqrt[3]{1 + \frac{250}{800}}}$$

$$c_1 = 0,9133$$

Des Weiteren wird ein Betriebsfaktor c_2 eingeführt, welcher durch die tägliche Betriebsdauer, der Schalthäufigkeit und von möglichen Stoßbelastungen beeinflusst wird. Da wir einen kontinuierlichen Betrieb über mehrere Tage anstreben und dabei keinerlei Stoßbelastungen auftreten sollten, kann ein Betriebsfaktor von festgelegt werden.

$$c_2 = 1,2$$

Die Reibzahl μ wird als letzter Einflussfaktor durch Umgebungsbedingungen bestimmt. Für trockene Mittelraue Oberflächen im Maschinenbau beträgt die Reibzahl $\mu = 0,7$. Die benötigte Anpresskraft F_N wird über die folgende Formel ermittelt.

$$F_N = \frac{F_U \cdot c_2}{\mu \cdot c_1} = \frac{19098,6N \cdot 1,2}{0,7 \cdot 0,9133}$$

$$F_N = 35846,9N$$

Anschließend wird die benötigte mit der vorhandenen Anpresskraft auf die Antriebswelle verglichen

$$F_{Antrieb} = 22446,8N > 35846,9N = F_N$$

Da die vorhandene Anpresskraft nicht größer ist als die benötigte, ist die Bedingung somit nicht erfüllt und es besteht Handlungsbedarf. Um eine größere Anpresskraft zu erreichen müsste der Winkel oder die Masse der Trommel weiter erhöht werden. Da jedoch der Winkel schon bei 69° ist und eine schwerere Trommel zu eine größere Leistung für den Betrieb benötigt, sind beide Varianten keine Möglichkeit. Damit aber die Reibräder nicht durchdrehen und die Trommel mit dem vier Kilowatt Motor betrieben werden können, muss ein langsames anfahren mit niedrigerer Leistung ermöglicht werden. Mit Hilfe eines Frequenzumrichters soll zuerst mit zwei Kilowatt angefahren werden. Durch die Verwendung von nur der halben Leistung reduzieren sich F_U und F_N um die Hälfte. Somit kann die Bedingung doch noch erfüllt werden.

$$F_{Antrieb} = 22446,8N > 17923,45N = F_N$$

Ob jedoch die vorhandene Anpresskraft im Betrieb von den Reibrädern getragen werden können, gilt es noch zu überprüfen.

$$F_{Antrieb,Rad} = \frac{F_{Antrieb}}{x_{RR}} = \frac{22446,8N}{4} = 5611,7N$$

Die Reibräder mit dem ausgewählten Durchmesser von 250 mm können laut Hersteller bei derartig kleinen Drehzahlen 7900 N tragen. Somit können diese verwendet werden.

Pro Welle vier Reibräder 250/75-140.

Bei der Verwendung von mehreren Reibringen (Kautschukkörper) nebeneinander, ist es sinnvoll diese auf einem Metallkern zu montieren. Für zwei Reibringe, wie in diesem Fall, ist der Metallkern 160 mm breit.

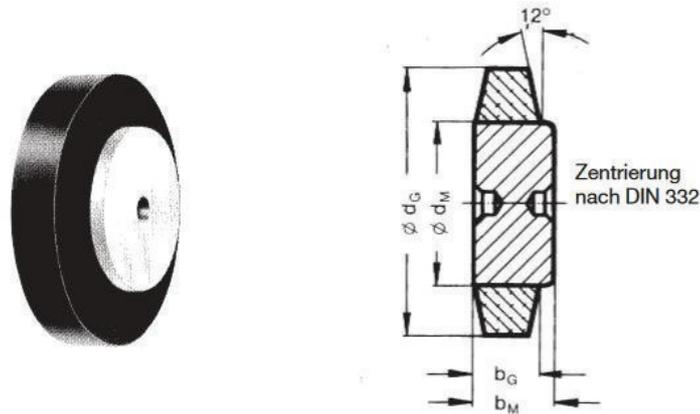


Abbildung 36: Reibrad bestehend aus Metallkörper und Reibring [22]

Ein einzelnes Reibrad ist in der Abbildung 36 dargestellt. Die Räder sollen nun auf den Wellen fest montiert werden, ohne dass die Welle dabei beschädigt wird. Eine Befestigungsmöglichkeit, welche zugleich eine Übertragung der Leistung ermöglicht, wäre die Nutzung einer Passfeder mit Nut. Die Reibräder würden dementsprechend auch eine Bohrung mit Nut bekommen.

Dabei würde nicht nur eine weitere Schwachstelle in die Welle hervorgerufen werden, sondern würde zusätzlich eine nachträgliche Positionsänderung der Reibräder auf der Welle nicht praktikabel machen. Damit dies gewährleistet jedoch möglich ist, werden andere Spannelemente gesucht.

Es muss eine besonders breite Ausführung sein, damit genügend Kontaktfläche mit dem Reibradkern entsteht. Es muss in der Lage sein die Leistung bei dem vorherrschenden Drehmoment zu übertragen und dies ohne weitere Bearbeitung der Welle.

Diese Bedingungen werden alle von dem Spannsatz Clampex KTR 400 erfüllt. Er besteht aus zwei Druckringen (1 und 2), einem Außenring (3) und den Zylinderschrauben (4). Durch das Anziehen der Zylinderschrauben werden die Druckringe zusammen geschoben, wodurch sich Druck auf den Außenring und die Welle gleichzeitig aufbaut. In der Abbildung 37 ist so ein Spannelement und deren Aufbau dargestellt. Es werden zwei Spannelemente pro Reibringpaar verwendet. Das bedeutet es werden insgesamt acht Clampex KTR 400 verbaut. [23]

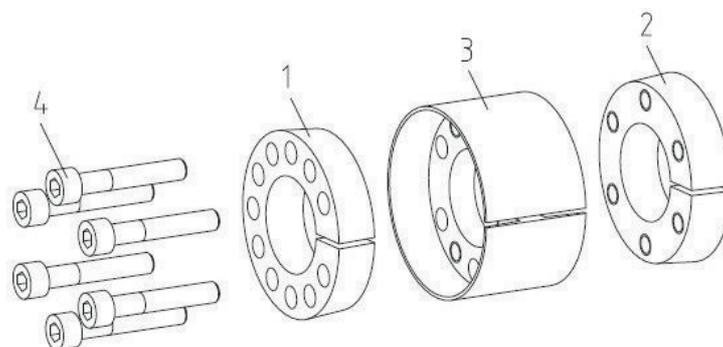


Abbildung 37: Aufbau Clampex KTR 400 [23]

4.4. Auslegung der Tragenden Elemente

Nachdem Antriebs Elemente nun berechnet wurden, schließt sich jetzt direkt die Auslegung der tragenden Komponenten an. Hierbei muss darauf geachtet, dass die Gewichte auch auf Dauer keine Auswirkungen auf die Stabilität und Funktionalität der gesamten Konstruktion haben. Angefangen bei den Lagern, welche die Antriebs- und Gegenwelle halten sollen.

Wahl der Lagerung

Die im Kapitel 4.3 ausgelegten Wellen müssen nun über eine geeignete Lagerung auf dem tragenden Gestell befestigt werden. Um unnötigen Energieverlust durch Reibung zu vermeiden, fiel die Wahl auf Kugellager, da diese sich durch geringe Reibung. Anhand des benötigten Wellendurchmessers und der vorliegenden Belastungen kann die ideale Größe und Art des Kugellagers bestimmt werden. [24]

Ein Y-Lager (Spannringlager) gilt als eine Ausführungsvariante der Rillenkugellager, wobei diese eine kugelige Außenringmantelfläche und einen verbreiterten Innenring besitzen. Durch verschiedene Befestigungsmöglichkeiten auf der Welle sind die Lager einfach und schnell zu montieren. Hierbei stellt die Nutzung von Gewindestiften die beste Variante dar. Da es sich um eine Anwendung in der Lebensmittelindustrie handelt, empfiehlt es sich zudem die Komponenten für den Kontakt mit Lebensmitteln auszulegen. Dazu zählen auch die Lager, welche besonders beim Befüllen und Entleeren der Trommel mit dem Produkt in Berührung kommen können.

Für solche Anwendungen stellt SKF Lebensmittelverträgliche Lager und Schmierfette. In der SKF Foodline werden deshalb Y-Lager aus nichtrostendem Stahl und verzinkt angeboten. Durch die berechneten Durchmesser der Welle von 70mm fällt die Wahl auf die Stehlagereinheit SYJ 70 TF. Die Einheit besteht aus einem Gussgehäuse mit der Bezeichnung SYJ 514 und einem Kugellager mit dem Titel YAR 214 2F. Beide sind im einzelnen in den Abbildung 38 und Abbildung 39 dargestellt. [25]



Abbildung 38: YAR 214 TF [25]

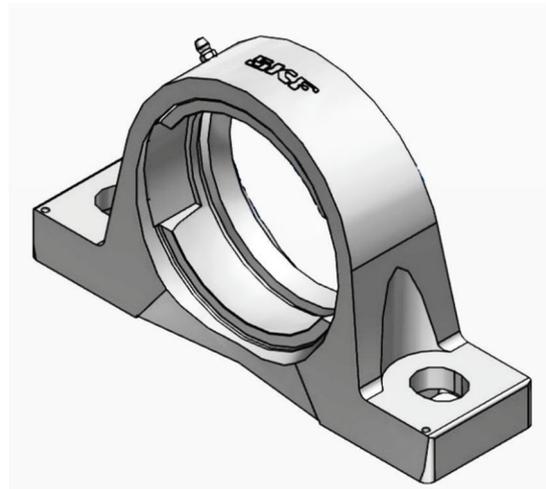


Abbildung 39: SYJ 70 TF [25]

Aus dem Datenblatt des Kugellagers sind die zulässigen Lasten und der maximalen Drehzahl entnehmbar. Ein direkter Vergleich der vorherrschenden Bedingungen und den möglichen Lasten und Drehzahlen ist in der Tabelle 15 beschrieben. Wie zu erkennen ist, sind die Lager deutlich unter den Grenzwerten.

Tabelle 15: Vergleich Kenndaten und Einsatzbedingungen

	Kenndaten YAR 214 2F	Einsatzbedingungen
dynamische Lasten	62,4 kN	11,225 kN
maximale Drehzahl	2800 min ⁻¹	18 min ⁻¹

Ebenfalls enthalten sie die genauen Maße der Komponenten, wodurch deren Position und Befestigung in der Konstruktion des Gestelles sich ableiten lässt. Die Länge des Gehäuses ist 266 mm und es ist 76 mm breit. Um entstehende Spannungen aufgrund von thermischer Ausdehnung zu vermeiden, wird ein Lager als Loslager eingesetzt. Dies bedeutet, dass nur eine Seite mit der Lagerung mit den Gewindestiften an der Welle befestigt wird. Für gewöhnlich wird hierbei die Antriebsseite als Festlager eingestellt.

Die Kurzbezeichnung -2F gibt Details für die verwendete Dichtung an und steht für die Standard-Berührungsdichtung mit vorgeschalteter Schleuderscheibe auf beiden Seiten des Lagers. Die zusätzliche Schleuderscheibe erhöht nicht die Reibung, steigert jedoch aber die Dichtwirkung, wodurch das benötigte Schmierfett besser zurückgehalten wird. Um jedoch direkten Kontakt mit dem Produkt dennoch zu verhindern werden auf der Deckelseite des Behälters die Lager mit einem Deckel versehen. Dessen Kurzbezeichnung ist ECY 214.

Damit das Lager lange im Betrieb sein kann, empfiehlt es sich das es mit Fett geschmiert wird. Weil es sich hierbei jedoch um eine Anwendung im Lebensmittelbereich handelt, muss dieses Lebensmittelkonform sein.

Das lebensmittelverträgliche Schmierfett wird vom Hersteller als „GFJ“ bezeichnet und kann in für dieses Lager eingesetzt werden. Schmierfette bestehen in der Regel aus einem Grundöl, welches 80 % der Masse ausmacht und die übrigen 20 % ist ein Eindickmittel. Dieses Eindickmittel ist meist eine Alkalimetallseife. [26]

Die Zusammensetzung des GFJ wird durch das Datenblatt der SKF definiert und bestätigt den Grundlegenden Aufbau. [27] Es besteht aus der Basis eines Polyalphaolefin (PAO), welches das hydrierte Polymer von Dec-1-en ist. Das PAO wird in diesem Fall mit einem Aluminiumkomplex eingedickt, wodurch sich eine Dichte von 0,83 kg/l ergibt und gehört damit in die Konsistenzklasse (NLGI-Klasse) 2. Es kann in einem Temperaturbereich von -40°C bis 150°C verwendet werden, wobei es sich erst bei einer Temperatur von 270°C zersetzt. Die Betriebstemperatur beeinflusst sehr stark die Viskosität, welche vom Hersteller ebenfalls gemessen wurde. Für 40°C beträgt sie 100 cSt und für 100°C nur noch 14,4 cSt. Eine höhere Viskosität trägt besonders zur Wärmeentwicklung durch Reibung bei, was wiederum die Temperatur steigert und somit die Viskosität senkt. Aufgrund der Bestandteile und deren Stabilität kann das Schmierfett im Lebensmittelbereich verwendet werden.

Berechnung des Gestells gegen Biege- und Knickbelastungen

Es wurde ein Gestell konstruiert, welches die Trommel und alle zusätzlichen Komponenten tragen muss. Dieses sollte sowohl einfach herzustellen sein, als auch stabil genug. Die Grundkonstruktion ist in Abbildung 40 dargestellt.

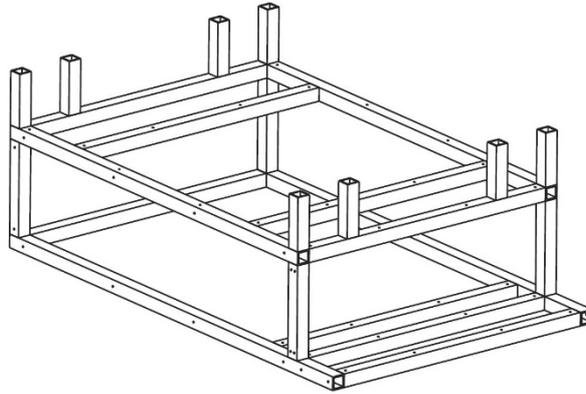


Abbildung 40: Isometrische Darstellung des Grundgestells

Durch die nun feststehenden Komponenten und Massen kann das Gestell dafür nun ausgelegt werden. Durch den Berührungswinkel der Reibräder mit der Trommel, kann die Position der Welle und der Lager ermittelt werden. Über die Breite der Stehlagergehäuse steht darauf hin auch die Breite des Gestells fest, sie beträgt 1130mm. Damit die Trommel die Querstange nicht berührt, wird die Lagerung mit acht 200 mm hohen Vierkantrohren angehoben. Die vier Stangenpaare sind jeweils mit einer Platte zusammengeschweißt, in welcher Gewinde für die Befestigung der Lager sind.

Die Stangenpaare sind nun auf den zutreffenden eulerischen Knickfall rechnerisch zu testen. Ebenfalls darf es sich nicht durch die in X-Richtung angreifende Kraft verbiegen. Hierfür muss das sowohl das Material als auch die Form des Gestells entsprechend gewählt werden. Es wird wieder mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 gerechnet, wodurch das Auslegungsgewicht auf 1987kg steigt.

$$F_G = m_T \cdot g = 1987,6 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 19498,5 \text{ N}$$

Die aufzunehmende Last teilt sich auf die vier tragenden Stützpaare auf, wodurch sich die Gewichtskraft gleichmäßig verteilt. Die beiden Trägerseiten, bzw. die Reibräder, stehen in einem Winkel von 69° zur Trommel.

F_x und F_y stehen für die in die jeweilige Richtung resultierende Kraft auf die Träger.

Als mögliche Trägervariante stehen die Formen Doppel T (Normtabelle DIN 1025), Vierkantrohr (DIN 2395) und die Kreisringform zur Verfügung. Hierfür sind beide Belastungsrichtungen auszulegen. Zum einen gegen eine mögliche Verformung (x-Richtung) oder eine Knickung (y-Richtung).

Es wird der Stahl 1.4301 verwendet, welcher eine 0,2 %-Dehngrenze bei 20°C von 190 MPa besitzt. Das entspricht 190.000.000 N/m². Diese wird mit dem Sicherheitsbeiwert von 1,5 dividiert, wodurch 126.666.667 N/m² als tatsächliche Dehngrenze festgelegt wird.

Generell können verschiedene Formen für die Konstruktion des Gestells verwendet werden. Der Stahlbau hat für diese Zwecke, wie bereits erwähnt auch einige genormte Formen zur Verfügung. Das Vierkantrohr bietet eine einfache Fertigung und für die Befestigung von weiteren Bauteilen oder Verbindungen leichte Befestigungsmöglichkeiten. Die zum Vierkantrohr zugehörige Norm ist die DIN 2395.

Es gilt zu prüfen, ob eine ausgewählte Rohrgröße und deren Wandstärke für die Konstruktion und deren Last genügen. Hierfür wird die tatsächlich hervorgerufene Spannung an der Konstruktion ermittelt, welche aber die zulässige Spannung mit einer ausreichend groß gewählten Sicherheit nicht überschreiten darf.

Zuerst wird der Biegebeanspruchung in X-Richtung überprüft. Die Formel zur Berechnung der tatsächlichen Spannung, welche durch das Gewicht der Trommel resultiert, sieht wie folgt aus. In Y-Richtung wird anschließend auf den passenden Eulerischen Knickfall geprüft. Die dafür zu prüfende Last ist mit F_Y definiert.

$$F_X = \sin \alpha \cdot \frac{F_G}{4} = \sin(69^\circ) \cdot \frac{19498,5N}{4} \quad F_Y = \cos \alpha \cdot \frac{F_G}{4} = \cos(69^\circ) \cdot \frac{19498,5N}{4}$$

$$F_X = 4550,85N \quad F_Y = 1746,91N$$

Durch die Last in X-Richtung resultiert ein Biegemoment, welches durch das dividieren mit dem Widerstandsmoment die Biegespannung ergibt. Das Biegemoment ergibt sich durch die Multiplikation der Kraft in X-Richtung mit der nicht befestigten Länge.

$$\sigma = \frac{M_b}{W_Z}$$

$$M_{Bx} = F_x \cdot e = 4550,85N \cdot 0,2m = 910,17Nm$$

Nachdem das Biegemoment in X-Richtung berechnet wurde, wird hierfür noch das Widerstandsmoment W_Z benötigt. W_Z lässt sich aus dem Abstand zur Neutralen Faser f und dem Axialen Flächenträgheitsmoment I_z berechnen. Dieses lässt sich über die Maße der Träger ermitteln. Länge und Breite sind gleich 50 mm, wobei die Wandstärke des Vierkantrohres auf 5 mm festgelegt wird. [20]

$$I_z = \frac{(B \cdot H^3 - b \cdot h^3)}{12} = \frac{(0,05m \cdot (0,05m)^3 - 0,04m \cdot (0,04m)^3)}{12}$$

$$I_z = 3,075 \cdot 10^{-7} m^4$$

Die neutrale Faser definiert den Schwerpunkt der zu berechnenden Form. In diesem Fall liegt er genau in der Mitte

$$W_z = \frac{I_z}{f} = \frac{1,48 \cdot 10^{-7} m^4}{0,025m} = 1,23 \cdot 10^{-5} m^3$$

Durch das Einsetzen des ermittelten W_z ergibt sich folgende Formel, über welche man die anliegende Spannung erhält. Diese muss niedriger sein als die zulässige Spannung, welche vom Material vorgegeben wird.

$$\sigma_{\text{Berechnet}} = \frac{M_b}{W_z} = \frac{910,17 Nm}{1,23 \cdot 10^{-5} m^3} = 7,4 \cdot 10^7 Nm^2$$

$$74 \cdot 10^6 Nm^2 = \sigma_{\text{Berechn}} \leq \sigma_{\text{zul}} = 126,67 \cdot 10^6 Nm^2$$

Nachdem nachgewiesen wurde, dass die ausgewählte Wandstärke für die Last ausreichend ist, gilt es noch auf den zutreffenden eulerischen Knickfall zu prüfen. Die möglichen Knickfälle sind in der Abbildung 41 dargestellt. Da die Last der Trommel auf senkrecht stehenden Vierkantrohren, welche über ein Lager und deren Befestigung miteinander verbunden sind, gilt der Fall 4. [28]

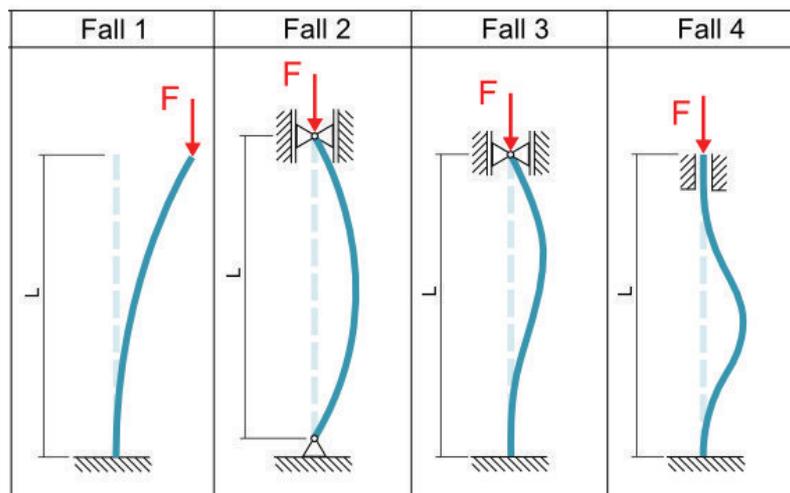


Abbildung 41: Eulerische Knickfälle

Daraus ergeben sich einige Rechenvorschriften, mit welchen überprüft werden kann, ob die Konstruktion dem Gewicht standhält.

Für den Fall 4 beträgt der Knicklängenbeiwert . $\beta = 0,5$

Daraus lässt sich die Knicklänge s berechnen. Die zugehörige Stablänge L beträgt $0,15m$

$$s = \beta \cdot L = 0,5 \cdot 0,2m = 0,1m$$

Um die nötige Last zu ermitteln, unter welcher der Träger einknickt, wird die nachstehende Formel verwendet. Mit dieser Knicklast kann anschließend die Biegespannung ermittelt werden, welche bei der Knicklast auftreten würde.

$$F_{Krit} = \frac{4 \cdot \pi^2}{L^2} \cdot E \cdot I = \frac{\pi^2}{s^2} \cdot E \cdot I = \frac{\pi^2}{(0,1m)^2} \cdot 180 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2} \cdot 3,075 \cdot 10^{-7} m^4$$

$$F_{Krit} = 5462826N$$

Die ermittelte kritische Knicklast ist deutlich größer als die zu tragende Last eines Trägers und für den eulerischen Knickfall 4 somit überdimensioniert. Es gilt nun noch zu überprüfen, ob dies auch für die Knickspannung zutrifft. Hierfür wird der Trägheitsradius i eingeführt, welcher sich aus der Wurzel der Division des Flächenträgheitsmomentes und der Querschnittsfläche zusammensetzt.

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{3,075 \cdot 10^{-8} m^4}{0,0009m^2}} = 0,0185m$$

Dieser Trägheitsradius kann zur Berechnung des Schlankheitsgrades verwendet werden, über welchen wiederum die Knickspannung bestimmt wird. [28]

$$\lambda = \frac{\beta \cdot L}{i} = \frac{0,5 \cdot 0,2m}{0,0185m} = 5,41$$

$$\sigma_k = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 \cdot 180 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2}}{5,41^2} = 60,7 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2} \hat{=} 60,7 \frac{N}{mm^2}$$

$$121,5 \frac{N}{mm^2} = \sigma_k \leq \sigma_{zul} = 126,67 \frac{N}{mm^2}$$

Die anliegende Spannung darf die oben ermittelte Knickspannung nicht überschreiten.

$$\sigma_{vorhanden} = \frac{F_y}{A} = \frac{1746,91N}{0,0009m^2} = 1,94 \frac{N}{mm^2} \leq 60,7 \frac{N}{mm^2} = \sigma_k$$

Wie auch die Knicklast ist die Knickspannung deutlich unter dem kritischen Wert, was bestätigt, dass das ausgelegte Gestell für die Anwendung und Last mehr als ausreichend ist.

m_T	-	Masse der befüllten Trommel
F_G	-	Gewichtskraft der Trommel
β	-	Knicklängenbeiwert [-]
E	-	Elastizitätsmodul [N/mm ²]
I	-	axiales Flächenträgheitsmoment des Querschnittes [m ⁴]
L	-	Stablänge [m]
s	-	Knicklänge [m]
e	-	Trägerabschnitt [m]
M_b	-	Biegemoment [Nm]
W_Z	-	Widerstandsmoment
f	-	Abstand zur neutralen Faser

Tragrollen

Die Anforderungen an die Konstruktion wurden im Lastenheft ausführlich beschrieben. So soll die räumliche Mobilität, geräuscharmer und schwingungsfreier Betrieb gewährleistet werden. Dies kann mit der Wahl der richtigen Standfüße gesichert werden. Indem man für den Bodenkontakt Rollen verwendet, ist das Gestell zwar Mobil, kann aber über einen Feststeller an einer Stelle fixiert werden. Diese Fixierung ist wiederum nicht fest genug, so dass keine Schwingungen von oder auf die Umgebung übertragen werden kann. Durch die Wahl des richtigen Materials der Rollen kann die zulässige Traglast eingestellt und zusätzlich Geräusche minimiert werden. [29]

Deshalb fiel die Wahl auf Rollen mit einem starken gepressten Stahlblechgehäuse, welches eine schwere Gabel und Anschraubplatte besitzt. Über einen stabilen Bolzen ist der Radkörper aus Grauguss mit dem Gehäuse verbunden, welcher einen aufgegossenen Laufbelag aus Polyurethan besitzt. Es werden vier Räder für einen stabilen Stand verwendet, wobei ein Paar aus Bockrollen gebildet wird und das zweite Paar aus Lenkrollen mit den benötigten Feststellern besteht. Beide sind in den Abbildung 42 und Abbildung 43 abgebildet. [29]



Abbildung 42: Lenkrolle mit Feststeller



Abbildung 43: Bockrolle

Beide Varianten haben eine Tragfähigkeit von je 600 kg, was bei vier Rollen eine Tragfähigkeit von insgesamt 2400 kg ergibt, was annähernd die maximale Sicherheitslast der gesamten Konstruktion entspricht. Montiert werden diese über eine Schraubverbindung mit einer am Gestell festgeschweißten Platte.

5. Wirtschaftliche Betrachtung

Ein weiterer Aspekt der Projektgestaltung ist die wirtschaftliche Betrachtung. Das bedeutet es wird mit Hilfe der ausgewählten Komponenten und den Tabellen der Prozessverfahrenstechnik ein Kostenüberschlag getätigt. Dieser soll in etwa widerspiegeln, wie viel die Umsetzung des Konzeptes letzten Endes kosten würde. Die Komponenten welche nicht Fertigungsware sind, können käuflich direkt über die Firma STAMAG erworben werden. Preise für diese Komponenten sind in der folgenden Tabelle 16 zusammengefasst. Weitere Informationen können den Stücklisten, dem Kapitel 4 oder den Datenblättern der jeweiligen Produkte entnommen werden.

