



Bachelorarbeit

Chantal Neupert

Analyse alternativer Methoden zum Druckausgleich in Getrieben und Entwicklung eines optimierten Druckausgleichsystems

Chantal Neupert

**Analyse alternativer Methoden zum Druckausgleich
in Getrieben und Entwicklung eines optimierten
Druckausgleichsystems**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau - Entwicklung und Konstruktion
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Getriebebau NORD GmbH & Co. KG

██

██

██

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Jan Holländer

Zweitprüfer: Dr.-Ing. Detlev Petersen

Abgabedatum: 14. September 2021

Zusammenfassung

Chantal Neupert

Thema der Bachelorthesis

Analyse alternativer Methoden zum Druckausgleich in Getrieben und Entwicklung eines optimierten Druckausgleichsystems

Stichworte

Getriebe, Getriebeinnendruck, Getriebeentlüftung, Entlüftungsschraube, Druckausgleich

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit werden Alternativen zur handelsüblichen Entlüftungsschraube aufgezeigt, die in vielen Getrieben zum Druckausgleich verwendet wird. Weiterführend wird ein optimiertes Druckausgleichsystem in einem methodischen Entwicklungsprozess ausgearbeitet.

Chantal Neupert

Title of the paper

Analysis of alternative gear venting solutions and development of an improved pressure equalisation system

Keywords

gear, internal gear pressure, gear vent, venting screw, pressure compensation

Abstract

This thesis shows alternatives to venting screws, which are frequently used as pressure equalisation elements for gear boxes. Secondly, an optimised pressure compensation system is designed in a methodical development process.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	III
Symbol- und Formelverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Schmierung	4
2.2 Getriebeöl	7
2.3 Ölförderung	9
2.4 Druckausgleich	10
3 Situationsanalyse	14
3.1 Entlüftungsschraube	14
3.2 Alternativen zur Entlüftungsschraube	18
4 Konkretisierung der Problemstellung	21
5 Anforderungen	26
5.1 Normen und Richtlinien	26
5.2 Anforderungsliste	27
6 Konzeptentwicklung	31
6.1 Funktionsstruktur	31
6.2 Konzipierung	31
6.2.1 Erweiterung der Entlüftungsschraube	32
6.2.2 Alternativen zur Druckentlüftung	35
6.2.3 Praktikable Membranlösung	37
6.2.4 Negativer Wärmeausdehnungskoeffizient	40
6.3 Revision und Auswahl	42
7 Gestaltung	45
7.1 Spezifische Konstruktionsrichtlinien	45
7.2 Konzept A	50
7.3 Konzept B	54
7.4 Revision	58

8 Zusammenfassung und Ausblick	59
Quellenverzeichnis	60
Literaturverzeichnis	60
Normen- und Richtlinienverzeichnis	62
A Anhang	63
A.1 Zeichnungen der Konzepte A & B	63
Eidesstattliche Erklärung	71

Tabellenverzeichnis

1	Druckerhöhung bei Erwärmung nach der Idealen Gasgleichung (2)	12
2	Liste der Anforderungen	28
3	Vergleich der Konzepte und Anforderungen	43
4	Übersicht der Gewindegrößen und Steigbohrungsdurchmesser	47

Abbildungsverzeichnis

1.1	Antriebslösungen von NORD - Getriebe, Motor, Frequenzumrichter	1
1.2	Produktentwicklungsprozess	3
2.1	Ölsumpf und Luftkammer im Getriebe im Stillstand	5
2.2	Standardisierte Einbaulagen im kartesischen Raum	6
2.3	Ölsumpf bei variabler Einbaulage	6
2.4	Luftvolumen im Getriebe abhängig von der Einbaulage	7
2.5	Viskosität-Temperatur-Kennlinien	8
2.6	Ölsumpf und Luftkammer im Getriebe im Betrieb	9
2.7	Ölförderung durch Verzahnung	10
2.8	Annahme: Thermodynamisches Gleichgewicht	11
3.1	Funktionsprinzip der Entlüftungsschraube	14
3.2	Verschlusschrauben in M1	15
3.3	Entlüftungsschraube - Vertikale/Horizontale Einbaulage	15
3.4	Entlüftungsschraube - Verlagerung in Beruhigte Zone	16
3.5	Funktionsprinzip der Druckentlüftungsschraube	17
3.6	Auswahl verschiedener Entlüftungsschrauben	18
3.7	Funktionsprinzip einer Membran als Entlüftung	19
3.8	Funktionsprinzip eines Faltenbalges	19
3.9	Patent: ZAE-AntriebsSysteme GmbH & Co KG (ZAE) ; Aktenzeichen: DE 10 2016 121 595.3, November 2016	20
3.10	Patent: SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG (SEW) ; Aktenzeichen: DE 10 2008 046 446.5, September 2008	20
4.1	Ölaustritt an den Entlüftungsöffnungen	22
4.2	Ölausgleichsbehälter	23
4.3	Ölabweisende Konturen im Getriebeinnenraum	24
4.4	Lösungsideen zur Leckagevermeidung an Entlüftungsöffnungen - NORD bis 2020	25
6.1	Aufbau einer Funktion - Druckausgleich	31
6.2	Erweiterte Entlüftungsschrauben Konzept	33
6.3	Entlüftungsschrauben mit Labyrinth	34

6.4	Entlüftungsschraube mit Auffangschale	34
6.5	Druckentlüftung mit Kunststoffklappe	35
6.6	Druckentlüftung mit Polyurethanschaumelement	37
6.7	Kontaktwinkel bei variierender Oberflächenspannung	38
6.8	Membran mit geänderter Form - 1	39
6.9	Membran mit geänderter Form - 2	40
6.10	Prinzip - Substanz mit negativem Wärmeausdehnungskoeffizient	41
6.11	Weiterführung der Konzepte	44
7.1	Arbeitsgrundlage der Gestaltung	45
7.2	Übernahme der unteren Außengeometrie	46
7.3	Wandstärke unter dem Gewindeauslauf	47
7.4	Verlegung der Schlüsselweite	50
7.5	Labyrinthteile	51
7.6	Konzept A - Schnittdarstellung	53
7.7	Konzept A	53
7.8	Schraubenbasis	54
7.9	Lage der Ausgangsbohrung	55
7.10	Größe der Ausgangsbohrung	56
7.11	Konzept B - Schnittdarstellung	57
7.12	Konzept B	57
A.1	Zusammenbauzeichnung - Konzept A	64
A.2	Einzelteilzeichnung - Konzept AB1	65
A.3	Einzelteilzeichnung - Konzept A2	66
A.4	Einzelteilzeichnung - Konzept A3	67
A.5	Zusammenbauzeichnung - Konzept B	68
A.6	Einzelteilzeichnung - Konzept B2	69
A.7	Einzelteilzeichnung - Konzept B3	70

Symbol- und Formelverzeichnis

M	$\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$	Molare Masse
m	kg	Masse
p	$\frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}^2}$	Druck
R	$\frac{\text{kg}\cdot\text{m}^2}{\text{s}^2\cdot\text{mol}\cdot\text{K}}$	Universelle Gaskonstante
R_{Luft}	$\frac{\text{kg}\cdot\text{m}^2}{\text{s}^2\cdot\text{mol}\cdot\text{K}}$	Spezifische Gaskonstante von Luft
T	K	Temperatur
V	m^3	Volumen
β	$\frac{1}{\text{K}}$	Ausdehnungskoeffizient
ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte

Abkürzungsverzeichnis

ATEX Atmosphère Explosible

CAD Computer Aided Design

DIN Deutsches Institut für Normung

E Ester

EN Europäische Norm

FVA Forschungsvereinigung Antriebstechnik

ISO International Organization for Standardization

ISO VG International Organization for Standardization Viscosity Grade

NORD Getriebebau NORD GmbH & Co KG

PA Polyamid

PAO Polyalphaolefin

PG Polyglykol

PUR Polyurethan

PTFE Polytetrafluorethylen

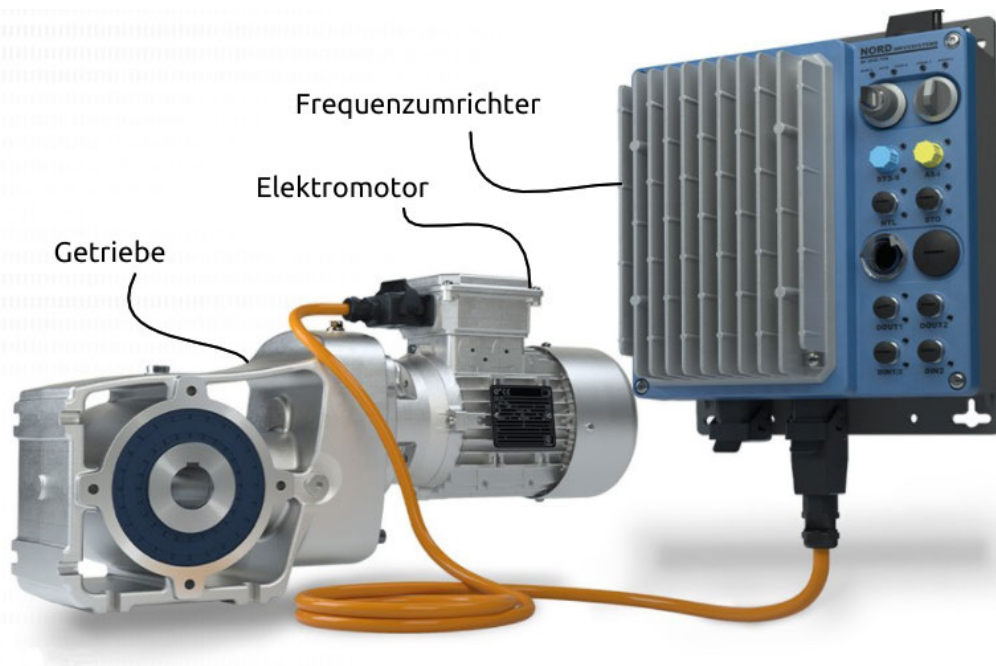
SEW SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG

VDI Verein Deutscher Ingenieure

ZAE ZAE-AntriebsSysteme GmbH & Co KG

1 Einleitung

Das Unternehmen Getriebebau NORD GmbH & Co KG (NORD) ist von seiner Gründung 1965 bis heute als Teil der Nord Drivesystems Gruppe zu einem weltweit agierenden Konzern herangewachsen. Kernkompetenz ist die Herstellung kundenorientierter und qualitativ hochwertiger Antriebslösungen, siehe Abbildung 1.1. Teil jeder Antriebslösung ist ein Getriebe, das vor dem treibenden Elektromotor die direkte Schnittstelle zur Kundenanwendung darstellt. Während für den Kunden die einwandfreie Funktion des Getriebes selbstverständlich ist, ist für NORD der Weg dahin mit zahlreichen Herausforderungen verbunden. Eine dieser Herausforderungen stellt der Druckausgleich im Getriebeinnenraum dar, der aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen Stillstand und Betrieb des Getriebes notwendig ist. Ein erhöhter Differenzdruck zwischen Umwelt und Getriebeinnenraum kann zu Schäden am Getriebe, speziell den Wellendichtringen, führen. Zum Druckausgleich in Getrieben wird üblicherweise eine sogenannte Entlüftungsschraube genutzt, die einen Luftaustausch zwischen Getriebeinnenraum und Umgebung ermöglicht. Die Entlüftungsschrauben sind aufgrund ihres Funktionsprinzips mit charakteristischen Vor- und Nachteilen belegt. Insbesondere aufgrund der Nachteile, auf die in dieser Arbeit näher eingegangen werden wird, sind die Entlüftungsschrauben im Speziellen und der notwendige Druckausgleich im Allgemeinen ständiger Forschungsgegenstand aller Getriebehersteller.



Quelle: <https://www.nord.com>

Abbildung 1.1: Antriebslösungen von NORD - Getriebe, Motor, Frequenzumrichter

Diese Arbeit zeigt in ihrem ersten Teil Weiterentwicklungen der klassischen Entlüftungsschraube, sowie Alternativen, die auf anderen Funktionsprinzipien basieren. Im zweiten Teil der Arbeit folgt ein Entwicklungsprozess, der zu einem optimierten Konzept zum Druckausgleich in Getrieben führt. Der Fokus der Optimierung liegt dabei auf der Erfüllung der spezifischen Anforderungen von NORD.

Während die Arbeit thematisch grob in die oben genannten zwei Teile aufgeteilt werden kann, erstreckt sich der Entwicklungsprozess des optimierten Druckausgleichsystems über die gesamte Länge der Arbeit. Die ersten vier Kapitel der Arbeit *Theoretische Grundlagen*, *Situationsanalyse*, *Konkretisierung der Problemstellung* und *Anforderungen* umfassen die Planungsphase des Entwicklungsprozesses. Das darauf folgende Kapitel *Konzeptentwicklung* bildet in weichen Grenzen die Konzept- und Entwurfsphase. Die finalen Kapitel *Gestaltung* und *Ausblick* bilden den Hauptteil der ausgedehnten Entwurfsphase ab. Die Phasen Planung, Konzeptentwicklung, Entwurf und Ausarbeitung folgen den Vorgaben der VDI 2221 [VDI19] für einen methodischen Produktentwicklungsprozess. Innerhalb dieser Aufteilung sind weiterhin die Kapitel *Konkretisierung der Problemstellung* bis *Konzeptentwicklung* in einen Problemlösungsprozess nach VDI 2222 [VDI97] und die Kapitel *Konzeptentwicklung* bis *Ausblick* in einen Entwurfsprozess nach VDI 2223 [VDI04] gegliedert. Die Grenzen dieser Prozesse gehen während der Konzipierungsphase mit den Phasen II und III der VDI 2221 fließend ineinander über. Um innerhalb dieser Struktur eine Übersicht zu ermöglichen, ist in Abbildung 1.2 ein Schema gezeigt und jedes Kapitel mit kleinen Einleitungen und Zusammenfassungen ausgestattet.

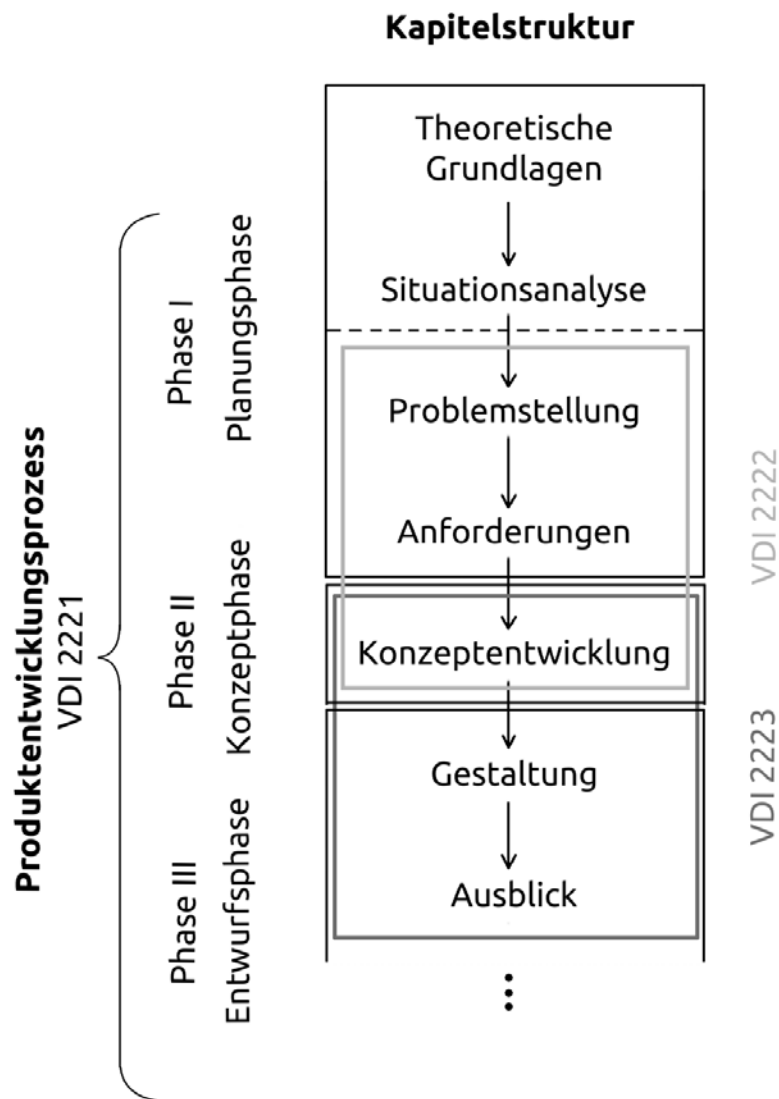


Abbildung 1.2: Produktentwicklungsprozess

2 Theoretische Grundlagen

In diesem ersten Teil der Arbeit werden die theoretischen Grundlagen, die zur Bearbeitung der Problemstellung notwendig sind, erklärt. Sie tragen zum direkten Verständnis der Arbeit bei und sollen deutlich machen, auf welche Weise Getriebeinnendruck entsteht und welche Auswirkungen dieser haben kann. Eingebunden werden nur die hier unmittelbar relevanten Grundlagen. Theoretisches und praktisches Wissen über die allgemeine Funktion eines Getriebes und seinen Aufbau werden vorausgesetzt.

2.1 Schmierung

Zahnradgetriebe sind nach den in ihrem Inneren angeordneten und umlaufenden Zahnrädern benannt. Beim Eingriff der Zahnräder kommt es zu einer überlagerten Roll- und Gleitbewegung, die sogenannte Wälzreibung an den Zahnflanken hervorruft [Wit+19, Kapitel 4]. Übermäßige Reibung führt zu Verschleiß am Material und ausgeprägter Wärmebildung. Außerdem ergeben sich weitere negative Auswirkungen wie ein verringerter Wirkungsgrad des Getriebes und beispielsweise erhöhte Geräuschbildung im Betrieb [Wit+19, Kapitel 20]. Daher muss die Reibung so weit wie möglich minimiert werden. Dazu wird ein Schmierstoff verwendet, dessen Hauptaufgabe es ist, die relativ zueinander bewegten Zahnflanken voneinander zu trennen. Zusätzlich kann über den Schmierstoff Wärme von der Reibstelle abgeführt werden. Die Art des Schmierstoffes und Schmiervfahrens sowie die Schmierstoffmenge sind von Getriebetyp, Umlaufgeschwindigkeit der Zahnräder, der zu übertragenden Belastung und den Umgebungsbedingungen abhängig. Allgemein kann zwischen Schmierfetten und Schmierölen unterschieden werden [Kle13]. Fernerhin gibt es Festschmierstoffe, die für Getriebe jedoch von untergeordnetem Interesse sind [Det18]. Verbreitete Schmiervverfahren sind zum Beispiel Umlaufschmierungen, Einspritzschmierungen oder Tauchschmierungen.

Bei NORD kommen fast ausschließlich Tauchschmierungen zum Einsatz. Sie eignen sich besonders gut für verhältnismäßig niedrig belastete Stirn- und Kegelradgetriebe, die das Hauptgeschäft von NORD ausmachen, und zeichnen sich durch ihre Einfachheit und Zuverlässigkeit aus [NW03]. Aufgrund dieser Bevorzugung werden andere Schmiervverfahren in dieser Arbeit nicht betrachtet. Bei einer Tauchschmierung wird eine definierte Menge Öl in den Innenraum des Getriebes gefüllt. Aufgrund der unterschiedlichen Dichten von Öl und Luft bilden sich im Getriebeinnenraum ein Ölsumpf im unteren Bereich und eine Luftkammer im oberen Bereich, siehe Abbildung 2.1. Die Ölmenge muss dabei wenigstens so groß sein, dass mindestens ein Rad dauerhaft und hinreichend tief in das Öl eintaucht und so klein, dass größere Planschverluste vermieden werden und Öl aus Kosten- und

Umweltschutzgründen gespart wird. Die Schmierung erfolgt dadurch, dass das im unteren Bereich liegende Öl von den sich drehenden Zahnrädern mitgenommen und zum Eingriffsbereich der Räder transportiert wird. Es entsteht ein Schmierfilm insbesondere an den Zahnflanken der Zahnräder [Eck85, S.36 ff.].

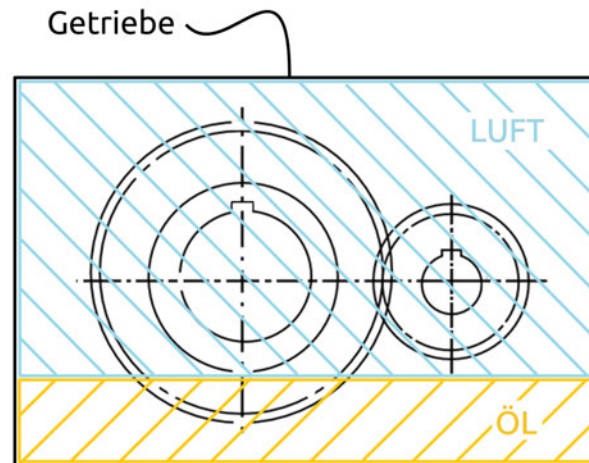


Abbildung 2.1: Ölsumpf und Luftkammer im Getriebe im Stillstand

Ein Getriebe kann frei im Raum gedreht eingesetzt werden. Die Position, in der es verbaut wird, wird Einbaulage genannt. In Bild 2.2 sind die sechs möglichen Standardeinbaulagen im kartesischen Raum dargestellt. Die Lagen sind zur späteren Wiedererkennung mit den Bezeichnungen M1 - M6 markiert [Nor21]. Aufgrund der Anforderungen an die Ölfüllmenge ergibt es sich, dass in jeder Einbaulage eine individuelle Ölfüllmenge definiert werden muss. Je nach Einbaulage des Getriebes kann die Ölfüllmenge stark variieren, siehe Abbildung 2.3. Eine beispielhafte Analyse jeweils einer Stirnradgetriebe- und einer Kegelradgetriebereihe bei NORD hat abhängig von der Einbaulage des Getriebes zu den in Abbildung 2.4 angegebenen Luftvolumenanteilen geführt. Die Luftvolumenanteile ergeben sich aus dem Gesamtinnenvolumen des Getriebes abzüglich der einbaulagenabhängigen Ölfüllmenge [Nor21]. Die Abbildung soll deutlich machen, wie hoch der prozentuale Luftanteil abhängig von der Einbaulage im Durchschnitt ist. Es zeigt sich, dass die Variation sich von 10% Luftanteil bis zu über 70% Luftanteil im Getriebeinnenraum erstreckt.