Tabelle 16: Preisübersicht für Kaufkomponenten

Komponente	Anzahl	Preis pro Stück [€]	Gesamtpreis [€]
O-Ring	1	120,37	120,37
Tragöse	4	32,35	129,4
Verschluss-Spanner	6	29,30	175,8
Scharnier	2	28,33	56,66
Bügelgriff	1	6,66	6,66
Rohrgriff	2	51,91	103,82
Festkupplung mit Innengewinde, Drehbar	2	17,88	35,76
Klebedichtung	1	10,00	10,00
Wagenheber	2	19,00	38,00
Reibrad mit Metallkern	8	110,06	880,48
Spannsatz	8	75,86	606,88
Motor-Spannschienen-Satz	1	39,48	39,48
Strinradtriebemotor	1	1122,00	1122,00
Taperlock-Buchse	1	12,66	12,66
Taperlock-Buchse	1	16,37	16,37
Zahnscheibe	1	101,36	101,36
Zahnscheibe	1	396,16	396,16
Zahnriemen PolyChain Carbon	1	278,19	278,19
Lagereinheit	4	84,02	336,08
Lagerdeckel	2	3,49	6,98
Bockrolle	2	144,08	288,16
Lenkrolle mit Feststeller	2	224,54	449,08
		Summe	5210,35€

Die anzufertigenden Komponenten werden durch die Nutzung von Tabellen zur Kalkulation von Equipment-Kosten überschlägig ermittelt. Für einen horizontalen Prozessbehälter wird die FIGURE 5.44. der gesammelten Werke genutzt. Hieraus ist abzulesen, dass ein Behälter aus Edelstahl mit Equipment, mit einem Durchmesser von rund einem Meter und einer Länge von zwei Metern nach Stand 2004 \$29.800 gekostet hätte.

Mit dem CEPCI Parameter (CE Plant Cost Index) können aktuellere Preise bestimmt werden. Der CEPCI-Parameter lag im Januar 2017 bei 550. [30]

$$C_{\text{Behälter}} = \frac{550}{400} \cdot \$29800 \cdot 0,9 \frac{\text{€}}{\text{\$}} \quad \underline{C_{\text{Behälter}} = 36877,5\text{€}}$$

Die Trommel mit Ihrem Equipment kostet überschlägig 36877,5€, wobei das Gestell noch nicht einberechnet sind. In der Tabelle 16 aufgelisteten Komponenten

Jedoch sind das nur überschlägig ermittelte Preise, deshalb wird eine Ausschreibung für die Fertigungsteile und deren Montage noch durchgeführt.

Die Ausschreibungsunterlagen bestehen aus dem Lastenheft und sämtlichen technischen Zeichnungen, sowie deren Verarbeitung zu den daraus bestehenden Baugruppen. Die Ausschreibung ist im Anhang in mit der Anfragenummer **500982** zu finden.

Das Gestell wird aus Vierkantrohren gefertigt, über die ein Materialeinkaufspreis bestimmt werden kann. Über die Konstruktion des Gestells wird die Gesamtlänge der Stangen bestimmt, deshalb kann eine Gesamtlänge der Stangen auf 18 Meter definiert werden, welche circa 128 kg wiegen. Auf Basis dieser Informationen kann ein Gesamtpreis der 18 Meter auf 817,92,- € festgelegt werden. [31]

Hierbei ist noch keine Bearbeitung und Befestigung der Stangen mit einberechnet. Wenn die bereits bekannten Preise zusammengerechnet werden, ergibt das eine **Gesamtsumme von 42905,77 €**.

6. Weiteres Vorgehen

Wenn das Projekt in die Tat umgesetzt wird, müssen jedoch für den problemlosen Betrieb ein paar Dinge bedacht und überarbeitet werden. Da die Trommel keine Ablaufmöglichkeit für mögliches Kondenswasser und den darin enthaltenen Chemikalien bietet, muss der zuleitende Rauch entwässert werden. Hierzu ist ein Kondensator notwendig, welcher den Rauch abkühlt und dann wieder auf die gewünschte Temperatur bringt.

Des Weiteren ist es aus sicherheitstechnischen und Zeit Gründen notwendig, das die Belüftung für den Behälter ausgelegt ist. Aufgrund dessen, das es sich bei den Räucherdämpfen um gesundheitsschädliche Stoffe handelt, muss die Trommel vor der Entnahme des Räucherguts vom Rauch befreit sein. Dafür ist eine zügige Belüftung notwendig, welche jedoch nicht so stark sein darf, dass es da das Gut mit hinaus bläst. Eine Faustregel besagt, für eine ausreichend Gute Belüftung muss mindestens dreimal so viel Volumen hindurch geströmt sein, wie belüftet werden soll. In unserem Fall muss ein Volumen von 1 m³ evakuiert werden, sodass ein Volumen von 3 m³ Frischluft hindurch gefördert werden muss. Dementsprechend wird ein Ventilator benötigt der in einem akzeptablen Zeitraum den benötigten Luftstrom hervorruft.

Formel 1: Strömungsgeschwindigkeit

$$\dot{V} = \frac{V}{t} = \frac{3m^3}{5 \text{ min}} = \frac{3000dm^3}{300s} = 10 \frac{dm^3}{s}$$

Bei einer akzeptablen Entlüftungszeit von fünf Minuten ergibt das einen benötigten Luftstrom von 10 Litern pro Sekunde. Wenn der Räucherrauch mit dem selbigen Ventilator hineinbefördert werden soll, aber die Rauchentwicklung langsamer abläuft, ist es empfehlenswert einen regelbaren Ventilator anzuschließen. Bei sehr feinem Räuchergut ist es empfehlenswert, einen geringeren Luftstrom und somit eine längere Belüftungszeit einzustellen, damit es nicht mit ausgetragen wird. Dies gilt es jedoch in der anschließenden Prozessoptimierung herauszufinden.

Selbstverständlich wird anfangs eine Prozessoptimierung stattfinden müssen, damit der Optimale Betrieb der Trommel gewährleistet werden kann und die gewünschte Produktionszeit reduziert wird. In welchem Maße es mit dieser Apparatur möglich ist, gilt es ebenfalls in der Prozessoptimierung herauszufinden.

Ebenfalls in der Prozessoptimierung gilt es die Messtechnik am Rauchzuleitungsschlauch anzubringen und wenn gewünscht kabellose Messgeräte und Messfühler für die Kontrolle des Innenraums des Behälters. Dies sind jedoch Einstellungen die anhand von Erfahrungen im Umgang mit dem Apparat getätigt werden können und obliegen dem Kunden.

Literaturverzeichnis

- [1] R. A. Handels-GmbH, „Red Arrow,“ März 2017. [Online]. Available: <http://www.red-arrow-deutschland.de/>.
- [2] T. Miller, „Räucherwerk,“ märz 2017. [Online]. Available: <http://www.raeucherwerk-ratgeber.com/>.
- [3] B. Vorath und D. Steffens, *Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse*, Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 1990.
- [4] W. Jira, „Chemische Vorgänge beim Pökeln und Räuchern,“ 2004.
- [5] L. GmbH, „Chemie.DE,“ März 2017. [Online]. Available: <http://www.chemie.de/lexikon/Lignin.html>.
- [6] „Onlineergänzung zum Artikel Räuchern aus chemischer Sicht,“ März 2017. [Online]. Available: <http://docplayer.org/35412975-Onlineergaenzung-zum-artikel-raeuchern-aus-chemischer-sicht.html>.
- [7] R. A. Handels-GmbH, „Red Arrow - Räucher Lexikon,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.red-arrow-deutschland.de/service/raeucherlexikon>.
- [8] Agrarmarkt Austria Marketing GesmbH., „AMA Grillclub.at,“ 2017.
- [9] DIY Digital GmbH, „Heimwerker,“ November 2017. [Online]. Available: <http://www.heimwerker.de/garten/grillen/smoker-und-raeucherofen/smoker-selber-bauen.html>. [Zugriff am November 2017].
- [10] A. Kreschke, „Räucheröfen Kaufberatung,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.fisch-raeucherofen-test.de/tag/raeucherofen/>. [Zugriff am November 2017].
- [11] „Lastenheft,“ [Online]. Available: <http://nice-itp-2003.sourceforge.net/files/pm/Vorlagen/Lastenheft.pdf>. [Zugriff am März 2017].
- [12] A. Druckbehälter, AD 2000-Merkblatt, Verband der TÜV e.V., 2008.
- [13] Otto Ganter GmbH & Co. KG, „Ganter,“ August 2017. [Online]. Available: <https://www.ganter-griff.de/de/home/>.
- [14] MÄDLER GmbH, „Mädler,“ Mai 2017. [Online]. Available: <http://www.maedler.de/>.

- [15] ERIKS Holding Deutschland GmbH, „Eriks - Know-how macht den Unterschied,“ [Online]. Available: <https://www.eriks.de/medien/556/datei/67/Storzkupplungen-online.pdf>. [Zugriff am Oktober 2017].
- [16] Vogel Business Media GmbH & Co.KG, „Process - Chemie-Pharma-Verfahrenstechnik,“ Vogel Business Media GmbH & Co.KG, [Online]. Available: <https://www.process.vogel.de/epdm-dichtungswerkstoff-fuer-die-lebensmittel-und-pharmaindustrie-a-231714/>. [Zugriff am Oktober 2017].
- [17] Gates®, *Poly Chain® GT® Carbon Belt Drive Systems #17595*, siehe Autor, 2007.
- [18] Gates Corporation, „Gates-Partview,“ Juni 2017. [Online]. Available: <http://partview.gates.com/catalog3/d/gates.pt/>.
- [19] S.Fiedler, *Vorlesung Statik und Werkstofftechnik*, Hochschule Merseburg, 2012/2013.
- [20] R. Gomeringer, M. Heinzler, R. Kilgus, V. Menges, S. Oesterle, T. Rapp, C. Scholer, A. Stenzel, A. Stephan und F. Wieneke, *Tabellenbuch Metall 47.Auflage*, Europa Lehrmittel, 2017.
- [21] M. Bürger, M. Dambacher, A. Hartmann, B. Heine, H. Kaufmann, R. Kümmerer, W. Rimkus und D. Schmid, *Konstruktionslehre - Maschinenbau 3.Auflage*, Euroa - Lehrmittel, 2013.
- [22] ContiTech AG, „Continental,“ 2008. [Online]. Available: <https://www.contitech.de/de-DE/Solutions/Power-Transmission/Mechanical-engineering/Friction-rings-wheels>. [Zugriff am Oktober 2017].
- [23] KTR Systems GmbH, „KTR,“ Juni 2017. [Online]. Available: <https://www.ktr.com/de/>.
- [24] SKF®, *Wälzlager PUB BU/P1 10000/2 DE*, ©SKF Group 2014, Januar 2014.
- [25] SKF®, „SKF - knowledge-centre - CAD-Download,“ Mai 2017. [Online]. Available: <http://www.skf.com/de/knowledge-centre/engineering-tools/skf-bearings-housings-units-and-seals-cad-models-general-instructions.html>.
- [26] SKF®, *LGFP 2 - Lebensmittelverträgliches SKF Wälzlagerfett*, ©SKF Gruppe 2014, 2014.
- [27] SKF®, „Safety data sheet - GFJ Version 01.00/GBR,“ Italy, 2014.
- [28] M. S. Agerer, „Maschinenbau-Wissen.de,“ Juni 2017. [Online]. Available: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/festigkeitslehre/134-knicken-euler>.

- [29] Blickle Räder+Rollen GmbH u. Co. KG, „Blickle,“ Oktober 2017. [Online]. Available: <https://www.blickle.de/>.
- [30] G. Ulrich und P. Vasudevan, *Chemical Engineering Process Design and Economics, 2nd Edition*, New Hampshire: Process Publishing, 2004.
- [31] F. H. G. & C. KG, „Stahlshop,“ [Online]. Available: <https://stahlshop.de/edelstahl/vierkantrohre-ungeschliffen/edelstahl-vierkantrohr-50-x-50-x-3-0-detail>. [Zugriff am November 2017].
- [32] „Abbildung einer Räucherammer mit externer Raucherzeugung,“ 2017.
- [33] „Abbildung einer Räucherammer mit interner Raucherzeugung,“ März 2017. [Online]. Available: http://c.heimwerker.de/fa/_processed_/csm_raeucherofen_heiss_bcc26b7ac2.gif.
- [34] DVA HOLLAND-MERTEN GMBH, „DVA-CM,“ März 2017. [Online]. Available: <http://www.dva-cm.de/kontakt/rechtliches/impressum/>.
- [35] P. u. L. O. M. GbR, „Räucherofen-Test.de,“ März 2017. [Online]. Available: <http://www.raeucherofen-test.de/raeuchertonnen/>.
- [36] Jimdo, „Der Raeucher Frizz,“ März 2017. [Online]. Available: <https://der-raeucher-frizz.jimdo.com/>.
- [37] B. B. d. E.-. u. W. e.V., „Gewerbegas,“ März 2017. [Online]. Available: <https://www.gewerbegas.info/erdgas-im-gewerbe/fleischerei/geraete-und-heizsysteme>.
- [38] P. Eisner, M. Menner und Fraunhofer-Gesellschaft, „Innerbetriebliche Reinigung von Abwässern aus Räucheranlagen,“ März 2017. [Online]. Available: <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/PX-18817.html>.
- [39] R. Zehnder, „Wie gesund ist Geräuchertes?,“ Schweizer Radio und Fernsehen (SRF), 2014.
- [40] Schaeffer Technologies GmbH & Co. Kg, Technisches Taschenbuch, siehe Autor, 2014.
- [41] SKF®, Y-Lager und Y-Lagereinheiten - PUB BU/P1 13728 DE, ©SKF Gruppe 2015, Oktober 2015.
- [42] H.Czichos und M.Hennecke, Das Ingenieur-Wissen, 32.Auflage, Springer.
- [43] DIY Digital GmbH, „Heimwerker,“ [Online]. Available: <http://www.heimwerker.de/garten/grillen/smoker-und-raeucherofen/raeucherofen-bauen-kaltraeuchern.html>. [Zugriff am November 2017].

Anhang

Tabelle 17: Vorteile der einzelnen Rührervarianten

<u>Ankerrührer</u>	<u>1-gängiger Wendelrührer</u>	<u>2-gängiger Wendelrührer</u>	<u>mehrere Schrägblattrührer</u>	<u>mehrere Scheibenrührer</u>
wenige Anhaftungen	Förderwirkung	Förderwirkung, Rückförderung	höhere Flexibilität	höhere Flexibilität
mittlere Schonung	schonende Mischung	schonende Mischung	weniger Drehmoment	weniger Drehmoment
hoher Mischungsgrad	hoher Mischungsgrad	hoher Mischungsgrad	geringe Klumpenbildung	Klumpen kann nicht so einfach entstehen

Tabelle 18: Nachteile der einzelnen Rührervarianten

<u>Ankerrührer</u>	<u>1-gängiger Wendel-rührer</u>	<u>2-gängiger Wendel-rührer</u>	<u>mehrere Schrägblattrührer</u>	<u>mehrere Scheiben- rührer</u>
Verklumpungswahrscheinlichkeit am größten	ungleiche Verteilung	aufwendiger	viele Rührorgane Notwendig	viele Rührorgane Notwendig
keine Förderwirkung		teurer	teure Verarbeitung	teure Verarbeitung
			großer Reinigungsaufwand	großer Reinigungsaufwand

Tabelle 19: Vorteile der einzelnen Trommelvarianten

<u>ohne Einbauten</u>	<u>8 gerade Bleche</u>	<u>8 gebogene Bleche</u>	<u>Maschen</u>	<u>8 "gerade" Schaufeln</u>	<u>8 "schräge" Schaufeln</u>	<u>Kammerung</u>
einfache Fertigung	große Oberfläche	gute Rührwirkung	enorme Oberfläche	gute Gutmitnahme	sehr gute Gutmitnahme	gute Durchmischung
einfache Reinigung	schonendes Rieseln	gute Oberflächen-nutzung		gute Oberflächen-nutzung	gute Oberflächen-nutzung	große Produkt-Oberfläche
wenig Verklebungen	90° Winkel um Anhaftungen zu Verhindern	90° Winkel um Anhaftungen zu Verhindern				schonende Mischung
wenig Wartungsaufwand	mittlerer Wartungsaufwand	mittlerer Wartungsaufwand				

Tabelle 20: Nachteil der einzelnen Trommelvarianten

<u>ohne Einbauten</u>	<u>8 gerade Bleche</u>	<u>8 gebogene Bleche</u>	<u>Maschen</u>	<u>8 "gerade" Schaufeln</u>	<u>8 "schräge" Schaufeln</u>	<u>Kammerung</u>
keine gute Durchmischung	Gut fällt früh von den Blechen	Kugelmühl en-Effekt (langer Fall)	hohes Verklebungs-Risiko	Winkel leicht spitz	spitzer Winkel in den Schaufeln	Sensorik schwer anzubringen
geringe Oberfläche			Hoher Fertigungsaufwand	Verklebungsrisiko + hoher Reinigungsaufwand	Verklebungsrisiko + hoher Reinigungsaufwand	größerer Fertigungsaufwand
			enormer Reinigungsaufwand	Kugelmühlen-Effekt (langer Fall)	Kugelmühlen-Effekt (langer Fall)	mögliche Verklebungen

Tabelle 21: Bewertung der Gegenüberstellung der Konzepte

Parameter	Wanne	Rührer	Trommel
Drehzahl	Begrenzt durch Förderhöhe	unbegrenzt	unbegrenzt
benötigter Raum	gering, weil Zugriff von Oben	groß, da Rührer gezogen werden muss	mittel, durch seitliche Öffnung
Füllmasse	gering, da Ankerrührer geringe Umwälzung hervorruft	beliebig	beliebig
Füllmengenanteil	halber Zylinder muss nicht mit Rauch gefüllt werden	Rest des Behälters mit Rauch	Rest des Behälters mit Rauch
Rauchgutzufuhr/-Abfuhr	Produkt per Hand von oben einfüllen und entleeren	durch Schiefstellung oder Rührer gestaltbar	durch Schiefstellung oder Innenleben gestaltbar
Reinigung	Reinigungsmittel mit gelösten Stoffen über den Boden/Ausfluss ableitbar	Gefahr Motor zu verunreinigen, teilweise unhandlich	teilweise unhandlich, Behälter und Motor räumlich unabhängig
Verklebungsrisiko/Rückstand	Durch geringe Umwälzung hohes Verklebungsrisiko, ungleichmäßige Befeuchtung	mittlere Bewegung, kleine Verklebungen können gelöst werden durch Rührer	maximaler Bewegungsgrad, gleichmäßige Befeuchtung
Durchmischungsgrad	Niedrig durch geringe Umwälzung/Bewegung	mittel durch Rührer, jedoch keine vollständige Bewegung	hoch, durch komplette Trommelbewegung
Wartung	Antrieb und Behälter nicht trennbar, beides wie auch Rührer müssen gewartet werden	Antrieb und Behälter nicht trennbar, beides wie auch Rührer müssen gewartet werden	Behälter von Antrieb trennbar, Rührorgan mit Behälter verbunden
Sensorik	komplette Sensorik ist einfach über den Deckel zu gestalten	Rührorgan könnte Sensorik behindern	Trommel dreht sich Kontinuierlich

Flexibilität	ausschließlich mit Ankerrührer verwendbar	Rührorgan auswechselbar und variabel gestaltbar	Rührorgan nicht auszuwechseln, aber verschiedene Gestaltungs- Möglichkeiten
--------------	---	---	---

Behälterauslegung nach DIN EN 13445 - 3

Symbol Größe Einheit

e	erforderliche Dicke	mm
e_n	Nennstärke	mm
e_{\min}	minimal mögliche Herstellstärke	mm
e_a	analytisch ermittelte Dicke	mm
c	Korrosions- oder Erosionszuschlag	mm
f	Berechnungsnennspannung	MPa or N/mm ²
d_f	maximaler Betrag der Berechnungsnennspannung für normale Betriebsfälle	MPa or N/mm ²
f_{\exp}	maximaler Betrag der Berechnungsnennspannung für außergewöhnliche Betriebsfälle	MPa or N/mm ²
f_{test}	maximaler Betrag der Berechnungsnennspannung für Prüflastfälle	MPa or N/mm ²
n_{eq}	Anzahl gleicher voller Druckzyklen	-
P	Berechnungsdruck	MPa or N/mm ²
P_d	Auslegungsdruck	MPa or N/mm ²
P_{\max}	maximal zulässiger Druck	MPa or N/mm ²
P_S, P_s	maximal zugelassener Druck	MPa or N/mm ²
P_{test}	Prüfdruck	MPa or N/mm ²
R_{eH}	untere Streckgrenze	MPa or N/mm ²
R_m	Mindestzugfestigkeit	MPa or N/mm ²
$R_{m/t}$	Mindestwert der Zugfestigkeit bei Temperatur t in °C	MPa or N/mm ²
$R_{p0,2}$	Mindestwert der 0,2 % Dehngrenze	MPa or N/mm ²
$R_{p0,2/t}$	Mindestwert der 0,2 % Dehngrenze bei Temperatur t in °C	MPa or N/mm ²
$R_{p1,0}$	Mindestwert der 1,0 % Dehngrenze	MPa or N/mm ²
$R_{p1,0/t}$	Mindestwert der 1,0 % Dehngrenze bei Temperatur t in °C	MPa or N/mm ²
t	Temperatur	°C
d_t	Berechnungstemperatur	°C
t_{test}	Prüftemperatur	°C
$T_{S\max}, T_{S\min}$	maximal/minimal zulässige Temperaturen	°C
V	Volumen eines Behälters (oder Druckraumes)	mm ³
z	Schweißnahtfaktor	-
	Querkontraktionszahl	-
D_i	Innendurchmesser	mm
D_e	Außendurchmesser	mm

f	Berechnungsnennspannung	MPa	or	N/mm ²
z	Schweißnahtfaktor	-		
e _b	Erforderliche Wanddicke der Krempe zur Verhinderung plastischen Beulens			
e _s	Erforderliche Wanddicke des Bodens zur Begrenzung der Membranspannung in der Mitte			
e _y	Erforderliche Wanddicke der Krempe zur Verhinderung achssymmetrischen Fließens			
f _b	Berechnungsnennspannung in der Beulgleichung			
h _i	Innenhöhe eines elliptischen Bodens			
K	Berechnungsbeiwert für einen elliptischen Boden nach Definition in Gleichung (7.5-18)			
N	Parameter nach Definition in Gleichung (7.5-12)			
R	Innenradius im Mittelbereich eines torisphärischen Bodens			
X	Verhältnis von Krempenradius zu Schaleninnendurchmesser			
Y	Parameter nach Definition in Gleichung (7.5-9)			
Z	Parameter nach Definition in Gleichung (7.5-10)			
β	Beiwert ermittelt aus Bild 7.5-1 und 7.5-2 oder durch das Verfahren in 7.5.3.5.			
r	Innenradius der Krümmung einer Krempe			

Abschnitt 7.4

Geltungsbereich der Nachstehenden Berechnungen der Zylinderwanddicke:

$$\text{gilt nur für } \frac{e}{D_e} \leq 0,16$$

Wanddicke e:

$$e = \frac{p \cdot D_i}{2 \cdot f \cdot z - p} \quad \text{oder} \quad e = \frac{p \cdot D_e}{2 \cdot f \cdot z + p} \quad (7.4.1) / (7.4.2)$$

Materialabhängig Größe

Kurzname	Werkstoffnummer	Bruchdehnung	Zugfestigkeit	Streckgrenze	Streckgrenze
		A	R _m	0,2%	1%
		min. %	min. N/mm ²	R _{p0,2}	R _{p1,0}
				min. N/mm ²	min. N/mm ²
X5CrNi18-10	1.4301	45	500 - 700	190	225

Auslegungsbedingungen

Für die Berechnungstemperatur wird eine Sicherheit von 25 K angenommen, wodurch sie nun 50°C beträgt. Die daraus Interpolierte Streckgrenze 1% bei der vorherrschenden Berechnungstemperatur beträgt 208 N/mm². Für R_{m,t} wird die untere Grenze festgelegt.

$$f_d = \max \left[\left(\frac{R_{p1,0/t}}{1,5} \right); \min \left(\frac{R_{p1,0/t}}{1,2}; \frac{R_{m/t}}{3} \right) \right]$$

$$f_d = \max \left[\left(\frac{208}{1,5} \right); \min \left(\frac{208}{1,2}; \frac{500}{3} \right) \right] = \max [(139); \min(173; 167)]$$

$$f_d = 167 \frac{N}{mm^2}$$

Prüfbedingung

$$f_{test} = \max \left[\left(\frac{R_{p1,0/t}}{1,05} \right); \left(\frac{R_{m/t}}{2} \right) \right]$$

$$f_{test} = \max \left[\left(\frac{208}{1,05} \right); \left(\frac{500}{2} \right) \right] = \max [(198); (250)]$$

$$f_{test} = 250 \frac{N}{mm^2}$$

$$p_{ges} = p + \rho \cdot g \cdot h = 0,15 \frac{N}{mm^2} + 2,160 \frac{kg}{mm^3} \cdot 10^{-6} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 400mm$$

$$p_{ges} = 0,1585MPa = 1,585bar$$

Die Berechnung wurde mit der Dichte von Salz vorgenommen, da diese größer ist als das mit am meisten verwendete Zucker. Dadurch resultiert auch ein größerer Druck durch das Medium. Dies soll als Sicherheitsmaßnahme dienen, damit der Behälter auch für die anderen Medien genutzt werden kann.

Für die Kontrolle der Schweißnähte wird die Prüfgruppe 3 festgelegt, wodurch sich ein Wert von 0,85 für z ergibt. Dadurch kann der Prüfaufwand gesenkt werden ohne an Sicherheit einzubüßen.

$$e = \frac{p_{ges} \cdot D_e}{2 \cdot f \cdot z + p} = \frac{0,1585MPa \cdot 800mm}{2 \cdot 167 \frac{N}{mm^2} \cdot 0,85 + 0,1585MPa}$$

$$e = 0,446mm$$

Mindestwanddicke, welche technisch herstellbar ist beträgt 2 mm (AD-Merkblätter).

Für eine gegebene Wanddicken gilt:

$$p_{c \max} = \frac{2 \cdot f \cdot z \cdot e_{act}}{D_m} = \frac{2 \cdot 167 \frac{N}{mm^2} \cdot 0,85 \cdot 2mm}{798mm} \quad (7.4.3)$$

$$p_{c \max} = 0,712MPa = 7,12bar$$

Die Überprüfung des Geltungsbereiches bestätigte die mögliche Verwendung der angegebenen Formeln:

$$\frac{e}{D_e} = \frac{2mm}{800mm} = 0,0025 \leq 0,16$$

Klörperboden

$$\frac{R}{D_e} = 1,0 \text{ und } \frac{r}{D_e} = 0,1$$

$$R = 800 \quad r = 80$$

Geltungsbereich der nachstehenden Berechnungen der Wanddicke von torisphärischen Böden. Gilt nur wenn alle aufgelisteten Bedingungen erfüllt sind.

Bedingung	Aktuell	Prüfung (j/n)
$r \leq 0,2 \cdot D_i$	$80 \leq 0,2 \cdot 796$	J
$r \geq 0,06 \cdot D_i$	$80 \geq 0,06 \cdot 796$	J
$r \geq 2 \cdot e$	$80 \geq 2 \cdot 2$	J
$e \leq 0,08 \cdot D_e$	$2 \leq 0,08 \cdot 800$	J
$e \geq 0,001 \cdot D_e$	$2 \geq 0,001 \cdot 800$	J
$R \leq D_e$	$800 \leq 800$	J

Die Wanddicke des Bodens entspricht dem größten der folgenden Werte e_s , e_y und e_b .

$$e_s = \frac{P \cdot R}{2 \cdot f \cdot z - 0,5 \cdot P} = \frac{0,16 \text{MPa} \cdot 800 \text{mm}}{2 \cdot 167 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 1 - 0,5 \cdot 0,16 \text{MPa}}$$

$$e_s = 0,383 \text{mm}$$

Für e_y ist ein β notwendig, welches über das Diagramm 7.5-1 bestimmt werden kann. Hierfür sind zwei Rechnungen zuvor durchzuführen.

Zum einen ist das Verhältnis zwischen r und D_i zu ermitteln um den richtigen Graphen auszuwählen.

Zum anderen mal ist $\left(0,75 + 0,2 \cdot \frac{D_i}{R}\right) \cdot \frac{P}{f}$ zu berechnen.

Formel	$\frac{r}{D_i}$	$\left(0,75 + 0,2 \cdot \frac{D_i}{R}\right) \cdot \frac{P}{f}$
Ergebnis	0,1005	0,00091

Daraus ergibt sich ein $\beta = 1,15$.

$$e_y = \frac{\beta \cdot P \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 D_i)}{f} = \frac{1,15 \cdot 0,16 \text{MPa} \cdot (0,75 \cdot 800 + 0,2 \cdot 796 \text{mm})}{167 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}$$

$$e_y = 0,836 \text{mm}$$

Die Berechnung für e_b entfällt wenn $e_y > 0,005 D_i$ ist.

$$e_y = 0,836 \text{mm} \geq 0,005 \cdot 796 \text{mm}$$

$$e_y = 0,836 \text{mm} \geq 3,98 \text{mm}$$

Dies ist jedoch nicht der Fall.

$$e_b = (0,75 \cdot R + 0,2 D_i) \cdot \left[\frac{P}{111 \cdot f_b} \left(\frac{D_i}{r} \right)^{0,825} \right]^{\left(\frac{1}{1,5} \right)}$$

Dabei ist $f_b = \frac{R_{p0,2/t}}{1,5} = 115,33 \frac{N}{mm^2}$ oder $f_b = \frac{1,6 \cdot R_{p0,2/t}}{1,5} = 184,53 \frac{N}{mm^2}$

$$e_b = (0,75 \cdot 800mm + 0,2 \cdot 796mm) \cdot \left[\frac{0,16MPa}{111 \cdot 115,33 \frac{N}{mm^2}} \left(\frac{796mm}{80mm} \right)^{0,825} \right]^{\left(\frac{1}{1,5} \right)}$$

$$e_b = 759,2mm \cdot 1,906 \cdot 10^{-3}$$

$$e_b = 1,447mm$$

e_b nimmt mit 1,447mm den größten Wert an und bestimmt somit die Dicke der Behälterbodenwandung.

Da jedoch auch hier eine Mindestfertigungsgrenze vorliegt, wird eine größere Wandung hergestellt als rechnerisch ermittelt. Auch nach DIN 13445-3 besitzt der Gesamte Behälter aus Fertigungsgründen somit die Wanddicke von 2 mm.

Deshalb schließt sich eine Nachrechnung an, wodurch ebenso der maximal zulässige Druck ermittelt werden kann.

$$p_s = \frac{2 \cdot f \cdot z \cdot e_a}{R + 0,5 \cdot e_a} = \frac{2 \cdot 167 \frac{N}{mm^2} \cdot 1 \cdot 2mm}{800mm + 0,5 \cdot 2mm}$$

$$p_s = 0,834MPa = 8,34bar$$

$$p_y = \frac{f \cdot e_a}{\beta \cdot (0,75 \cdot R + 0,2D_i)} = \frac{167 \frac{N}{mm^2} \cdot 2mm}{1,15 \cdot (0,75 \cdot 800mm + 0,2 \cdot 796mm)}$$

$$p_y = 0,383MPa = 3,83bar$$

$$p_b = 111 \cdot f_b \cdot \left(\frac{e_a}{0,75 \cdot R + 0,2D_i} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{D_i}{r} \right)^{0,825}$$

$$p_b = 111 \cdot 115,33 \frac{N}{mm^2} \cdot \left(\frac{2mm}{0,75 \cdot 800mm + 0,2 \cdot 796mm} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{796mm}{80mm} \right)^{0,825}$$

$$p_b = 11,521MPa = 115,21bar$$

Der höchstzulässige Berechnungsdruck P_{max} wird durch p_y festgelegt, denn dieser besitzt mit 3,83 bar den niedrigsten Wert.

Erster Schnitt von rechts:

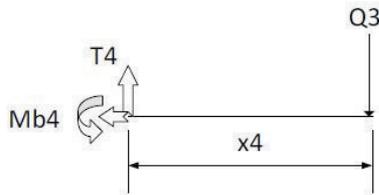


Abbildung 44: Erster Schnitt von rechts - Zwischen Zahnrad und Lager B

$$\uparrow T_4 - Q_4 = 0$$

$$T_4(0m \leq x_4 \leq 0,166m) = 11589,00N$$

$$\curvearrowright -M_{b4} - Q_3 \cdot x_4 = 0$$

$$M_{b3}(0m \leq x_3 \leq 0,166m) = -11589,00N \cdot 0,166m$$

$$M_{b4}(x_4 = 0m) = 0Nm$$

$$M_{b4}(x_4 = d = 0,166m) = -1923,77Nm$$

Zweiter Schnitt von rechts:

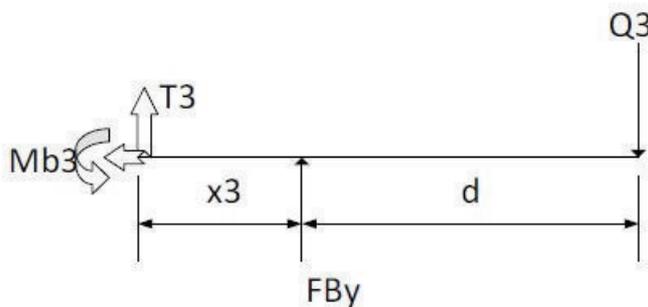


Abbildung 45: Zweiter Schnitt von rechts - Zwischen Lager B und Reibrad 2

$$\uparrow T_3 - Q_3 + F_{by} = 0$$

$$T_3(0m \leq x_3 \leq 0,26m) = 11589,00N - 17674,23N$$

$$T_3(0m \leq x_3 \leq 0,26m) = -6085,23N$$

$$\curvearrowright -M_{b3} - Q_3 \cdot (x_3 + d) + F_{by} \cdot x_3 = 0$$

$$M_{b3}(0m \leq x_3 \leq 0,26m) = 17674,23N \cdot 0,26m - 11589,00N \cdot (0,26m + 0,166) = 0$$

$$M_{b3}(x_3 = 0m) = -1923,77Nm$$

$$M_{b3}(x_3 = c = 0,26m) = -341,61Nm$$

Dritter Schnitt von rechts:

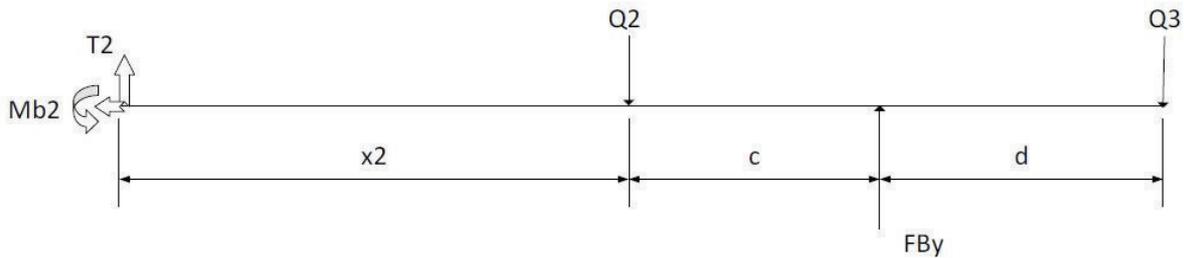


Abbildung 46: Dritter Schnitt von rechts - Zwischen Reibrad 2 und Reibrad 1

$$\uparrow T_2 - Q_3 - Q_2 + F_{by} = 0$$

$$T_2(0m \leq x_2 \leq 1,11m) = -1767423N + 1158900N + 490500N$$

$$T_2(0m \leq x_2 \leq 1,11m) = -1180,23N$$

$$\curvearrowright -M_{b2} - Q_3 \cdot (d + c + x_2) - Q_2 \cdot x_2 + F_{by} \cdot (c + x_2) = 0$$

$$M_{b2}(0m \leq x_2 \leq 1,11m) = -11589,00N \cdot (0,166 + 0,26 + 1,11)m - 4905 \cdot 1,11m + 176774,23N \cdot (0,26 + 1,11)m$$

$$M_{b2}(x_2 = 0m) = -341,61Nm \quad M_{b2}(x_2 = b = 1,11m) = 968,44Nm$$

Vierter Schnitt von rechts:

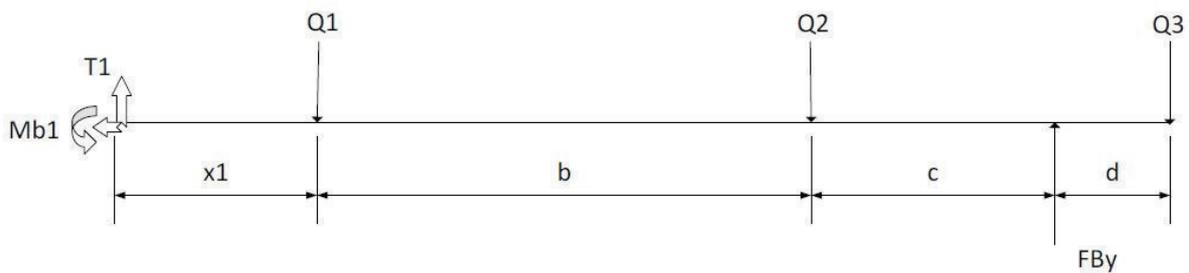


Abbildung 47: Vierter Schnitt von rechts - Zwischen Reibrad 1 und Lager A

$$\uparrow T_1 - Q_3 - Q_2 - Q_1 + F_{by} = 0$$

$$T_1(0m \leq x_1 \leq 0,26m) = -1767423N + 1158900N + 490500N + 490500N$$

$$T_1(0m \leq x_1 \leq 1,11m) = 3724,77N$$



$$-M_{b_1} - Q_3 \cdot (d + c + b + x_1) - Q_2 \cdot (b + x_1) - Q_1 \cdot x_1 + F_{by} \cdot (c + b + x_1) = 0$$

$$M_{b_1}(0m \leq x_1 \leq 0,26m) = -11589,00N \cdot (0,166 + 0,26 + 1,11 + 0,26)m - 4905 \cdot 1,11m$$

$$-4905 \cdot (0,26 + 1,11)m + 176774,23N \cdot (0,26 + 1,11 + 0,26)m$$

$$M_{b_1}(x_1 = 0m) = 968,44Nm$$

$$M_{b_1}(x_1 = a = 0,26m) = 0Nm$$

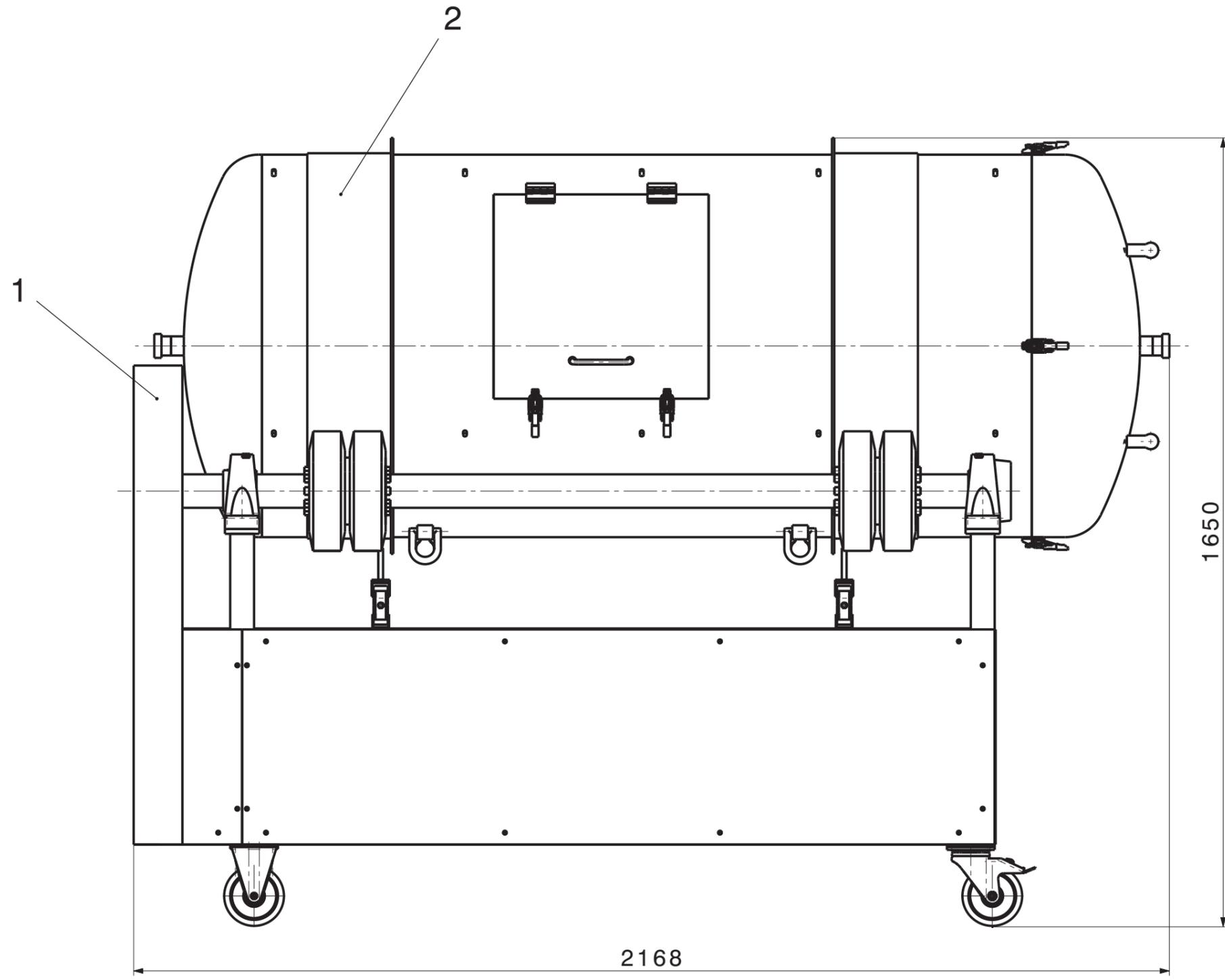
Abbildungsverzeichnisverzeichnis

Abbildung 1: Guajakol und Syringol [4]	10
Abbildung 2: Sinapinsäure [6]	11
Abbildung 3: Interne Rauchgaserzeugung [9]	17
Abbildung 4: Externe Rauchgaserzeugung [9]	17
Abbildung 5: schematische Darstellung Smoker [9]	18
Abbildung 6: Beispiel eines Räucherofens [10]	18
Abbildung 7: Fließbild des Räucherungsprozesses im Ist- Zustandes	20
Abbildung 8: Mögliches Fließbild für zukünftige Räucherprozesse	21
Abbildung 9: Ishikawa-Diagramm - Einflussfaktoren für den PAK-Wert	24
Abbildung 10: Ersten Konzeptüberlegungen	26
Abbildung 11: Konzept Wanne, eigene Darstellung	30
Abbildung 12: Konzept Ankerrührer, eigene Darstellung	31
Abbildung 13: Konzept 1-gängiger Wendelrührer, eigene Darstellung	31
Abbildung 14: Konzept Scheibenrührer, eigene Darstellung	31
Abbildung 15: Konzept mit geraden Blechen	35
Abbildung 16: Konzept mit gebogenen Blechen	35
Abbildung 17: Konzept mit Taschen/ Schaufeln	35
Abbildung 18: Konzept Kammerung	35
Abbildung 19: Tragöse nach DIN 28086 (Bild 1)	50
Abbildung 20: Schwenkbare Tragöse [13]	51
Abbildung 21: Edelstahl Verschlussspanner [14]	53
Abbildung 22: Seitlicher Deckel mit Bohrungen für Scharniere und Griff	54
Abbildung 23: Motorspannschienen für genormte Motoren der Motorengröße 112 [14]	60
Abbildung 24: PolyChain Carbon Riemen [18]	62
Abbildung 25: PolyChain Zahnscheibe mit 38 Zähne [18]	65
Abbildung 26: PolyChain Zahnscheibe mit 112 Zähnen [18]	65
Abbildung 27: Taperspannbuchse [14]	65
Abbildung 28: Grafische Darstellung der Welle	66
Abbildung 29: Kraftübersicht Antriebswelle	67
Abbildung 30: Erster Schnitt von links - Zwischen Lager A und Reibrad 1	68
Abbildung 31: Zweiter Schnitt von links - Zwischen Reibrad 1 und Reibrad 2	69
Abbildung 32: Dritter Schnitt von links - Zwischen Reibrad 2 und Lager B	69
Abbildung 33: Vierter Schnitt von links - Zwischen Lager B und Zahnrad	70
Abbildung 34: Querkraftverlauf über die Gesamtlänge der Antriebswelle	71
Abbildung 35: Biegemomentenverlauf über die Gesamte Länge der Antriebswelle	72

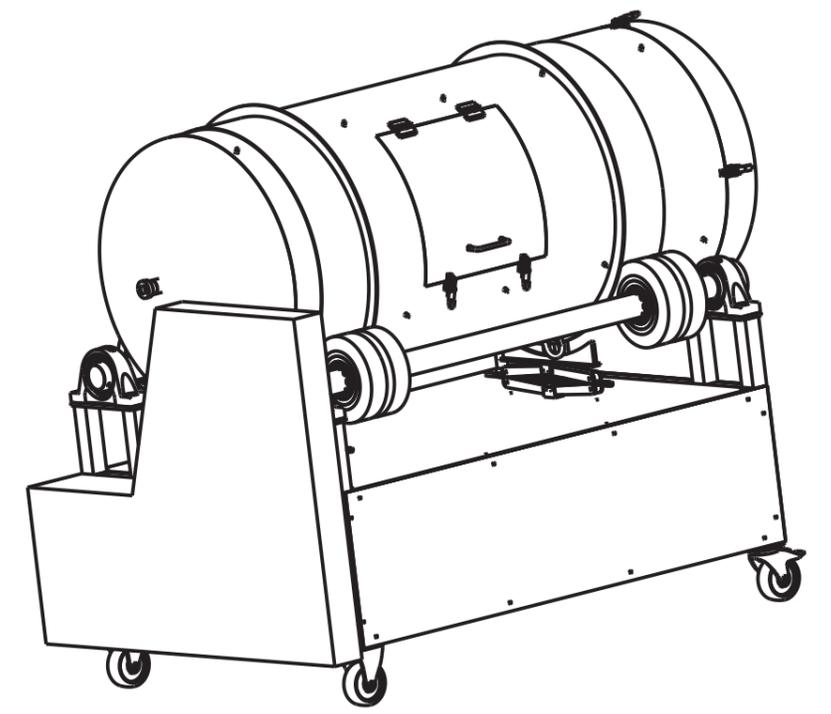
Abbildung 36:Reibrad bestehend aus Metallkörper und Reibring [22]	79
Abbildung 37: Aufbau Clampex KTR 400 [23]	79
Abbildung 38: YAR 214 TF [25]	81
Abbildung 39: SYJ 70 TF [25]	81
Abbildung 40: Isometrische Darstellung des Grundgestells	83
Abbildung 41: Eulerische Knickfälle	85
Abbildung 42: Lenkrolle mit Feststeller	88
Abbildung 43: Bockrolle	88
Abbildung 44: Erster Schnitt von rechts - Zwischen Zahnrad und Lager B	105
Abbildung 45: Zweiter Schnitt von rechts - Zwischen Lager B und Reibrad 2	105
Abbildung 46: Dritter Schnitt von rechts - Zwischen Reibrad 2 und Reibrad 1	106
Abbildung 47: Vierter Schnitt von rechts - Zwischen Reibrad 1 und Lager A	106