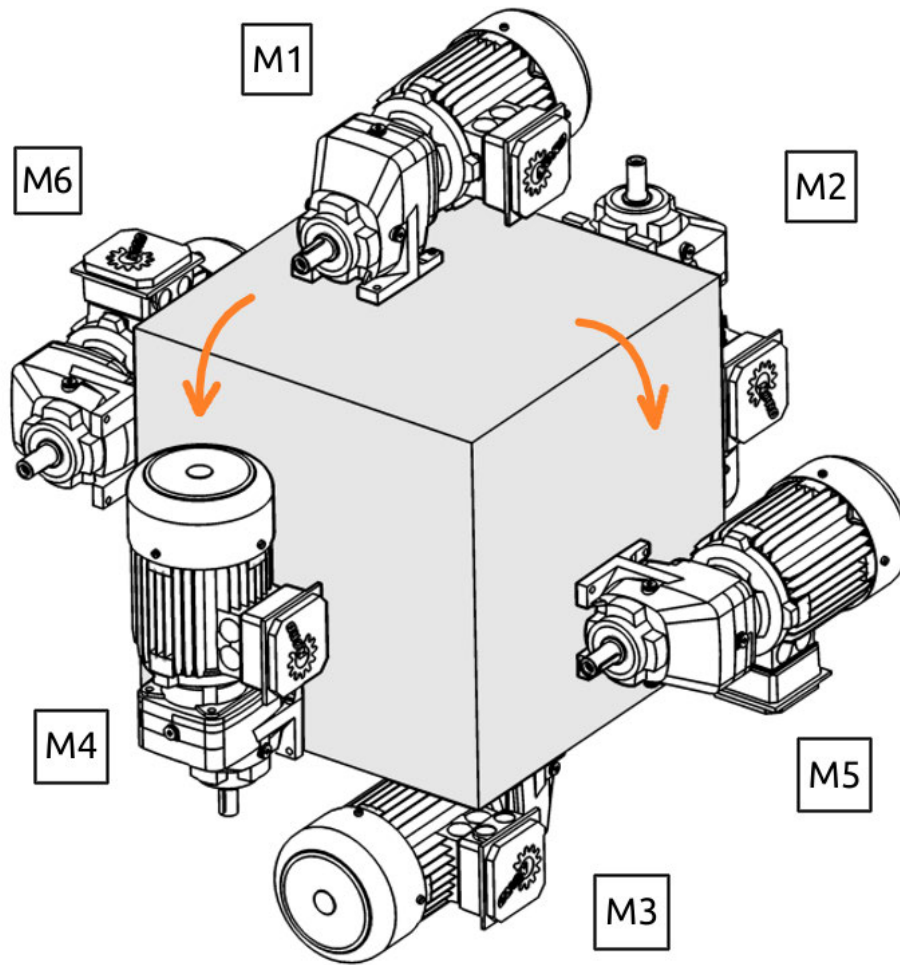


Abbildung 2.2: Standardisierte Einbautagen im kartesischen Raum

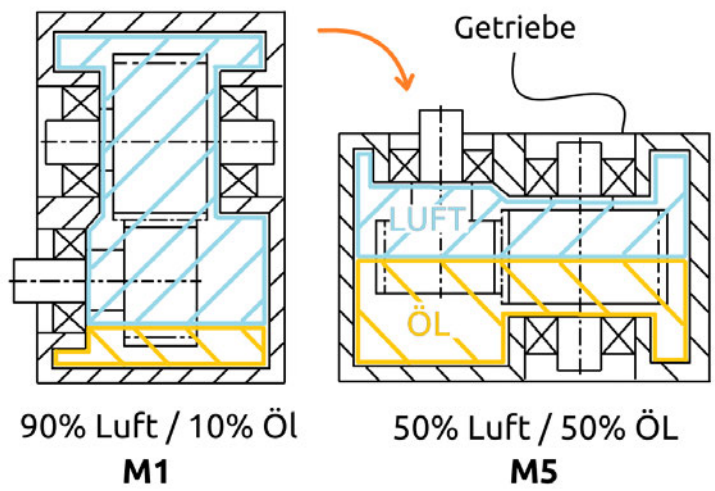


Abbildung 2.3: Ölsumpf bei variabler Einbaulage

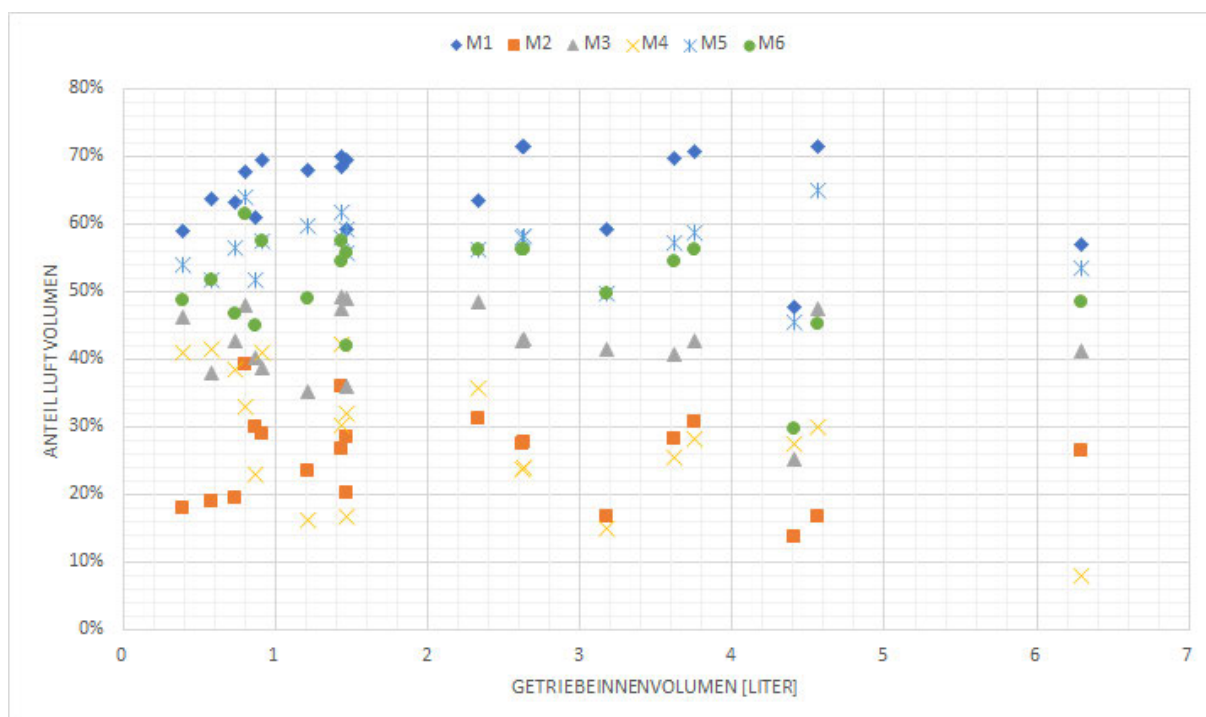


Abbildung 2.4: Luftvolumen im Getriebe abhängig von der Einbaulage

2.2 Getriebeöl

Das für eine Tauchschmierung eingesetzte Öl wird zusammengefasst als Getriebeöl bezeichnet. Es unterscheidet sich aufgrund seiner einzigartigen Anforderungen beispielsweise von Hydraulikölen oder Motorenölen.

Das Getriebeöl muss bereits in die Konstruktion des Getriebes miteinbezogen werden. Es bestehen vielfältige Grundöle, aus denen auf Basis des Getriebetyps, der Leistung, des Drehzahlbereichs und der Umgebungseinflüsse ausgewählt werden kann. Ein Getriebeöl wird durch die Hauptmerkmale Typ, Verschleißschutz, Betriebstemperaturbereich und Viskosität beschrieben. Je höher beispielsweise die Belastung des Getriebes, desto höher muss die Viskosität des Öls gewählt werden [NW03]. Des Weiteren wird ein Getriebeöl durch Nebenmerkmale wie Alterungsverhalten, Tieftemperaturverhalten, Schaumverhalten und Verträglichkeit definiert. Man unterscheidet ferner zwischen Mineralölen und synthetischen Getriebeölen, wobei die synthetischen Getriebeöle weiter aufgrund ihrer Basis unterteilt werden in Polyalphaolefin (PAO), Polyglykol (PG) und Ester (E) [Wit+19, Kapitel 4]. Ester-Öle und einige PG-Öle sind biologisch abbaubar. Native Öle sind aufgrund ihrer mangelnden Leistungsfähigkeit für industrielle Anwendungen nicht relevant [Det18]. Die Viskosität ist zusammen mit dem Öltyp eines der wichtigsten Merkmale bei der Aus-

wahl des Getriebeöls, da sie die Grundlage für die Schmierfilmbildung und die Verteilung des Öls bildet. Die Viskosität des Getriebeöls ist stark von seiner aktuellen Temperatur abhängig. Je nach Öltyp und beigefügten Additiven ergeben sich unterschiedliche Viskosität-Temperatur Kennlinien. In Abbildung 2.5 ist eine nicht-maßstäbliche Skizze gezeigt, in der die grundsätzlichen Viskosität-Temperatur-Kennlinien der Grundöle Mineralöl, PAO und PG gezeigt sind. Die Kennlinien sind als Geraden dargestellt, die sich bei 40°C treffen. An dieser Stelle ist die Viskosität aller Öltypen, bei Vergleich von Ölen der gleichen Viskositätsklasse ISO VG, gleich. Relevant ist die Steigung der Geraden, die durch den Viskositätsindex beschrieben wird [Eck85, S.81].

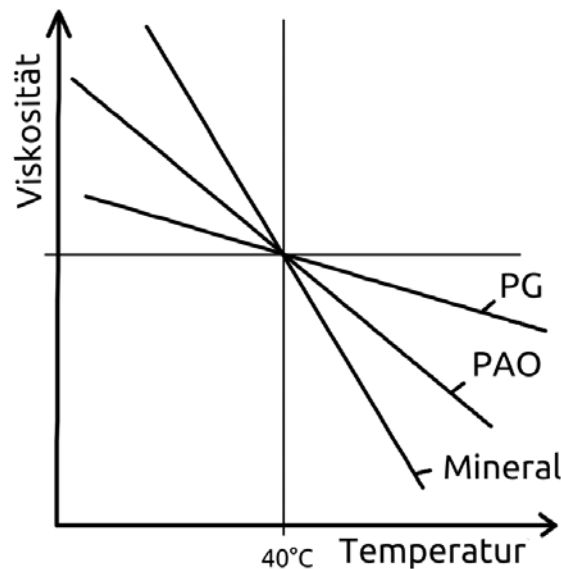


Abbildung 2.5: Viskosität-Temperatur-Kennlinien

Steigt bei Inbetriebnahme des Getriebes infolge der Reibung die Temperatur an den Zahnflanken an, steigt auch die Temperatur des Öls. Seine Viskosität nimmt ab. Abhängig von der Sorte des Schmierstoffes, kommt es, wie in Abbildung 2.5 gezeigt, zu unterschiedlich hohen Differenzviskositäten bei Bezugstemperatur (40°C) und Betriebstemperatur des Getriebes. Während einerseits für den Anlauf des Getriebes eine ausreichend niedrige Viskosität benötigt wird, darf die Viskosität im Betrieb einen Minimalwert nicht unterschreiten, um einen Abriss des Schmierfilms zu verhindern und dessen Tragfähigkeit zu gewährleisten. Die Viskosität des Öls wird daher immer anhand der erwarteten Betriebstemperatur festgelegt mit nur zweitrangiger Berücksichtigung der Umgebungstemperatur. Ausgenommen sind standortbedingte Tief- und Hochtemperaturanwendungen, die sich an den Grenzen der Kennlinien des Öls bewegen. Ein fester Standard für die Viskosität von industriell verwendeten Schmierölen ist als International Organization for

Standardization Viscosity Grade (ISO VG) unter der Nummer ISO 3448 [ISO10] aufgeschrieben [Wit+19, Kapitel 4].

2.3 Ölförderung

Im Betrieb werden die Grenzen von Ölsumpf und Luftkammer, wie sie in Abbildung 2.1 gezeigt wurden, aufgelöst, siehe Abbildung 2.6. Die Verteilung des Öls im Getriebeinnenraum wird hauptsächlich von den Zahnrädern bestimmt, die aufgrund ihrer Lage, Drehrichtung und -geschwindigkeit sowie ihrer Geometrie eine Förderwirkung haben. Weiteren Einfluss auf die Ausbildung des Ölstromes im Betrieb haben als bewegte Teile die Lager und zusätzlich die Wellendichtringe, die jedoch nur sekundär zu betrachten sind. Als unbewegtes Teil nimmt das Getriebegehäuse aufgrund seiner Form und Einbaulage Einfluss.

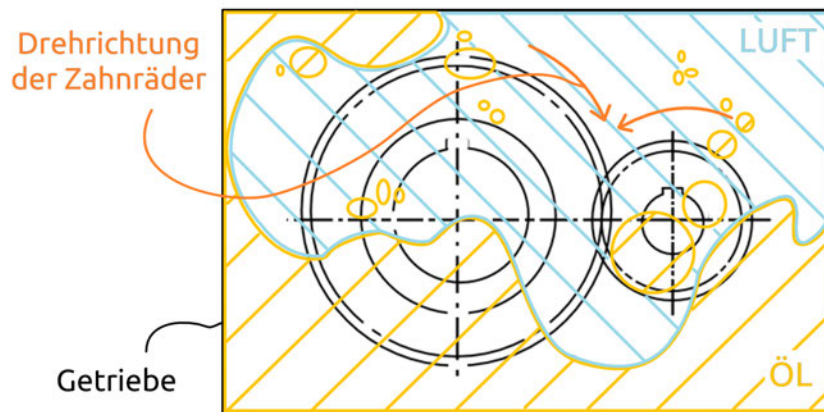


Abbildung 2.6: Ölsumpf und Luftkammer im Getriebe im Betrieb

Wie bereits beschrieben, wird Öl aus dem Ölsumpf von den durchlaufenden Zähnen der Räder mitgeschleppt und zur Reibstelle am Eingriffspunkt transportiert. Es bildet sich ein Schmierfilm über der Verzahnung. Dabei wird durch die vorherrschenden Radialkräfte aufgrund der Umfangsgeschwindigkeit der Zahnräder Öl nach außen geschleudert. Die Menge des Öls, welches auf den Zähnen des Zahnrades transportiert wird, nimmt mit der Länge der Transportstrecke ab. Das Öl, das den Eingriffspunkt erreicht, wird wiederum von den aufeinander treffenden Zahnflanken verdrängt. Es spritzt sowohl entgegen der Zahnradrehrichtung als auch seitlich über die Zahnbreite aus der Verzahnung heraus [Eck85, S.37]. Eine Darstellung der Vorgänge ist in Abbildung 2.7 gezeigt. Weiterhin trifft das von den Zähnen geschleuderte Öl auf die Innenwände des Getriebegehäuses und haftet entweder dort oder wird zurückgeworfen. Ob, wie stark und in welche Richtung ein Zurückschleudern auftritt ist individuell von jedem Getriebe, dessen Einbaulage und der Charakteristik seines Zahnradumlauf abhängig. Liegen die Zahnräder bei geänderter

miteinander verknüpft. Es ergibt sich eine Dichteänderung des Materials bei Temperaturerhöhung, die aufgrund der Massenerhaltung wiederum eine Volumenänderung nach sich zieht. Während die Wärmeausdehnung der Metalle verhältnismäßig gering ist, dehnen sich das Getriebeöl und besonders die Luft, die sich im Innenraum des Getriebes befinden, erheblich aus. Unten sind zur Veranschaulichung einige Daten dem 'VDI-Wärmeatlas' ([Spa19],[UB19]) entnommen worden.

Ausdehnungskoeffizient β in $\frac{1}{K}$:

Gusseisen mit Kugelgraphit (EN-JS 1030): $12 \cdot 10^{-6}$

Aluminium (EN-AW 1200): $22.5 \cdot 10^{-6}$

Trockene Luft bei 20°C: $3,421 \cdot 10^{-3}$

Um ein Austreten des Öls zu verhindern, sind Getriebe vollständig abgedichtet. Sie bilden einen abgeschlossenen Raum. Da das Innenvolumen daher nicht erhöht werden kann, kommt es bei Erwärmung statt zu einer Volumensteigerung zu einer Druckerhöhung im Getriebe.

Es wird vereinfachend ein thermodynamisches Gleichgewicht angenommen:

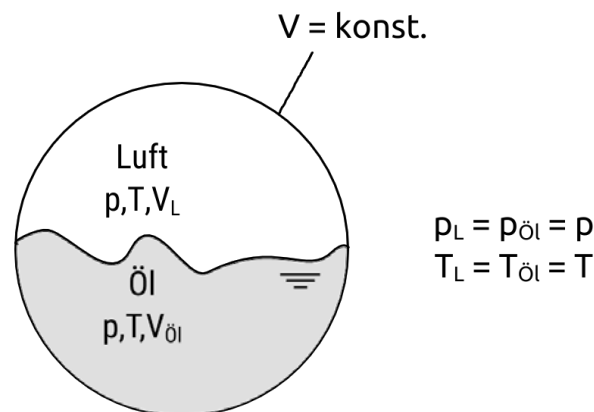


Abbildung 2.8: Annahme: Thermodynamisches Gleichgewicht

Unter der Voraussetzung, dass die Ausdehnung der Metalle und des Öls¹ vernachlässigt werden und weiterhin das Öl als inkompressibel ($V_{\text{Öl}} = \text{konst.}$) angenommen wird, ist die Druckerhöhung ausschließlich von der Luft im Getriebe abhängig. Es gilt die Ideale Gasgleichung [JTS06, S.116], wenn zusätzlich die Kompressibilität der Luft vernachlässigt

¹Grundsätzlich wäre es wünschenswert das Öl miteinzubeziehen. Da der Ausdehnungskoeffizient des Öls jedoch stark von seinen exakten Inhaltsstoffen abhängt, ist für eine annähernde Berechnung eine Vernachlässigung unumgänglich.

wird. Die Spezifische Gaskonstante von Luft (R_{Luft}) [WKW14, S.162] wird eingesetzt:

$$R_{Luft} = \frac{R}{M_{Luft}} = \frac{8,314 \frac{J}{mol \cdot K}}{0,028944 \frac{kg}{mol}} = 287,058 \frac{J}{kg \cdot K} \quad (1)$$

$$p = \frac{m_{Luft} \cdot R_{Luft} \cdot T}{V_{Luft}} \quad (2)$$

Anstelle von Volumen (V) und Masse (m) kann bei $V_{Luft} = \text{konst.}$ auch mit der Dichte gerechnet werden.

$$p = \rho_{Luft} \cdot R_{Luft} \cdot T \quad (3)$$

Die Dichte von Luft liegt bei 0°C bei $1,276 \frac{kg}{m^3}$ [Spa19].

Es ergibt sich nach Einsetzen von ρ_{Luft} und R_{Luft} ein lineares Verhältnis zwischen Druck und Temperatur mit einem konkreten Faktor, siehe Gleichung 4. Wichtig anzumerken ist hier, dass der überschlägig anhand Gleichung 4 berechnete Druck im Getriebe unabhängig vom genauen Verhältnis zwischen Öl und Luft im Getriebe ist.

$$p = 367,43 \frac{J}{m^3 \cdot K} \cdot T \quad (4)$$

In Tabelle 1 sind die Drücke zu ausgewählten Temperaturen gezeigt. Ausgangspunkt ist eine Temperatur von 0°C. Bei einem Vergleich der hier vereinfacht berechneten Tabellenwerte mit Berechnungswerten eines komplexeren Ansatzes [Die17], der die Ausdehnung des Öls und die Kompressibilität der Luft miteinbezieht, ergibt es sich, dass die Werte bei niedrigen Temperaturen gut übereinstimmen, mit steigender Temperatur jedoch höhere Abweichungen aufweisen. Für einen groben Überblick über die Thematik, wie er hier benötigt wird, sind die Werte hinreichend genau.

Ein erhöhter Innendruck kann zu erheblichen Schäden am Getriebe führen. Die Lebensdauer von Wellendichtringen beispielsweise wird durch konstanten Innendruck und dadurch erhöhte Dichtkantenpressung stark reduziert [Det18]. Zusätzlich kann es zu Ölaustritt an den Kanten der Dichtungen kommen, unabhängig davon, welche Art Dichtung ge-

Tabelle 1: Druckerhöhung bei Erwärmung nach der Idealen Gasgleichung (2)

T in K	273	283	293	303	313	323	333	343	353	363	373
T in °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
p in bar	1,00	1,04	1,08	1,11	1,15	1,19	1,22	1,26	1,29	1,33	1,37

nutzt wird. In extremen Fällen kann es zum Herauslösen von Wellendichtringen und Verschlusskappen kommen. Zusätzlich zur Druckerhöhung durch Erwärmung gibt es weitere Faktoren, die Einfluss auf den Getriebeinnendruck haben. Dazu gehören zum Beispiel Förderwirkungen der Wellendichtringe und Lager nach Außen. Ihr Einfluss ist geringer als der der Wärmeausdehnung, zeigt sich jedoch in Langzeitmessungen an realen Getrieben. Um Schäden an Getriebekomponenten sowie Ölverlust durch eine Druckerhöhung zu vermeiden, muss im Getriebe daher ein Druckausgleich stattfinden. Dieser kann entweder konstant aktiv sein oder durch die Druckerhöhung aktiviert werden. Ein Druckausgleich durch ein geöffnetes Getriebe wird als Entlüftung bezeichnet.

3 Situationsanalyse

Im folgenden Kapitel sollen Aufbau, Funktionsweise und Anwendungsgrenzen von Systemen zum Druckausgleich in Getrieben erläutert werden. Als Grundlage dient die im letzten Kapitel aufgeführte Theorie.

3.1 Entlüftungsschraube

Als Fazit des Kapitels *Theoretische Grundlagen* hat sich ergeben, dass bei abgedichteten Getrieben ein Druckausgleich durchgeführt werden muss. Die Entlüftungsschrauben haben sich in der Praxis zum am häufigsten verwendeten Mittel für einen Druckausgleich durchgesetzt. Sie basieren auf dem einfachen Prinzip des Druckausgleichs durch eine lokal begrenzte Öffnung des Getriebeinnenraums in die Umgebung. Zwischen Schraube und Gehäusewand liegt ein Dichtring, der in einer entsprechenden Aussparung in der Schraube integriert ist.

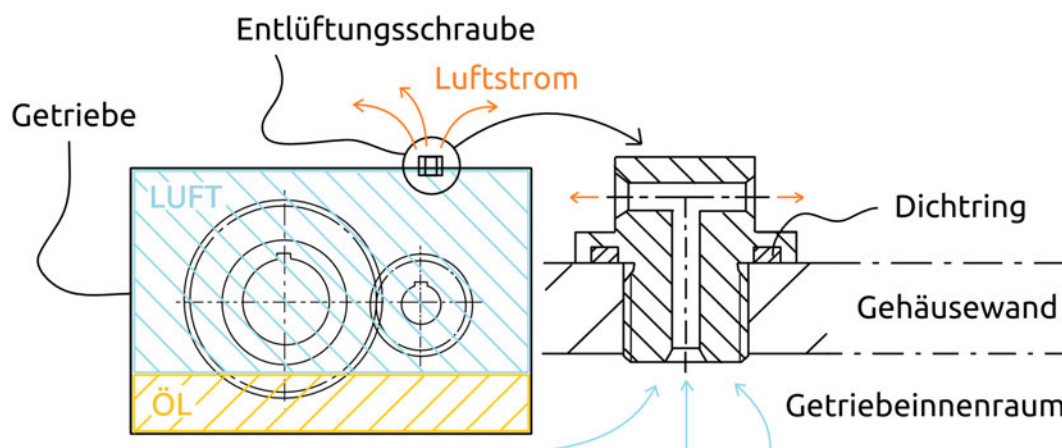


Abbildung 3.1: Funktionsprinzip der Entlüftungsschraube

Die Schrauben bieten diverse Vorteile wie hohe Universalität, geringe Kosten und hohe Montage-/Demontage und Wartungsfreundlichkeit. Über eine Entlüftungsschraube kann ein beliebiges Luftvolumen abgeführt oder zugeführt werden, sodass sie in unterschiedlichen Gewindegrößen für jede Getriebegröße genutzt werden können. Sie werden standardmäßig am höchsten Punkt des Getriebes vertikal angebracht, sodass die Schraube innerhalb der Luftkammer liegt [Nor21]. Es stehen an jeder Seite des Getriebes entsprechende Gewindebohrungen zur Verfügung, sodass je nach Einbaulage die Entlüftungsschrauben immer in der Luftkammer angebracht werden können. Die so zusätzlich vorhandenen Bohrungen werden mit Verschlusschrauben verschlossen. Nach Bedarf können diese auch durch Ölschaugläser ersetzt werden, an denen der Ölstand abgelesen werden kann. Die

am tiefsten liegende Verschlusschraube kann als Ölablass genutzt werden. Eine Skizze der verschiedenen Möglichkeiten ist in Abbildung 3.2 zu sehen. Dargestellt ist als Beispiel die Einbaulage M1 [Nor21].

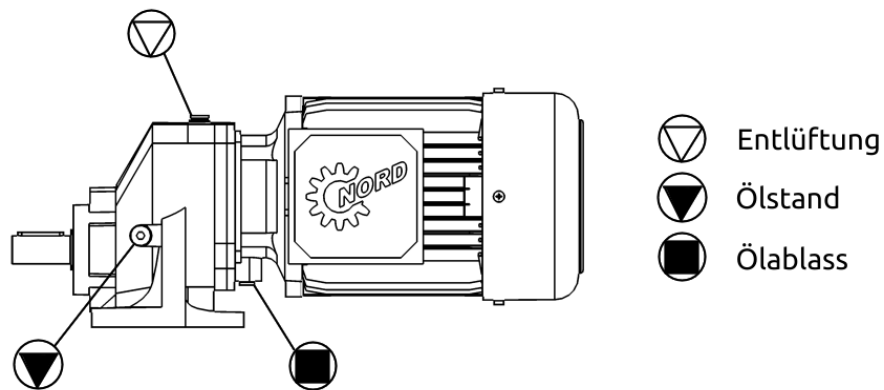


Abbildung 3.2: Verschlusschrauben in M1

In besonderen Fällen können Entlüftungsschrauben auch horizontal am höchsten Punkt eingebaut werden. Dies sollte jedoch vermieden werden, da durch die geänderte Drehlage ein unerwünschter Austritt von Öl in die Umgebung erleichtert wird. Eine Darstellung des Problems ist in Abbildung 3.3 zu sehen.

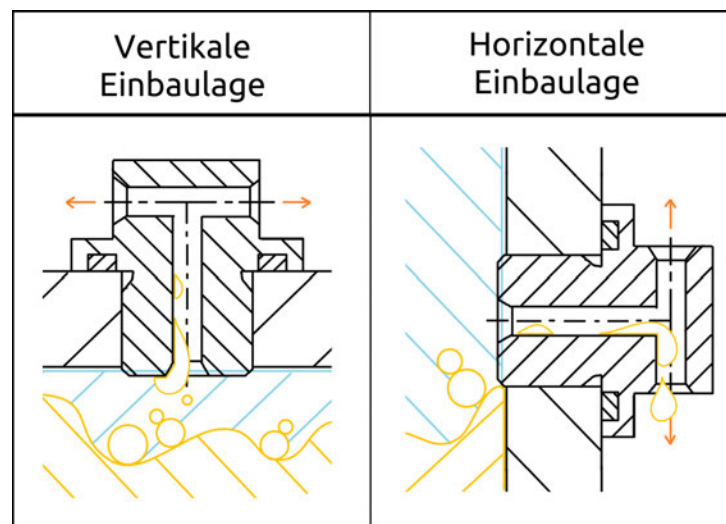


Abbildung 3.3: Entlüftungsschraube - Vertikale/Horizontale Einbaulage

Ein Verändern der Einbaulage des Getriebes während des Betriebs, also bei konstanter Lage der Entlüftungsschraube, ist nur in einem festgelegten Bereich möglich. Wie groß der Verdrehwinkelbereich genau ausfallen darf, hängt von der individuellen Situation ab. In jedem Fall darf der Ölstand im Stillstand nicht über das Niveau der Entlüftungsschraube

steigen. Weitere Ausnahmen von der Regel zur Lage der Entlüftungsschraube können sich durch die Ölförder Routen der Zahnräder ergeben, siehe Abbildung 2.7. Liegt der höchste Punkt des Getriebes beispielsweise direkt über einem Zahnrad mit der Zahnbreite parallel zur Außenwand, kann es sinnvoll sein, die Entlüftungsschraube an einen tieferen Punkt zu verlegen, der außerhalb einer Zone mit hohem Spritzölaufkommen liegt, siehe Abbildung 3.4.

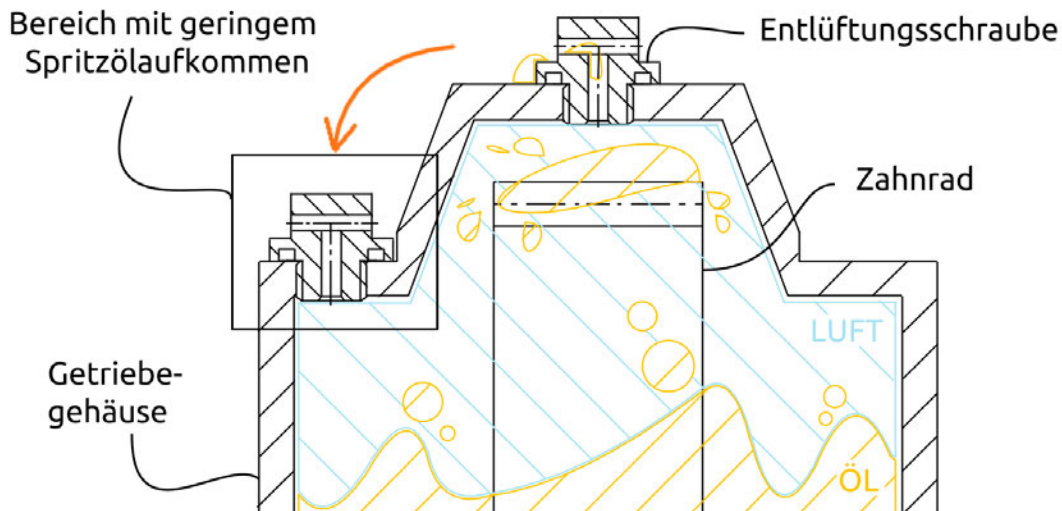


Abbildung 3.4: Entlüftungsschraube - Verlagerung in Beruhigte Zone

Bereits seit ihrer Einführung haben die Entlüftungsschrauben aber auch einige Nachteile wie häufige Leckagen und Eindringen von Schmutz und Wasser. Insbesondere horizontal liegende Schrauben sind verstärkt betroffen, siehe Abbildung 3.3. Da selbst sehr geringe Leckagen zum Beispiel in der Lebensmittelindustrie ausgeschlossen werden müssen und Verschmutzungen im Öl mindestens das Betriebsverhalten des Getriebes negativ beeinflussen, unterliegen die Entlüftungsschrauben einem ständigen Verbesserungsprozess. Es sind im Laufe der Jahre viele Varianten für die unterschiedlichsten Anwendungsfälle entstanden [Zel95]. Im Gegensatz zur ursprünglichen, sehr einfachen Variante haben sich die anderen Varianten jedoch kaum durchgesetzt, da sie in Bezug auf ihre Herstellungskosten und Wartungsfreundlichkeit bedeutend schlechter abschneiden. Einzige sehr häufig eingesetzte Erweiterung ist die sogenannte Druckentlüftung, die, mit einer Kugel und Feder ausgestattet, erst ab einem konkreten Druck öffnet, sodass das Getriebe einen weitestgehend abgeschlossenen Raum darstellt und Leckagen und das Eindringen von Schmutz und Wasser vermieden werden, siehe Abbildung 3.5. Mit der Nutzung von Druckentlüftungen ergeben sich indessen neue Herausforderungen. Ein Beispiel stellt der Abkühlvorgang nach Ausschalten eines Antriebes dar. Da die Druckentlüftungsschrauben nur in eine Richtung öffnen können, kann der beim Abkühlen entstehende Unterdruck nicht ausgeglichen wer-

den. Ein geringes Druckniveau² kann von den Getriebeteilen kurzzeitig kompensiert werden. Gleichwohl stellen alle Druckschwankungen, Überdrücke und Unterdrücke, gegenüber dem Atmosphärendruck eine möglichst zu vermeidende Zusatzbelastung des Getriebes dar [Det18].

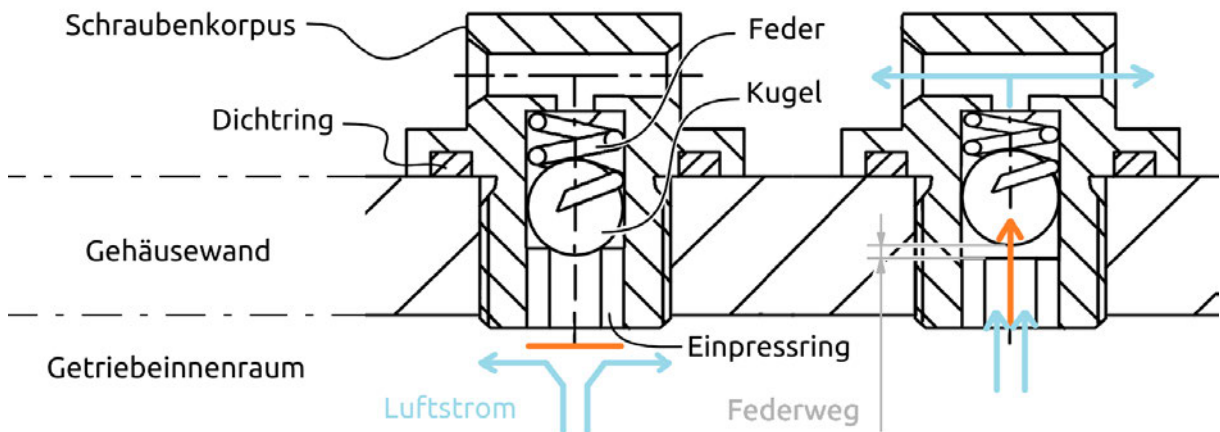
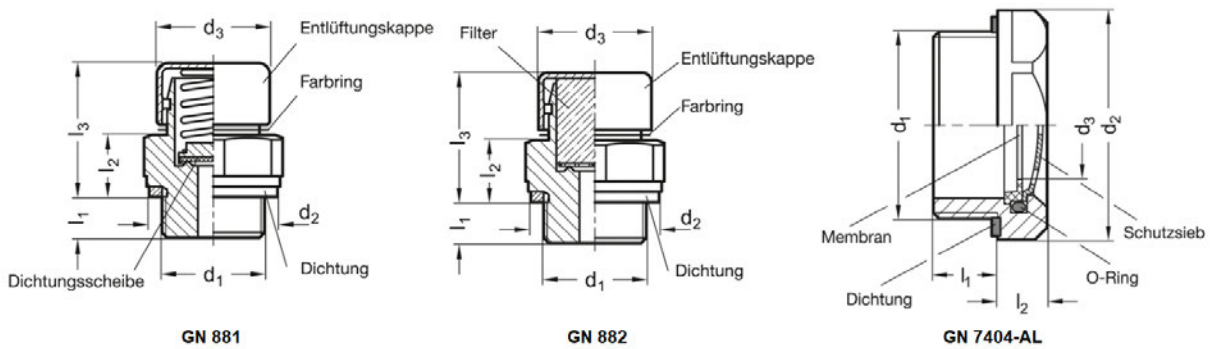


Abbildung 3.5: Funktionsprinzip der Druckentlüftungsschraube

Hersteller von Entlüftungsschrauben sind beispielsweise: GANTER, Hunger Pneumatik, Reyher, Heinrichs & Co. KG, Skarke Ventilsysteme oder Anselm. In Abbildung 3.6 sind drei Beispiele für komplexere Entlüftungsschrauben der Firma GANTER zu sehen. Links ist eine Druckentlüftung mit einer Dichtungsscheibe statt einer Kugel zu sehen (GN 881). Mittig ist eine Schraube mit einem Filterelement zu sehen, das das Eindringen von Schmutz von außen und das Austreten von Öl von innen verhindert (GN 882). Rechts ist eine Variante mit einer Membran und einem Sieb gezeigt. Die Membran verhindert dabei das Austreten von Öl, während sie es für Luft ermöglicht. Das Sieb soll die Membran vor Verschmutzung von außen schützen (GN 7404-AL).

²Erfahrungen von NORD definieren 'gering' als $\approx 0.2\text{bar}$ Druckdifferenz zu Normaldruck. Druckentlüftungen mit entsprechendem Öffnungsdruck werden eingesetzt.



Quelle: <https://www.elesa-ganter.at/de/aut/produkte/olschauglaser-olstandanzeiger-verschluss-schrauben--3#facet:12579>

Abbildung 3.6: Auswahl verschiedener Entlüftungsschrauben

Bei den anderen Herstellern finden sich ergänzend zu der einfachen Variante (siehe Darstellung 3.1) ähnliche Modelle. Es sei dazu der Verweis auf deren Kataloge gemacht.

3.2 Alternativen zur Entlüftungsschraube

Die beschriebenen Probleme der Entlüftungs- und Druckentlüftungsschrauben haben dazu geführt, dass nicht nur die Schrauben selbst weiterentwickelt worden sind, sondern auch, dass neue Konzepte zum Druckausgleich entwickelt worden sind, die auf anderen Ansätzen beruhen. Zwei Konzepte, die sich besonders hervortun, da viele unterschiedliche Varianten auf ihnen basieren, sind luftdurchlässige Membranen und Luftbälge.

Membranen können in Verschlusskappen, in Entlüftungsschrauben (siehe Abbildung 3.6, rechts) oder im Getriebedeckel integriert sein. Der Druckausgleich ergibt sich genau wie bei den vorgestellten Entlüftungsschrauben durch das Abführen von überschüssigem Luftvolumen, siehe Abbildung 3.7. Der große Vorteil einer durchlässigen Membran ist, dass im Gegensatz zu Entlüftungsschrauben keine echte Öffnung des Getriebes besteht, aber trotzdem ein Druckausgleich durchgeführt wird. Ein häufig verwendetes Membranmaterial ist der teilkristalline Kunststoff Polytetrafluorethylen (PTFE), besser bekannt unter Markennamen wie Teflon oder GORE-Tex. PTFE hat diverse positive Eigenschaften wie seine chemische Beständigkeit, thermische Stabilität (bis 260°C [HK19]) und seine ausgezeichnete Hydrophobie³. Er eignet sich daher besonders zum Einsatz als Grenzschicht zur Entlüftung und zum Druckausgleich. PTFE kann in entsprechender Kombination als festes Material oder als Stoff auftreten. Nachteile sind, dass PTFE, genau wie andere Materialien mit ähnlichen Eigenschaften, verhältnismäßig kostenintensiv in der Herstellung ist und dass die Haltbarkeit einer Membran unter starker Belastung durch Schmieröl nur

³Wasserabweisende Eigenschaften

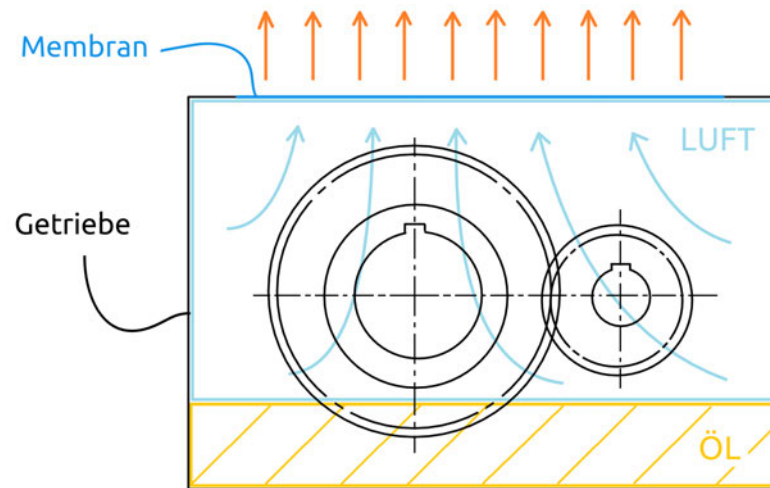


Abbildung 3.7: Funktionsprinzip einer Membran als Entlüftung

sehr gering ist. Probleme sind ein kurzfristiges Verkleben der Membran und langfristig chemische Reaktionen. Dies gilt besonders für synthetische Getriebeöle, die Eigenschaften von Lösungsmitteln besitzen [Eck85].

Im Gegensatz zu Membranen, die sehr universell einsetzbar sind, können Balge meist nur an weiten, glatten Flächen angebracht werden. Das bei Erwärmung entstehende zusätzliche Luftvolumen wird von ihnen kompensiert, ohne dass eine Öffnung nach Außen vorliegt. Sie bestehen aus undurchlässigen Membranen mit veränderlicher Außengeometrie. Bei Innendruckerhöhung entsteht durch Erweiterung der Geometrie des Balgs ein Zusatzraum. Die Membran bei beispielsweise Faltenbalgen faltet sich entsprechend dem Innendruck des Getriebes auf oder zu (siehe Abbildung 3.8). Vorteil eines Balgs ist die vollständige Trennung zwischen Getriebeinnenraum und Außenbereich. Nachteile sind die Geometrierweiterung und die mangelnde universelle Einsetzbarkeit.

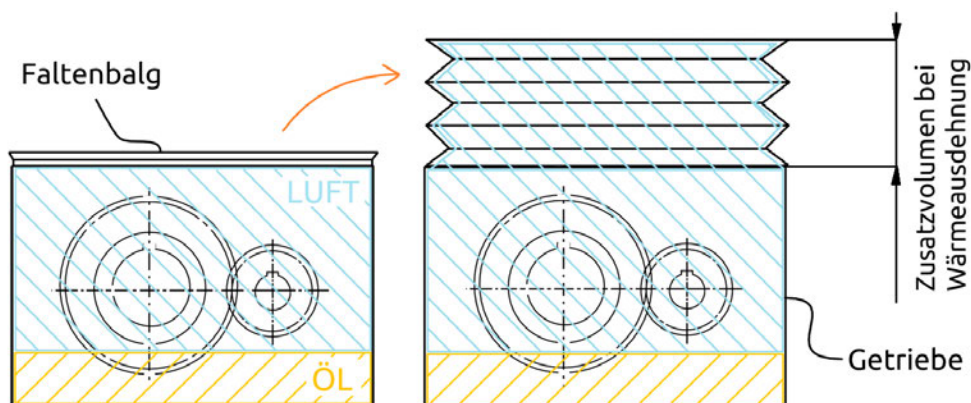


Abbildung 3.8: Funktionsprinzip eines Faltenbalges

Ein Beispiel für ein kombiniertes Membran/Balg-System wurde von der Firma ZAE zum Patent angemeldet. Es ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Die Erfindung zeigt eine Lösung mit zwei einfachen Öffnungen und einer in einem Zwischenraum liegenden Membran, sodass der Getriebeinnenraum trotz Öffnung nach außen abgeschlossen bleibt. Bei Innendruckerhöhung fließt das entstehende Zusatzvolumen aus dem Innenraum des Getriebes in den Zwischenraum, in dem die Membran liegt. Die Luft, die zuvor den Zwischenraum eingenommen hat, wird über die Membran aus der zweiten Öffnung in den Außenraum gedrückt.

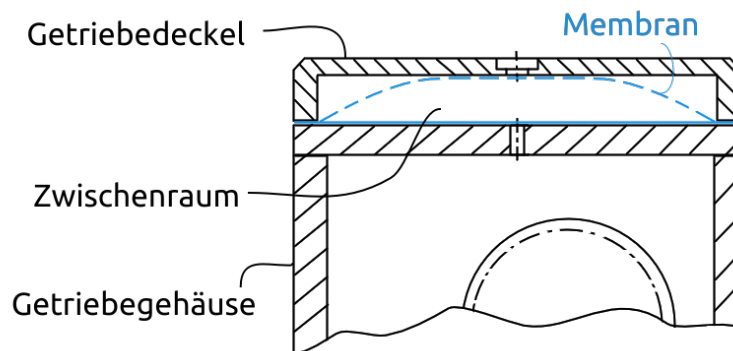


Abbildung 3.9: Patent: ZAE ; Aktenzeichen: DE 10 2016 121 595.3, November 2016

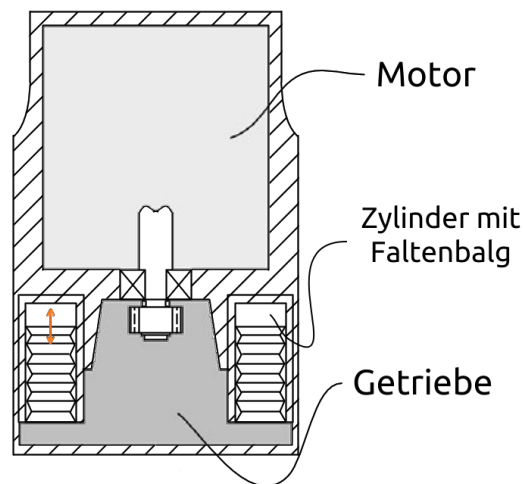


Abbildung 3.10: Patent: SEW ; Aktenzeichen: DE 10 2008 046 446.5, September 2008

Als Beispiel für eine Balglösung ist in Abbildung 3.10 ein Patent der Firma SEW zu sehen. Das Druckausgleichssystem ist Teil der MoviGear-Reihe. Die MoviGear Reihe zeichnet sich dadurch aus, dass Getriebe und Motor im gleichen Gehäuse liegen, das in zwei Bereiche aufgeteilt ist. Die im Bild markierten Zylinder enthalten entweder Faltenbälge, wie hier

beispielhaft gezeigt ist, oder eine Art Kolben, der sich bei Druckerhöhung bewegt und das überschüssige Volumen vom Getriebe aufnimmt.

4 Konkretisierung der Problemstellung

Von NORD werden zur Zeit zum Druckausgleich ausschließlich Entlüftungs- und Druckentlüftungsschrauben genutzt, wie sie im Kapitel *Entlüftungsschraube* ausführlich beschrieben worden sind. Am häufigsten verwendet werden speziell die Entlüftungs- und Druckentlüftungsschrauben der Größen M8x1, M10x1 und M12x1.5, von denen grundsätzlich mehrere tausend bis zehntausend Exemplare auf Lager gehalten werden. Die Schrauben der Größe M8x1 und M10x1 haben dabei die gleiche Innengeometrie. Für eine Entlüftungsschraube werden im Einkauf circa 30 Cent, für eine Druckentlüftungsschraube circa 1 Euro ausgegeben.

Die genutzten Entlüftungsschrauben bringen die bekannten Vor- und Nachteile mit sich. Das am häufigsten auftretende Problem mit Entlüftungsschrauben bei NORD sind Leckagen über ihre Öffnung. Für ihr Auftreten gibt es mehrere Ursachen, die entweder einzeln oder auch in Kombination auftreten können. Fehlerhafter Einbau oder Produktionsfehler werden hier als Ursache nicht betrachtet.

Das Öl kann als **Flüssigkeit** (Abbildung 4.1, links) austreten, indem es von den schnell drehenden Zahnrädern gegen die Entlüftungsöffnung geschleudert wird (siehe Abbildung 2.7) und durch den sich aufbauenden Innendruck und den auftretenden Kapillareffekt durch die Öffnung nach außen gedrückt wird. Diese Art der Leckage hat erfahrungsgemäß den volumenmäßig größten Anteil an austretendem Öl. Sie ist unabhängig von der aktuellen Getriebeinnentemperatur, kommt jedoch besonders häufig während des Anlaufprozesses des Getriebes zum Tragen, wenn die Viskosität des Öls hoch ist und dieses nur schwer ablaufen kann. Druckentlüftungen sind nicht betroffen.

Weiterhin kann das Öl als **Schaum** (Abbildung 4.1, mitte) austreten. Schaum entsteht im Getriebe durch das Einschlagen von Luft im Betrieb. Diese Neigung wird durch Verschmutzungen im Öl verstärkt. Ölschaum kann als Oberflächenschaum bei großem Luftvolumen und kleinem Ölvolumen oder als Kugelschaum, das heißt Bläschen im Öl, bei kleinem Luftvolumen und großem Ölvolumen auftreten. Besonders günstig verhalten sich Mineralöle, diese neigen jedoch zu Ölnebelbildung [NW03]. Der Ölschaum, der sich auf der Oberfläche des Getriebeöls bildet, wächst über den Luftraum hinaus bis an die Entlüftung heran. Der Schaum wird ebenfalls durch den Innendruck und Kapillareffekt

aus der Öffnung nach außen gedrückt. Diese Leckagemöglichkeit wird durch entsprechende Additive im Öl weitestgehend reduziert. Trotzdem kann es vorkommen, dass es vereinzelt zu erhöhter Schaumbildung und einer damit verbundenen Leckage kommen.

Schließlich kann das Öl als **Nebel** (Abbildung 4.1, rechts) austreten. Nebel ist fachlich gesehen ein Aerosol. Ein Aerosol ist ein Gemisch aus hier flüssigen Schwebeteilchen in einem Gas. Eine Größenbegrenzung der Teilchen besteht nur durch die Tatsache, dass sie durch die Dichte des Umgebungsmediums in der Schwebelage gehalten werden müssen [MSW69, S.63]. Der Nebel steigt zur Entlüftungsöffnung auf und verlässt zusammen mit der austretenden Luft das Getriebeinnere. Voraussetzung für Ölnebelbildung ist eine durch Ansteigen der Temperatur verminderte Ölviskosität. Ein Austreten von derartigem Ölnebel lässt sich lediglich durch die Auswahl einer geeigneten Ölsorte, gegebenenfalls mit bestimmten Additiven versetzt, oder mittels Einsatz von Entlüftungsschrauben mit integriertem Filter verhindern.

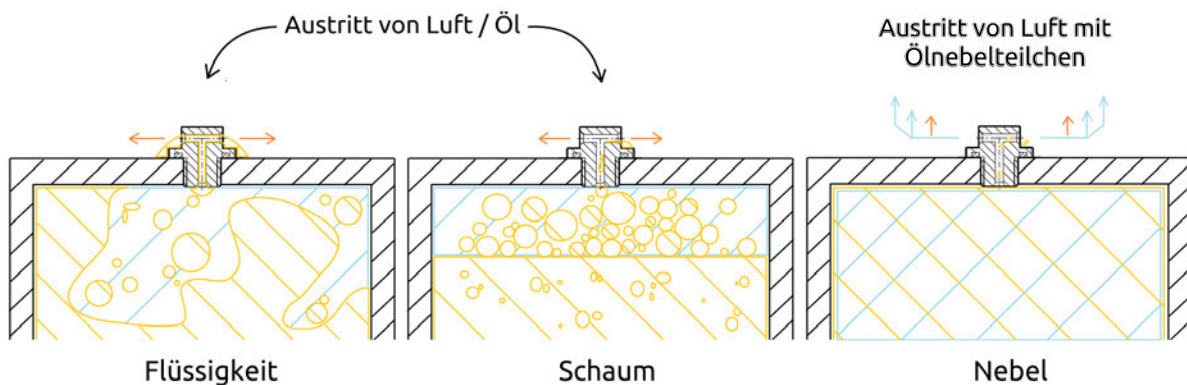


Abbildung 4.1: Ölaustritt an den Entlüftungsöffnungen

Leckagen über die Entlüftungsöffnung machen nur einen geringen Anteil der Reklamationen aus, die im System von NORD erfasst sind.⁴ Konkret sind zum Beispiel 2020 nur 28 Getriebe reklamiert worden, bei denen kein Fertigungs- oder Montagefehler vorlag. Die Dunkelziffer liegt jedoch bedeutend höher. Dies hängt einerseits damit zusammen, dass eine Leckage bei vielen Anwendungen nicht auffällt. Beispiele sind Outdoor Anwendungen oder Off Shore Projekte. Andererseits werden viele Leckageprobleme, die eine große Reklamation auslösen könnten, behoben, bevor es dazu kommt. Entweder bereits bei Versuchen während der Montage oder bei der Inbetriebnahme beim Kunden. Diese Leckagen können sehr gering ausfallen oder, zum Beispiel bei horizontalen Entlüftungsschrauben,

⁴Am häufigsten werden Leckagen über die Wellendichtringe reklamiert. Auch möglich sind Leckagen an den Dichtflächen zwischen Getriebe und Motor oder vorhandenen Flanschen.

für drastische Ölverluste verantwortlich sein. Langfristig stellen jedoch selbst die kleinen Leckagen mit Hinblick auf die Umgebung, in der sich die Getriebe befinden, ein Problem dar.