Tabellenverzeichnis

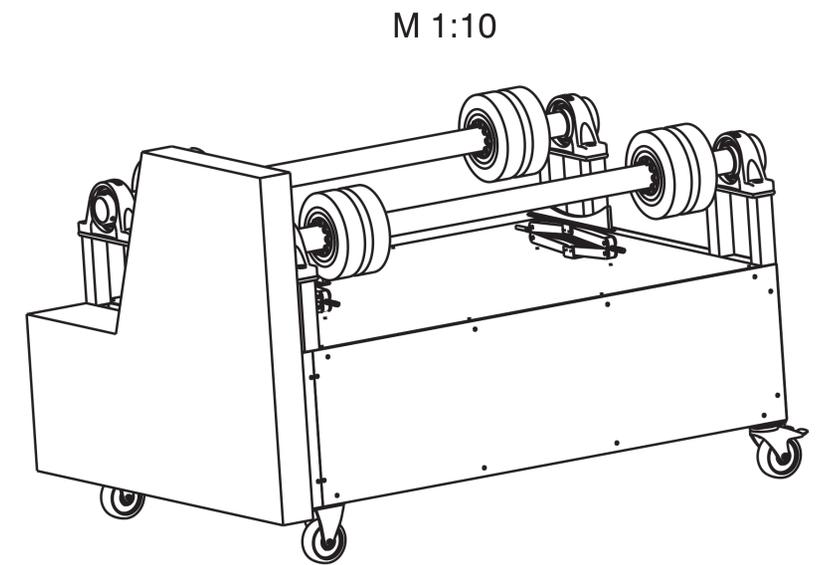
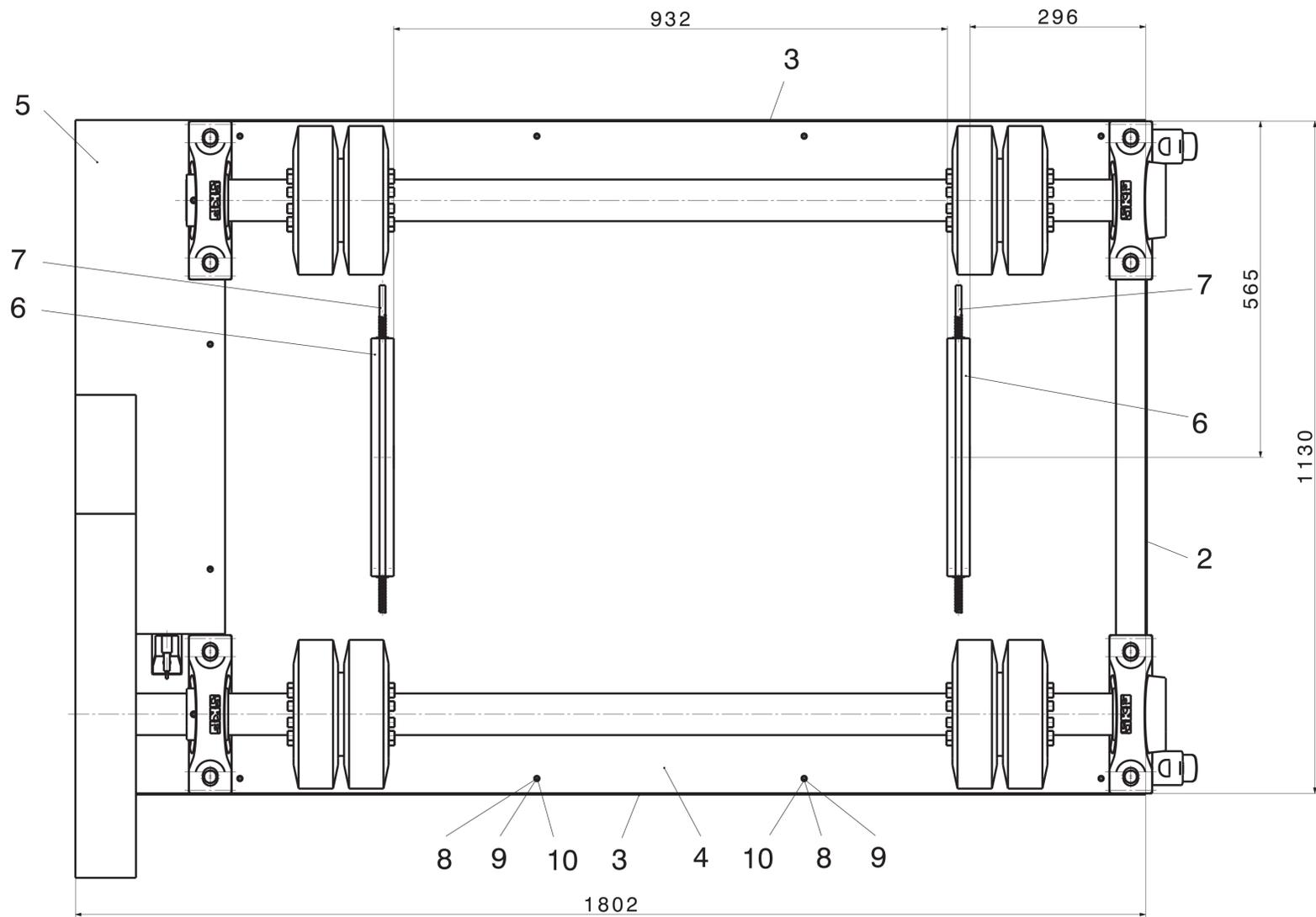
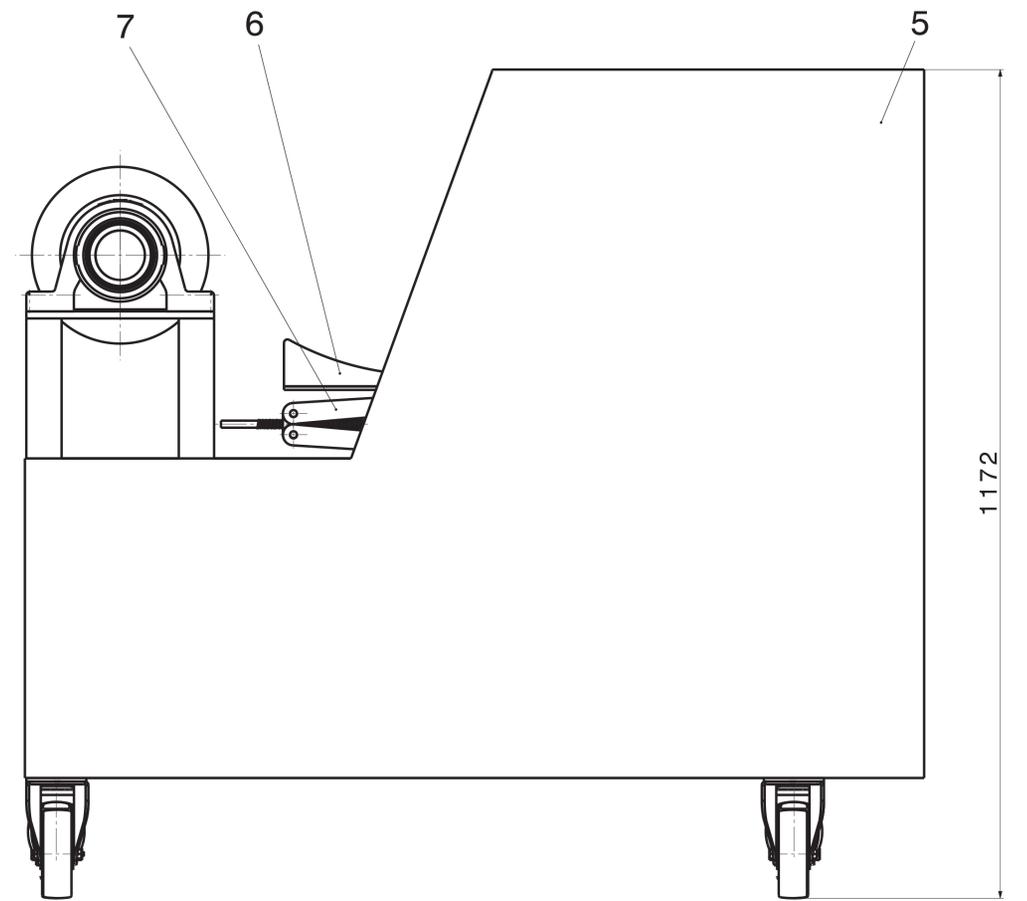
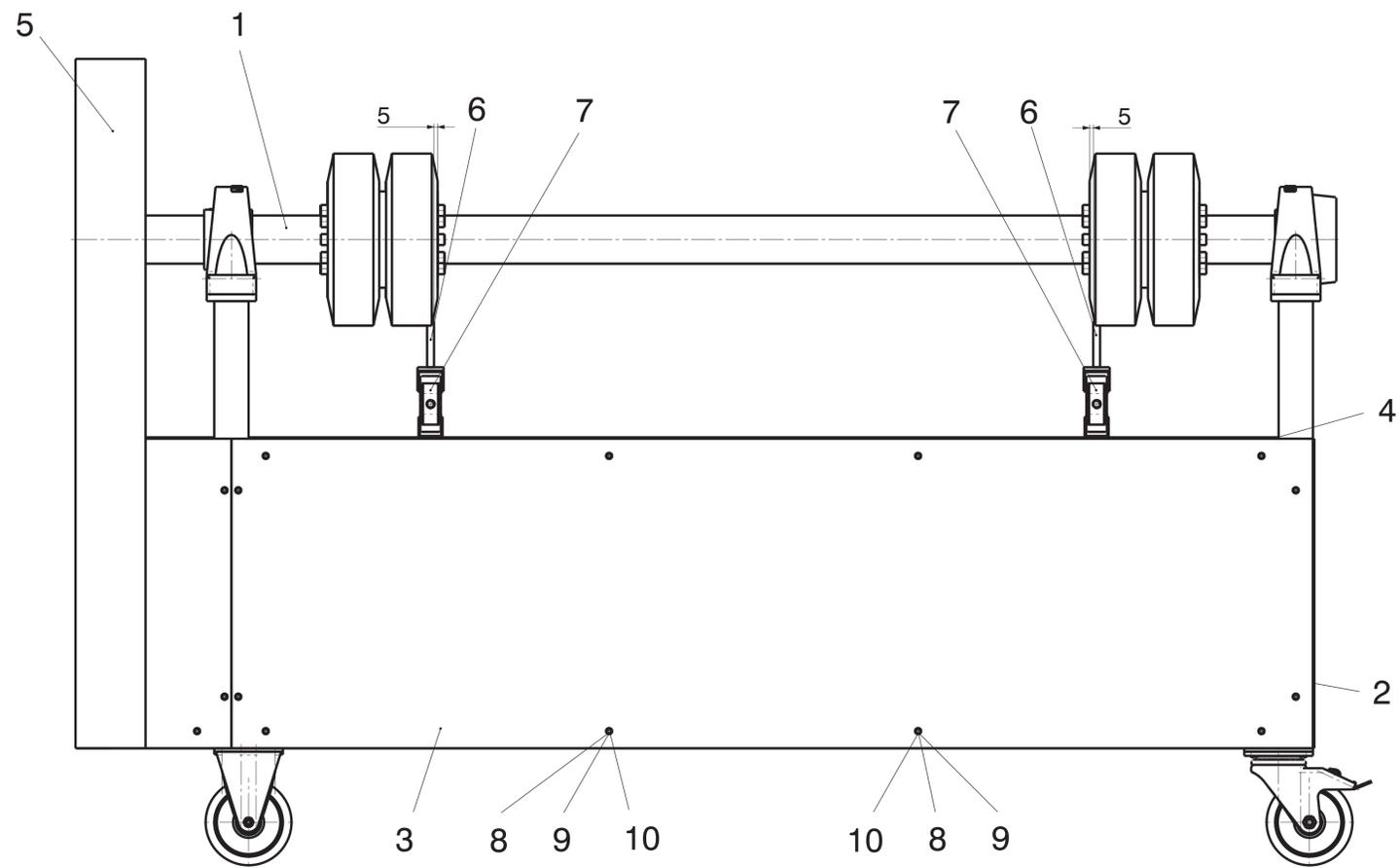
Tabelle 1: Holzarten und deren Anwendungen [1]	9
Tabelle 2: Wirkung des Räucherrauches [7]	12
Tabelle 3: Pyrolyseschritte [6]	13
Tabelle 4: Ausschnitt der Verordnung (EU) Nr. 835/2011	14
Tabelle 5: Räucherarten	15
Tabelle 6: Zusammenfassung gewünschter Aspekte	29
Tabelle 7: Übersicht über Vor- und Nachteile der Rührervarianten	33
Tabelle 8: Übersicht über Vor- und Nachteile der Trommelvarianten	37
Tabelle 9: Übersicht über die Gegenüberstellung der Konzepte	40
Tabelle 10: Übersicht über die anzutreibenden Massen	57
Tabelle 11: Relevante Lasten zur Auslegungsberechnung	57
Tabelle 12: Aufzunehmende Lasten	66
Tabelle 13: Berechnete Lagerkräfte	67
Tabelle 14: Zusammenfassung der Berechneten Werte	71
Tabelle 15: Vergleich Kenndaten und Einsatzbedingungen	81
Tabelle 16: Preisübersicht für Kaufkomponenten	89
Tabelle 17: Vorteile der einzelnen Rührervarianten	95
Tabelle 18: Nachteile der einzelnen Rührervarianten	95
Tabelle 19: Vorteile der einzelnen Trommelvarianten	96
Tabelle 20: Nachteil der einzelnen Trommelvarianten	96
Tabelle 21: Bewertung der Gegenüberstellung der Konzepte	97



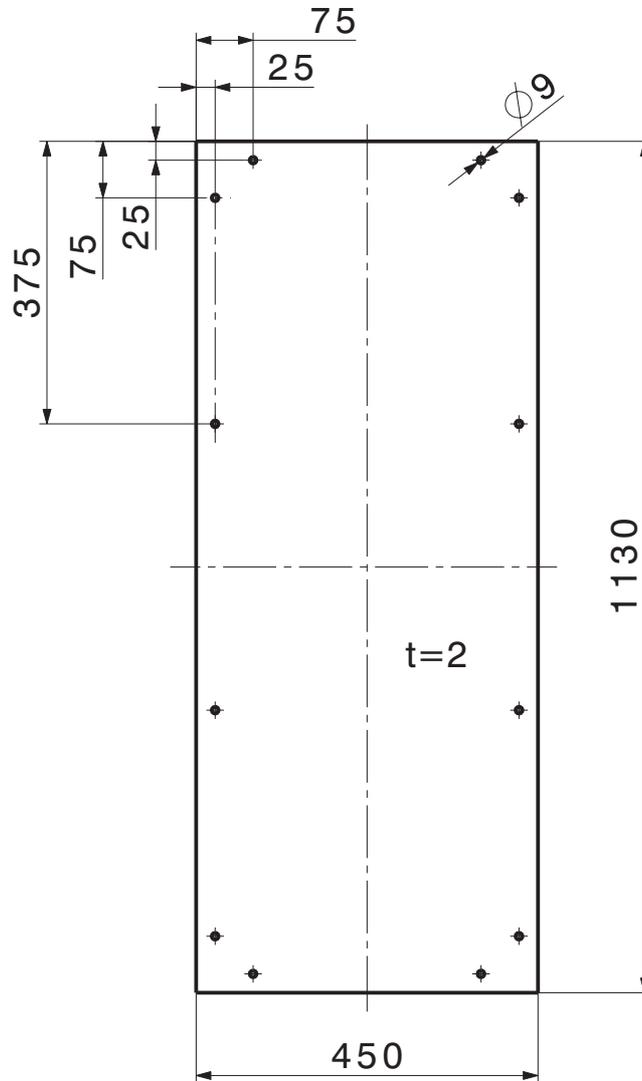
M 1:20



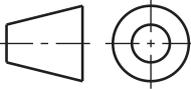
		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768	Oberfl.	Maßstab 1:10 (1:20)	Gewicht ca. 765 kg
		Werkstoff, Halbzeug			Benennung
		2017 Bearb.	Datum 18.10.	Name O. Barthol	Räuchertrommel
		Gepr.			
		Norm			
Hochschule Merseburg				Zeichnungsnummer	Blatt 1
				RT17-1	41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.: Ers. d.:

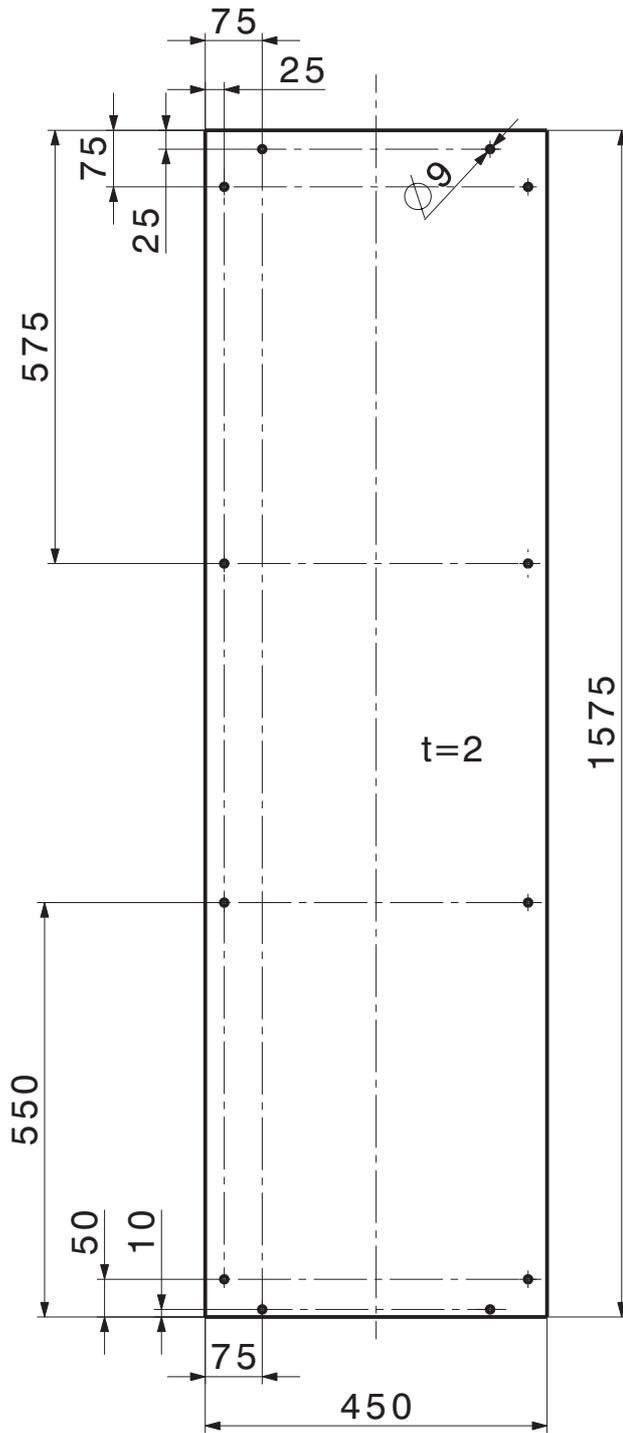


	Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768	Oberfl.	Maßstab 1:5 (1:10)	Gewicht ca. 540 kg
	2017 Datum Bearb. 18.10. Gepr. Norm	Name O. Barthol	Benennung Gestell	
Hochschule Merseburg			Zeichnungsnummer RT17-1-1	Blatt 3 41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. GATIA V5 R21 Ers. f.: Ers. d.:



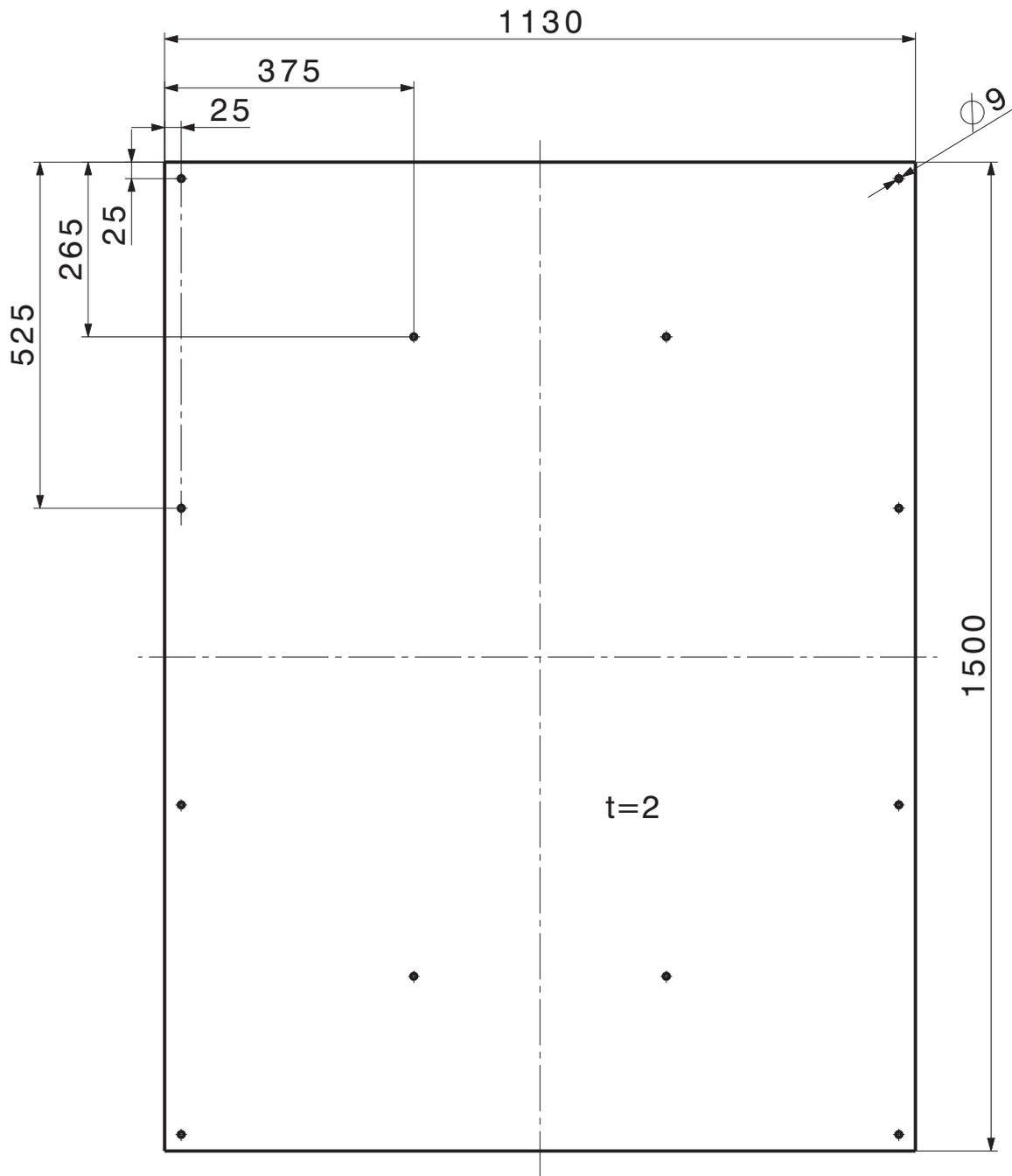
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:10	Gewicht ca. 8 kg	
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Blech EN 10051- 2 x 450 x 1130		
		2017	Datum	Name	Benennung Abdeckblech Hinten		
		Bearb.	11.10.	O. Barthol			
		Gepr.					
		Norm					
		Hochschule Merseburg			Zeichnungsnummer	ET17-1-1-1:01	Blatt 5
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:	41 Bl.



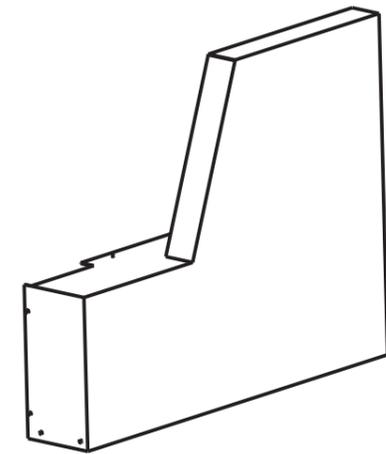
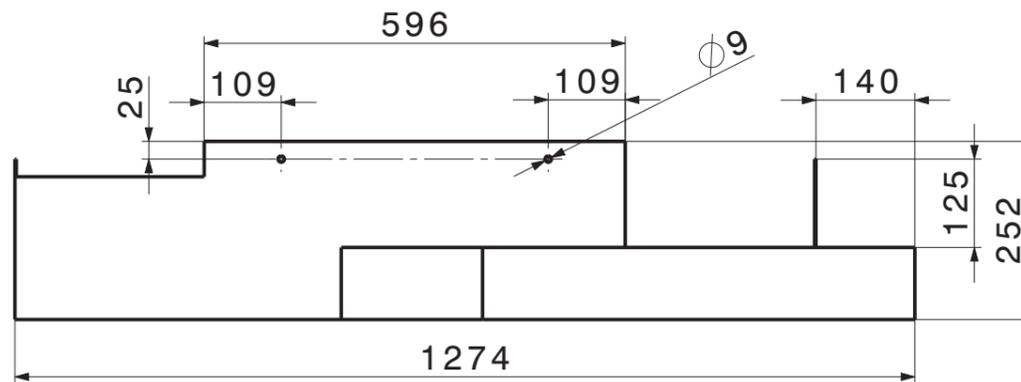
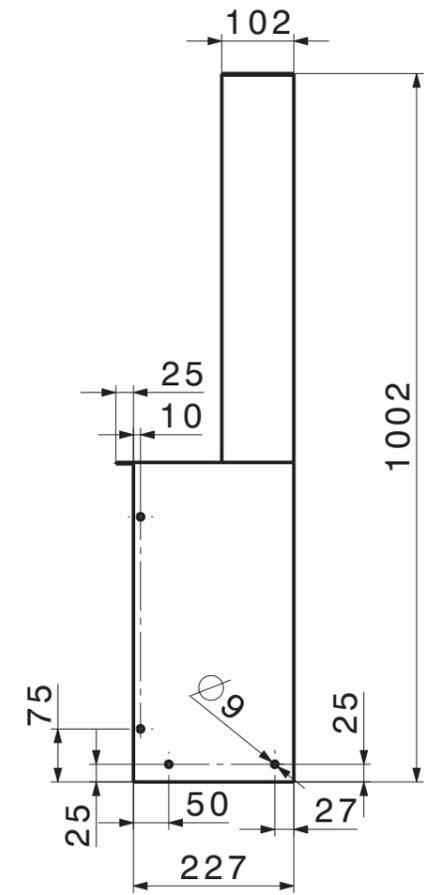
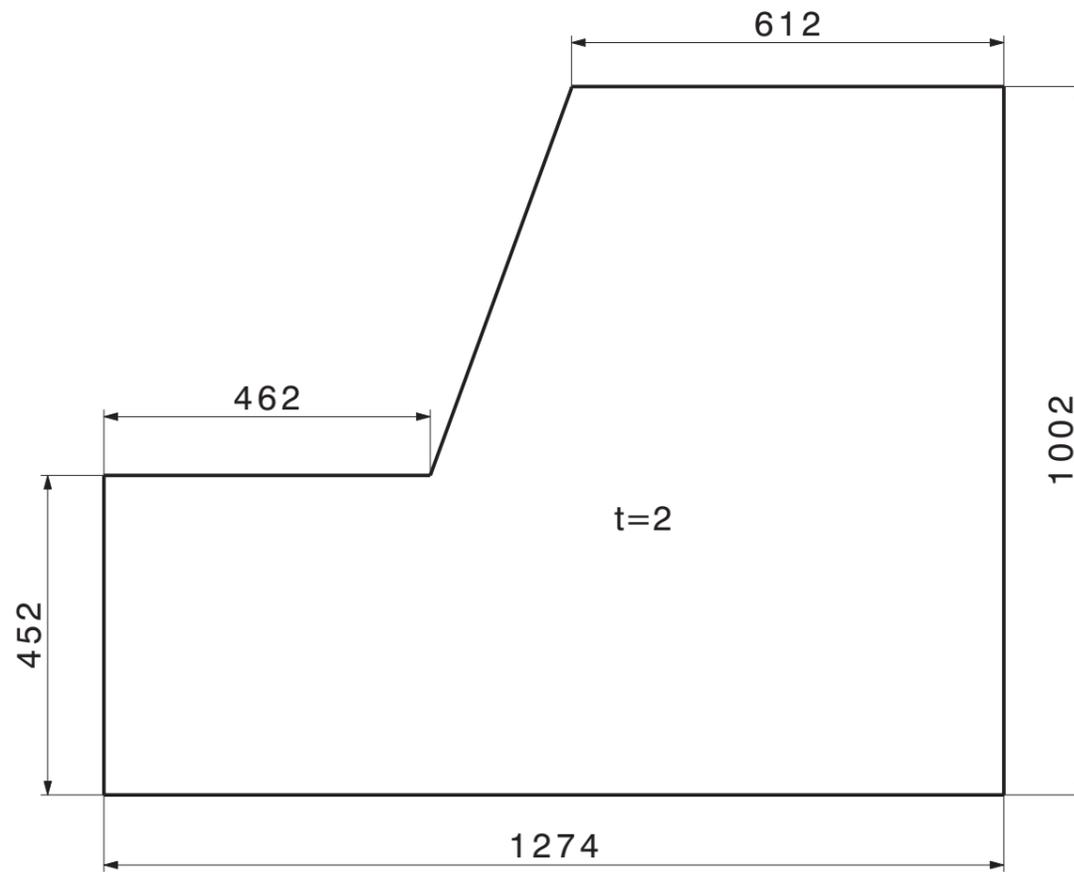
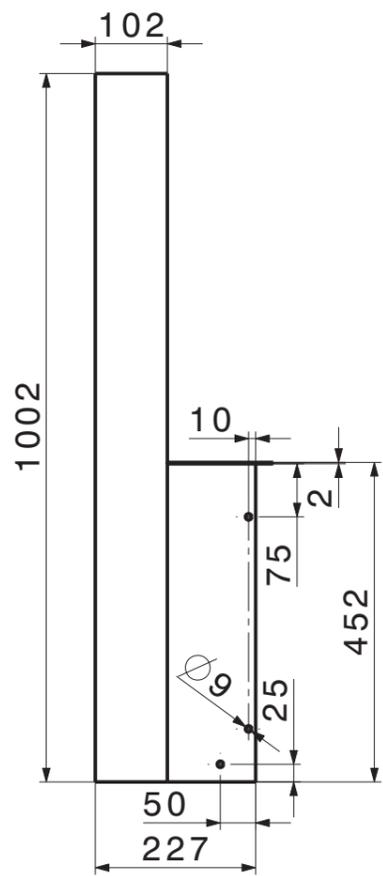
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:10	Gewicht ca. 11 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Blech EN 10051- 2 x 450 x 1575	
		2017	Datum	Name	Benennung Abdeckblech Seite	
		Bearb.	11.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
				Hochschule Merseburg	Zeichnungsnummer ET17-1-1-1:02	Blatt 6
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:
						41 Bl.



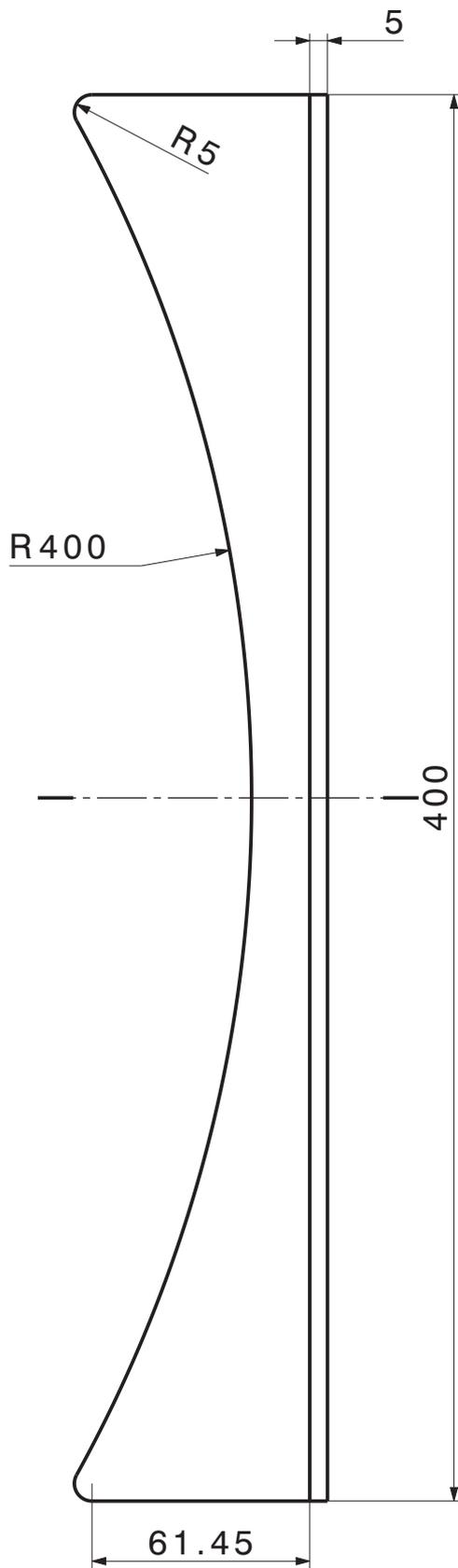
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:10	Gewicht ca. 27 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Blech EN 10051- 2 x 1130 x 1500	
		2017	Datum	Name	Benennung Abdeckblech Oben	
		Bearb.	11.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
		Hochschule Merseburg			Zeichnungsnummer	Blatt
					ET17-1-1-1:03	7
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:
						41 Bl.