Als einfache Sofortmaßnahme sind bei NORD bisher Entlüftungsschrauben gegen Druckentlüftungen getauscht worden, um mindestens die Leckage von flüssigem Öl zu verhindern. Allerdings wurden damit auch teurere Druckentlüftungen in Situationen eingebaut, in denen sie eigentlich nicht benötigt wurden. Fernerhin werden so die Nachteile der Entlüftungsschrauben gegen die der Druckentlüftungen eingetauscht.

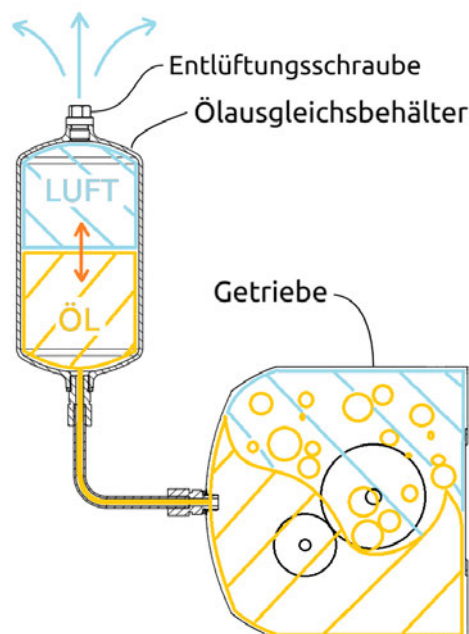


Abbildung 4.2: Ölausgleichsbehälter

Als Ergänzung können sogenannte Ölausgleichsbehälter genutzt werden. Sie werden eingesetzt, wenn ein einwandfreier Druckausgleich bei horizontal liegenden Entlüftungsöffnungen oder betriebsbedingt veränderlichen Einbaulagen des Getriebes garantiert werden muss. Die Entlüftungsschraube wird von ihrem eigentlichen Befestigungspunkt am Getriebegehäuse an die Spitze des Ölausgleichsbehälters verlagert. Im Behälter herrscht im Gegensatz zum Getriebeinnenraum im Betrieb eine beruhigte Zone, da das Öl dort nicht von Zahnrädern aufgeschlagen wird. Bei Druckänderungen im Getriebeinnenraum verändert sich der Ölspiegel im Ausgleichsbehälter. Bei korrekt dimensioniertem Behälter hält der Ölspiegel immer einen Mindestabstand zur Entlüftungsöffnung, sodass eine leckagefreie Ent- und Belüftung ermöglicht wird. In Abbildung 4.2 ist eine schematische Darstellung der Vorgänge zu sehen. Da besonders der zusätzlich benötigte Platz für einen Ölausgleichs-

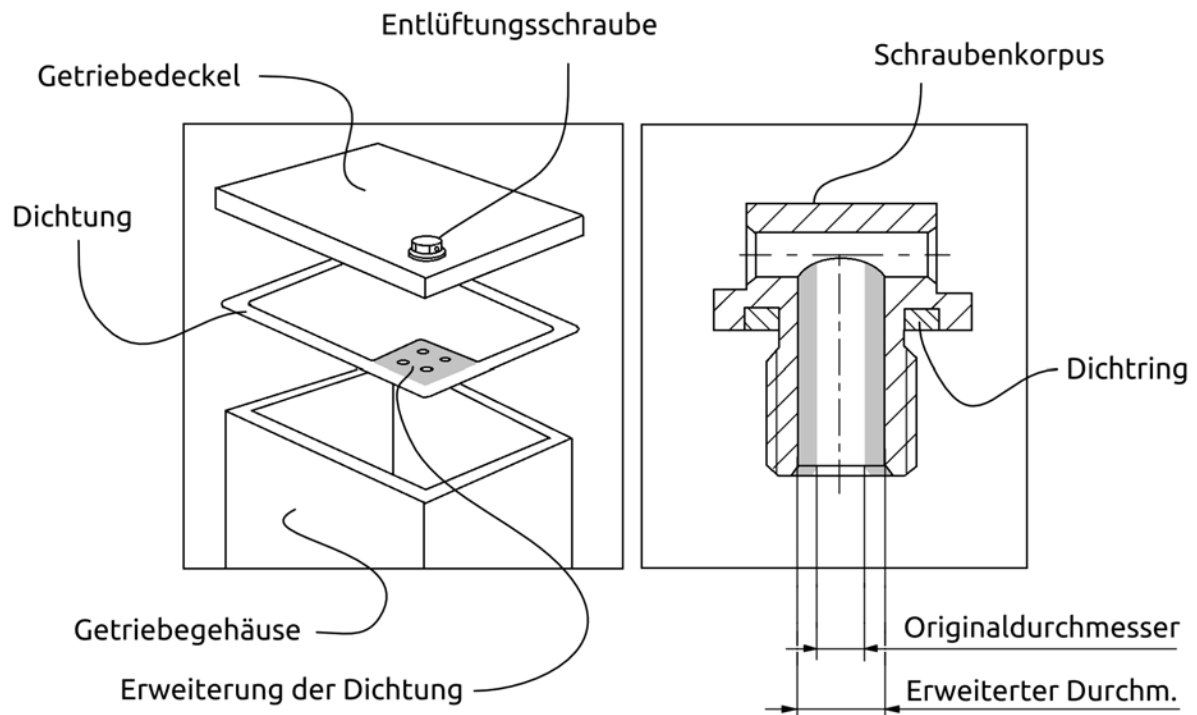


Abbildung 4.4: Lösungsideen zur Leckagevermeidung an Entlüftungsöffnungen - NORD bis 2020

Bei weiteren Versuchen sind unter anderem aufgebohrte Schrauben und erweiterte Dichtungen getestet worden. Die erweiterten Dichtungen, in Abbildung 4.4 links dargestellt, verhindern, dass Spritzöl die Entlüftungsschraube erreicht und so der Austritt von Öl verringert wird. Die vergrößerten Steigbohrungen, in Abbildung 4.4 rechts dargestellt, verhindern keine Belastung durch Spritzöl, vermindern jedoch den Effekt der Kapillarwirkung und senken das Risiko, dass die Steigbohrung verstopft. Obwohl diese Versuche erhebliche Erfolge gebracht haben, sind sie aus unterschiedlichen Gründen nicht weitergeführt worden. Unter anderem ausschlaggebend waren mangelnde Zeit für weitere Versuche und Kostengründe.

Da die hier aufgezeigten Lösungsansätze nicht in das Produktportfolio von NORD eingebunden worden sind, bleiben die Leckagen über die Entlüftungsöffnung bestehen. Aus diesem Grund folgt der zweite Teil dieser Arbeit, der sich mit der Entwicklung eines optimierten Druckausgleichsystems beschäftigt.

5 Anforderungen

Um ein optimiertes Druckausgleichssystem entwickeln zu können, müssen zuerst die Anforderungen festgelegt werden, die ein solches System erfüllen soll. Dazu zählen allgemeine Anforderungen sowie Anforderungen, die aus Normen und Richtlinien entstehen, und schließlich individuelle Anforderungen von NORD. Die Anforderungen sollen dabei möglichst lösungsneutral formuliert werden, um zu frühe Einschränkungen im Entwicklungsprozess zu verhindern.

5.1 Normen und Richtlinien

Für etwas so Spezielles wie ein Druckausgleichssystem für Getriebe, das in den unterschiedlichsten Varianten vorliegen kann, gibt es keine konkreten Normen oder Richtlinien, die sich ausdrücklich damit beschäftigen. Trotzdem gibt es einige Richtlinien die generell beachtet werden müssen und einige Normen, die je nach Aufbau des Druckausgleichsystems von Bedeutung sein können. Nach Möglichkeit sollten deutsche (Deutsches Institut für Normung (DIN)), europäische (Europäische Norm (EN)) und internationale (International Organization for Standardization (ISO)) Standards gleichwertig eingehalten werden.

Prinzipiell kann als Arbeitsgrundlage das Handbuch des Verein Deutscher Ingenieure (VDI) genutzt werden. Dabei handelt es sich um eine weitreichende Sammlung an Richtlinien für Ingenieure, die sich mit allen Themen eines Entwicklungsprozesses beschäftigt. Beginnend von Konstruktion und Planung bis hin zu Hinweisen für konkrete Konstruktionswerkstoffe können diverse Richtlinien genutzt werden. Die Richtlinien VDI 2221 / 2222 / 2223 beispielsweise bieten einen standardisierten Ablauf für jeden Entwicklungsprozess und wurden zu Beginn dieser Arbeit im Verlauf der Einleitung bereits erwähnt, siehe auch Abbildung 1.2. Wird ein Teil des VDI-Handbuches genutzt, wird sein Abschnittscode genannt und sein Inhalt kurz erläutert. Eine vollständige Auflistung aller Teile des Handbuches findet sich im Online-Katalog des VDI.

Insgesamt liegen für Getriebe im allgemeinen über 2000 verschiedene DIN Normen vor, von denen die meisten jedoch in diesem Fall nicht relevant sind. Sofern das Druckausgleichssystem das Konzept einer Entlüftungsschraube aufgreift, wäre es von Vorteil, wenn es allgemein kompatibel ist. Als Vorlage für die Außenmaße ist daher die DIN 910 zu nutzen, die auch zum aktuellen Zeitpunkt Grundlage aller Verschlusschrauben bei NORD ist. Welche weiteren Normen beachtet werden müssen, kann genau wie bei den Richtlinien des VDI, erst zu einem späteren Zeitpunkt auf Basis des Druckausgleichsystemkonzeptes entschieden werden.

Analog zur Außen geometrie für eine Schraube sind bei einem außen liegenden System die sogenannten „Atmosphère Explosible (ATEX) - Richtlinien“⁵ zu beachten, da viele der Antriebe, die von NORD verkauft werden, diese Richtlinien erfüllen müssen. Die Richtlinien sind in der DIN EN ISO 80079-36 und -37 als internationale Norm niedergelegt. Die zum momentanen Zeitpunkt genutzten Druckentlüftungen erfüllen diese Anforderungen. Für weitere Details ist die Norm heranzuziehen.

5.2 Anforderungsliste

Um die allgemeinen und spezifischen Anforderungen zusammenzufassen, die über die einzuhaltenden Normen hinausgehen, ist das Schreiben einer Anforderungsliste zu empfehlen. Bei einer Anforderungsliste steht üblicherweise ein Produkt im Vordergrund, über das grundlegende Informationen bereits bekannt sind. Ein Beispiel für eine klassische Anforderungsliste kann in *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte* [PL11] eingesehen werden. Dort wird ein Handstaubsauger betrachtet. Da zu diesem Zeitpunkt jedoch noch unklar ist, wie genau das optimierte Druckausgleichssystem aussehen wird, ist es nicht möglich eine Anforderungsliste dieser Art zu formulieren. Trotzdem bestehen Anforderungen an das Druckausgleichssystem. Je nachdem ob eine Öffnung des Getriebes nach außen vorgesehen ist, ergeben sich wiederum weitere Anforderungen. In der eingefügten Tabelle 2 ist eine Liste aller Anforderungen zu sehen. Diese haben eine fortlaufende Nummer und eine Bezeichnung. Weiterhin sind die Anforderungen einem Typ zugeordnet. Der Typ 'Wunsch' kennzeichnet dabei alle Anforderungen, die nicht zwingend erfüllt werden müssen, um eine einwandfreie Funktion von Druckausgleichssystem und Getriebe zu gewährleisten. Die Wünsche sollten für eine optimale Lösung trotzdem weitestgehend erfüllt werden. Im Anschluss an die Übersicht folgt eine genaue Erklärung der einzelnen Anforderungen.

⁵Die ATEX-Richtlinien sind ein europäisches Regelwerk zum Explosionsschutz und sind verpflichtend für Produkte, die in explosionsgefährdeten Umgebungen genutzt werden.

Tabelle 2: Liste der Anforderungen

Nr.	Typ	Anforderung
1	Forderung	Universalität
2	Wunsch	Kosten
3	Forderung	Haltbarkeit
4	Wunsch	Montagefreundlichkeit
5	Wunsch	Wartungsfreundlichkeit
6	Wunsch	Geometrie
7	Forderung	Transportsicherung
8	Forderung	Verhinderung von Ölaustritt
9	Forderung	Verhinderung von Wasser-/Schmutzeintritt

1. Anforderung Universalität

Ein Getriebe kann in vielen verschiedenen Varianten auftreten. Das Gehäuse kann eine nahezu beliebige Form haben, das Innenleben ändert sich mit jeder möglichen Übersetzung und seine Einbaulage kann neben den standardisierten Lagen zusätzlich frei im kartesischen Raum variieren (siehe Abbildung 2.2). Zudem ist von vielen verschiedenen Betriebssituationen auszugehen. Wichtig für ein Druckausgleichselement ist, dass es möglichst universell seine Funktion anforderungskonform erfüllt. Zusätzlich ergibt sich für etablierte Unternehmen wie NORD die Anforderung, dass ein Druckausgleichselement gleichermaßen für bereits bestehende Produkte als auch für Neuentwicklungen funktionieren muss.

2. Anforderung Kosten

Der Druckausgleich ist zwar notwendig aber keine gewünschte Funktion des Getriebes. Er muss daher im Vergleich zu den anderen Getriebekomponenten günstig zu realisieren sein. Spezifisch auf NORD bezogen ist eine Lösung vorzuziehen, die den Preis einer Druckentlüftungsschraube für ein Getriebe nicht übersteigt. Wäre eine Lösung teurer, könnte sie bei hervorragender Leistung dennoch verwendet werden, würde jedoch voraussichtlich nicht zum Standard werden.

3. Anforderung Haltbarkeit

In einem Getriebe liegen häufig erhöhte Anforderungen an darin verbaute Werkstoffe vor, da die Temperaturen im Betrieb ansteigen oder durch Additive im Öl eine für Kunststoff oder nicht-eisen Metalle korrosive Umgebung entstehen kann. Diese Umgebung darf keinen negativen Einfluss auf die Lebensdauer des Druckausgleichselements haben. Erhöhte Haltbarkeit in Notsituation, die nicht der durchschnittlichen Betriebssituation entsprechen, sind wünschenswert.

4. Anforderung Montagefreundlichkeit

Die Montagefreundlichkeit ist eine elementare Anforderung, da ein Druckausgleichselement in jedem Getriebe verbaut wird. Eine erhöhte Montagezeit hat somit einen erhöhten Einfluss auf die Gesamtmontagezeit eines Auftrages mit mehreren Getrieben. Dabei ist nicht nur die Erstmontage zu bedenken, sondern auch die Montage/Demontage Vorgänge bei einer möglichen Wartung oder Reparatur.

5. Anforderung Wartungsfreundlichkeit

Bei einem Getriebe wird das Wartungsintervall maßgeblich von den Lagerlebensdauern und den Ölwechselintervallen definiert. Das festgelegte Wartungsintervall sollte aufgrund des Druckausgleichs nicht verkürzt werden müssen. Nach Möglichkeit ist keine Wartung nötig oder sie kann zusammen mit einer Standardwartung durchgeführt werden, was die Forderung nach einer möglichst langen Nutzungsdauer nach sich zieht. Falls eine eigene Wartung des Druckausgleichselements nötig ist, sollte diese möglichst einfach und ohne Demontage des kompletten Getriebemotors möglich sein. Daraus ergibt sich die Forderung nach einer guten Zugänglichkeit und Austauschbarkeit der Verschleißteile.

6. Anforderung Geometrie

Je nach Einbauort des Getriebemotors ist es möglich, dass nur begrenzter Platz zur Verfügung steht. In diesem Fall muss beachtet werden, dass der Druckausgleich nicht außerordentlich über die Außenmaße des Getriebegehäuses hinaus steht. Da häufig unbekannt ist, wo ein Getriebe nach dem Verkauf eingebaut wird, sollte in diesem Sinne ein kleineres Druckausgleichselement vorgezogen werden. Gleichmaßen ist auch der Platz im Innenraum des Getriebes durch die sich dort befindenden Maschinenelemente begrenzt.

7. Anforderung Transportsicherung

Bevor ein Antrieb in Betrieb genommen wird, erfolgt der Transport vom Montagewerk zum Kunden. Der Transport kann über Straße, Schiene oder als See- oder Luftfracht erfolgen. Die Antriebe werden dabei nicht unbedingt in ihrer endgültigen Einbaulage transportiert und sind außerdem ständiger Bewegung ausgesetzt. Während des Transports muss das Getriebe daher vollständig dicht sein, um ein Auslaufen von Öl zu verhindern. Ist beispielsweise eine dauerhaft offene Entlüftungsschraube zum Druckausgleich montiert, muss diese für den Transport abgedichtet werden. Sie darf erst nach Aufbau beim Kunden aktiviert werden. Momentan nutzt NORD Gummidochte, die zum Transport durch die Entlüftungsöffnung gezogen werden. Vor Betriebsbeginn werden sie wieder herausgezogen. Es gilt allgemein: Ein Druckaus-

gleichsystem mit Öffnung zur Umgebung muss entweder automatisch oder manuell aktiviert werden können.

8. Verhinderung von Austritt von Öl

Falls das Druckausgleichselement eine Öffnung des Getriebes in die Umgebung vor-
sieht, muss garantiert werden, dass durch diese Öffnung kein Getriebeöl austritt.

9. Verhinderung von Eintritt von Wasser und Schmutz

Ebenso muss verhindert werden, dass Schmutz oder Wasser aus der Umgebung in
den Innenraum des Getriebes eintritt.

Die Entlüftungsschrauben, die zur Zeit bei NORD verwendet werden, erfüllen alle Anfor-
derungen außer den Anforderungen 8 und 9. Mit diesen ausformulierten Anforderungen
als Grundlage kann mit der Konzipierungsphase begonnen werden.

6 Konzeptentwicklung

In diesem Kapitel sollen Konzepte für ein verbessertes Druckausgleichsystem für NORD ausgearbeitet werden. Grundlage sind die im vorangegangenen Kapitel aufgestellten Anforderungen.

6.1 Funktionsstruktur

Vor Beginn der ausführlichen Konzeptentwicklung ist es sinnvoll eine Funktionsstruktur aufzustellen. Eine Funktionsstruktur dient dazu, die Komplexität einer Entwicklungsaufgabe zu senken, indem die gewünschte Funktion des Produktes in Teilfunktionen unterteilt wird. Sie orientiert sich dabei an der Anforderungsliste. Beim Aufstellen einer Funktionsstruktur ist es von entscheidender Bedeutung den Abstraktionsgrad der formulierten Funktionen zu beachten. Bei einer zu genauen Formulierung verliert die Funktionsstruktur ihren lösungsneutralen Charakter [BG21]. Eine zu abstrakte Formulierung kann dazu führen, dass das ursprüngliche Ziel des Entwicklungsprozesses verfehlt wird. Eine Funktion setzt sich immer aus zwei Zuständen und einer Operation zusammen, die den Ausgangszustand und den Zielzustand miteinander verbindet [PL11]. Wird die in Abbildung 6.1 dargestellte

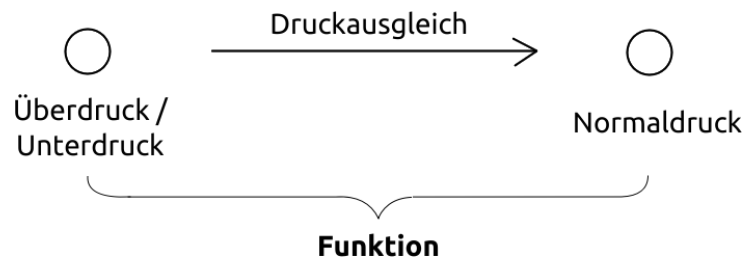


Abbildung 6.1: Aufbau einer Funktion - Druckausgleich

Funktion *Druckausgleich* betrachtet, zeigt sich, dass eine Unterteilung in Teilfunktionen nur bedingt möglich ist. Grund dafür ist der gewählte Abstraktionsgrad. Eine Unterteilung in Teilfunktionen wie *Ölaustritt verhindern*, *Abdichten*, *Luftvolumen abführen* oder *Verschmutzung durch Fremdstoffe verhindern* setzen voraus, dass es sich beim Druckausgleichselement um eine Entlüftungsschraube handelt. Für beispielsweise einen Faltenbalg ist keine dieser Funktionen relevant oder erfüllt und eine Membran erfüllt alle Funktionen gleichermaßen, ohne dass eine Unterteilung notwendig ist.

6.2 Konzipierung

Um trotzdem ein System in den Überfluss der Möglichkeiten zu bringen und einen Ansatz zu finden, sollen die drei bereits bekannten Ansätze Entlüftungsschraube, Membran

und Balg jeweils eine Konzeptrichtung bilden. Der Ansatz eines Luftbalges wird aufgrund seiner mangelnden Universalität nicht weitergeführt. Es bleiben die Ansätze der Entlüftungsschraube und der Membran. Ein unabhängiges Konzept ist ebenso möglich. Mithilfe der getroffenen Vorauswahl wird die Suche nach einem guten Konzept bereits etwas eingeschränkt und damit vereinfacht. Trotzdem bleibt die Vielfalt der Möglichkeiten groß, weshalb auch weiterhin ein systematisches Vorgehen angebracht ist. In der folgenden Konzeptphase sollen alle aussichtsreichen Ideen für Konzepte zum Druckausgleich gesammelt werden. Der Kreativprozess soll dabei dem Grundgerüst der Vorauswahl folgen. Um einen Einstieg zu finden, wird das Vorgehen der *Systematischen Variation* [BG21] auf das bekannte Konzept Entlüftungsschraube angewandt. Dabei wird ein etabliertes Konzept in kleinen Schritten verändert, wobei die Veränderungsschritte jeweils das vorangegangene Konzept verbessern sollen. Abschließend kann zur Prozessevaluation das finale Konzept mit dem Ausgangskonzept verglichen werden.

6.2.1 Erweiterung der Entlüftungsschraube

Sowohl die bereits bekannten Versuche von NORD (siehe Abbildung 4.4) als auch Versuche der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) [Zel95] haben aufgezeigt, dass kleinere Veränderungen an den Entlüftungsschrauben in Kombination mit ölabweisenden Konturen Leckagen weitestgehend verhindern können. Die am häufigsten zu sehende Anpassung, die auch von NORD getestet wurde (siehe Abbildung 4.4), ist die Erweiterung der aufsteigenden Bohrung. Als zusätzliche Erweiterung könnte die Steigbohrung am unteren Ende verlängert und mit horizontalen Bohrungen versehen werden. Über diese könnte anhaftendes Öl seitlich innerhalb des Getriebes abfließen bevor es die Umgebung erreicht. Ähnliche Konzepte sind bereits in *Entlüfter - Entlüftung von Getrieben* [Zel95] und als angemeldete Patente zu finden.

In Abbildung 6.2 ist eine Skizze mit den Maßen für eine Entlüftungsschraube M10 gezeigt. Die zusätzlichen Erweiterungen sind mit den Nummerierungen 1a und 1b gekennzeichnet.

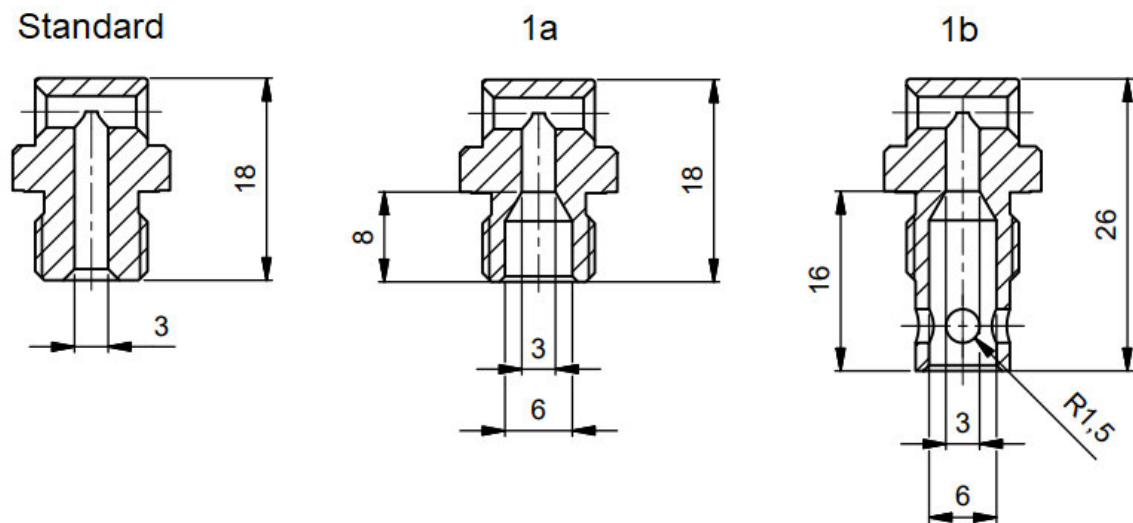


Abbildung 6.2: Erweiterte Entlüftungsschrauben Konzept

Nachteil dieser Konzepte ist die Tatsache, dass zwar flüssiges Öl am Austritt gehindert werden kann, Ölnebel aber nicht. Außerdem kann die Verlängerung der Entlüftungsschraube in das Innere des Getriebes, wie sie in 1b gezeigt ist, potenziell zu Kollisionen im engen Innenraum führen. Weiterhin ist es unklar, ob die Vorteile gegenüber einer Standardentlüftungsschraube auch in horizontalen Einbaulagen vorhanden sind.

Im nächsten Schritt muss also eine Veränderung der Entlüftungsschraube folgen, die diese Anforderungen zusätzlich erfüllen kann. Um das Problem der horizontalen Einbaulage zu lösen, bietet sich die Idee einer Labyrinthdichtung an, die im Getriebebau als berührungslose Wellendichtung bekannt ist. Eine Labyrinthdichtung als Strömungsdichtung schaltet mehrere Drosselstellen hintereinander, um so den Ölfluss vollständig zu stoppen [Wit+19, Kapitel 19]. Je nach Bedarf können Labyrinth so eng und verschachtelt ausgelegt werden, dass selbst hohe Getriebeinnendrucke nicht ausreichen, um Öl austreten zu lassen. Auch Ölnebel könnte durch den Lauf durch die Labyrinthgänge aufgefangen werden.

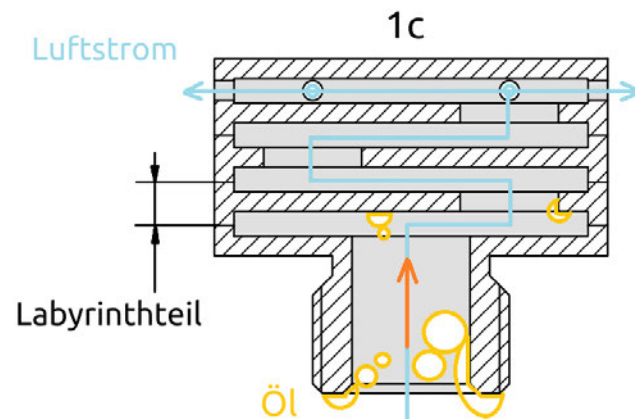


Abbildung 6.3: Entlüftungsschrauben mit Labyrinth

In Abbildung 6.3 ist eine Idee gezeigt, wie eine Entlüftungsschraube mit Labyrinth aussehen könnte. Eine Funktion des Labyrinthes als Strömungsdichtung bietet das Konzept nur teilweise, das allgemeine Konzept 'Labyrinth' kann so jedoch gut umgesetzt werden. Das Labyrinth könnte durch gleichen Teilen aufgebaut werden, die jeweils einen Durchgang haben und so verdreht zueinander liegen, dass die Durchgänge versetzt sind. Eintretendes Öl würde sich so zuerst in der ersten Ebene sammeln, bevor überhaupt die Möglichkeit besteht, dass es in die zweite Ebene vordringt. Der außen liegende Teil der Schraube wäre voraussichtlich größer als bei einer einfachen Entlüftungsschraube, jedoch immer noch klein genug, um auch in engen Einbauräumen genutzt werden zu können. Eine Fertigung ist aus Kunststoff oder Metall denkbar. Nachteil ist das Nichtvorhandensein einer Transportsicherung. Weiterhin ist im Vergleich zur Standardentlüftungsschraube kein verbesserter Schutz gegen das Eindringen von Schmutz und Wasser geboten.

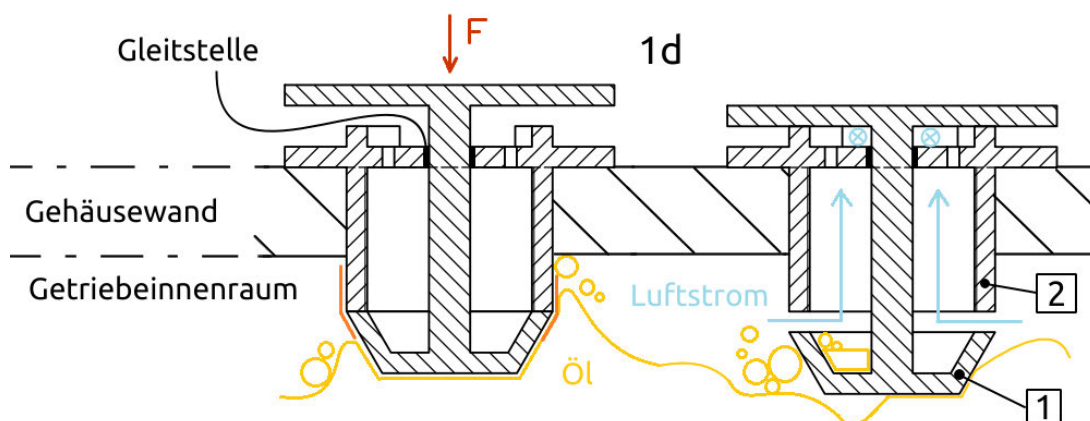


Abbildung 6.4: Entlüftungsschraube mit Auffangschale

In Abbildung 6.4 ist eine Idee für ein zweiteiliges System gezeigt, das eine gute Transport-

sicherung bieten würde. Die zwei Teile sollen dabei so miteinander verbunden sein, dass sie unter Krafteinwirkung ineinander verschiebbar sind. Die Gleitstelle ist mit verstärkten Linien gekennzeichnet. Für den Transport ist Teil 1 nach oben geschoben (Abbildung 6.4 links), sodass keine Öffnung innerhalb des Getriebes besteht. Soll die Entlüftung geöffnet werden, wird Teil 1 durch einen Schlag, gekennzeichnet als Kraft F , nach unten geschoben. Es entsteht eine Öffnung im Getriebeinnenraum, die durch die Form der Einzelteile in die Umgebung führt. Durch die Form der Auffangschale an Teil 1 liegt die Öffnung, die sich im Inneren des Getriebes befindet, an der Seite. Diese Lage hat den Vorteil, dass Öl nicht direkt in die Öffnung eindringen kann. Sollte Öl in die Öffnung gelangen, sammelt es sich in der Auffangschale.

6.2.2 Alternativen zur Druckentlüftung

Trotz aller Vorteile besitzen alle bisher entwickelten Konzepte eine Öffnung nach Außen und im Gegensatz zur bekannten Druckentlüftungsschraube auch keinen umfassenden Schutz gegen Wasser und Schmutz von Außen. Es wäre also vorteilhaft ein Konzept aufzustellen, das die Verschlussfunktion einer Druckentlüftungsschraube besitzt, jedoch mit weniger Einzelteilen und so mit geringerem Fertigungsaufwand herstellbar ist als eine Kugel-Feder-Lösung. Ein mögliches Konzept ist im physischen Einzelteilrepertoire von NORD zu finden. Eine Skizze ist in Abbildung 6.5 zu sehen.

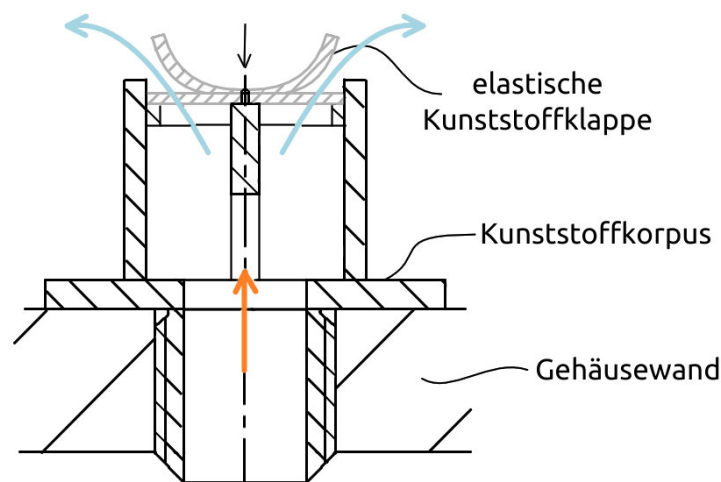


Abbildung 6.5: Druckentlüftung mit Kunststoffklappe

Bei diesem Konzept wird der Feder-Kugel-Mechanismus durch eine elastische Kunststoffklappe ersetzt. Diese biegt sich bei Druck hoch und ermöglicht so eine Entlüftung. Normalisiert sich der Druck, kehrt die Klappe in ihre Ausgangslage zurück. Die Mitte der Klappe wird dabei von einem in der Skizze als schwarzer Pfeil angedeutetem Deckel heruntergedrückt. Dieser fungiert gleichzeitig als Schutz vor äußeren Einflüssen. Das System besteht

mit nur drei Hauptbauteilen aus bedeutend weniger Teilen als eine Druckentlüftung. Die genutzten Teile sind außerdem aus Kunststoff, weshalb sowohl Anschaffung als auch Fertigung der Schraube günstiger sind, als die einer Druckentlüftungsschraube mit Kugel-Feder-Lösung. Aufgrund des Materials können die Schrauben jedoch gleichzeitig nicht für Anwendungen mit sehr hohen Anforderungen an Sicherheit und Verschleißschutz genutzt werden. Weiterhin ist ein Druckausgleich, genau wie bei Druckentlüftungsschrauben mit einer Kugel-Feder-Lösung, nur in eine Richtung möglich.

Ein praktikables Konzept müsste also wenigstens in der Außenhülle aus Metall bestehen, einen Druckausgleich in beide Richtungen bieten und gleichzeitig im Inneren eine Alternative zum Feder-Kugel-Mechanismus enthalten.

Der Kunststoff Polyurethan (PUR) wird vielfältig eingesetzt. Er findet Verwendung als Schaumstoff in Matratzen oder Schuhsohlen, als Beschichtung für Bauteile oder als Gussform in Gießereibetrieben. Er besitzt diverse positive Eigenschaften. Als Schaum ist er in verschiedenen Dichten ($\approx 0.05 \frac{g}{cm^3}$ [Gom+14, S.186]) und Härten verfügbar. Aufgrund seiner Elastizität kann er ähnlich wie die Kunststoffklappe im oberen Beispiel als Druckelement genutzt werden. Ein solches Schaumelement aus Polyurethan könnte in den oberen Teil der Entlüftungsschraube integriert werden. Der entstehende Druck im Getriebe wird das PUR-Schaumelement zusammendrücken, sodass das überschüssige Luftvolumen an den Seiten des Elements über kleine Entlüftungsbohrungen entweichen kann. Voraussetzung für die Funktion wäre die Verwendung eines geschlossenporigen Schaumstoffes. Über Auswahl der Schaumhärte ließe sich der Öffnungsdruck einstellen. Fertigung und Montage sind mit geringem Aufwand durchführbar. Polyurethanschaum ist weit verbreitet, kostengünstig und aufgrund seiner Elastizität ohne die Nutzung mehrerer Schraubenteile montierbar. Eine potenzielle Schwierigkeit wäre die Haltbarkeit von Polyurethan als Kunststoff unter dauerhafter Belastung mit Getriebeöl, wobei Polyurethan grundsätzlich zumindest im Bereich synthetischer Schmierstoffe als unkritisch angesehen wird [Sch80, S.42]. In Abbildung 6.6 ist eine Skizze der Idee zu sehen.

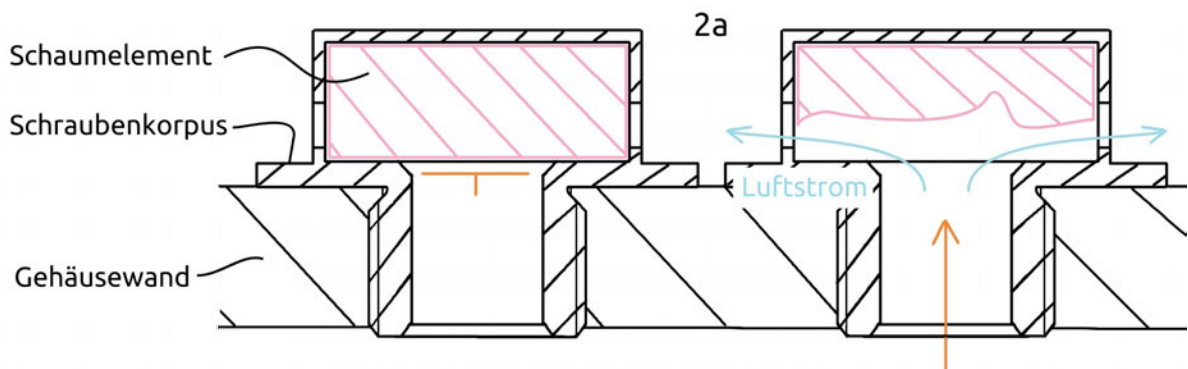


Abbildung 6.6: Druckentlüftung mit Polyurethanschaumelement

Ein weiterer Nachteil ergibt sich dadurch, dass weiterhin nur ein Druckausgleich in eine Richtung möglich ist. Um dieses Problem zu lösen, könnte statt eines geschlossenenporigen ein offenporiger Schaumstoff verwendet werden. Dadurch würde das Druckausgleichselement in ein Filterelement gewandelt. Während mit einem Filter alle Forderungen hinsichtlich Leakagevermeidung erfüllt werden können, ergibt sich der bekannte Nachteil des Zusetzens des Filters mit Öl, was langfristig die Funktion des Filters beeinträchtigen wird. Es steht zur Frage, wie hoch die Wartungsfrequenz wäre und ob eine solche Filterschraube ausreichend kostengünstig hergestellt werden könnte, um einen regelmäßigen Austausch wirtschaftlich zu ermöglichen.

Aufgrund der Schwachpunkte der Filterlösung sollte im nächsten Schritt eine Variation gesucht werden, die einen Druckausgleich in beide Richtungen ermöglicht, aber mit weniger Nachteilen und Unsicherheiten belegt ist. Um eine solches Konzept zu finden, wird eine andere bereits bekannte Lösung aufgegriffen.

6.2.3 Praktikable Membranlösung

Entlüftungsschrauben mit Membranen sind im freien Handel verfügbar. Ein Beispiel wurde am Anfang dieser Arbeit im Kapitel *Situationsanalyse* bereits vorgestellt. Trotzdem werden diese von NORD nicht eingesetzt. Hintergrund sind negative Versuchsergebnisse mit Membranentlüftungsschrauben bei NORD. Trotz oleophober Eigenschaften⁶ setzen sich die Membranen bei hoher Ölbelastung nach einiger Zeit zu und büßen ihre Funktion ein. Diese Ergebnisse sind von Erfahrungswerten der Firma GORE bestätigt worden. Der Einsatz von Membranen zur Entlüftung besitzt nichtsdestotrotz sehr hohes Potential, weshalb im folgenden Abschnitt versucht werden soll, eine Lösung für dieses spezifische

⁶Ölabweisende Eigenschaften

Problem zu finden.

Während die Oleophobie der Membranen eine Herausforderung darstellt, gibt es auf der Außenseite der Membran, die mit Wasser belastet ist, keine Schwierigkeiten. Es stellt sich somit die Frage, wo der Unterschied zwischen den hydrophoben und oleophoben Eigenschaften der Membranen liegt und ob dieser Unterschied genutzt werden kann, um ihre Oleophobie zu verbessern.

Der Unterschied zwischen Hydrophobie und Oleophobie liegt in der Oberflächenspannung. Öl gehört mit einer durchschnittlichen Oberflächenspannung von 30 dynes⁷/cm im Gegensatz zu Wasser mit 73 dynes/cm zu den Fluiden mit niedriger Oberflächenspannung. Je höher die Oberflächenspannung eines Fluides ist, desto geringer ist die Auflagefläche eines Tropfens auf einer Oberfläche und desto größer ist der Kontaktwinkel zwischen Oberfläche und Fluid [Gor16]. Der Kontaktwinkel wird zusätzlich von der Oberflächenrauheit beeinflusst. Bei Wasser wird je nach Kontaktwinkel zwischen benetzten, hydrophilen, hydrophoben und superhydrophoben Oberflächen unterschieden [Waw20].

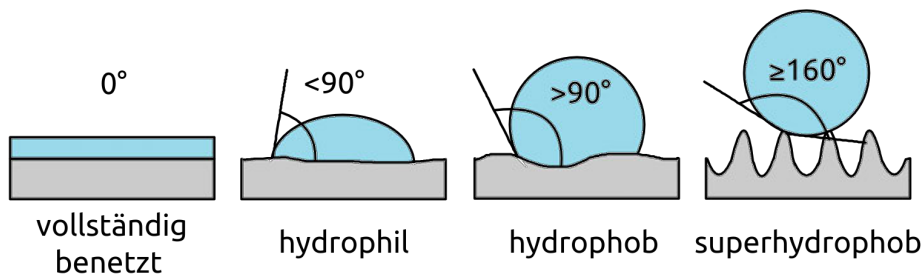


Abbildung 6.7: Kontaktwinkel bei variierender Oberflächenspannung

Um Hydrophobie zu erreichen, muss die Textur einer Membran nach Abbildung 6.7 so verändert werden, dass der Kontaktwinkel von Tropfen und Membran auf über 90° erhöht wird. Je geringer die Oberflächenspannung eines Fluides, desto stärker muss die Oberflächenveränderung ausgeprägt sein, um die gleichen Kontaktwinkel zu erhalten. Eine Superoleophobie⁸ analog zur Superhydrophobie⁹ ist demnach nicht möglich.

Um die Vorteile einer Membran nutzen zu können, müssten demnach zusätzliche Maßnahmen getroffen werden, die entweder verhindern, dass Öl mit der Membran in Kontakt kommt oder verhindern, dass sich Öl an der Membran festsetzt. Eine Kombination einer

⁷'Dyn' ist die Einheit der Kraft im CGS-Einheitensystem. Ein Dyn entspricht 0,00001 Newton. Quelle: Encyclopaedia Britannica - <https://www.britannica.com/science/dyne>

⁸Stark Ölabweisende Eigenschaften

⁹Stark Wasserabweisende Eigenschaften

Membran mit den Konzepten 1c oder 1d (siehe Abbildungen 6.3 / 6.4) könnte zu einem neuen Konzept entwickelt werden, das einen Kontakt zwischen Membran und Öl verhindern kann. Eine solche Konstruktion wäre vermutlich so komplex, dass anfallende Kosten für Fertigung und Montage nicht wirtschaftlich wären. Mit einer einfachen Formänderung der Membran hingegen, könnte auf einfache Weise ermöglicht werden, dass die Membran durch Öl zugesetzt wird.

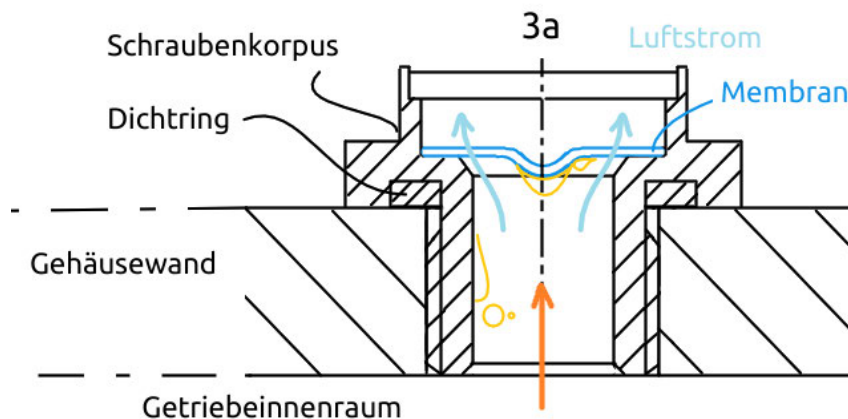


Abbildung 6.8: Membran mit geänderter Form - 1

In Abbildung 6.8 ist eine Entlüftungsschraube mit Membran gezeigt. Im Unterschied zu den bisher gezeigten Lösungen mit Membran, ist die Membran hier nicht völlig glatt, sondern mit einer tropfenförmigen Absenkung in der Mitte dargestellt. Eine solche Vorformung der Membran würde das anhaftende Öl, sobald es eine Maximalviskosität erreicht hat, in die Mitte der Membran zum tiefsten Punkt leiten. Durch die zusätzliche Ölmenge, die so in der Mitte gesammelt wird, kommt es zu erhöhter Tropfenbildung. Ein ausreichend großer Tropfen wird durch seine Gewichtskraft von der Membran gelöst und fällt zurück in den Getriebeinnenraum.

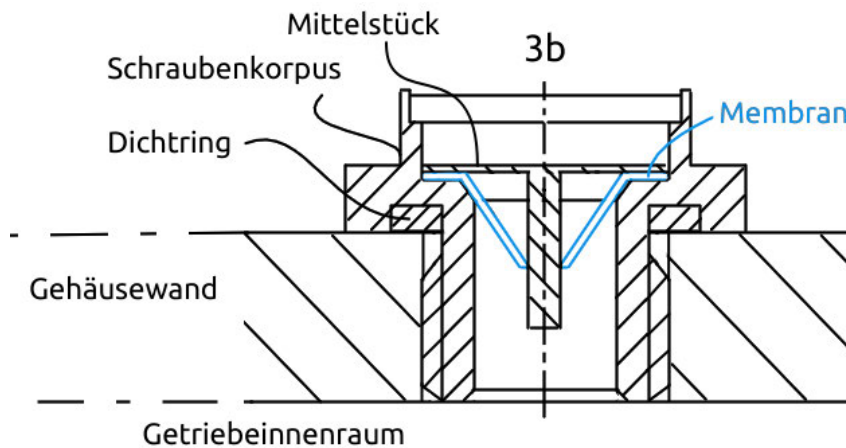


Abbildung 6.9: Membran mit geänderter Form - 2

Alternativ wäre auch eine Lösung mit einer konusförmigen Membran möglich, die auf ein Mittelstück zu läuft. Dieses könnte geklemmt oder durch einen zusätzlichen Deckel festgesetzt werden. Vorteil dieser Lösung wäre, dass die Membran nicht aus sich selbst heraus eine Form halten müsste, da ein Konus durch einen trapezförmigen Zuschnitt der Membran erzeugt werden könnte. Nachteil wäre, dass potenziell ein zusätzliches Bauteil entsteht, das gefertigt und montiert werden muss. Das Funktionsprinzip der Lösungen 3a und 3b ist gleich.

Auch wenn in diesem Abschnitt zusätzlich das Konzept einer Membran mit eingebunden wurde, sind bis zu diesem Punkt der systematischen Weiterentwicklung entsprechend alle Konzepte durch Weiterentwicklung einer Entlüftungs- oder Druckentlüftungsschraube entstanden. Um eine möglichst große Konzeptvielfalt zu erhalten, soll daher im nächsten Schritt auf einem anderem Weg nach Lösungen gesucht werden.

6.2.4 Negativer Wärmeausdehnungskoeffizient

Bei vielen Entwicklungsprozessen werden nach dem Aufstellen der Funktionsstruktur für die einzelnen Funktionen Wirkprinzipien gesucht. Wirkprinzipien beschreiben, mit welchen physikalischen, chemischen oder biologischen Effekten die Operation der Funktion (siehe Abbildung 6.1) durchgeführt werden kann. Sind mehrere mögliche Wirkprinzipien gefunden, kann ein Morphologischer Kasten¹⁰ erstellt werden. Im Fall des Druckausgleichs gibt es nach aktuellem Wissensstand nur ein mögliches Wirkprinzip. Um eine Druckerhöhung bei Temperaturerhöhung zu verhindern, muss das Volumen äquivalent

¹⁰Ein Morphologischer Kasten ist eine diskursive Kreativmethode, die genutzt wird, um Lösungsideen zu ordnen. Dabei werden die Teilprobleme/Teilfunktionen eines Systems in die erste Spalte einer Tabelle und die Lösungsideen in die weiteren Spalten geordnet [Lin09, S. 281].

zur Temperatur erhöht werden. Physikalischer Effekt ist die Wärmeausdehnung, wie sie im Kapitel *Theoretische Grundlagen* ausführlich beschrieben ist. Auch wenn es sich im Fall des Druckausgleichselementes somit nicht um ein typisches Kombinationsproblem [BG21] handelt, kann das Wirkprinzip zur Lösungssuche dennoch genutzt werden. Es kann zwar nicht verändert werden, aber örtlich verlagert. Alle bisher betrachteten Ansätze sehen eine Volumenerweiterung in die Außenwelt vor. Eine Volumenerweiterung, die innerhalb des Getriebes stattfindet, könnte eine optimale Lösung darstellen.