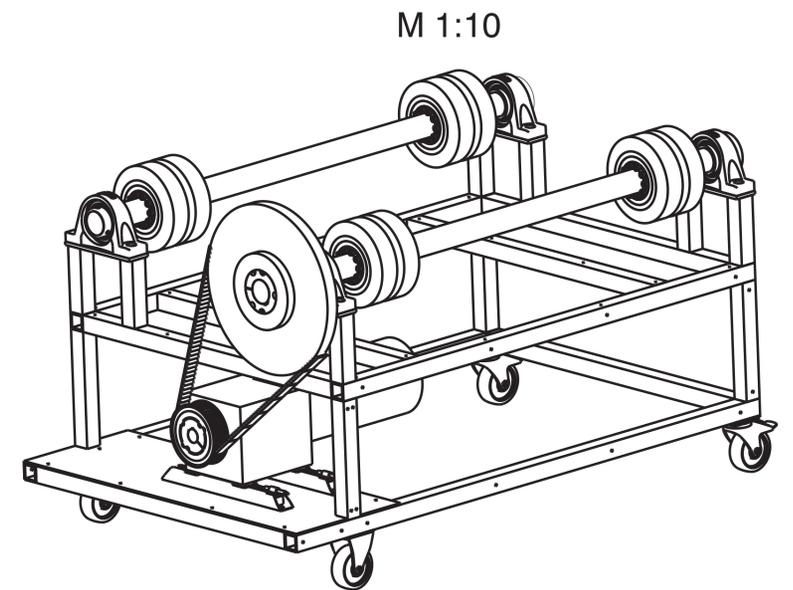
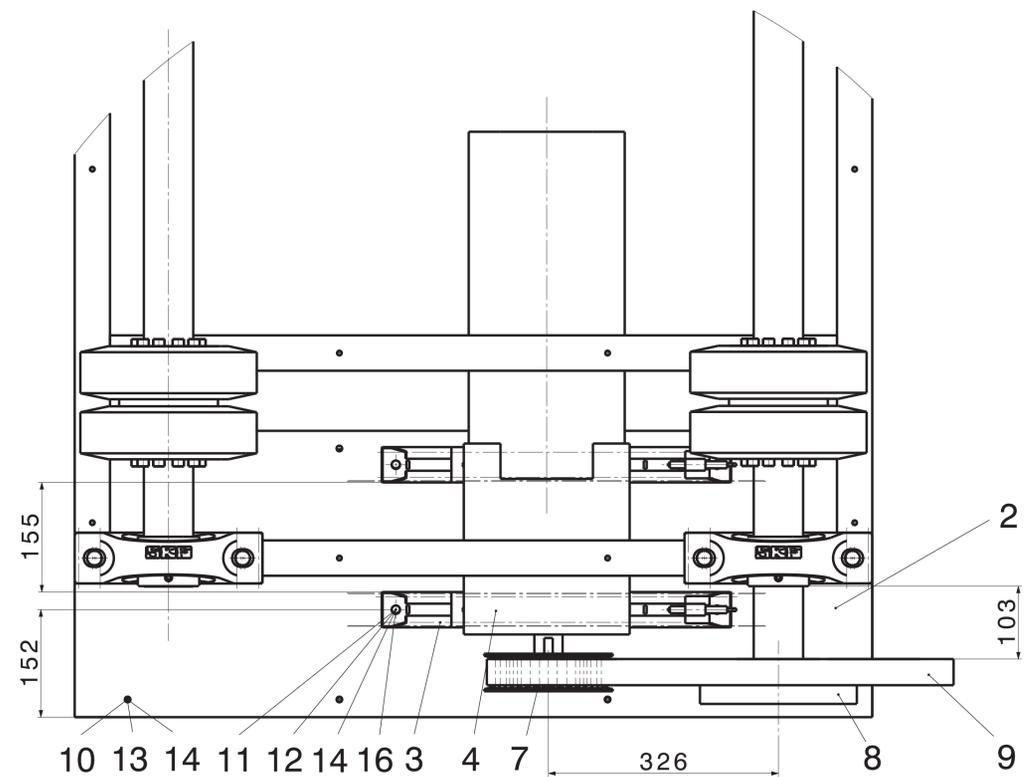
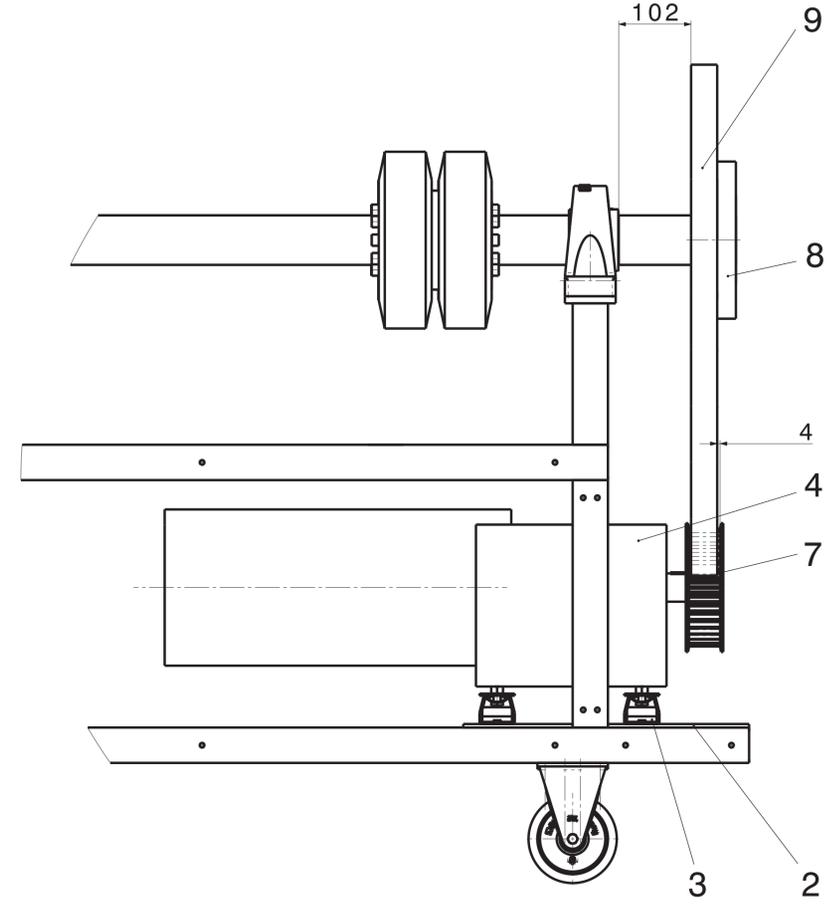
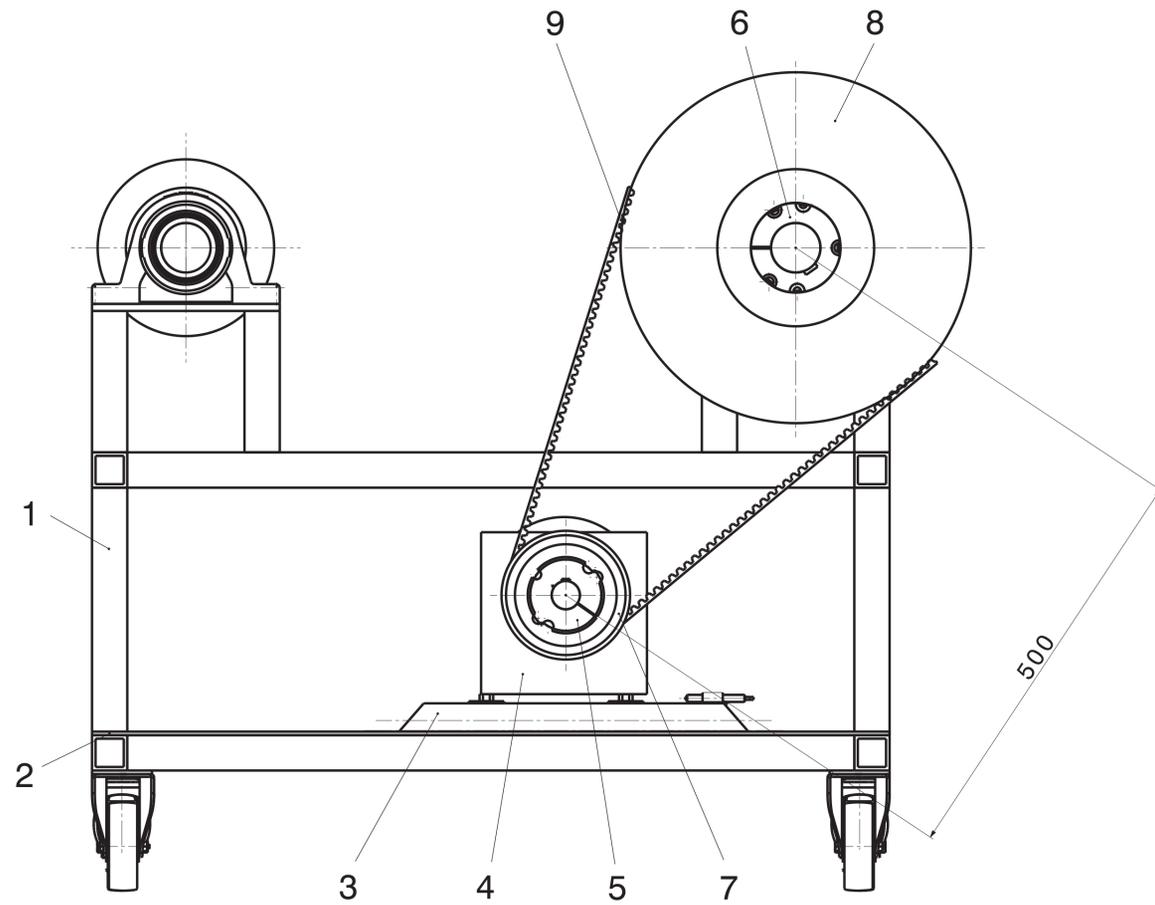
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:10 (1:20)	Gewicht ca. 10 kg
		2017 Bearb. 09.10.		Datum	Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Blech EN 10051- 2 x 1654 x 1868	
		Gepr.		Name	Benennung Antriebsabdeckung	
		Norm		O. Barthol		
				Zeichnungsnummer		Blatt 8
				ET17-1-1-1:04		41 Bl.
Hochschule Merseburg		Urspr. CATIA V5 R21		Ers. f.:		Ers. d.:
Zust.	Änderung	Datum	Name			



√ Ra 6,3

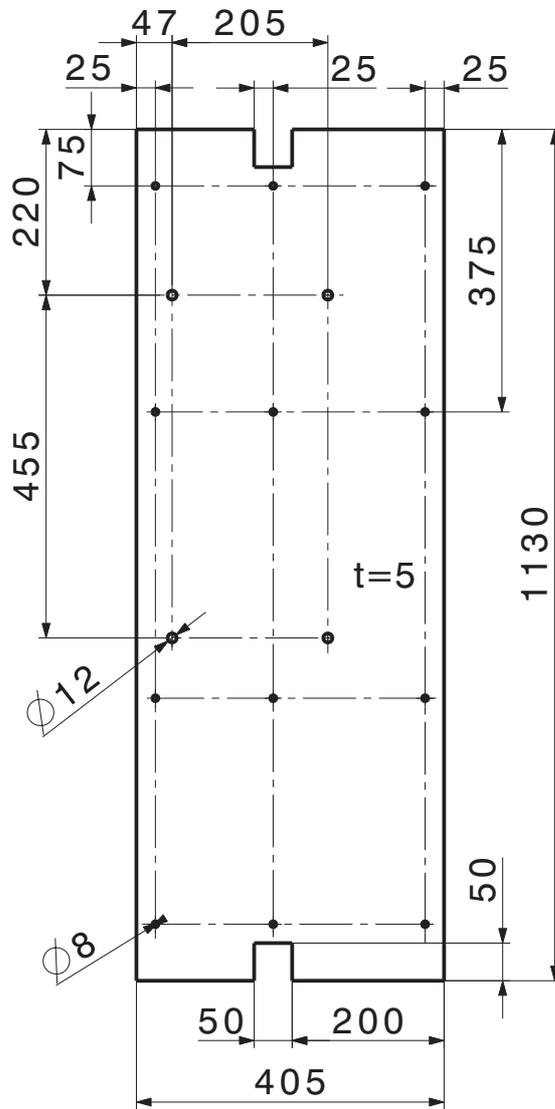
		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:2	Gewicht ca. 1,7 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Blech EN 10051-10 x 66,45 x 400	
		2017	Datum	Name	Benennung Hubblech	
		Bearb.	05.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
				Hochschule Merseburg	Zeichnungsnummer	Blatt 9
					ET17-1-1-1:05	41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:



	Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768	Oberfl.	Maßstab 1:5 (1:10)	Gewicht ca. 465 kg
	2017 Datum Bearb. 18.10. Gepr. Norm	Name O. Barthol	Benennung Gestell - Antrieb	
Hochschule Merseburg			Zeichnungsnummer RT17-1-1-2	Blatt 10 41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. Ers. f. Ers. d.

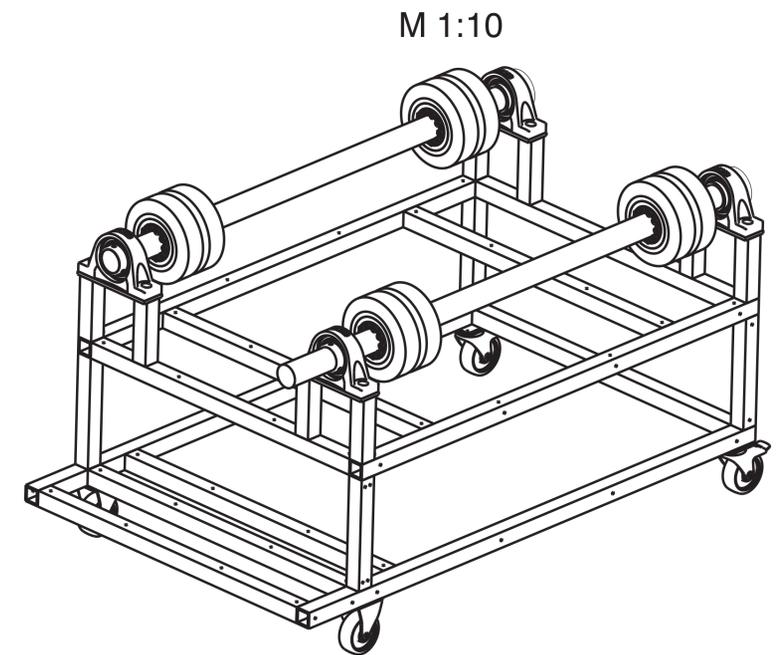
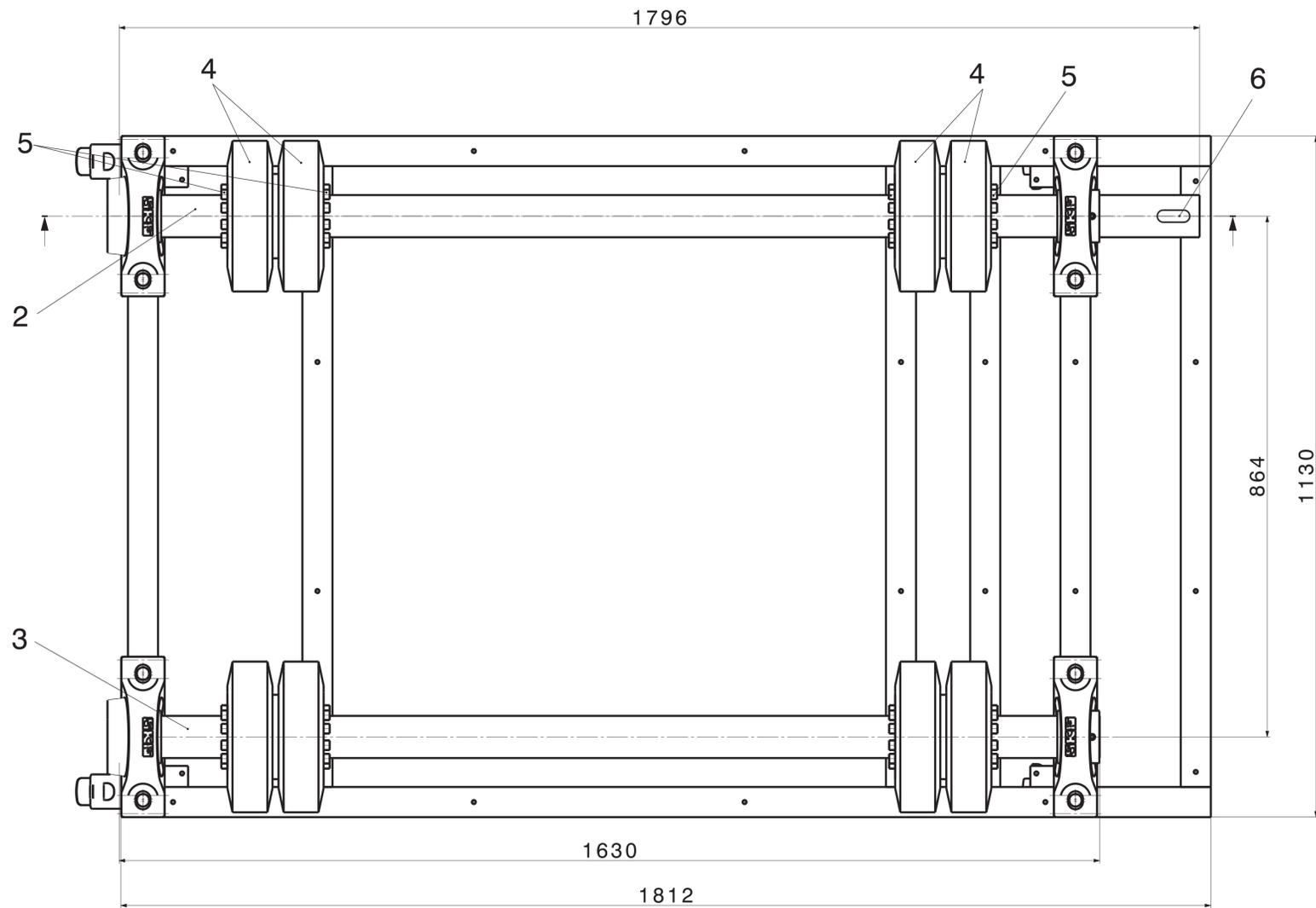
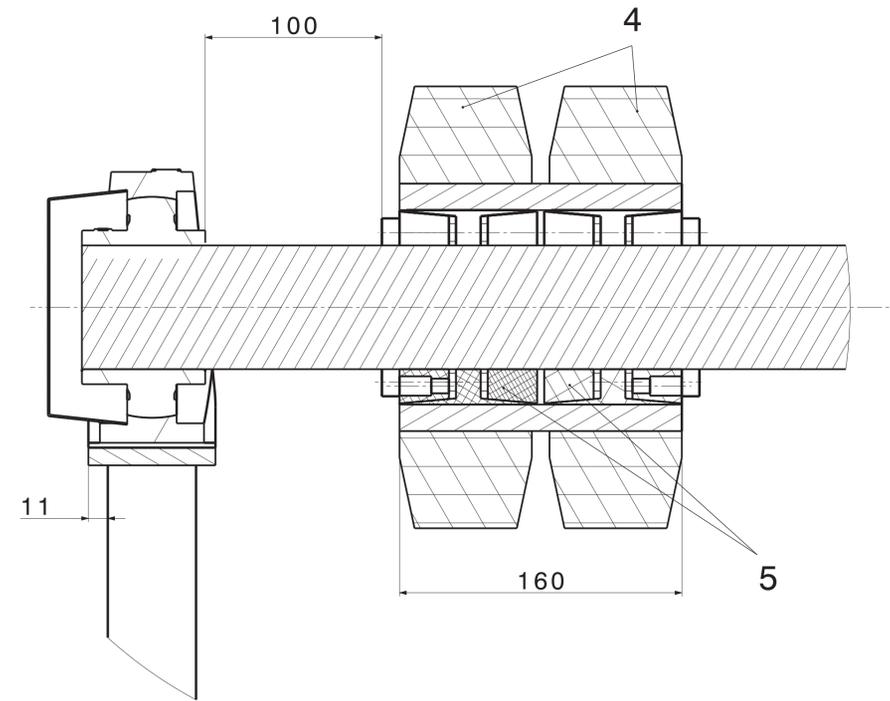
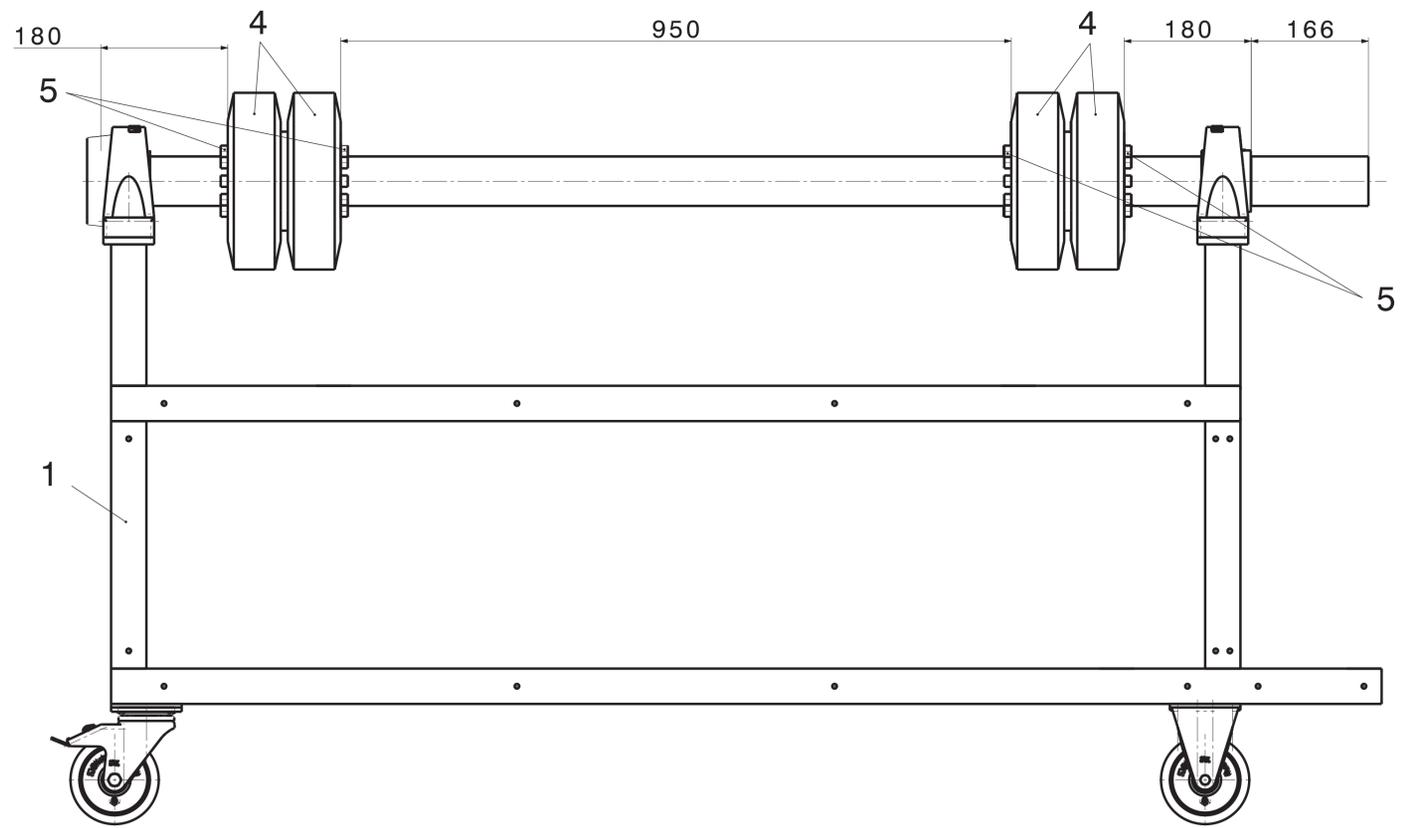
1	2	3	4	5	6
Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Sachnummer / Norm-Kurzbezeichnung	Bemerkung
1	1	Stck	Gestell - Wellen	RT17-1-1-3	
2	1	Stck	Motorauflegeplatte	ET17-1-1-2:01 Blech EN 10051- 5 x 405 x 1130	1.4301
3	2	Stck	Motor-Spannschienen-Satz (1 Satz : 2 Stck)	Typ SPS Gesamtlänge 495mm für IEC Motorgröße 112	
4	1	Stck	Strinradgetriebemotor	R77 DRN112M4 Bauform M1	
5	1	Stck	Taperlock-Buchse	TB 2517- 40	
6	1	Stck	Taperlock-Buchse	TB 3020 - 70	
7	1	Stck	Zahnscheibe	14MX-38S-37	Gates
8	1	Stck	Zahnscheibe	14MX-112S-37	Gates
9	1	Stck	Zahnriemen PolyChain Carbon	PCC 14MGT-2100-37	Gates
10	12	Stck	Sechskantschraube M8	ISO 4017 – M8 x 16 – A2-70	
11	4	Stck	Sechskantschraube M12	ISO 4017 – M12 x 25 – A2-70	
12	4	Stck	Sechskantmutter M12	ISO 4032 – M12 – A2-70	
13	12	Stck	Federring B8	DIN 127 – B8 – 1.4310	
14	4	Stck	Federring B12	DIN 127 – B12 – 1.4310	
15	12	Stck	Scheiben M8	ISO 7090-8-200 HV	A2
16	4	Stck	Scheiben M12	ISO 7090-12-200 HV	A2

				2017	Datum	Name	Benennung Stückliste Gestell - Antrieb	
				Bearb.	16.10.	O. Barthol		
				Gepf.				
				Norm				
				Stueckliste-Word.doc				
				Hochschule Merseburg			Zeichnungsnummer RT17-1-1-2	Blatt 11
								41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr.	Ers.f.:	Ers.d.:		



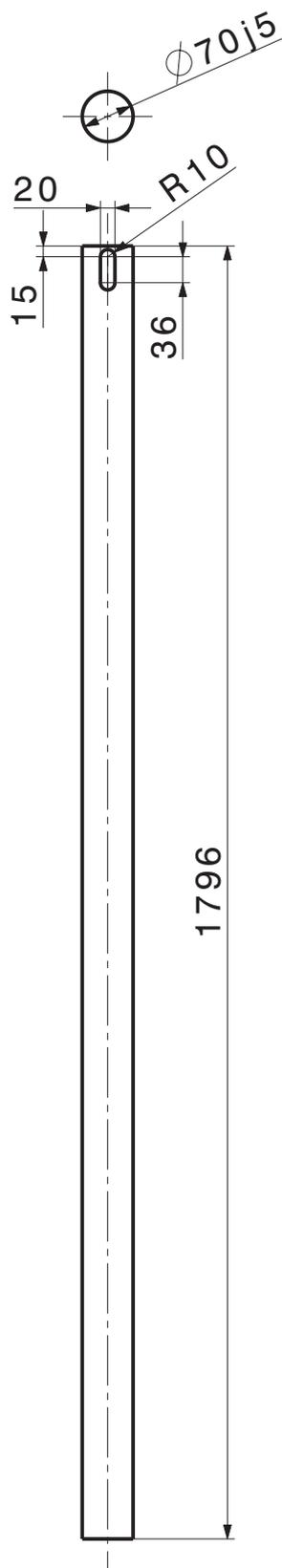
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:10	Gewicht ca. 18 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Blech EN 10051- 5 x 405 x 1130	
		2017	Datum	Name	Benennung Motorauflegeplatte	
		Bearb.	05.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
Hochschule Merseburg				Zeichnungsnummer	Blatt	
				ET17-1-1-2:01		12
						41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:



	Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768	Oberfl.	Maßstab 1:5 (1:10)	Gewicht ca. 297 kg
	Werkstoff, Halbzeug			
2017 Datum Bearb. 18.10. Gepr. Norm	Name O. Barthol	Benennung	Gestell - Wellen	
Hochschule Merseburg		Zeichnungsnummer		
		RT17-1-1-3	Blatt 13	41 Bl.
Zust. Änderung	Datum	Name	Urspr. CATA V5 R21	Ers. f. Ers. d.