Die meisten aller Materialien haben einen positiven Wärmeausdehnungskoeffizienten. Dieser kann sehr klein sein, ist aber immer größer als Null. Die Beispiele Stahl, Aluminium und Luft sind bereits vorgestellt worden. Es gibt jedoch auch Substanzen, die sich bei Wärme zusammenziehen - also einen negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen. Dazu gehören unter anderem Zirkoniumwolframat¹¹ [Han+04], Scandiumtrifluorid¹² [Li+11], und einige Polymere. Könnte eine ausreichende Menge einer dieser Substanzen in den Innenraum des Getriebes eingebracht werden, könnte die Volumenausdehnung des Getriebeöls und der Luft kompensiert werden. Damit würde sich ein Druckausgleich ohne Öffnung des Getriebes ergeben.

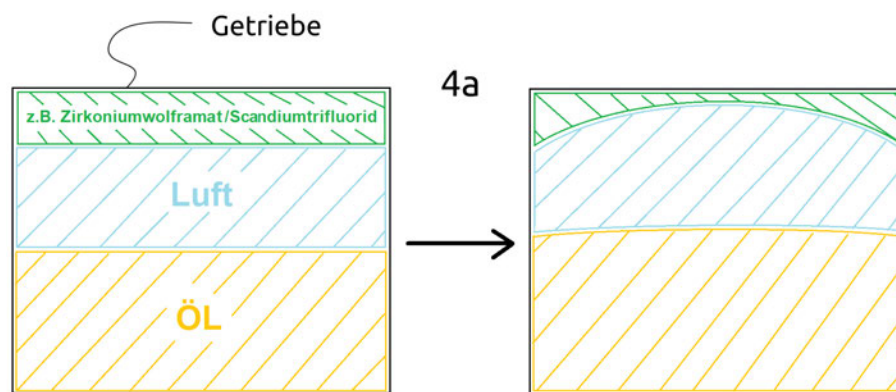


Abbildung 6.10: Prinzip - Substanz mit negativem Wärmeausdehnungskoeffizient

Eine praktische Einbringung ist zum Beispiel denkbar, indem die verrippten Getriebeinnenwände- und deckel ausgegossen würden. Zu beachten ist die Haftung und die Haltbarkeit der gewählten Substanz. Es gelten die bekannten Anforderungen. Eine Schwierigkeit stellt außerdem die konkrete Ausdehnungskurve der verschiedenen Materialien dar. Öl und Luft müssten sich bei einer bestimmten Erwärmung im gleichen Maße ausdehnen, wie sich die andere Substanz zusammenzieht. Ist dies nicht der Fall, würde es zu Über-

¹¹Zirkoniumwolframat ist eine komplexe Legierung aus Zirkonium, Wolfram und Sauerstoff.

¹²Scandiumtrifluorid ist ein einfaches Gitter aus Scandium- und Fluoratomen.

und Unterdrücken im Getriebe kommen. Diese können zwar bis zu einem geringen Maß akzeptabel sein, müssen aber bedacht werden. Ein zusätzliches Problem stellt der hohe Preis und die Verarbeitung von Substanzen mit negativem Wärmeausdehnungskoeffizient dar. Da sie ein aktuelles Forschungsgebiet sind und bisher nur selten Anwendung in der Praxis finden, müsste eine große Menge Pionierarbeit geleistet werden.









6.3 Revision und Auswahl

In den vorangegangenen Abschnitten sind diverse Konzepte für ein Druckausgleichssystem entworfen worden.

Die Gestaltung eines Produktes ist aufgrund der einzuhaltenden Konstruktionsrichtlinien und spezifischen Anforderungen immer ein aufwändiger und langwieriger Prozess [Wit+19]. Im Rahmen dieser Arbeit stehen, genau wie in jedem Industriekonzern, nur begrenzte Kapazitäten für einen vollständigen Konstruktionsprozess zur Verfügung. Aus diesem Grund muss vor Beginn der Gestaltung eine Auswahl der zu gestaltenden Konzepte aus der Gesamtmenge aller Konzepte getroffen werden, wofür dieses Unterkapitel genutzt werden wird. Ausgewählt werden sollen zwei Konzepte. Üblich ist es, sich auf ein einzelnes Konzept zu beschränken. Da hier jedoch mehrere Konzepte ein hohes Potential zeigen und weiterhin der Aufwand für die Gestaltung einer Schraube im Vergleich zu einer vollständigen Maschine verhältnismäßig gering ist, werden zwei statt einem Konzept weitergeführt.

Um einen Überblick zu gewinnen, folgt eine Gegenüberstellung mit den Anforderungen in tabellarischer Form. Die Nummerierung der Konzepte folgt dabei den in den Skizzen (Abbildungen 6.2 - 6.4 und 6.6 - 6.10) gezeigten Daten. Wichtigstes Entscheidungskriterium für die Auswahl von Konzepten zur weiteren Konkretisierung sind die Vorgaben von **NORD**.

Tabelle 3: Vergleich der Konzepte und Anforderungen

Anforderung / Konzept	1a	1b	1c	1d	2a	3a	3b	4a
								
Universalität	+	+	++	+	++	+	+	++
Kosten	++	+	-	-	++	-	-	--
Haltbarkeit	++	++	++	++	+	-	-	?
Montagefreundlichkeit	++	++	++	++	++	++	++	?
Wartungsfreundlichkeit	++	++	++	++	+	-	-	?
Geometrie	++	+	++	+	++	++	++	++
Transportsicherung	+	+	+	++	++	/	/	/
Kein Ölaustritt	--	-	+	+	++	/	/	/
Kein Wasser-/Schmutzeintr.	--	--	+	+	++	/	/	/

Wie bereits im obigen Absatz angedeutet, muss das Konzept 4a, das einzige, das nicht die Geometrie einer Schraube aufgreift, zurückgestellt werden. Eine weiterführende Bearbeitung dieses Konzeptes würde den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit übersteigen.

Konzept 2a dahingegen sollte aufgrund der positiven Bewertung der Tabelle 3 unbedingt weitergeführt werden. Nach Rücksprache mit NORD soll der Ansatz als Druckentlüftungsschraube gewählt werden. Damit ergibt sich zwar der Nachteil, dass nur ein Druckausgleich in eine Richtung möglich ist, dieser ist jedoch als weniger gravierend als die Herausforderungen eines Filters eingestuft worden.

Die Konzepte 1a und 1b zeigen höheres Potential als eine Standardentlüftungsschraube, sind in den entscheidenden Punkten jedoch weiterhin mit den gleichen Nachteilen belegt. Eine Weiterführung als Produktentwicklungsprozess ist für sie nicht gerechtfertigt.

Es bleiben zur Auswahl die Konzepte 1c / 1d und 3a / 3b. Für die Ausarbeitung der Konzepte der Reihe 3 wäre eine Kollaboration mit einem Membranhersteller notwendig, dessen Erfahrung in die Konstruktion mit einbezogen werden muss, um ein gutes Produkt zu erhalten. Da eine solche Zusammenarbeit in der hier zur Verfügung stehenden Zeit nicht möglich ist, müssen die Konzepte der Reihe 3 trotz ihres hohen Potentials genau wie 4a zurückgestellt werden. Zur Auswahl bleiben die Konzepte 1c / 1d. 1d bietet den Vorteil einer integrierten Transportsicherung, kann jedoch nicht horizontal genutzt werden, weshalb hier die Wahl auf 1c fällt. Eine horizontale Nutzbarkeit ist aufgrund der häufigen Leckagefälle in horizontaler Einbaulage von NORD als wichtiger anzusehen. Als Risiko ist von NORD die hohe Teileanzahl und damit steigenden Montagekosten angeführt worden.

Bei der Gestaltung muss dies bedacht werden.

Damit stehen die zwei Konzepte, die ausgestaltet werden sollen, fest. Zur Übersicht erhalten sie einen neuen Namen.

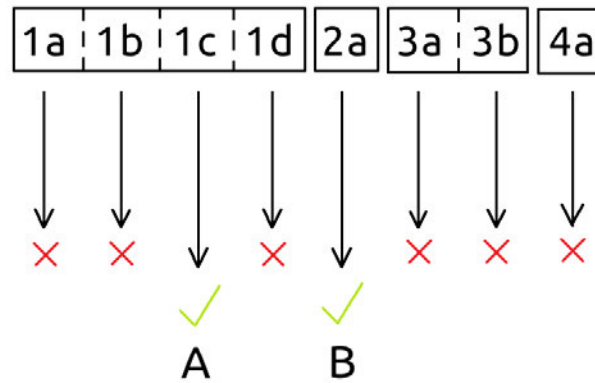


Abbildung 6.11: Weiterführung der Konzepte

7 Gestaltung

Mit der im vorangegangenen Kapitel getroffenen Auswahl kann der Gestaltungsprozess beginnen. Während des Gestaltungsprozesses werden die Konzeptideen mit Hinblick auf die Anforderungen des gesamten Produktlebenszyklus entworfen. Als Endprodukt der Gestaltung resultiert mindestens ein Entwurf, welcher anschließend zu Fertigungsunterlagen ausgearbeitet werden kann, die genutzt werden können, um einen Prototypen zu fertigen. Auf Basis des ersten Grobentwurfs und des Prototypen können Verbesserungen eingebunden werden, die zu einem weiteren Prototypen und schließlich zu einem serienreifen Produkt führen. Dabei sollten verschiedene Gestaltungsrichtlinien verfolgt werden. Beispiele sind festigkeitsgerechtes, werkstoffgerechtes oder fertigungsgerechtes Gestalten. Vorrangig sollte jedoch immer funktionsgerecht gestaltet werden [Wit+19]. Als Hilfsmittel zur Gestaltung dient hier das Computer Aided Design (CAD) Programm *Inventor 2015* der Firma Autodesk.

7.1 Spezifische Konstruktionsrichtlinien

Die beiden ausgewählten Konzeptideen folgen dem Prinzip einer Schraube. Dies vereinfacht den Gestaltungsprozess deutlich, da als Arbeitsgrundlage die derzeit verwendeten Schrauben genutzt werden können. An ihnen können sukzessive Veränderungen vorgenommen werden, um die erdachten Konzepte A (Labyrinth) & B (Schaumelement) praxisnah umzusetzen.

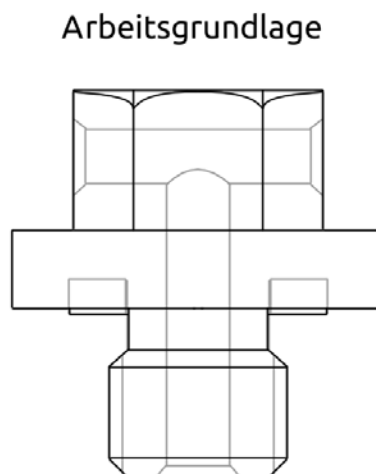


Abbildung 7.1: Arbeitsgrundlage der Gestaltung

Übernommen werden muss dabei mindestens die Außengeometrie der Schrauben nach DIN910 [DIN20], wie es bereits im Kapitel *Anforderungen* angekündigt worden ist. Tatsächlich ist damit jedoch nicht die gesamte Außengeometrie sondern nur die *untere Hälfte* gemeint, da diese Voraussetzung für die universelle Einschraubbarkeit in jedes Getriebe ist. Innerhalb der DIN910 verbergen sich unter anderem die DIN13 [DIN99] für Gewindemaße und die DIN76 [DIN16] für Gewindeausläufe. Diese werden somit zwangsläufig ebenfalls beachtet, auch wenn sie nicht direkt herangezogen werden.

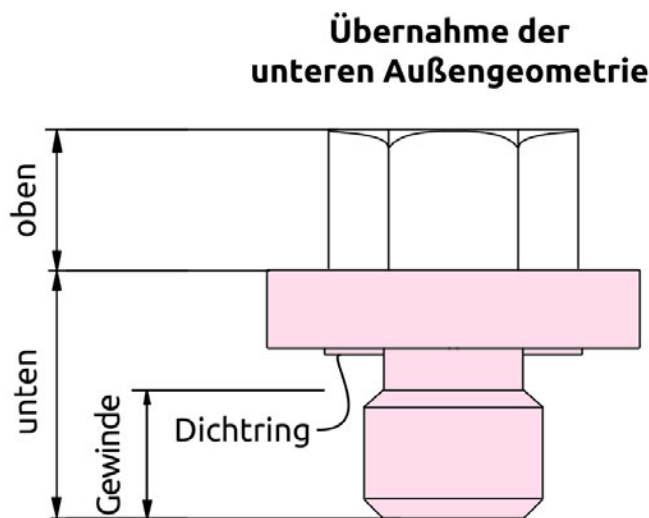


Abbildung 7.2: Übernahme der unteren Außengeometrie

Als logische Konsequenz hieraus ergibt sich fernerhin, dass der Dichtring, wie er von den Standardentlüftungsschrauben und Druckentlüftungsschrauben bekannt ist, weiterhin genutzt werden kann. Dieser ist in der DIN7603 [DIN01] genormt.

Die erste Veränderung, die für beide Konzepte eingebracht werden soll, ist eine Erweiterung der Bohrung, um die Vorteile des Konzeptes 1a, das nicht weitergeführt worden ist, miteinzubeziehen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass eine Mindestwandstärke unter dem Gewindeauslauf bestehen bleibt. Zurzeit haben die Schrauben M8/M10 einen Innendurchmesser von 3mm, sodass sich eine Wandstärke unter dem Gewindeauslauf von circa 1.5mm bei M8 und 2.5mm bei M10 ergibt. Der Innendurchmesser von M12 liegt bei 5mm. Der Innendurchmesser der M8 Schrauben sollte nicht vergrößert werden. Der Innendurchmesser von M10 kann auf 5mm vergrößert werden, sodass eine Wandstärke unter dem Gewindeauslauf von circa 1.5mm bleibt. Die Innenbohrung der M12 Schrauben kann entsprechend auf 7mm erhöht werden. Eine Übersicht ist in Tabelle 4 gezeigt. Für größere Gewinde muss überprüft werden, ob eine Wandstärke von 1.5mm zugelassen werden kann.

Tabelle 4: Übersicht der Gewindegrößen und Steigbohrungsdurchmesser

Gewinde	M8x1	M10x1	M12x1.5
∅ Originalmaß	3mm	3mm	5mm
∅ Erweitert	3mm	5mm	7mm

Aufgrund der geringen¹³ Belastungen der Schrauben und den bereits vorangegangenen Versuchen ist eine Mindestwandstärke unter dem Gewindeauslauf von 1.5mm für kleine Gewindedurchmesser als ausreichend einzustufen. Zusätzlich können bereits bestehende Entlüftungsschrauben mit erweiterten Durchmessern als Referenz genutzt werden, siehe zum Beispiel Abbildung 3.6. Weiterhin zu beachten sind die Belastungsgrenzen der typischerweise verwendeten Werkstoffe von Entlüftungsschrauben. Eine Erläuterung folgt im weiteren Verlauf dieses Abschnitts.

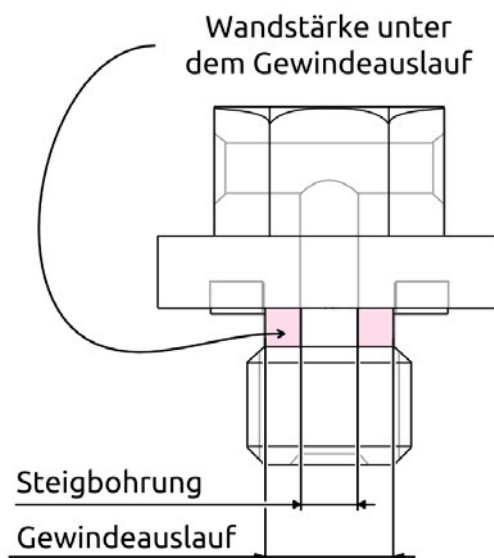


Abbildung 7.3: Wandstärke unter dem Gewindeauslauf

Anhand der oben ausgeführten Festlegung der Bohrungsdurchmesser wird deutlich, dass eine Ausarbeitung aller möglichen Gewindedurchmesser im Gestaltungsprozess einen erheblichen Darstellungsaufwand beinhalten würde. Da zur Bearbeitung der Aufgabenstellung einerseits nur begrenzter Platz zur Verfügung steht und andererseits eine parallele Ausarbeitung aller Varianten von relevanten Inhalten ablenken würde, soll eine Begrenzung auf die Ausarbeitung einer möglichen Gewindegröße stattfinden. Hier wird beispielhaft M10x1 als Größe festgelegt, da es sich um die am häufigsten verwendete Größe bei

¹³Die Entlüftungsschrauben, wie alle am Getriebegehäuse eingesetzten Verschlusschrauben, fallen in die Kategorie der Dichtungsschrauben. Somit sind sie im Vergleich zu Befestigungsschrauben nur 'geringen' Belastungen ausgesetzt. [Wit+19, Kapitel 8]

NORD handelt. Eine Skalierung auf die anderen Maße ist nachträglich mit verhältnismäßig wenig Arbeitsaufwand umsetzbar, sofern die Tatsache, dass es mehrere Größen geben muss, während der Gestaltung bedacht wird. Eine Skalierung auf unter M8x1 ist nicht notwendig.

Mit der Festlegung des Bohrungsdurchmessers und der Außengeometrie der DIN910 ergibt sich eine verbindliche Grundlage für die geometrische Gestaltung der unterschiedlichen Konzepte. Die Gestaltung umfasst jedoch nicht nur die Ausarbeitung der Bauteilgeometrie sondern auch die Festlegung anderer Parameter, wie das durchführen einer Materialauswahl. NORD bietet zurzeit Entlüftungsschrauben aus Messing sowie den Stählen X17CrNi16-2 (1.4057) und X39CrMo17-1 (1.4122) an. Die Stähle werden dabei hauptsächlich aufgrund ihrer Beständigkeit gegen Korrosion genutzt und nicht aufgrund ihrer Festigkeitseigenschaften. Zur Verdeutlichung: Während ihre Dehngrenzen im Bereich von 600MPa liegen, weißt eine einfache Messinglegierung ohne weitere Zusätze wie CuZn37 nur eine Dehngrenze von 120MPa auf [Wit+19, S.1001 ff. oder Tabellenbuch S.7 ff. falls eine zweigeteilte Ausgabe vorliegt]. Die Schrauben, die hier ausgestaltet werden, sollten mindestens aus den gleichen Werkstoffen herstellbar sein. Als Zusatzoption ist eine Schraube aus Kunststoff denkbar, da die Materialkosten der meisten Kunststoffe bedeutend niedriger sind als die von Stahl oder Messing. Mit niedrigeren Materialkosten könnten potentiell höhere Fertigungs- oder Montagekosten der Konzeptschrauben A & B im Vergleich zu klassischen Entlüftungs- und Druckentlüftungsschrauben ausgeglichen werden. Als Kunststoff könnte zum Beispiel der Thermoplast Polyamid (PA) 66 genutzt werden, welcher vom *Tabellenbuch Metall* als Werkstoff für bestimmte Schraubenanwendungen empfohlen wird. Da Kunststoff andere Materialparameter vorweist als Messing oder Stahl, müssten die entsprechend niedrigeren Belastungsgrenzen miteinbezogen werden. Als Vorgabe sind die Materialkennwerte von Messing zu nutzen. PA66 beispielsweise besitzt nach oben angegebener Quelle eine Zugfestigkeit von 80MPa, was im Rahmen des Verwendungszweckes eine grundsätzlich annehmbar kleine Differenz zu Messing darstellt.

Auf Basis des Werkstoffs kann ein Fertigungsverfahren gewählt werden. Diese Auswahl muss mit Blick auf die Spezialgestaltungsrichtlinien für unterschiedliche Fertigungsverfahren vor Beginn des eigentlichen Gestaltungsprozesses getroffen werden. Im vorliegenden Fall muss aufgrund der verschiedenen Werkstoffe ein Fertigungsverfahren gewählt werden, in dem sowohl Metalle als auch Kunststoffe verarbeitet werden können. Aufgrund der stark variierenden Schmelztemperaturen von Kunststoff und Metall, sowie innerhalb der Metalle Messing und Stahl, ist ein spanendes Fertigungsverfahren vorzuziehen. Für die Wahl eines Fertigungsverfahrens sind jedoch nicht nur der Werkstoff,

sondern auch andere Randbedingungen wie Verwendungszweck und Stückzahl relevant. Bei Entlüftungsschrauben handelt es sich um ein Massenprodukt. Für Produkte, die in großer Stückzahl gefertigt werden, gibt der *Roloff/Matek Maschinenelemente - Normung, Berechnung, Gestaltung* vor, nach Möglichkeit zeitsparende spanlose Fertigungsverfahren zu wählen. Grund sind die erfahrungsgemäß hoch gewichteten Fertigungskosten für kleine Bauteile. Mit der Überlagerung von Werkstoff und Stückzahl als Kriterium ergibt sich somit ein Konflikt. Da die Entlüftungsschrauben voraussichtlich nicht von NORD selbst sondern als Sonderanfertigung von einem, zu diesem Zeitpunkt noch unbekanntem, externen Lieferanten gefertigt würden, kann keine sichere Auswahl eines Fertigungsverfahrens getroffen werden. Um keinen Nachteil hieraus zu tragen, muss die Konzeptgeometrie das Potential bieten, sowohl spanlos als auch spanend gefertigt werden zu können.

Mit den Informationen über Werkstoff und Fertigungsrichtlinien sind alle für einen allgemeinen Gestaltungsprozess vorerst notwendigen Festlegungen getroffen. Bevor er jedoch gestartet wird, sollen zwei weitere für diesen Prozess eigenen Festlegungen getroffen werden. Zuzüglich der verschiedenen Materialien und Fertigungsverfahren ergibt sich trotz der Festlegung auf die Gewindegröße M10x1 erneut eine übermäßig hohe Variantenvielfalt. Daher soll hier ebenfalls zu Gunsten einer vereinfachten Darstellung auf eine Materialangabe in den anzufertigenden Zeichnungen verzichtet werden.

Des Weiteren wird der hier ausgebreitete Gestaltungsprozess rein qualitativ durchgeführt. Das heißt, dass keine Berechnungen beispielsweise zur Festigkeit durchgeführt werden. Hintergrund ist die oben beschriebene Übernahme des am stärksten belasteten Teils der Schraube von einem bereits bestehenden und damit bereits berechneten Produkt. Zu einem späteren Zeitpunkt des Produktentwicklungsprozesses sollte spätestens vor Serienfreigabe eine überprüfende Berechnung durchgeführt werden. Von besonderem Interesse sind die Materialvarianten Messing und Kunststoff.

Es folgen die Unterkapitel 'Konzept A' und 'Konzept B', in denen die Gestaltung der Konzepte als Produkte detailliert ausgebreitet wird.

7.2 Konzept A

Am Beginn des Kapitels 'Gestaltung' ist eine Arbeitsgrundlage für die eigene Ausarbeitung beider Konzepte festgelegt worden, siehe Abbildungen 7.1 und 7.8. Diesen Ausgangspunkt nutzend folgt nun die Gestaltung des *oberen* Teils der Schrauben. Begonnen wird mit dem Konzept A.

Im Kapitel *Konzeptentwicklung* ist bereits die Idee aufgeführt worden, ein Labyrinth aus mehreren gleichen Teilen zu erzeugen, die übereinander gesteckt werden. Eine Fertigung aus einem Teil ist weder spanlos noch spanend möglich, weshalb die Idee, ein mehrteiliges Produkt anzustreben, weitergeführt wird. Werden mehrere Teile verwendet, sollten möglichst viele dieser Teile gleich sein. Grund ist eine Reduzierung der Teilevielfalt, die dazu führt, dass Kosten im Verwaltungs- und Fertigungsbereich gespart werden und eine Vereinfachung der Montage, da keine Verwechslungsgefahr durch ähnliche Teile besteht. Durch den Einsatz mehrerer Teile verkompliziert sich unabhängig von ihrer Form der obere Teil der Schraube erheblich. Daher muss die bisher dort angesetzte Schlüsselweite verschoben werden.

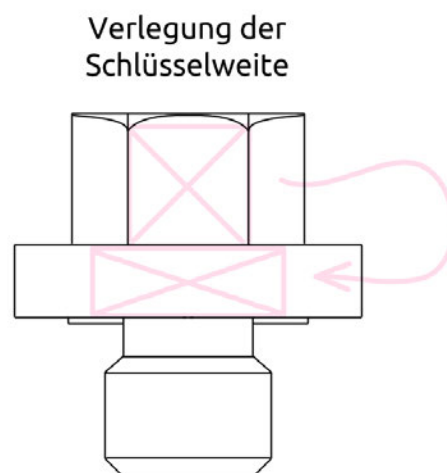


Abbildung 7.4: Verlegung der Schlüsselweite

Dafür bietet sich der Auflagekranz der Schraube am Gehäuse an. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Auflagefläche nicht unnötig vergrößert wird, da die plane Auflagefläche am Getriebegehäuse begrenzt ist. Die sich so ergebende Schlüsselweite 14 ist ungewöhnlich, da sie zwischen SW13 für M8 Muttern und SW17 für M10 Muttern liegt. Trotzdem können Schlüssel der Größe 14 einfach beschafft werden, weshalb keine Möglichkeit gesucht wird, die Größe der Schlüsselweite zu verändern.

Mit Verlegung der Schlüsselweite in den unteren Bereich der Schraube ergibt sich ein universelles Basisteil. Eine Zeichnung ist in Abbildung A.2 dargestellt.

Auf diesem Basisteil können die Einzelteile, die das Labyrinth bilden, platziert werden. Um eine möglichst universelle Fertigung zu ermöglichen, sollen die Labyrinthteile kreisförmig ausgeführt werden. Kreisförmige Bauteile können sowohl gegossen (spanlos) als auch einfach von einer Stange abgedreht (spanend) werden. Da mehrere gleiche Teile übereinander gesteckt werden sollen, ergeben sich zwei verpflichtende Geometrien, die umgesetzt werden müssen. Erstens muss es eine Art Zweiteilung der Labyrinthteile in vertikaler Richtung geben, die ein endloses ineinander Fügen ermöglicht. Diese Funktion wird von zwei Rezessen übernommen, die aufgrund ihres Durchmessers verbunden werden können.

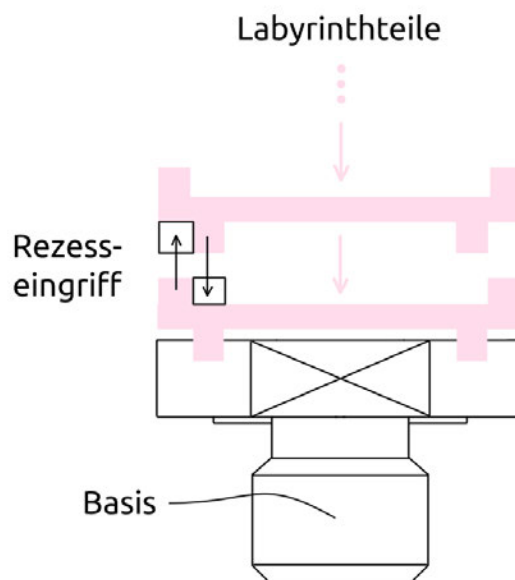


Abbildung 7.5: Labyrinthteile

Zweitens muss es eine asymmetrische Öffnung in den eigentlich symmetrischen Teilen geben, um ein Labyrinth erzeugen zu können. Eine Zeichnung der Teile ist in Abbildung A.3 zu sehen.

Die Rezesse bieten eine formschlüssige Verbindung der Labyrinthteile in horizontaler Richtung. In vertikaler Richtung bieten sie jedoch keine Sicherung. Daher müssen die Teile verklebt werden. Klebeverbindungen sind im Maschinenbau eher ungewöhnlich, da sie zu den stoffschlüssigen Verbindungen zählen und meist nicht zerstörungsfrei getrennt werden können. An dieser Stelle kann aufgrund der geringen Größe der Teile jedoch keine andere Art der Verbindung, weder kraft- noch formschlüssig, in vertikale Richtung genutzt

werden. Gleichzeitig kann eben aufgrund der geringen Teilegröße eine Klebeverbindung gerechtfertigt werden, da eine Zerstörung der Teile bei Bedarf keine erheblichen finanziellen Einbußen nach sich zieht. Als Klebstoff kann zum Beispiel Epoxidharz oder Cyanacrylat genutzt werden [Gom+14, S.397].¹⁴ ¹⁵ Als Nachteil ergibt sich, dass der Fertigungsaufwand durch das Applizieren eines Klebstoffes erhöht wird. Allerdings voraussichtlich nicht signifikant im Verhältnis zum zusätzlichen Fertigungsaufwand durch die Teileanzahl.

Die Teile, die das Labyrinth bilden, sind wie bereits beschrieben mit einer asymmetrischen Bohrung ausgestattet (siehe Abbildung A.3 im Anhang), um die Kammern der Schraube miteinander zu verbinden. Infolge dieser Bohrung, die aufgrund ihrer Lage und Größe keinen adäquaten Ausgang nach Außen bietet, muss ein weiteres Teil erstellt werden, das als abschließender Deckel dient. Dieses Teil ist höher als die Labyrinthteile, um seitliche Bohrungen zu ermöglichen, die mit den bekannten Gummidochten als Transporticherung ausgestattet werden können. Eine Zeichnung des Deckels kann in Abbildung A.4 eingesehen werden.

Insgesamt ergibt sich damit eine Schraube aus drei verschiedenen Teilen. Eine Gesamtzeichnung ist im Anhang unter A.1 abgebildet. Die Zeichnung zeigt im oberen Bereich einen angedeuteten Montageprozess sowie die groben Abmaße der Schraube und eine Stückliste im unteren Bereich.

In der Zusammenbauzeichnung sind drei Labyrinthteile dargestellt. Tatsächlich kann jede beliebige Anzahl zwischen 0 - 5¹⁶ eingefügt werden. Dabei muss bedacht werden, dass jedes zusätzliche Teil zwar die Leistungsfähigkeit aber auch die Komplexität erhöht. In der Praxis könnte eine Standardanzahl verwendet werden oder abhängig vom Leckagerisiko entschieden werden. Weiterhin ist im Montageprozess auf der Zusammenbauzeichnung ein Versatz der asymmetrischen Labyrinthbohrung um 120° dargestellt. Praktisch ist nicht wichtig, in welchem exakten Winkel die Bohrungen zueinander ausgerichtet sind, solange ein möglichst großer Winkel gewählt wird. Je höher der Abstand zwischen den Bohrungen der übereinander liegenden Ebenen, desto hochwertiger ist das entstehende Labyrinth.

¹⁴Für konkrete Angaben zu Aushärtebedingungen, Einsatztemperaturen und Eigenschaften kann auf angegebener Seite oder weiterführend in Herstellerkatalogen nachgeschlagen werden.

¹⁵An den Zeichnungen der Konzepte A & B wird auffallen, dass zuzüglich zu den fehlenden Materialangaben auch keine Oberflächen und Toleranzangaben gemacht wurden. Grund dafür ist, dass die entsprechenden Angaben abhängig vom final eingesetzten Klebstoff sind. Wahrscheinlich ist die Fertigung einer Spielpassung zwischen den zu verklebenden Bauteilen.

¹⁶Die Begrenzung auf eine maximale Labyrinthteileanzahl von 5 ergibt sich durch die entstehende Schraubenlänge im Verhältnis zum zusätzlichen Nutzen, den ein weiteres Labyrinthteil bringen könnte.

In den Abbildungen 7.6 und 7.7 sind zwei Darstellungen der vollständigen Entlüftungsschraube mit Labyrinth gezeigt.

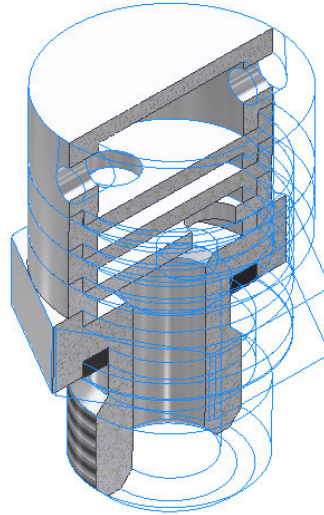


Abbildung 7.6: Konzept A - Schnittdarstellung

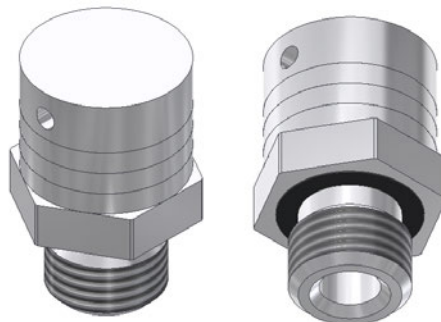


Abbildung 7.7: Konzept A

7.3 Konzept B

Nach Abschluss des ersten Teils der Gestaltung mit der Ausarbeitung des Konzeptes A folgt das Konzept B im zweiten Teil. Es wird möglicherweise bereits aufgefallen sein, dass das Basisteil des Konzeptes A in A.2 mit der Bildunterschrift AB untertitelt ist. Grund dafür ist, dass sowohl für das Konzept A als auch B das gleiche Basisteil verwendet werden kann. Die Komplexität des Konzeptes B gibt von sich aus keinen Grund, Maßnahmen wie eine Verlegung der Schlüsselweite vorzunehmen. Es könnte die Außengeometrie der Standardentlüftungsschrauben vollständig übernommen werden. Dennoch ist es im Hinblick auf die Teilevielfalt und Austauschbarkeit der Lösungen sinnvoll, die Änderungen auch im Konzept B einzubringen. Es ergibt sich durch die Vereinheitlichung der Basis kein Nachteil für Konzept B. Stattdessen entsteht durch eine einheitliche Basis vielmehr die Chance ein modulares Konzept einzuführen, das Raum für weitere Optimierungen bietet.

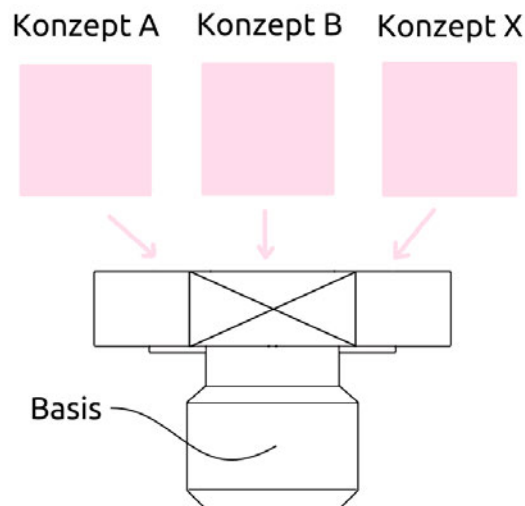


Abbildung 7.8: Schraubenbasis

Für die Umsetzung von Konzept B kann auf dem Basisteil ein anderer Oberkörper eingesetzt werden. Im Gegensatz zu Konzept A, für das Labyrinthteile benötigt wurden, wird für Konzept B dahingegen eine Art Lagerschale für das Schaumelement benötigt. Diese sollte, wie die Labyrinthteile, kreisförmig aufgebaut sein. Einerseits um die kreisförmige Aussparung der Basis zu nutzen, andererseits um den Fertigungsaufwand zu minimieren. Es ergibt sich eine Kappe mit horizontaler Bohrung. Eine Zeichnung ist in A.6 gezeigt. Die Wandstärke der Kappe ist dabei für eine Schraube aus Metall mit 2mm höher als notwendig. Um jedoch eine Fertigung aus Kunststoff zu vereinfachen und die Empfindlichkeit¹⁷ des Bauteils zu senken, sind 2mm als angemessen ausgewählt worden. Die Kappe muss,

¹⁷Zur Erlangung eines ATEX-Zertifikates, siehe Kapitel 'Anforderungen', ist ein hohe Widerstandsfähigkeit gegen Schläge der außen liegenden Bauteile wünschenswert.

ebenfalls analog zu den Labyrinthteilen, in die Basis eingeklebt werden. Die horizontale Bohrung soll zur Entlüftung genutzt werden. Während der Durchmesser dieser Bohrung relativ frei gewählt werden kann, da in Konzept B keine zusätzliche Transportsicherung eingebracht werden muss, ist ihre Positionierung eine wichtige Festlegung.

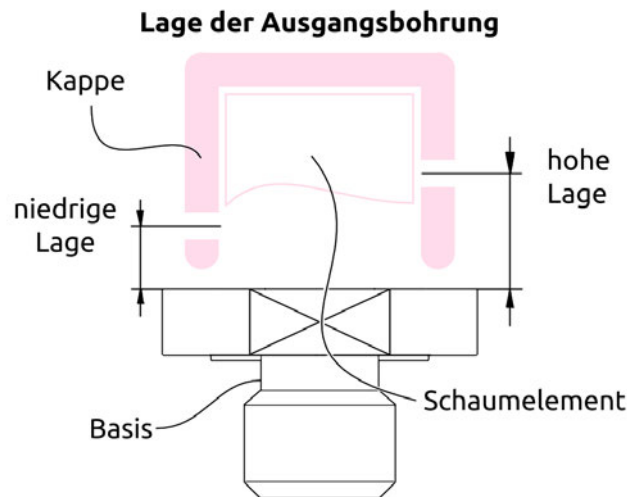


Abbildung 7.9: Lage der Ausgangsbohrung

Abhängig von der Härte des Schaumelements muss die Bohrung unter Normaldruck verschlossen sein und durch Überdruck freigelegt werden. Da bisher noch nicht bekannt ist, welche Härte ein PUR-Schaumelement haben wird, ist ein mittlerer Wert zur Positionierung gewählt worden. Innerhalb des Auswahlbereichs des Bohrungsdurchmessers ist zu beachten, dass kleinere Durchmesser zur Folge haben, dass die Höhe des abgehenden Luftvolumenstroms direkt ihren Maximalwert erreicht. Größere Bohrungen ermöglichen eine Steuerung des Volumenstroms abhängig vom Innendruck.

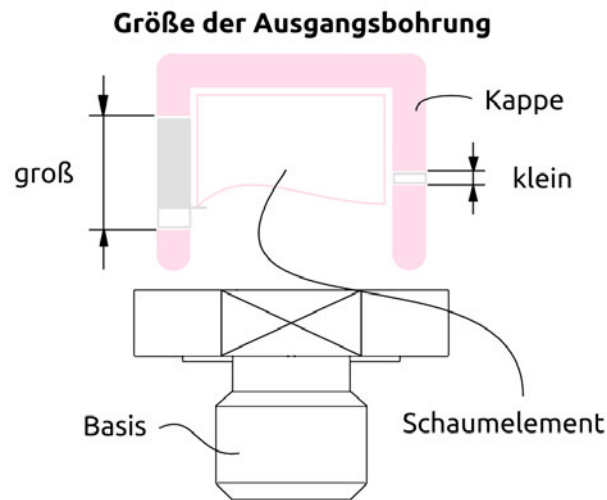


Abbildung 7.10: Größe der Ausgangsbohrung

Im Gegensatz zur Kappe darf das PUR-Element auf keinen Fall eingeklebt werden. Weder in die Basis noch in die Kappe. Andernfalls kann die Funktion als Druckelement nicht erfüllt werden. Als Vorteil ergibt sich, dass eine getrennte Entsorgung der Teile aus verschiedenen Materialien ermöglicht wird. Für das Schaumelement wird mit der Kappe eine zylinderförmige Geometrie vorgegeben. Eine einfache Zeichnung, die die Geometrie des Schaumelements darstellt, ist in Abbildung A.7 zu sehen. Ein Hersteller, der PUR-Schaum in vielfältigen Varianten anbietet, ist beispielsweise die Zelu Chemie GmbH (<https://www.zelu.de>). Ein Informationsflyer ist im Quellenverzeichnis verlinkt [Zel19]. Zusätzlich zu den Geometrievorgaben muss das Schaumelement mindestens, wie bereits im Kapitel *Konzeptentwicklung* angegeben, aus geschlossenzelligem Schaum bestehen, welcher außerdem widerstandsfähig gegenüber Getriebeöl ist. Diese Anforderungen werden vom kostengünstigen Polyurethan erfüllt, weshalb dieser Kunststoff als bevorzugtes Material angegeben wurde. Möglicherweise sind jedoch auch andere Schaummaterialien, die potentiell biologisch abbaubar sind, einsetzbar. Bis zur Serienfertigung des Produktes sollten möglichst viele Schaumvarianten, bezüglich Härte und Material, getestet werden. Dabei können entweder ein Material und eine Härte ausgewählt werden, oder es können unterschiedliche Varianten für unterschiedliche Anwendungsfälle eingesetzt werden. Denkbar sind zum Beispiel eine lebensmittelverträgliche Variante, eine Variante mit niedrigem und eine mit hohem Öffnungsdruck oder eine Variante für Innenräume und eine für Außenanwendungen. Eine Zusammenarbeit mit Zelu oder anderen Herstellern von Schaumstoffen ist für ein solches Spektrum unerlässlich.

Insgesamt ergibt sich damit wiederum eine Schraube aus vier verschiedenen Teilen. Eine

Gesamtzeichnung ist im Anhang unter A.5 abgebildet. Die Zeichnung zeigt analog zur vorangegangenen Zusammenbauzeichnung im oberen Bereich einen angedeuteten Montageprozess sowie die äußeren Abmaße der Schraube und eine Stückliste im unteren Bereich.

In den Abbildungen 7.11 und 7.12 sind zwei Darstellungen der vollständigen Druckentlüftungsschraube mit Schaumelement gezeigt.

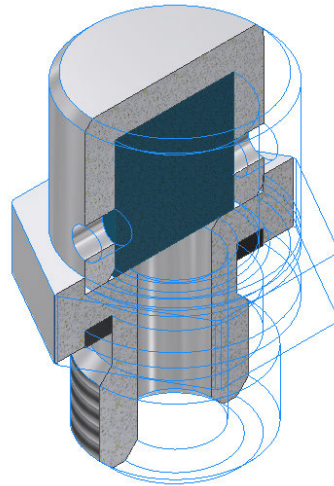


Abbildung 7.11: Konzept B - Schnittdarstellung

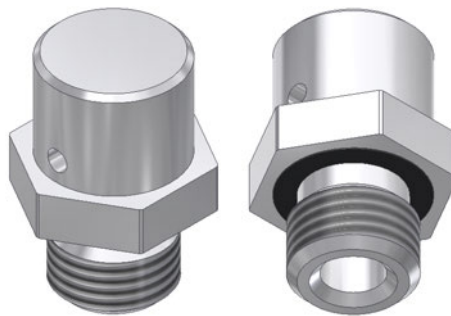


Abbildung 7.12: Konzept B

7.4 Revision

Mit den bis zu diesem Zeitpunkt entstandenen Entwürfen kann ein erster Prototyp hergestellt werden. An dieser Stelle würde nach einer Versuchsreihe mit den ersten physischen Prototypen der erste Iterationszyklus des Gestaltungsprozesses gestartet werden. Dieser würde, wie zum Beginn des Kapitels beschrieben, wiederum in den zweiten Prototypen und einen weiteren Iterationszyklus münden, bis ein serienreifes Produkt vorliegt. Im Rahmen dieser Arbeit kann der vollständige Prozess mit allen Zwischenschritten nicht abgebildet werden, weshalb der Gestaltungsprozess nach diesem ersten Durchlauf angehalten wird.

Auch wenn der Entwicklungsprozess somit noch nicht abgeschlossen ist, kann ein erstes Fazit gezogen werden.

Ziel ist es gewesen, ein optimiertes Druckausgleichselement zu entwickeln, dass die spezifischen Anforderungen von NORD erfüllen kann. Dies ist in zwei Varianten gelungen.

Eine Variante stellt eine Erweiterung der klassischen Entlüftungsschraube und die andere eine Abwandlung der Druckentlüftungsschraube dar. Konzept A hat alle Vorteile einer Entlüftungsschraube, siehe Kapitel *Situationsanalyse*. Zusätzlich bietet es die Möglichkeit eines Leckageschutzsystems dessen Wirksamkeit anhand der vorliegenden Situation beliebig erhöht und gesenkt werden kann. Einziger Nachteil ist, dass es aus mehr Einzelteilen als eine Entlüftungsschraube besteht, was den Fertigungsprozess erschwert. Konzept B besitzt alle Vor- und Nachteile einer Druckentlüftungsschraube, mit der Leckagen durch flüssiges Öl vermieden werden können, ist jedoch einfacher zu fertigen, was insgesamt die Herstellungskosten senkt.

Bei der Erarbeitung von Entwürfen zur Verbesserung des Druckausgleichsystems wurden wesentliche Anforderungen erfasst und berücksichtigt. Mit Hinblick auf die ergänzend zur Funktion zu erfüllenden Gestaltungsrichtlinien kann zukünftig auf der Grundlage der Entwürfe der Entwicklungsprozess fortgesetzt werden. Mit diesen Ergebnissen kann ein Fazit über den gesamten Entwicklungsprozess gezogen und ein Ausblick gegeben werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit beginnt mit der Beschreibung theoretischer Grundlagen und einer ausgedehnten Situationsanalyse. Die gesammelten Informationen werden genutzt, um in einen methodischen Entwicklungsprozess nach VDI 2221 einzusteigen. Dieser leitet anhand der VDI 2222 über das Formulieren einer präzisen Problemstellung und einer Anforderungsliste den Konzeptentwicklungsprozess ein. Über den Konzeptentwicklungsprozess wird den Methoden der VDI 2223 folgend ein Gestaltungsprozess begonnen. Der Gestaltungsprozess bringt abgeschlossene Entwürfe hervor, mit denen ein Prototyp beider Schraubenvarianten gefertigt werden kann.

Bis zur Serienreife der Entlüftungsschrauben müssen diverse Entscheidungen getroffen werden. Unter anderem gehören dazu Gespräche mit möglichen Lieferanten zu führen, eine genaue Kostenberechnung durchzuführen, eine Systemanpassung vorzunehmen und eine Entscheidung zu treffen ob und wenn ja welches Konzept überhaupt zu einem Serienprodukt weiterentwickelt wird. All dies sind Entscheidungen, die nicht nur vom Ausgang der Versuche mit den Prototypen, sondern auch von anderen Abteilungen wie dem Einkauf, dem Management und der Verwaltung abhängig sind. Wenn eines der oder beide Konzepte als Serienprodukt ausgearbeitet werden, ergeben sich ferner zusätzliche Herausforderungen wie eine mögliche Auslaufsteuerung der bisherigen Produkte oder eine Vermarktung als Alternative, sowie das Recycling und die Entsorgung der Schrauben am Ende ihres Lebenszyklus.

Ergänzend zu dieser direkten Perspektive für die entwickelten Konzepte wird durch die Modularisierung der Basis eine weitere Perspektive geboten. Sollte keines der Konzepte befriedigende Ergebnisse im Praxistest liefern oder grundsätzlich eine oder mehrere weitere Varianten benötigt werden, können die Ergebnisse des Gestaltungsprozesses weiter genutzt werden. Über die ausgewählten Konzepte hinausgehend bleiben weitere Möglichkeiten. Trotz eines systematischen Vorgehens während der Konzipierungsphase ist das Ergebnis eines Entwicklungsprozesses immer auch von der Veranlagung und Erfahrung des Bearbeitenden abhängig [BG21, S.41].

Fernerhin bleiben offene Fragen wie: Gibt es tatsächlich nur ein mögliches Wirkprinzip? Bietet vielleicht die Bionik weitere Lösungsmöglichkeiten? Wie hätten sich die anderen Konzepte in einem Prototypenversuch verhalten? Und nicht zuletzt: Gibt es eine Möglichkeit Druckentstehung im Getriebe von Grund auf zu verhindern?

Quellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

- [BG21] Beate Bender und Kilian Gericke. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2021.
- [Det18] Ludger Deters. „Reibung, Verschleiß und Schmierung“. In: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2*. 8. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2018. Kap. 10.
- [Die17] Arne Dietrich. „Analyse der Druckverteilung innerhalb von Getriebegehäusen“. Bachelorarbeit. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2017.
- [Eck85] F. Eckhardt. *Stationäre Zahnradgetriebe - Schmierung und Wartung*. 2. Auflage. Mobil Oil AG, 1985.
- [Gom+14] Roland Gomeringer u. a. *Tabellenbuch Metall*. 46. Auflage. Verlag EUROPA Lehrmittel, 2014.
- [Gor16] Gore. *Materials Technology - Venting with Hydrophobic vs. Oleophobic Membranes*. Informations-Flyer der Firma GORE; abgerufen: 01.07.2021. 2016. URL: <https://www.gore.com/sites/g/files/ypyipe116/files/2016-04/PTV-TechInfo-Hydrophobic-Oleophobic-US.pdf>.
- [Han+04] Jason N. Hancock u. a. „Unusual Low-Energy Phonon Dynamics in the Negative Thermal Expansion Compound ZrW_2O_8 “. In: *Phys. Rev. Lett.* 93 (22 Nov. 2004), S. 225501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.225501. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.93.225501>.
- [HK19] Christof Hübner und Paul Bernd Kempa. „Thermophysikalische Stoffwerte fester Polymere“. In: *VDI-Wärmeatlas*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2019. Kap. D6.2.
- [JTS06] Peter Jany, Gerd Thielke und Eugen Sapper. *Thermodynamik für Ingenieure*. Friedrich Vieweg & Sohn Verlag Wiesbaden, 2006.
- [Kle13] Joachim Klement. *Getriebe-Technologie - Praxishinweise zu Lagergestaltung, Verzahnungsarten, spielarmen Getriebebauarten, Schmierung, Abdichtung und Instandhaltung*. 1. Auflage. expert Verlag, 2013.
- [Li+11] Chen W. Li u. a. „Structural Relationship between Negative Thermal Expansion and Quartic Anharmonicity of Cubic ScF_3 “. In: *Phys. Rev. Lett.* 107 (19 Nov. 2011), S. 195504. DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.195504. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.107.195504>.