Paßmaß	Abmaße
70j5	+0,018 -0,012

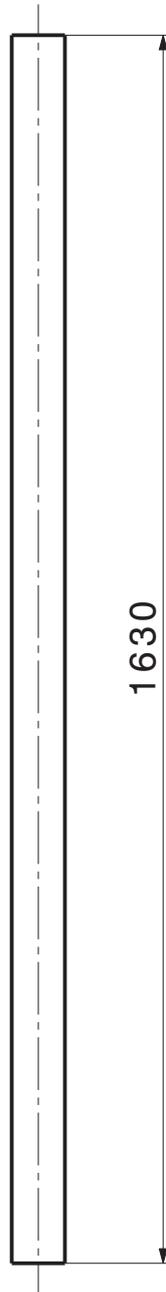
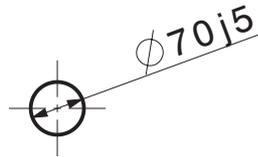


✓ Ra 6,3

Nut für Passfeder nach DIN 6885-1

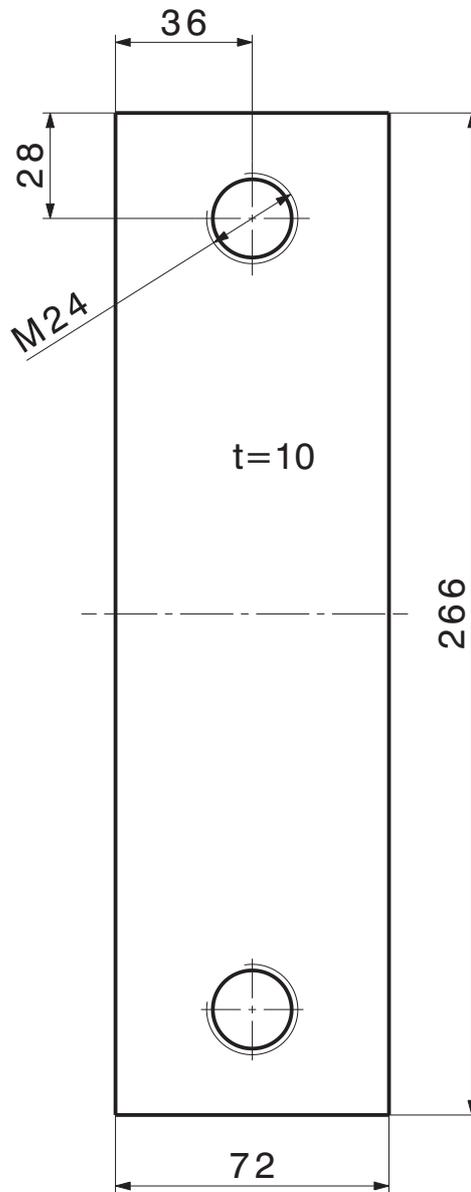
		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:10	Gewicht ca. 55 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Rundstab EN 10060 – 70 x 1796 E	
		2017	Datum	Name	Benennung Antriebswelle	
		Bearb.	05.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
				Hochschule Merseburg	Zeichnungsnummer	Blatt
					ET17-1-1-3:01	15
						41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:

Paßmaß	Abmaße
70j5	+0,018 -0,012



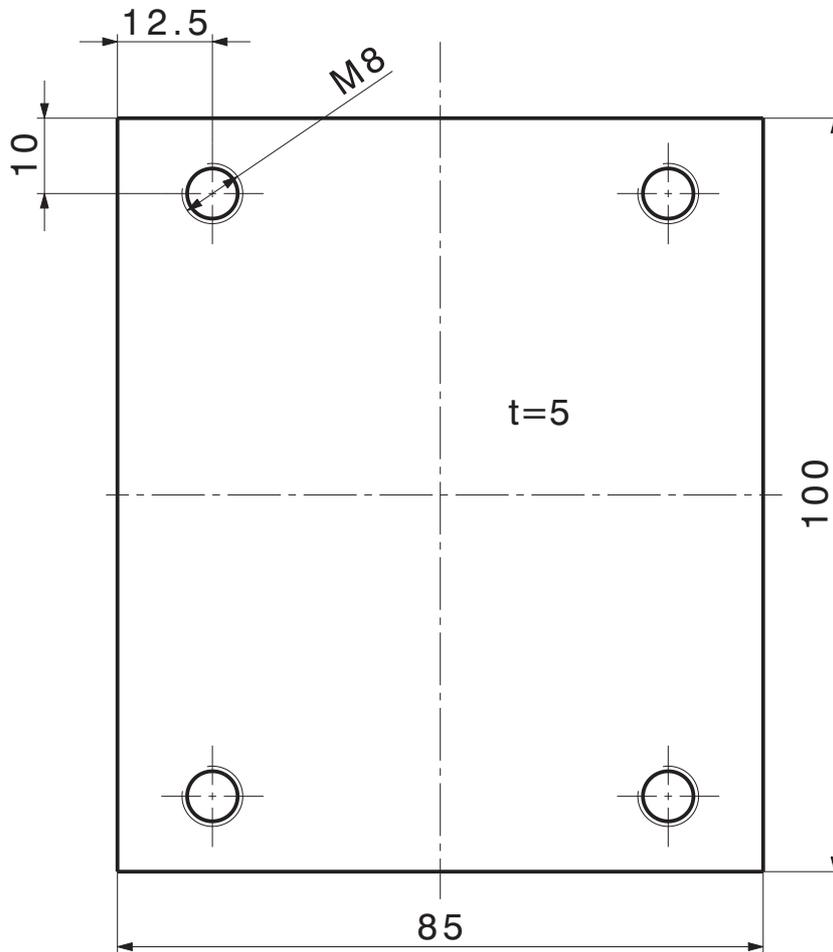
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:10	Gewicht ca. 50 kg	
						Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Rundstab EN 10060 – 70 x 1630 E	
		2017	Datum	Name	Benennung Gegenwelle		
		Bearb.	05.10.	O. Barthol			
		Gepr.					
		Norm					
		Hochschule Merseburg			Zeichnungsnummer	Blatt 16	
					ET17-1-1-3:02		41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:	



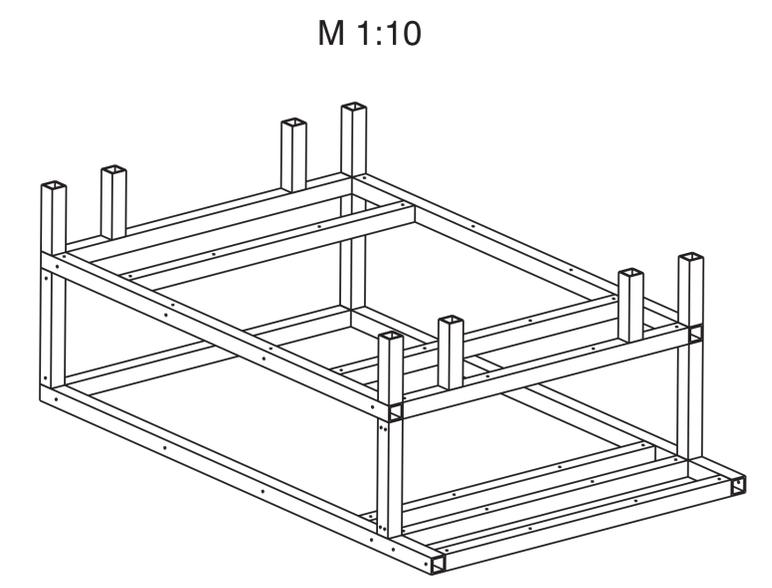
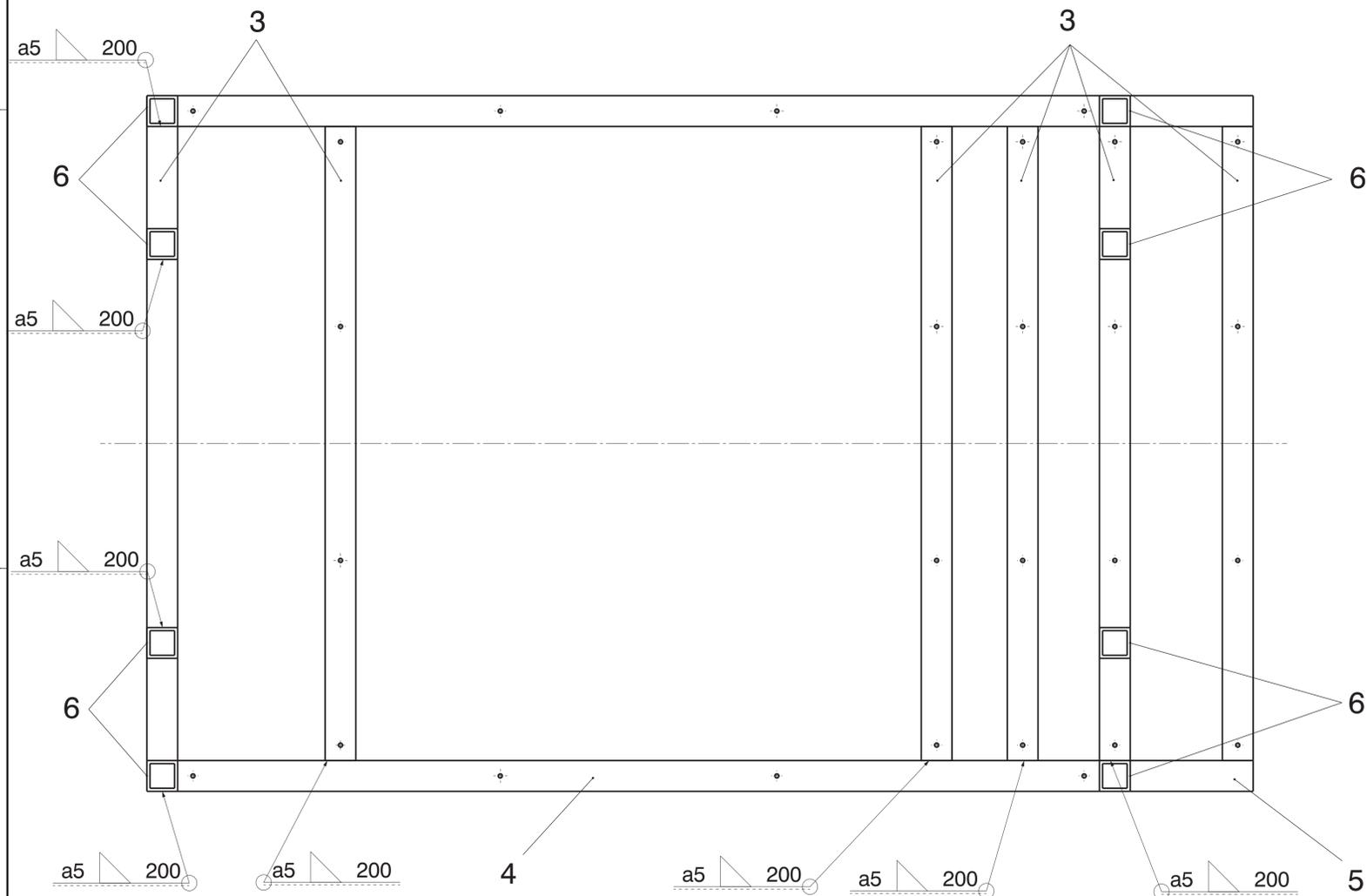
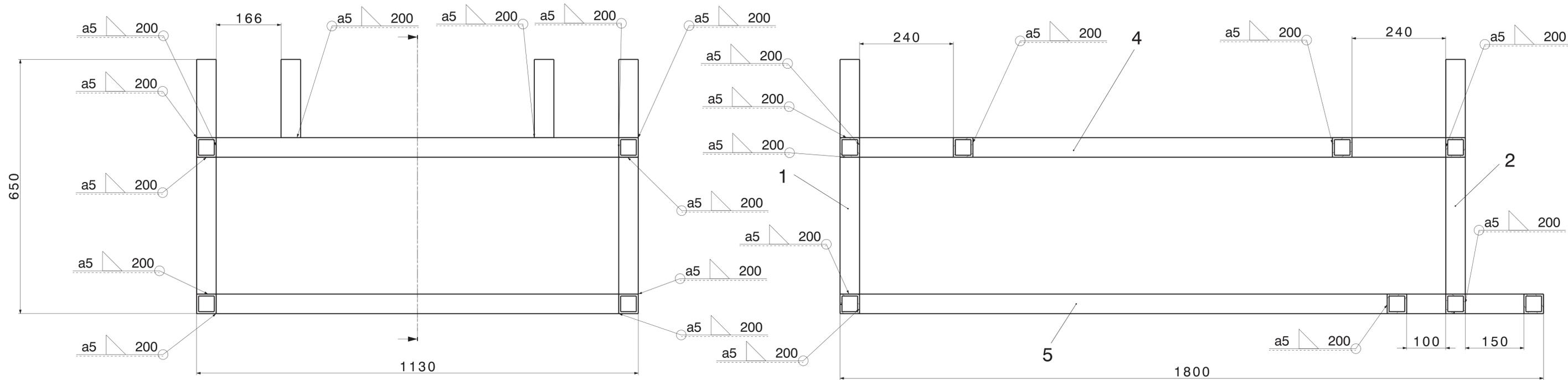
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:2	Gewicht ca. 1,5 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Blech EN 10051- 10 x 72 x 266	
		2017	Datum	Name	Benennung Kontaktplatte Lager	
		Bearb.	05.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
		Hochschule Merseburg			Zeichnungsnummer	Blatt
					ET17-1-1-4:01	19
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:
						41 Bl.

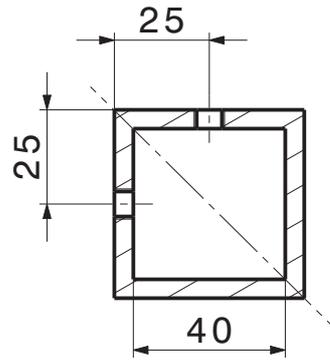
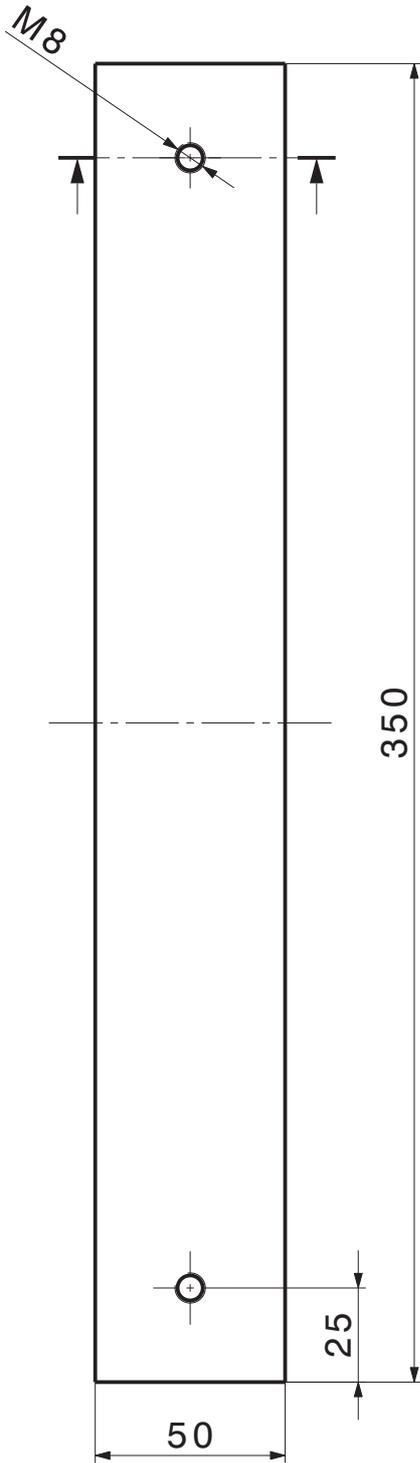


✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:1	Gewicht ca. 0,5 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Blech EN 10051- 5 x 85 x 100	
		2017	Datum	Name	Benennung Kontaktplatte Räder	
		Bearb.	05.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
		Hochschule Merseburg			Zeichnungsnummer	Blatt
					ET17-1-1-4:02	20
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:
						41 Bl.

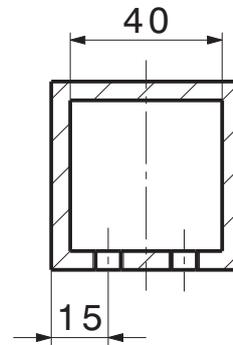
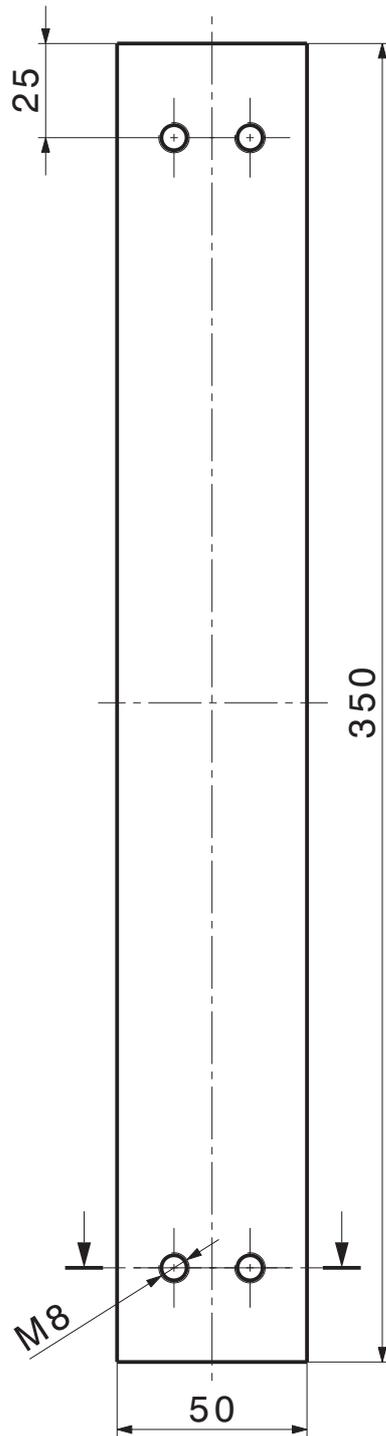


Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768	2017	Datum	Name	O. Barthol	Benennung	Hochschule Merseburg	Zeichnungsnummer	Blatt 21 41 Bl.
Werkstoff, Halbzeug				1.4301		Gestell - Grundgerüst		
Gepr.				Norm		Ers. f.:		
Ers. d.:				Ers. d.:		Ers. d.:		



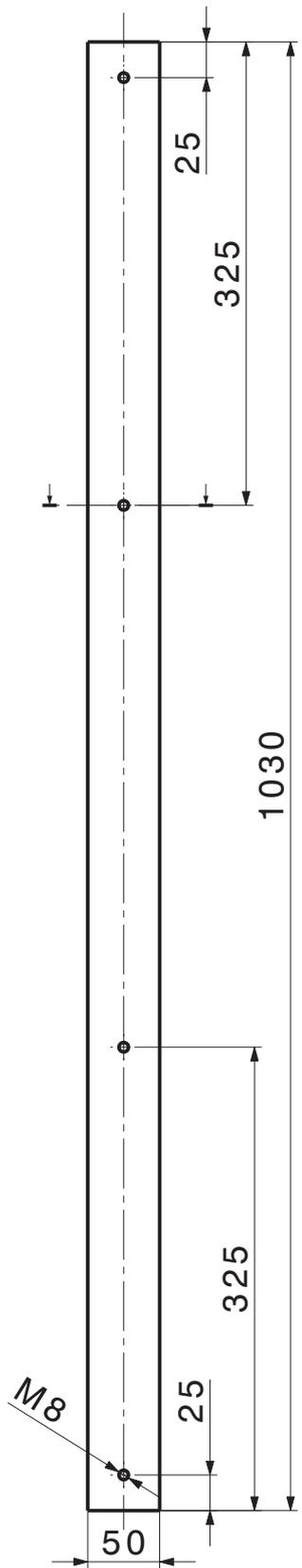
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:2	Gewicht ca. 2,5 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Hohlprofil EN 10219-2 – 50 x 50 x 5	
		2017	Datum	Name	Benennung Stange 1 - Höhe	
		Bearb.	05.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
				Hochschule Merseburg	Zeichnungsnummer	Blatt
					ET17-1-1-5:01	23
						41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:



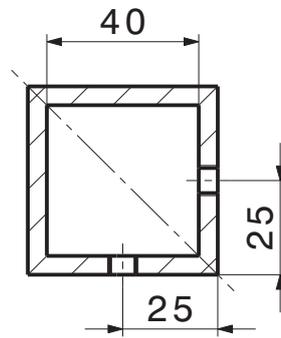
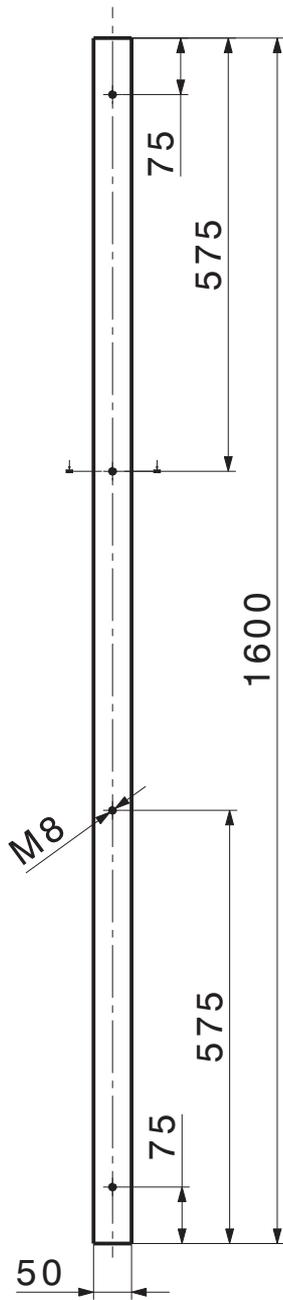
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:2	Gewicht ca. 2,5 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Hohlprofil EN 10219-2 – 50 x 50 x 5 x 350	
		2017	Datum	Name	Benennung Stange 6 - Höhe	
		Bearb.	05.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
				Hochschule Merseburg	Zeichnungsnummer	Blatt
					ET17-1-1-5:02	24
						41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:



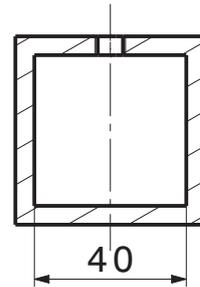
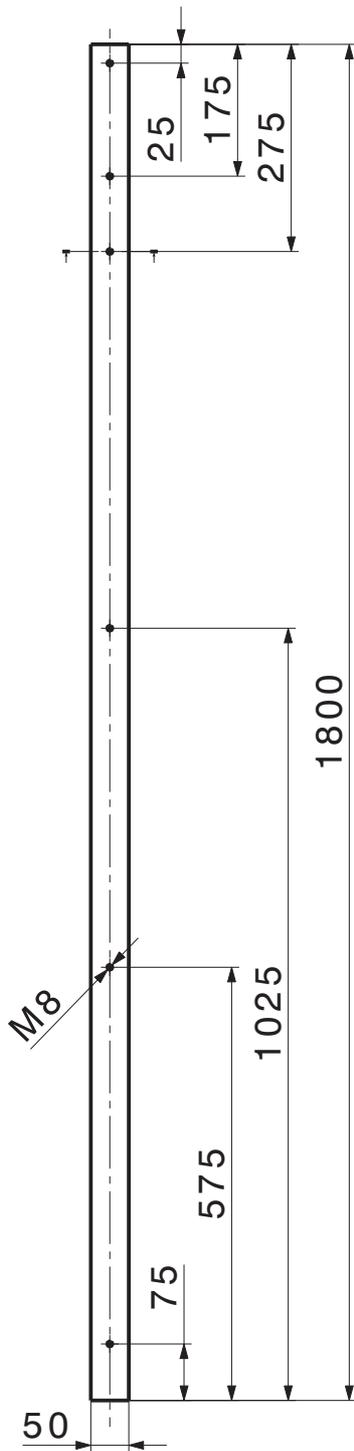
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:5	Gewicht ca. 7,5 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Hohlprofil EN 10219-2 – 50 x 50 x 5 x 1030	
		2017	Datum	Name	Benennung Stange 3 - Breite	
		Bearb.	05.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
				Hochschule Merseburg	Zeichnungsnummer	Blatt
					ET17-1-1-5:03	25
						41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:



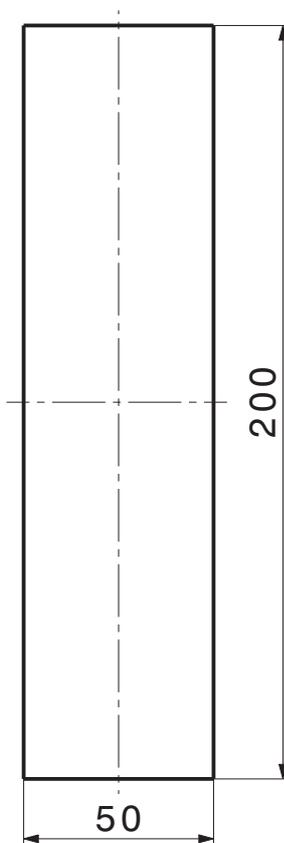
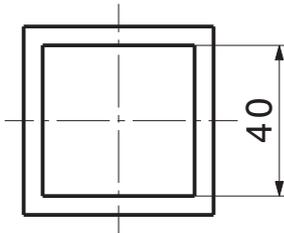
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:10	Gewicht ca. 11,5 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Hohlprofil EN 10219-2 – 50 x 50 x 5 x 1600	
		2017	Datum	Name	Benennung Stange 4 - Länge oben	
		Bearb.	05.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
				Hochschule Merseburg	Zeichnungsnummer	Blatt
					ET17-1-1-5:04	26
						41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:



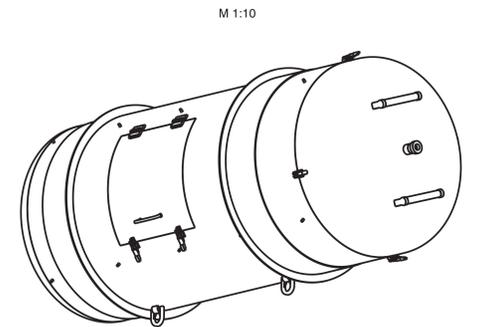
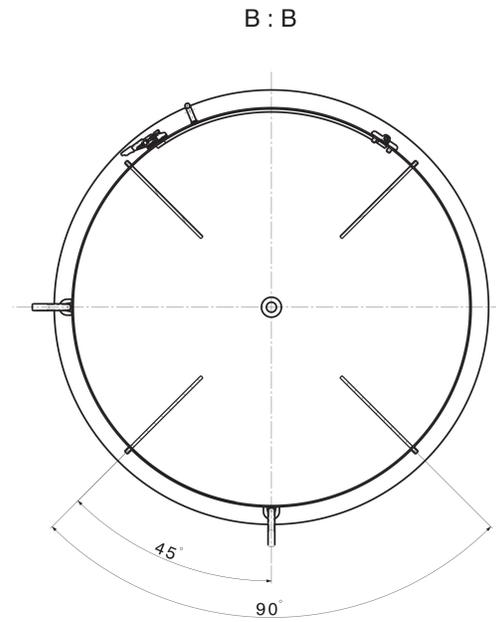
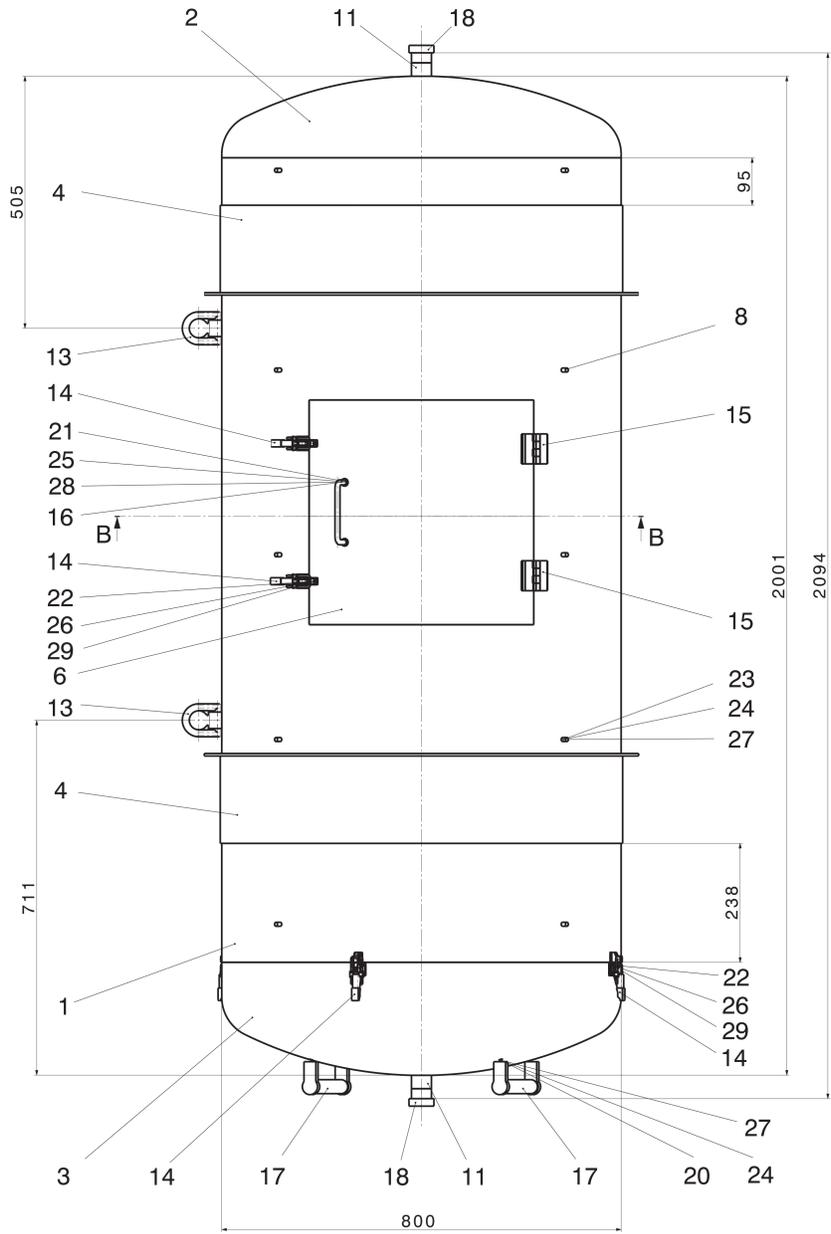
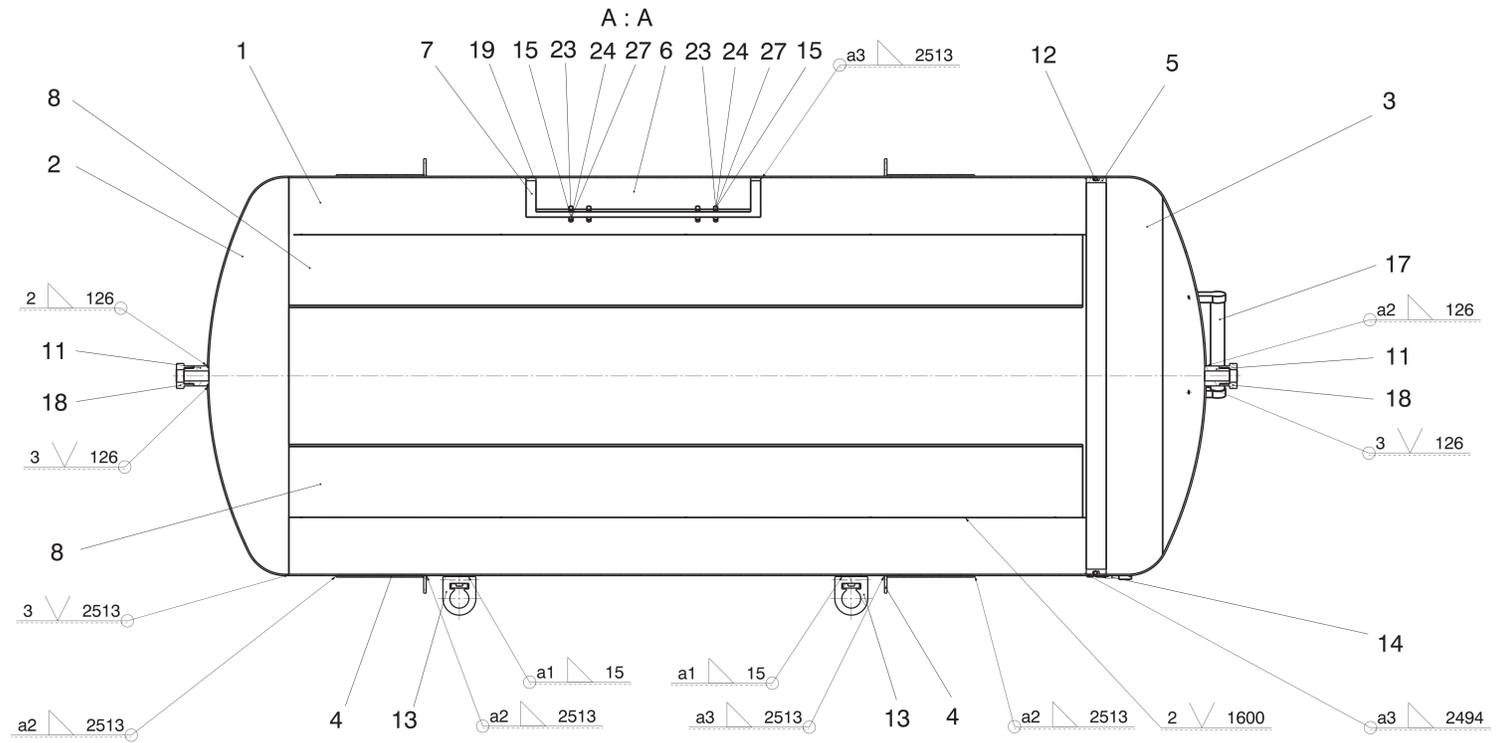
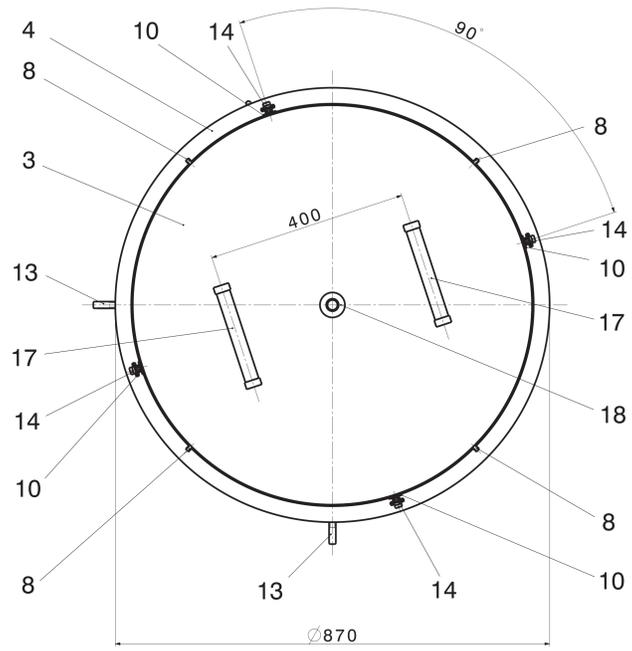
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:10	Gewicht ca. 13 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Hohlprofil EN 10219-2 – 50 x 50 x 5 x 1800	
		2017	Datum	Name	Benennung Stange 2 - Länge Unten	
		Bearb.	05.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
				Hochschule Merseburg	Zeichnungsnummer	Blatt
					ET17-1-1-5:05	27
						41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:



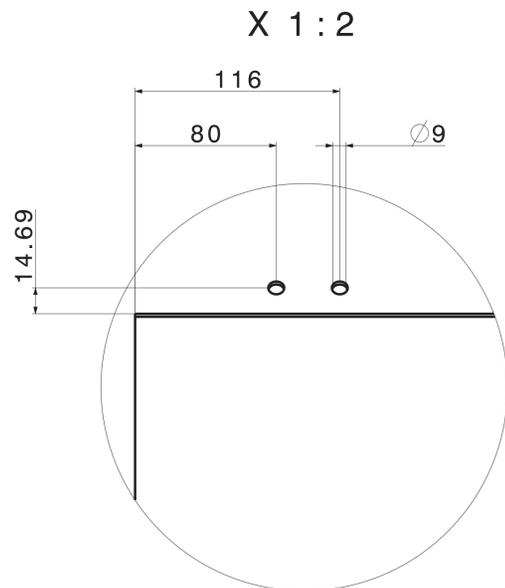
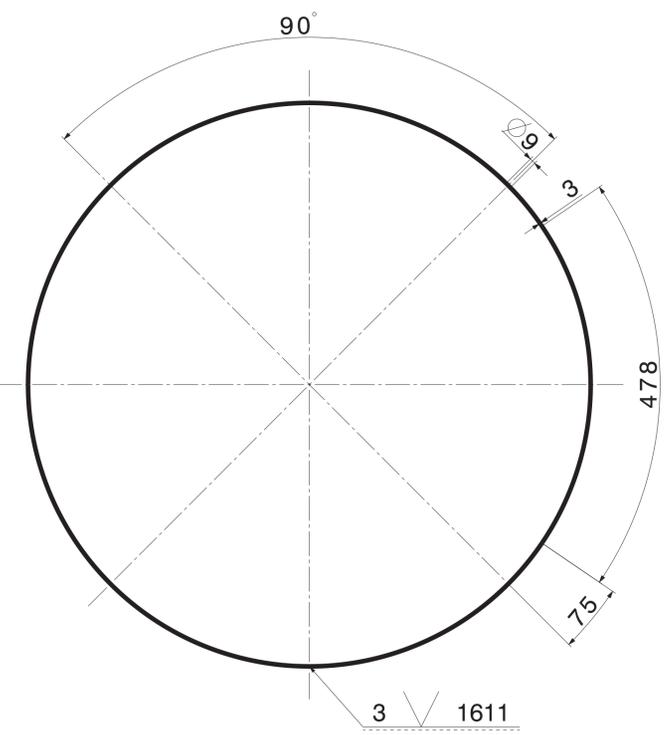
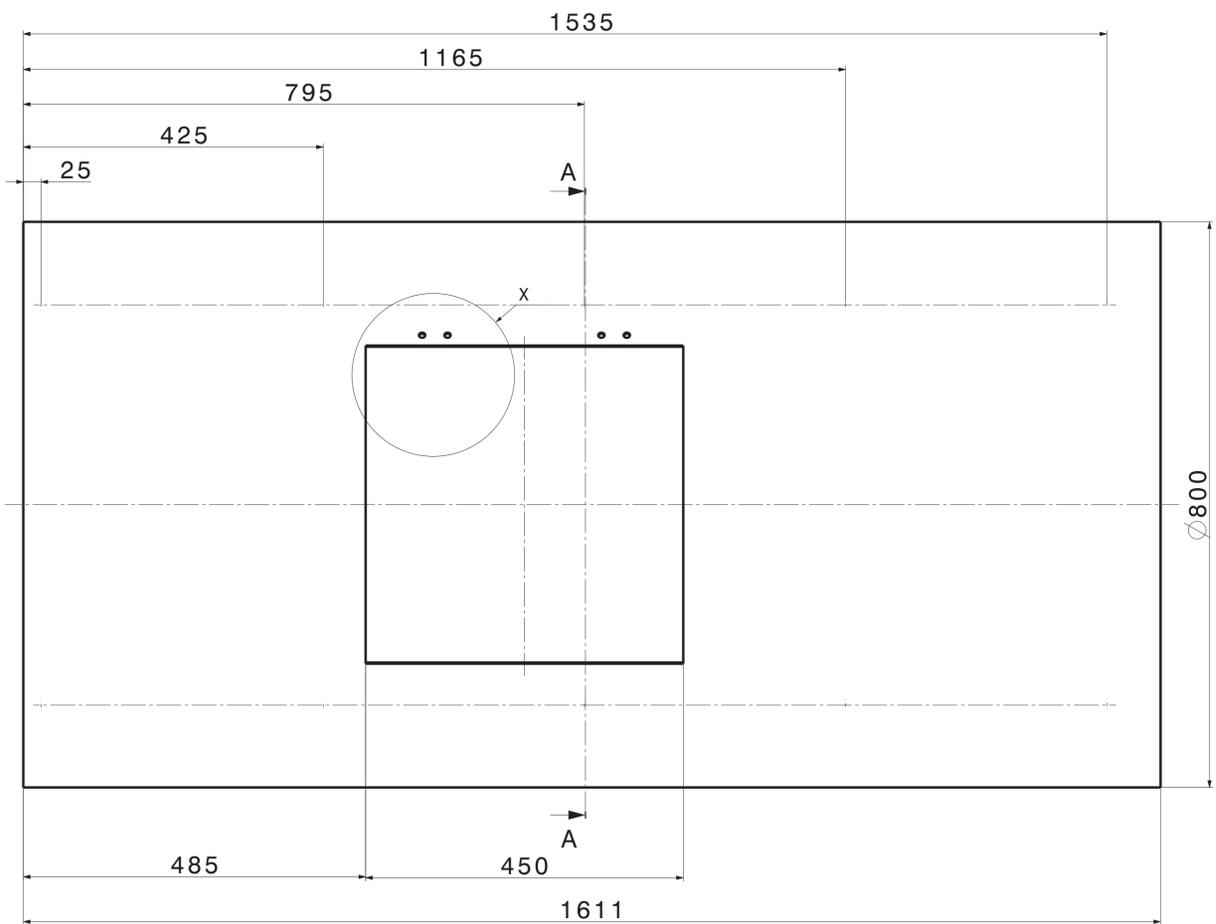
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:2	Gewicht ca. 1,5 kg	
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Hohlprofil EN 10219-2 – 50 x 50 x 5 x 200		
		2017	Datum	Name	Benennung Stange 5 - Höhe		
		Bearb.	05.10.	O. Barthol			
		Gepr.					
		Norm					
		Hochschule Merseburg			Zeichnungsnummer	Blatt	
					ET17-1-1-5:06		28
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:	41 Bl.



jedes in den Innenraum führende Gewinde mit Gewindedichtfaden (30) versehen

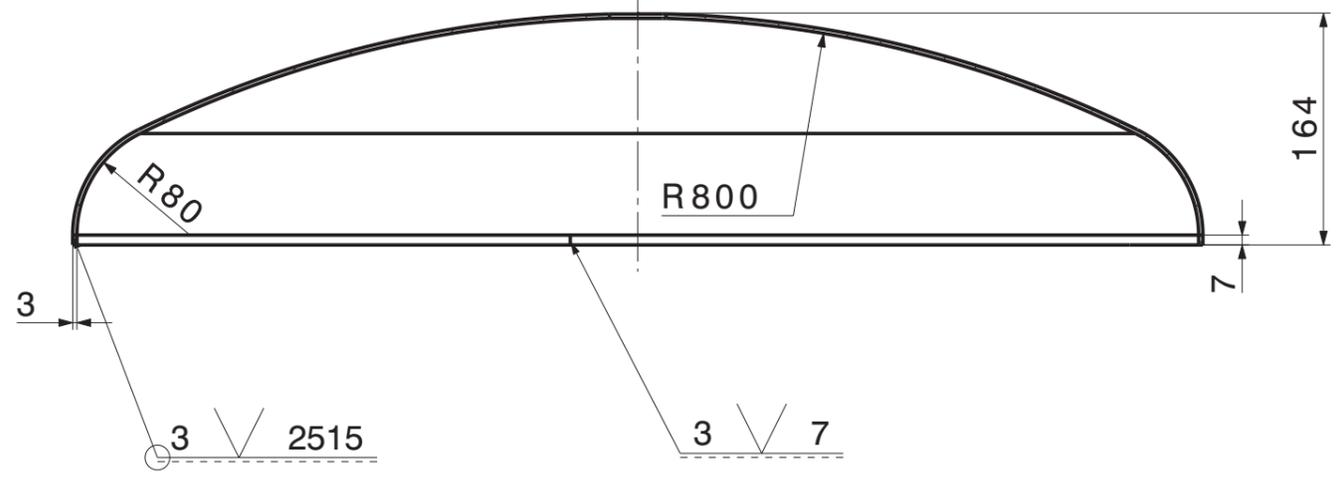
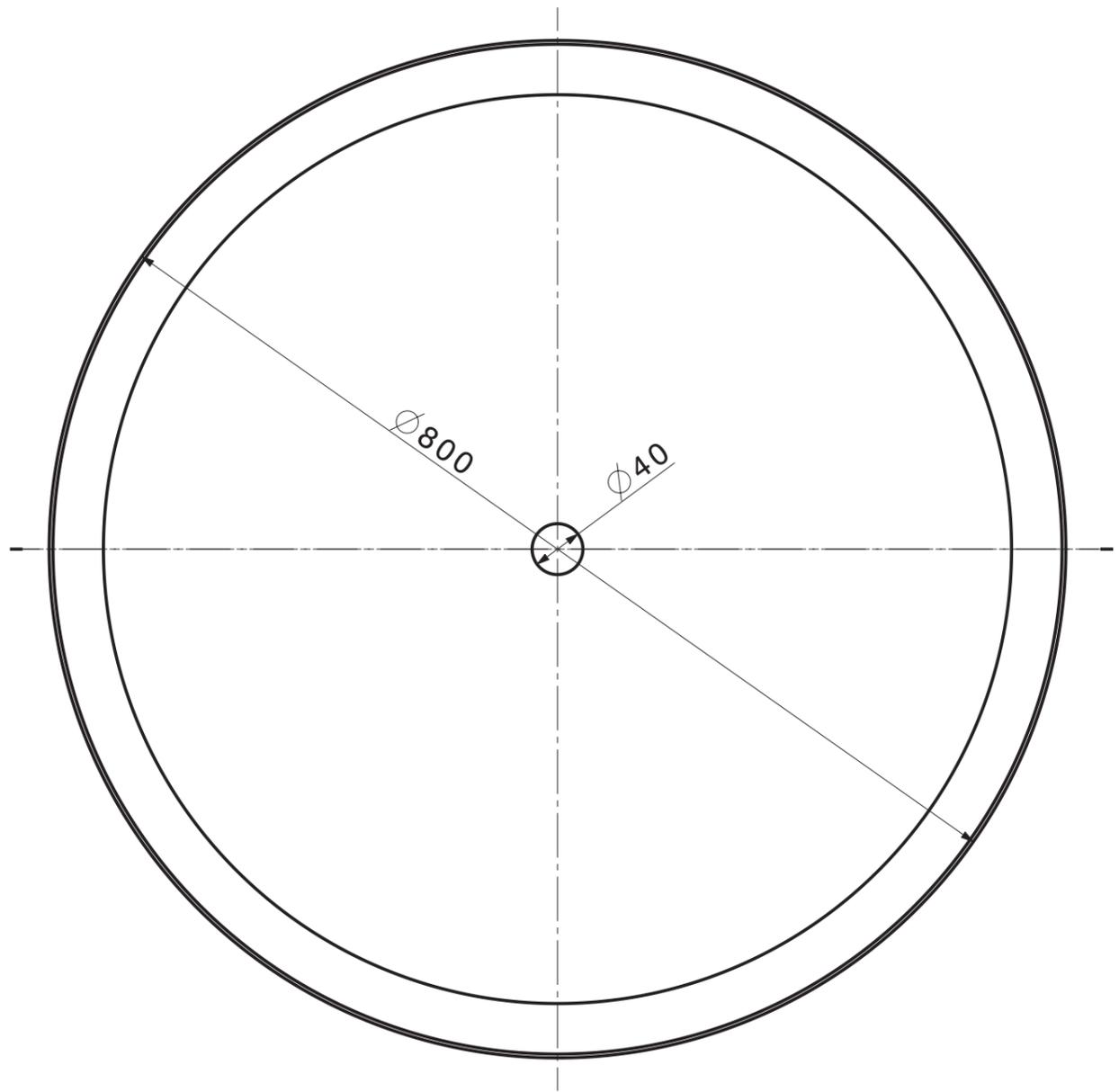
Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768	2017 Bearb. 23.10 Chr. Norm	Datei Name D. Barthel Benennung	Maßstab 1:5 (1:10) Werkstoff, Halbzeug	Gewicht ca. 230 kg
Hochschule Merseburg		Zeichnungsnummer	RT17-1-2	
Blatt 20		41		B



gestreckte Länge = 2504

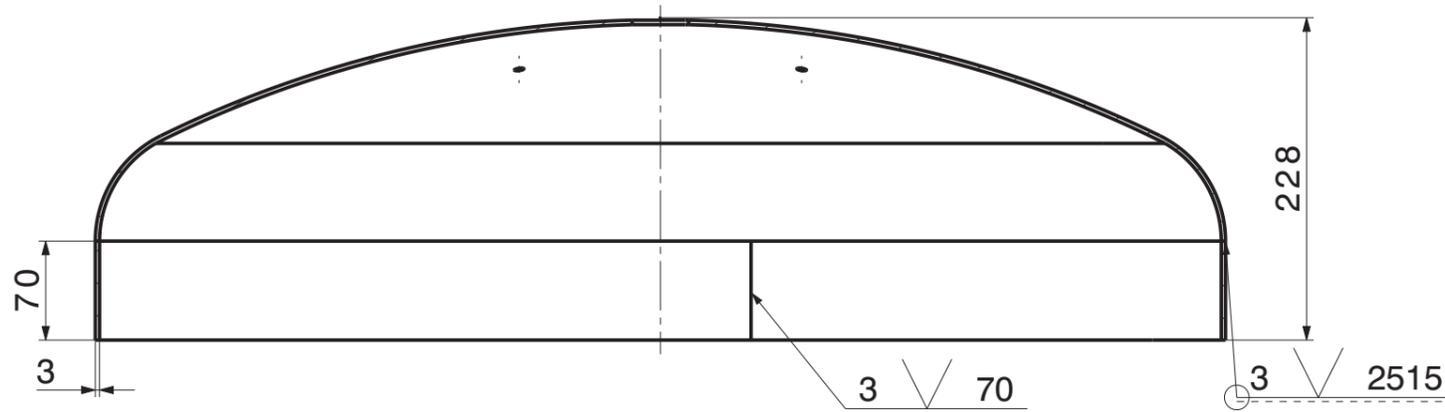
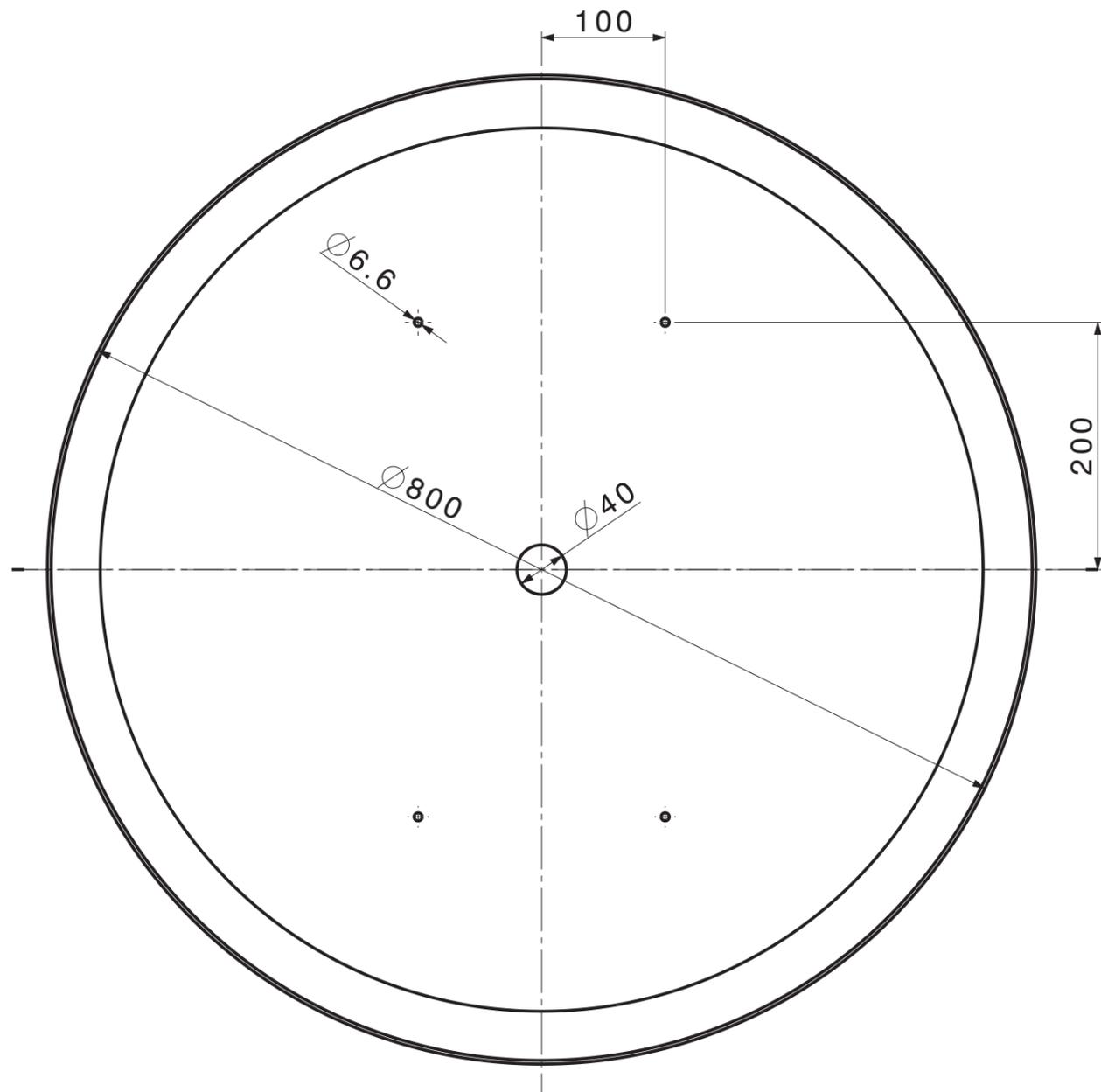
√ Ra 6,3

	Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768	Oberfl.	Maßstab 1:5 (1:2)	Gewicht ca. 90 kg
	2017 Datum Bearb. 18.10. Gepr. Norm	Name O. Barthol	Benennung zylindrischer Mantel	
Hochschule Merseburg			Zeichnungsnummer ET17-1-2:01	Blatt 31 41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21
Ers. f.:			Ers. d.:	



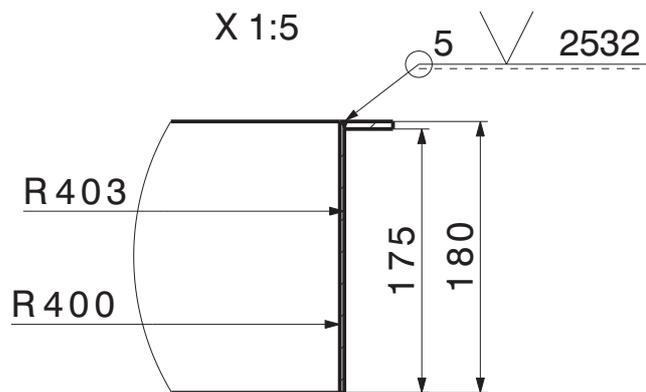
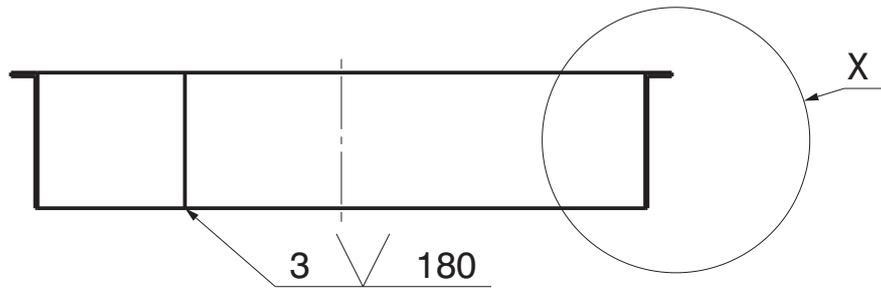
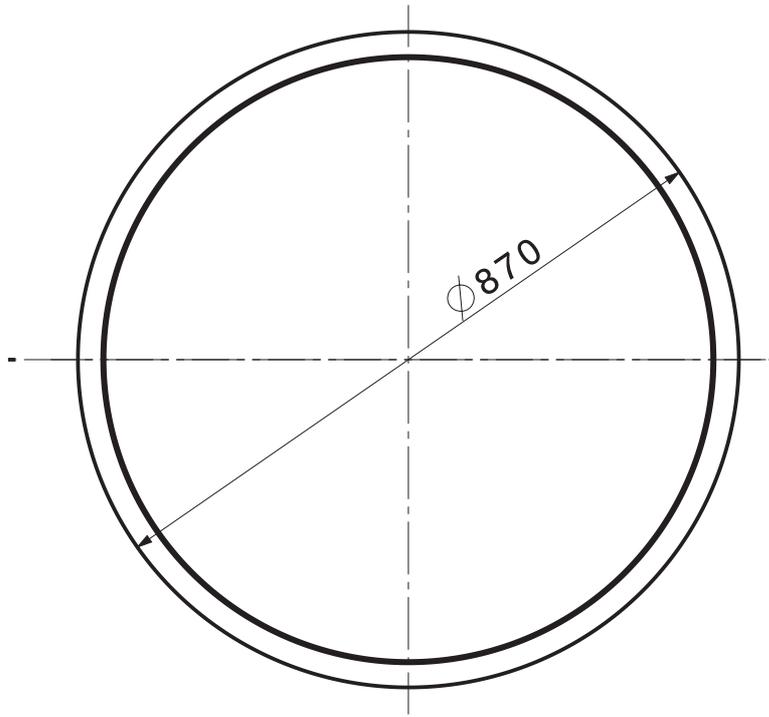
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768	Oberfl.	Maßstab 1:5	Gewicht ca. 15 kg
		Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Boden DIN 28011 – 800 x 3 - VA		Benennung Behälterboden	
		2017 Bearb.	Datum 09.10.	Name O. Barthol	Zeichnungsnummer ET17-1-2:02
		Gepr.			
		Norm			
Hochschule Merseburg				Ers. f.:	Ers. d.:
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Blatt 32 41 Bl.



✓ Ra 6,3

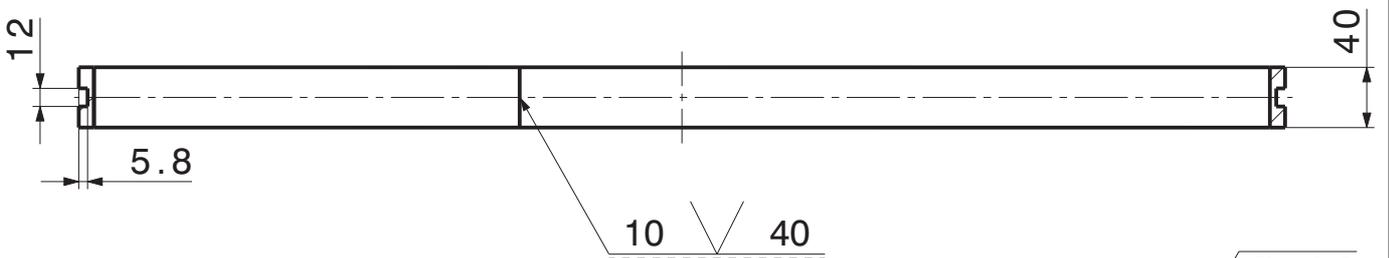
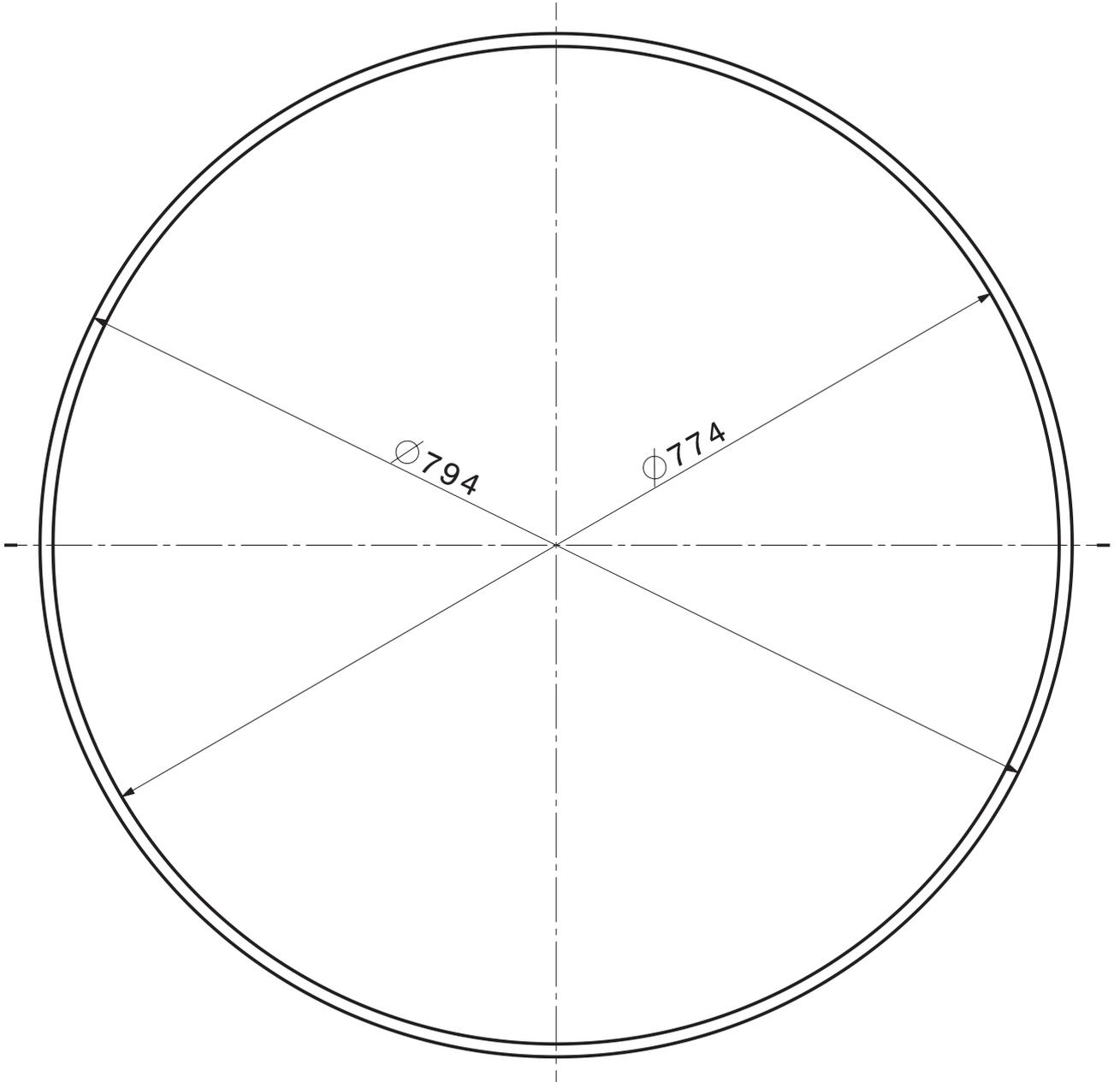
		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768	Oberfl.	Maßstab 1:5	Gewicht 20 kg
		Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Boden DIN 28011 – 800 x 3 - VA		Benennung Behälterdeckel	
2017		Datum	Name	Zeichnungsnummer	
Bearb. 09.10.		O. Barthol		ET17-1-2:03	
Gepr.				Blatt 33	
Norm				41 Bl.	
		Hochschule Merseburg		Ers. f.:	
				Ers. d.:	
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	



gestreckte Länge = 2523

✓ Ra 6,3

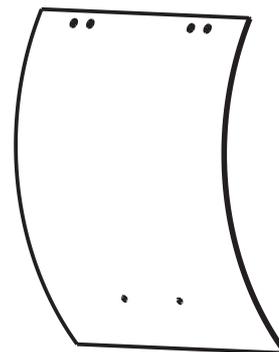
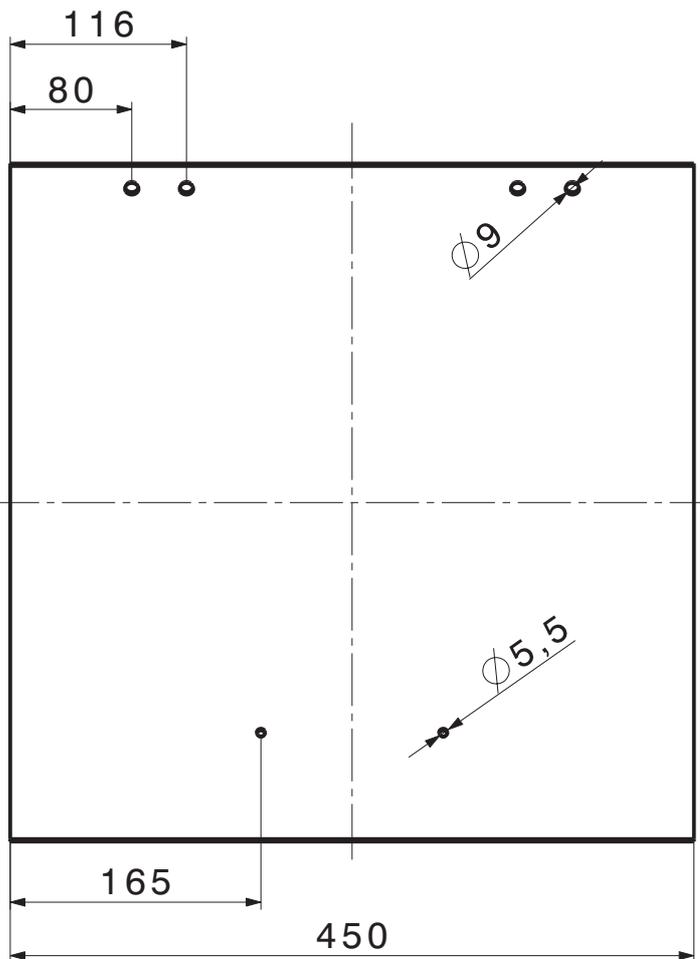
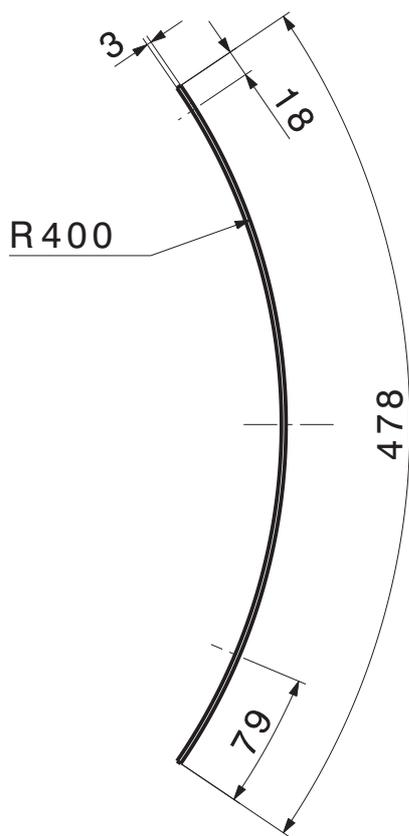
		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:10 (1:5)	Gewicht ca. 14 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Blech EN 10051- 3 x 180 x 2523	
		2017	Datum	Name	Verstärkungsblech mit Führungsring	
		Bearb.	09.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
				Hochschule Merseburg	Zeichnungsnummer	Blatt 34
					ET17-1-2:04	41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:



gestreckte Länge = 2463

✓ Ra 6,3

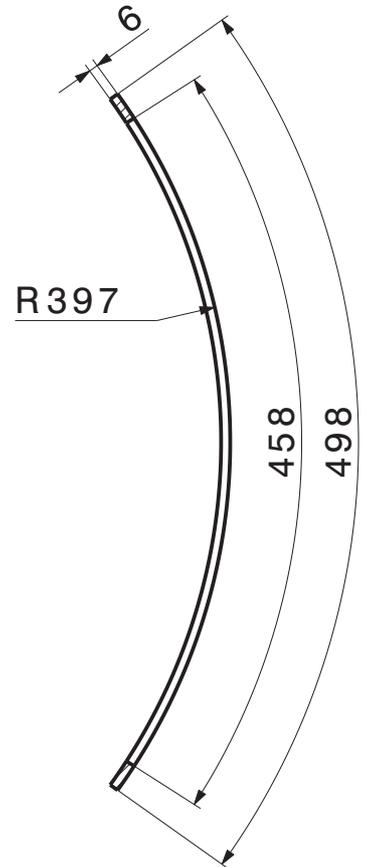
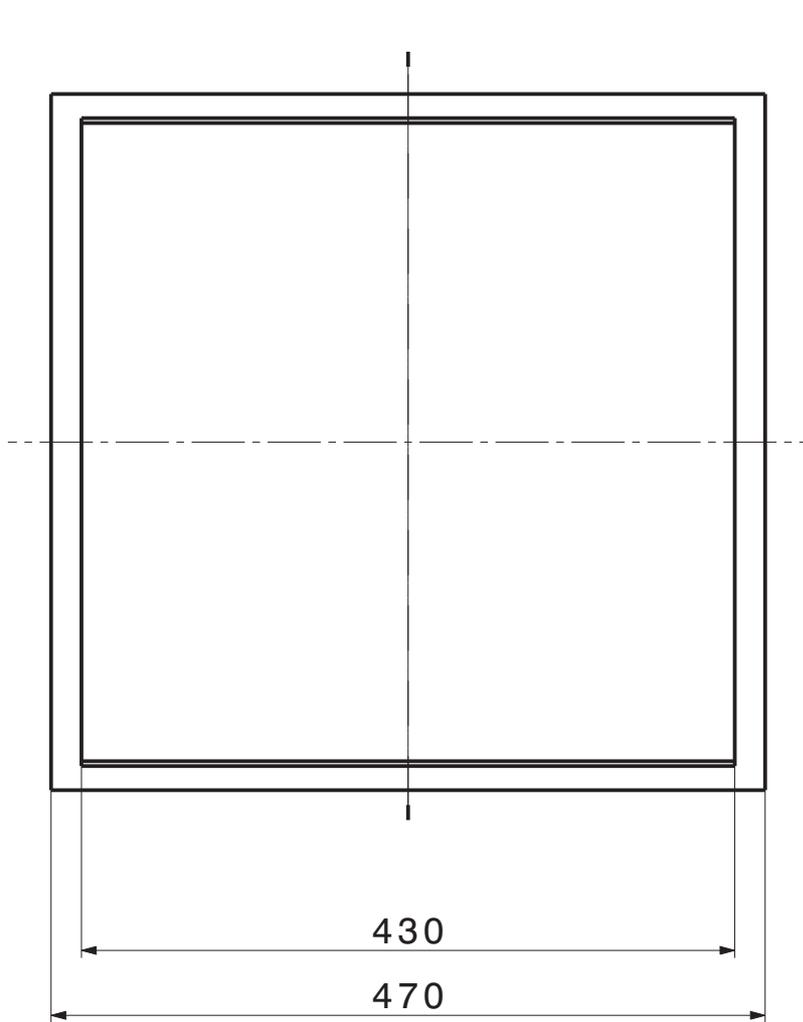
		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:5	Gewicht ca. 6,5 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Blech EN 10051- 10 x 40 x 2463	
		2017	Datum	Name	Benennung Auflagefläche Deckel	
		Bearb.	11.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
				Hochschule Merseburg	Zeichnungsnummer	Blatt 35
					ET17-1-2:05	41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:



gestreckte Länge = 478

✓ Ra 6,3

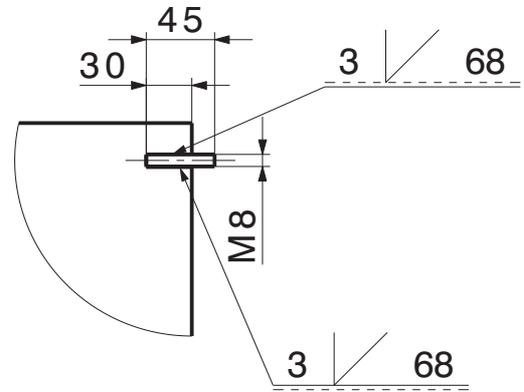
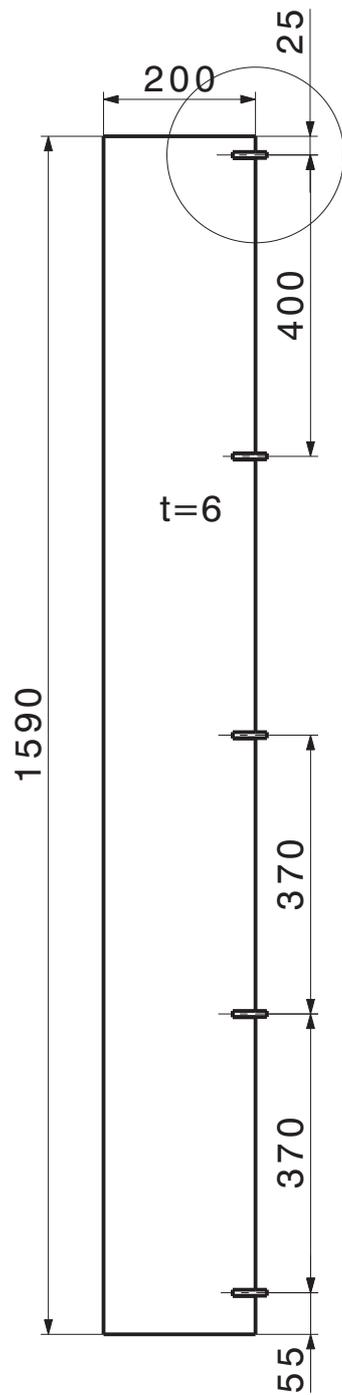
		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:5	Gewicht ca. 5 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Blech EN 10051- 3 x 450 x 478	
		2017	Datum	Name	Benennung Klappe	
		Bearb.	11.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
				Hochschule Merseburg		Zeichnungsnummer ET17-1-2:06
						Blatt 36 41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:



gestreckte Länge = 498

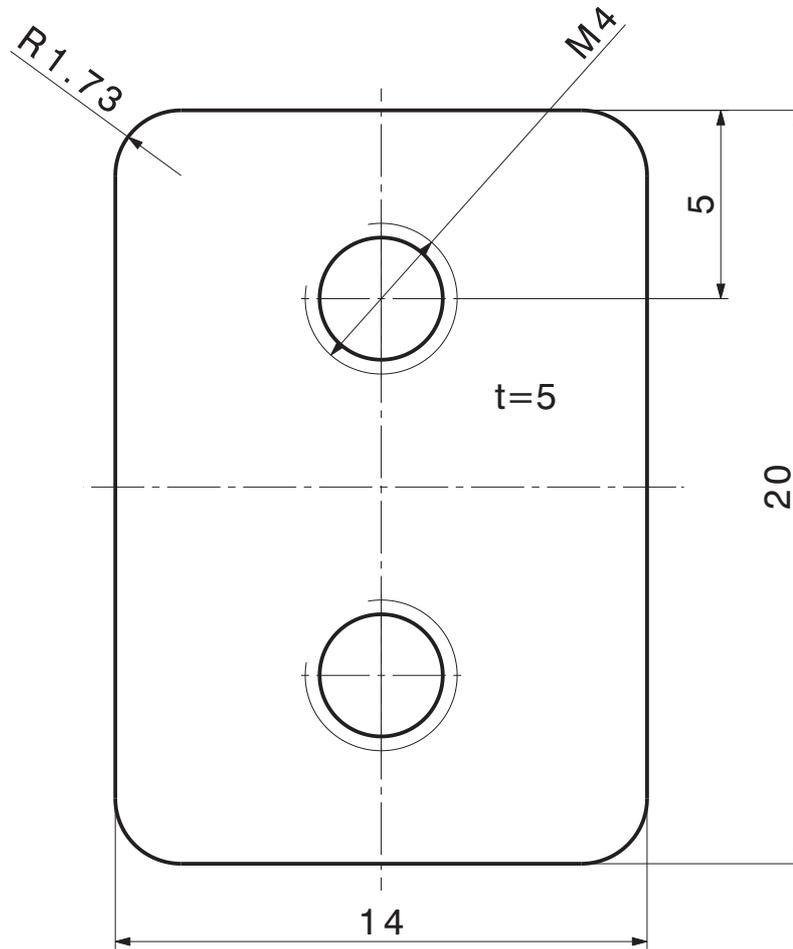
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:5	Gewicht ca. 2 kg	
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Blech EN 10051- 6 x 470 x 498		
		2017	Datum	Name	Benennung Auflagefläche Klappe		
		Bearb.	11.10.	O. Barthol			
		Gepr.					
		Norm					
		Hochschule Merseburg			Zeichnungsnummer	ET17-1-2:07	Blatt 37
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:	41 Bl.



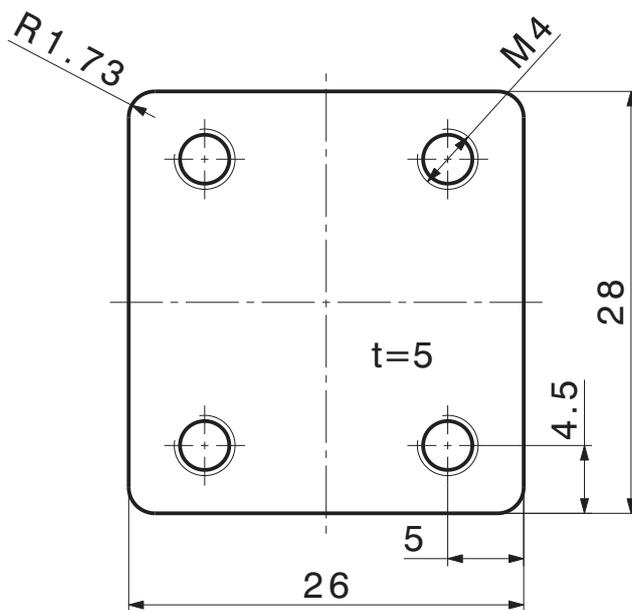
✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 1:10 (1:5)	Gewicht ca. 15 kg
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Blech EN 10051- 6 x 200 x 1590	
		2017	Datum	Name	Benennung Durchmischungsblech	
		Bearb.	6.11.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
				Hochschule Merseburg	Zeichnungsnummer	Blatt 38
					ET17-1-2:08	41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:



✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 5:1	Gewicht ca. 6 g
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Blech EN 10051- 5 x 14 x 20	
		2017	Datum	Name	Benennung Befestigungsplatte A	
		Bearb.	11.10.	O. Barthol		
		Gepr.				
		Norm				
				Hochschule Merseburg	Zeichnungsnummer	Blatt 39
					ET17-1-2:09	41 Bl.
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:



✓ Ra 6,3

		Zul. Abw. mittel DIN ISO 2768		Oberfl.	Maßstab 2:1	Gewicht ca. 17 g	
					Werkstoff, Halbzeug 1.4301, Blech EN 10051- 5 x 26 x 28		
		2017	Datum	Name	Benennung Befestigungsplatte B		
		Bearb.	11.10.	O. Barthol			
		Gepr.					
		Norm					
		Hochschule Merseburg			Zeichnungsnummer	ET17-1-2:10	Blatt 40
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr. CATIA V5 R21	Ers. f.:	Ers. d.:	41 Bl.