- [Lin09] Udo Lindemann. *Methodische Entwicklung technischer Produkte - Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3. Auflage. In Zusammenarbeit mit dem VDI. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [MSW69] Armin Meyer, Gerd Seibert und Erhard Wendelberger. *Enzyklopädie 2000 - Band 1*. Wissen Verlag Stuttgart/Zürich, 1969.
- [Nor21] Nord. *Getriebe und Getriebemotoren im BLOCK Gehäuse 50Hz, metrisch - IE3*. Katalog; abgerufen: 16.07.2021. 2021. URL: <https://www.nord.com/de/dokumentation/kataloge/details/>.
- [NW03] Gustav Niemann und Hans Winter. *Maschinenelemente - Band 2: Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe - Grundlagen, Stirnradgetriebe*. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.
- [PL11] Josef Ponn und Udo Lindemann. *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte - Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungsformen*. 2. Auflage. In Zusammenarbeit mit dem VDI. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [Sch80] W. Schmid. *Synthetische Industrielubrikationsstoffe. Neue Wege der Problemlösung*. 2. Auflage. Mobil Oil AG, Juni 1980.
- [Spa19] Roland Span. „Thermophysikalische Stoffwerte von trockener Luft“. In: *VDI-Wärmeatlas*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2019. Kap. D2.2.
- [UB19] Christian Ullrich und Thomas Bodmer. „Thermophysikalische Stoffwerte von Metallen und Metallegierungen“. In: *VDI-Wärmeatlas*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2019. Kap. D6.1.
- [Waw20] Welf Wawers. *Bionik - Bionisches Konstruieren verstehen und anwenden*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2020.
- [Wit+19] Herbert Wittel u. a. *Roloff/Matek Maschinenelemente - Normung, Berechnung, Gestaltung*. 24. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2019.
- [WKW14] Bernhard Weigand, Jürgen Köhler und Jens von Wolfersdorf. *Thermodynamik kompakt - Aufgaben und Formeln*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [Zel19] Zelu. *Polyurethan-Schaumsysteme*. Informations-Flyer der Firma Zelu Chemie GmbH; abgerufen: 12.08.2021. 2019. URL: https://www.zelu.de/fileadmin/PDF_downloads/prod_pu_de/zelu_broschuere_polyurethan-schaumsysteme_web_DE.pdf.
- [Zel95] H. Zelßmann. *Entlüfter - Entlüftung von Getrieben*. Techn. Ber. Forschungsheft Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. - Forschungsvorhaben Nr. 182/II - Heft 475. Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 1995.

Normen- und Richtlinienverzeichnis

- [DIN01] DIN7603:2001-05. *Dichtringe*. Mai 2001.
- [DIN16] DIN76-1:2016-08. *Gewindeausläufe und Gewindefreistriche - Teil 1: Für Metrisches ISO-Gewinde nach DIN 13-1*. Aug. 2016.
- [DIN20] DIN910:2020-02. *Verschlussschrauben mit Bund und Außensechskant - Zylindrisches Gewinde*. Feb. 2020.
- [DIN99] DIN13-5:1999-11. *Metrisches ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung - Teil 5: Nennmaße für Feingewinde mit Steigungen 1 mm und 1,25 mm; Gewinde-Nenn Durchmesser von 7,5 mm bis 200 mm*. Nov. 1999.
- [ISO10] ISO3448:2010-02. *Flüssige Industrie-Schmierstoffe - ISO-Viskositätsklassifikation*. Feb. 2010.
- [VDI04] VDI2223:2004-01. *Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. Jan. 2004.
- [VDI19] VDI2221:2019-11. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*. Nov. 2019.
- [VDI97] VDI2222:1997-06. *Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Juni 1997.

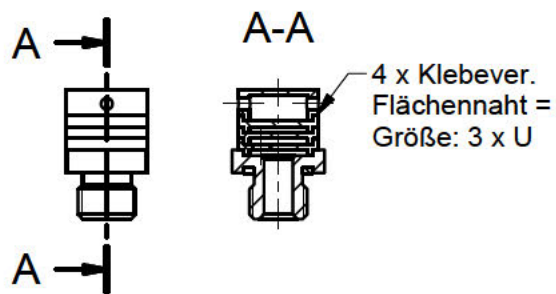
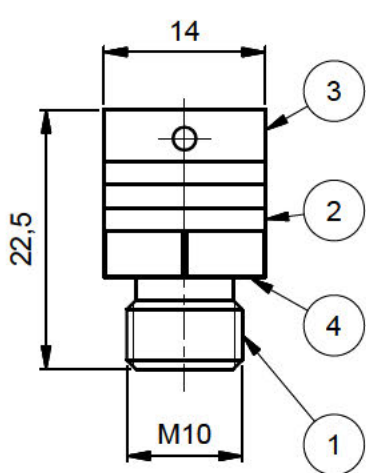
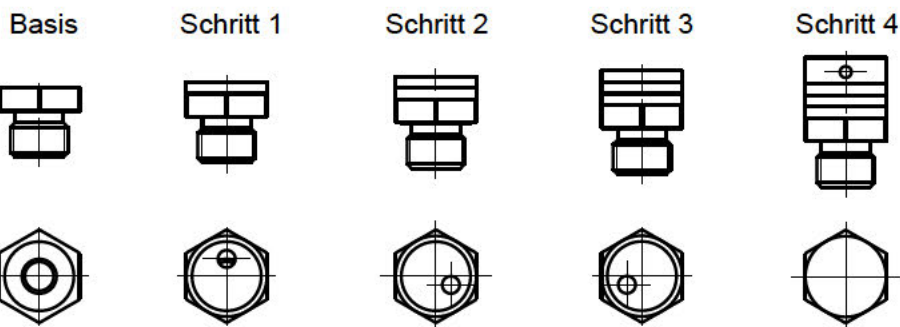
A Anhang

A.1 Zeichnungen der Konzepte A & B

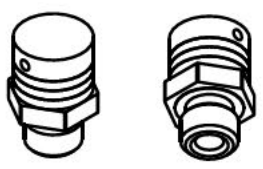
Nachfolgend sind die Zeichnungen der Konzepte A und B angehängt:

1. A.1: Zusammenbauzeichnung - Konzept A
2. A.2 Einzelteilzeichnung - Konzept AB1
3. A.3: Einzelteilzeichnung - Konzept A2
4. A.4: Einzelteilzeichnung - Konzept A3
5. A.5: Zusammenbauzeichnung - Konzept B
6. A.6: Einzelteilzeichnung - Konzept B2
7. A.7: Einzelteilzeichnung - Konzept B3

Montageprozess



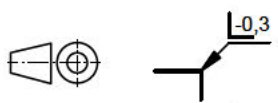
Stückliste		
Lfd.-Nr.	Stückz.	Sachnummer
1	1	Konzept_AB_1
2	3	Konzept_A_2
3	1	Konzept_A_3
4	1	Dichtring



Weitergabe sowie Vervielfältigung dieses Dokuments, Verwertung und Mitteilung seines Inhalts sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Alle Rechte für den Fall der Patent-, Gebrauchsmuster- oder Geschmacksmusterertragung vorbehalten.

The reproduction, distribution and utilization of this documents as well as the communication of its contents to other without explicit authorization is prohibited. Offenders will be held liable for the payment of damages. All rights reserved in the event of the grant of a patent, utility model or design.

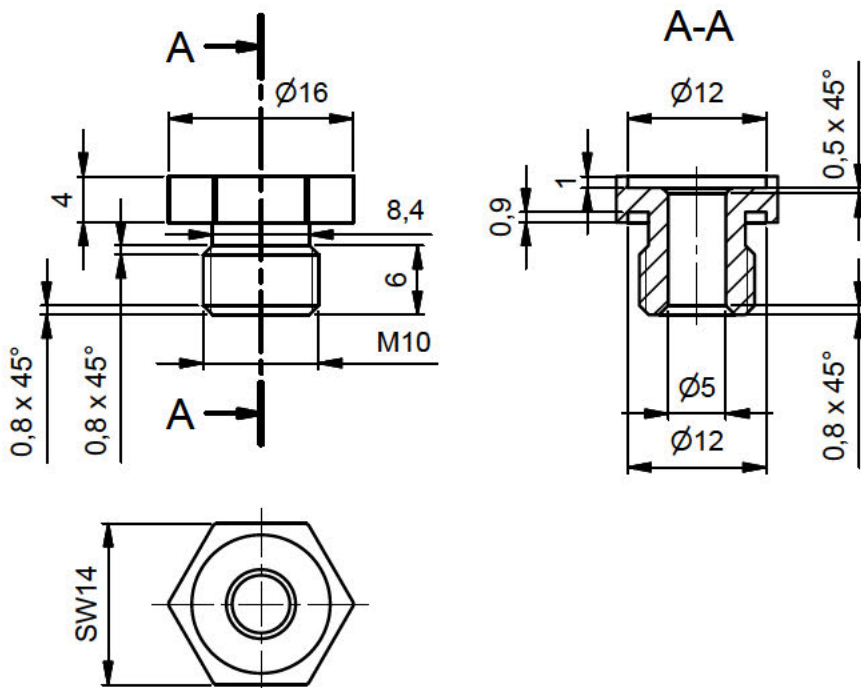
本文未经许可不得转让及翻译，不允许引用或转载其内容，违者必纠，并须赔偿损失。保留专利及试样注册的所有权。



Oberflächenbeschaffenheit siehe WN 3-020-06 / Surface Finish see WN 3-020-06
Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m K / Tolerierung DIN ISO 8015
General tolerances DIN ISO 2768 - m K / Tolerances according to DIN ISO 8015

Getriebebau NORD GmbH & Co. KG www.nord.com					Schutzvermerk nach ISO 16016 beachten	Maßstab Scale 1:1 (2:1)	Format Format A4
						Werkstoff Material	
				Datum/Date	Name/Name		
				Bearb. Drawn 06.08.2021	Neupert		
				Gepr.			
				Checked			
				Rohteil-Nr./Vorfertigteil-Nr.: Unmachined-No./Pre-fab-No.:			Blatt Page 1
Zust. State	Änderung Changes	Datum Date	Name Name	Konzept A			1 BI
				Gewicht /Mass: 0,016 kg			

Abbildung A.1: Zusammenbauzeichnung - Konzept A



Weitergabe sowie Vervielfältigung dieses Dokuments, Verwertung und Mitteilung seines Inhalts sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patent-, Gebrauchsmuster- oder Geschmacksmustereintragung vorbehalten.

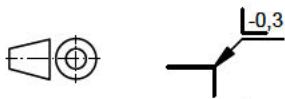
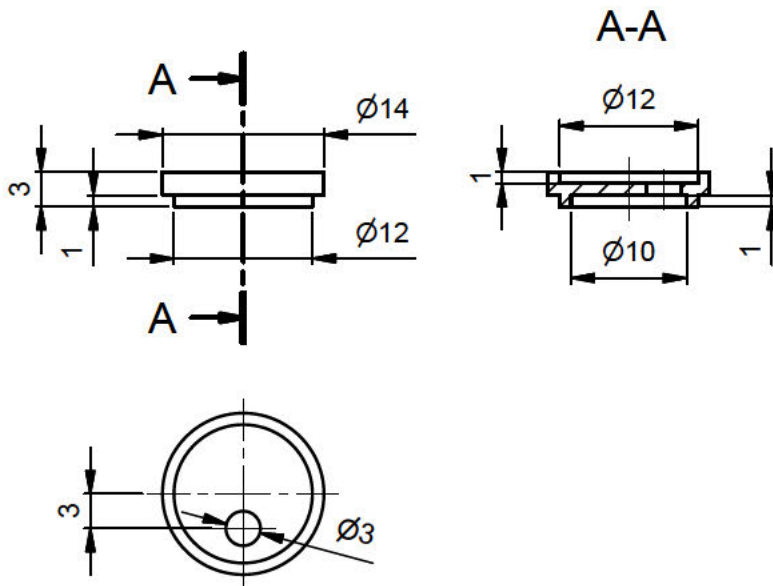
The reproduction, distribution and utilization of this documentsites as well as the communication of its contents to other without explicid authorization is prohibited. Offenders will be held liable for the payment of damages. All rights reserved in the event of the grant of a patent, utility model or design.

本文未经许可不得转让及翻译，不允许引用或转载其内容，违者必纠，并须赔偿损失。保留专利及试样注册的所有权。

Oberflächenbeschaffenheit siehe WN 3-020-06 / Surface Finish see WN 3-020-06
Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m K / Tolerierung DIN ISO 8015
General tolerances DIN ISO 2768 - m K / Tolerances according to DIN ISO 8015

Getriebbau NORD GmbH & Co. KG - www.nord.com			Schutzvermerk nach ISO 16016 beachten	Maßstab Scale: 2:1	Format Format: A4
			Datum/Date: 06.08.2021	Werkstoff Material	
		Name/Name: Neupert	Konzept_AB_1		
		Gepr. / Checked			
		Rohteil-Nr./Vorfertigtteil-Nr.: Unmachined-No./Pre-fab-No.:	Blatt Page: 1		1 Bl
Zust. / State	Änderung / Changes	Datum / Date	Name	Gewicht / Mass:	

Abbildung A.2: Einzelteilzeichnung - Konzept AB1



Weitergabe sowie Vervielfältigung dieses Dokuments, Verwertung und Mitteilung seines Inhalts sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patent-, Gebrauchsmuster- oder Geschmacksmustereintragung vorbehalten.

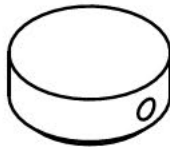
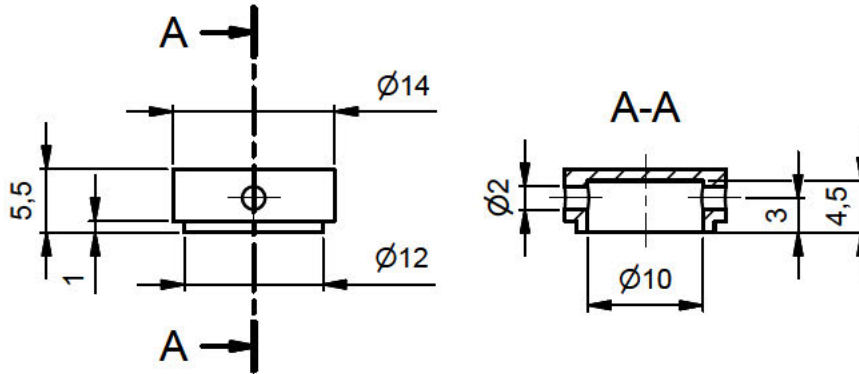
The reproduction, distribution and utilization of this documentsites as well as the communication of its contents to other without explicit authorization is prohibited. Offenders will be held liable for the payment of damages. All rights reserved in the event of the grant of a patent, utility model or design.

本文未经许可不得转让及翻译，不允许引用或转载其内容，违者必纠，并须赔偿损失。保留专利及试样注册的所有权。

Oberflächenbeschaffenheit siehe WN 3-020-06 /Surface Finish see WN 3-020-06
Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m K / Tolerierung DIN ISO 8015
General tolerances DIN ISO 2768 - m K / Tolerances according to DIN ISO 8015

Getriebebau NORD GmbH & Co. KG					Schutzvermerk nach ISO 16016 beachten	Maßstab Scale 2:1	Format Format A4
www.nord.com						Werkstoff Material	
				Datum/Date	Name/Name		
				Bearb. Drawn	06.08.2021	Neupert	
				Gepr.			
				Checked			
				Rohteil-Nr./vorfertigteil-Nr.: Unmachined-No./Pre-fab-No.:			Blatt Page 1
Zust. State	Änderung Changes	Datum Date	Name Name	Konzept_A_2			1 Bl
				Gewicht /Mass:			

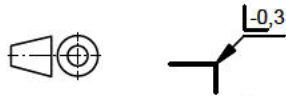
Abbildung A.3: Einzelteilzeichnung - Konzept A2



Weitergabe sowie Vervielfältigung dieses Dokuments, Verwertung und Mitteilung seines Inhalts sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patent-, Gebrauchsmuster- oder Geschmacksmustereintragung vorbehalten.

The reproduction, distribution and utilization of this documentsites as well as the communication of its contents to other without explicit authorization is prohibited. Offenders will be held liable for the payment of damages. All rights reserved in the event of the grant of a patent, utility model or design.

本文未经许可不得转让及翻译，不允许引用或转载其内容，违者必纠，并须赔偿损失。保留专利及试样注册的所有权。



Oberflächenbeschaffenheit siehe WN 3-020-06 /Surface Finish see WN 3-020-06
Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m K / Tolerierung DIN ISO 8015
General tolerances DIN ISO 2768 - m K / Tolerances according to DIN ISO 8015

Getriebebau NORD GmbH & Co. KG - www.nord.com					Schutzvermerk nach ISO 16016 beachten	Maßstab Scale 2:1	Format Format A4
						Werkstoff Material	
				Datum/Date 06.08.2021	Name/Name Neupert		
				Bearb. Drawn			
				Gepr. Checked			
				Rohteil-Nr./orfertigteil-Nr.: Unmachined-No./Pre-fab-No.:		Konzept_A_3	
Zust. State	Änderung Changes	Datum Date	Name Name	Gewicht /Mass:		Blatt Page 1 1 Bl	

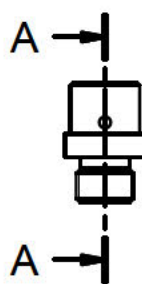
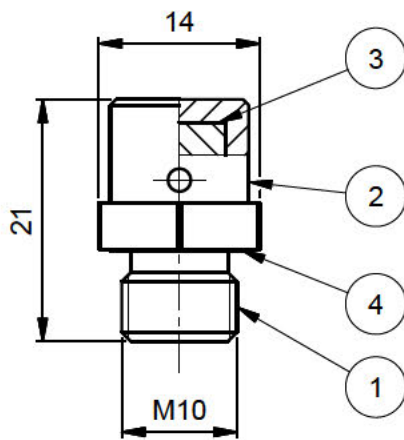
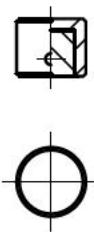
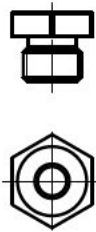
Abbildung A.4: Einzelteilzeichnung - Konzept A3

Montageprozess

Basis

Schritt 1

Schritt 2



A-A



Klebeverbindung
Flächennaht =
Größe: 2,5 x U

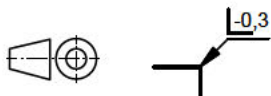
Stückliste		
Lfd.-Nr.	Stückz.	Sachnummer
1	1	Konzept_AB_1
2	1	Konzept_B_2
3	1	Konzept_B_3
4	1	Dichtring



Weitergabe sowie Vervielfältigung dieses Dokuments, Verwertung und Mitteilung seines Inhalts sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patent-, Gebrauchsmuster- oder Geschmacksmustereintragung vorbehalten.

The reproduction, distribution and utilization of this documentsites as well as the communication of its contents to other without explicit authorization is prohibited. Offenders will be held liable for the payment of damages. All rights reserved in the event of the grant of a patent, utility model or design.

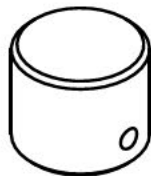
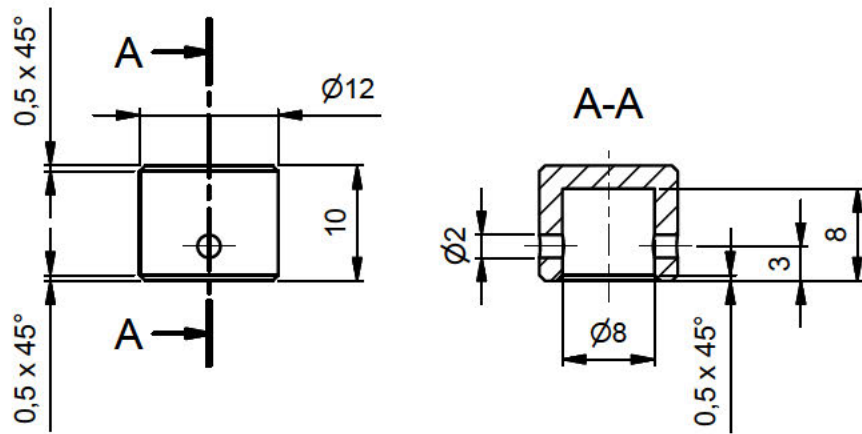
本文未经许可不得转让及翻译，不允许引用或转载其内容，违者必纠，并须赔偿损失。保留专利及试样注册的所有权。



Oberflächenbeschaffenheit siehe WN 3-020-06 /Surface Finish see WN 3-020-06
Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m K / Tolerierung DIN ISO 8015
General tolerances DIN ISO 2768 - m K / Tolerances according to DIN ISO 8015

Getriebebau NORD GmbH & Co. KG www.nord.com					Schutzvermerk nach ISO 16016 beachten	Maßstab Scale 1:1 (2:1)	Format Format A4
Datum/Date Name/Name					Werkstoff Material		Konzept B
Bearb. Drawn 06.08.2021 Neupert				Gepr. Checked		Rohteil-Nr./Vorfertigteil-Nr.: Unmachined-No./Pre-fab-No.:	
Zust. State	Änderung Changes	Datum Date	Name Name	Gewicht /Mass: 0,016 kg			

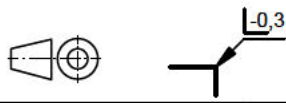
Abbildung A.5: Zusammenbauzeichnung - Konzept B



Weitergabe sowie Vervielfältigung dieses Dokuments, Verwertung und Mitteilung seines Inhalts sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patent-, Gebrauchsmuster- oder Geschmacksmustereintragung vorbehalten.

The reproduction, distribution and utilization of this documents as well as the communication of its contents to other without explicit authorization is prohibited. Offenders will be held liable for the payment of damages. All rights reserved in the event of the grant of a patent, utility model or design.

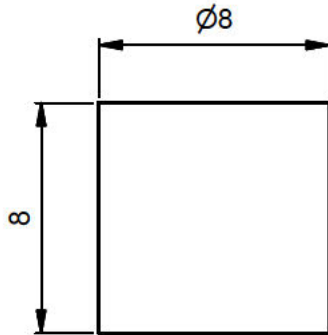
本文未经许可不得转让及翻译，不允许引用或转载其内容，违者必纠，并须赔偿损失。保留专利及试样注册的所有权。



Oberflächenbeschaffenheit siehe WN 3-020-06 / Surface Finish see WN 3-020-06
Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m K / Tolerierung DIN ISO 8015
General tolerances DIN ISO 2768 - m K / Tolerances according to DIN ISO 8015

Getriebebau NORD GmbH & Co. KG - www.nord.com					Schutzvermerk nach ISO 16016 beachten	Maßstab Scale 2:1	Format Format A4	
					Datum/Date 06.08.2021	Name/Name Neupert	Werkstoff Material 	
				Bearb. Drawn Gepr. Checked	Rohteil-Nr./Vorfertigtteil-Nr.: Unmachined-No./Pre-fab-No.:			
Zust.	Änderung	Datum	Name	Konzept_B_2				Blatt Page 1
State	Changes	Date	Name					Gewicht /Mass:

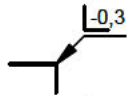
Abbildung A.6: Einzelteilzeichnung - Konzept B2



Weitergabe sowie Vervielfältigung dieses Dokuments, Verwertung und Mitteilung seines Inhalts sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patent-, Gebrauchsmuster- oder Geschmacksmustereintragung vorbehalten.

The reproduction, distribution and utilization of this documentsites as well as the communication of its contents to other without explicit authorization is prohibited. Offenders will be held liable for the payment of damages. All rights reserved in the event of the grant of a patent, utility model or design.

本文未经许可不得转让及翻译，不允许引用或转载其内容，违者必纠，并须赔偿损失。保留专利及试样注册的所有权。



Oberflächenbeschaffenheit siehe WN 3-020-06 /Surface Finish see WN 3-020-06
Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m K / Tolerierung DIN ISO 8015
General tolerances DIN ISO 2768 - m K / Tolerances according to DIN ISO 8015

Getriebebau NORD GmbH & Co. KG www.nord.com					Schutzvermerk nach ISO 16016 beachten	Maßstab Scale 5:1 (2:1)	Format Format A4
						Werkstoff Material	
				Datum/Date	Name/Name		
				Bearb. Drawn	06.08.2021	Neupert	
				Gepr.			
				Checked			
				Rohteil-Nr./vorfertigteil-Nr.: Unmachined-No./Pre-fab-No.:		Konzept_B_3	
Zust. State	Änderung Changes	Datum Date	Name Name	Gewicht /Mass:			

Abbildung A.7: Einzelteilzeichnung - Konzept B3

Eidesstattliche Erklärung

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Chantal Neupert

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift im Original