

INNOVATIONSPROJEKT ZUM REDESIGN EINES
B2B-ELEKTROMAGNETKONZEPTES

DIPLOMARBEIT

VON

STEFAN ANTON STRASCHEK

27. FEBRUAR 2014

BETREUER:

DIPL.-ING. INGO RIEMENSCHNEIDER

DR. GERALD JARITZ

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ
INSTITUT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Zuge des Innovationsprojekts „Material und Geometrie“ der Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung der Firma Kendrion Binder Magnete GmbH, Bereich Magnetic Systems in Eibiswald.

Mein Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Ingo Riemenschneider für seine Unterstützung, die ich nicht nur während der Arbeit, sondern schon in der Vorbereitungsphase erfahren durfte.

Des Weiteren gilt mein besonderer Dank Herrn Dr. Gerald Jaritz für die fachliche und organisatorische Betreuung der Arbeit, sowie für die wertvollen Anregungen, die entscheidend zum Gelingen der Arbeit beitrugen.

Außerdem danke ich allen Mitarbeitern der Fachabteilung Entwicklung und Konstruktion, sowie der Fachabteilung Industrial Engineering, die mich freundlich aufgenommen und mit dem angenehmen Arbeitsklima für einen reibungslosen Projektablauf sorgten. Besonderer Dank gilt hier Herrn Ing. Ferdinand Purkathofer und Herrn Florian Koinegg, deren Diskussionsbereitschaft und Unterstützung mir eine große Hilfe waren.

Ein weiterer Dank gilt den Mitarbeitern des Instituts für Fertigungstechnik an der Technischen Universität Graz, die mir von Anfang an bis zur Veröffentlichung zur Seite standen.

Der abschließende, besondere Dank sei meiner Familie und Freunden gewidmet. Sie haben mich in dieser Phase meines Studiums stets geduldig unterstützt.

Kurzfassung

Innovationsprojekt zum Redesign eines Business to Business Elektromagnetkonzeptes

Im immer stärker umkämpften Bereich der elektromagnetischen Kleinaktoren ist es von entscheidender Bedeutung neue Wege zu gehen um sich einen Wettbewerbsvorteil zu erarbeiten und somit weiter profitabel zu agieren, vor allem in Zeiten einer globalen Wirtschaftskrise. Besonderer Wert wird hierbei auf die Wahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens gelegt.

Vor diesem Hintergrund wurde ein komplett neues Konzept entwickelt, welches eine grundlegende Formänderung gegenüber den bisher üblichen Hubmagneten darstellt. Aufgrund feinmechanisch bedingter niedriger Toleranzen, Einschränkungen bzgl. Bauvolumina und Materialauswahl, sowie hoher Stückzahlen, reduziert sich die Anzahl der ökonomisch einsetzbaren Fertigungsverfahren.

Der Einsatz der Hochleistungsstanztechnik in Kombination mit der Abkehr von der rotationssymmetrischen Geometrie zu einer rechteckigen Geometrie ermöglicht beträchtliche finanzielle Einsparungen. Die Anzahl der Bauteile wird reduziert, die Materialkosten sinken und die Anzahl der Arbeitsschritte nimmt ebenfalls ab.

Aus zu Beginn grundlegenden Berechnungen und Untersuchungen des Grundkonzepts, um ein Verständnis für die Problematik zu entwickeln, wird im Laufe des Projekts ein konkretes Produkt. Dieses basiert auf den Vorgaben eines vorliegenden Elektromagneten. In der Folge werden mittels zahlreicher Berechnungen und Labormessungen an Prototypen, die Vor- und Nachteile des neuen Magnetkonzepts ergründet, sowie Ausblicke auf zukünftige Anwendungen gegeben.

Abstract

Innovation Project to Redesign a Business to Business Solenoid Concept

The highly competitive market for small actuators forces all competitors into new approaches to stay competitive and profitable, especially during a global economic crisis. Of particular importance are the manufacturing processes used.

Taking this background into consideration it was therefore necessary to develop a new lifting solenoid design, which especially influences the commonly used design. Some restrictions such as parts with low tolerances, the limited set of materials, the limited construction space and the high volume in production, reduce the number of useable manufacturing processes.

The use of High Performance Stamping combined with the new rectangular design significantly reduces the costs as it does the number of parts, the material costs and the job steps.

From the basic calculations and analyses on the new lifting solenoids concept emerges a specific product, which is based on an existing solenoid. Followed by numerous calculations and laboratory measurements on prototypes, it was possible to figure out the most important advantages and disadvantages of this new solenoid concept. Furthermore, perspectives for future applications are described.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	ii
Abstract	iii
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Durchführung der Arbeit	2
1.4 Ablauf des Projekts	2
1.5 Resultierender Projektablauf	2
1.6 Gliederung der Arbeit	3
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Grundlagen Elektromagnete	5
2.1.1 Elektromagnetische Kräfte / Wirkprinzip	5
2.1.2 Prinzipieller Aufbau eines Elektromagneten	8
2.1.3 Technische Parameter	9
2.2 Grundlagen Finite Elemente	13
2.2.1 Differentielle Maxwellsche Gleichungen	13
2.2.2 Diskretisierung und Modellbildung	14
2.2.3 Approximation und Variation	17
2.2.4 Lösung und Fehlerabschätzung	17
2.3 Grundlagen Stanztechnik	20
2.3.1 Grundlagen des Schneidens	21
2.3.2 Das Feinschneiden	22
2.3.3 Werkstoffe für Stanzteile	25
2.3.4 Paketieren in der Stanztechnik	25
3 Parameterstudie	29
3.1 Technische Vorgaben	29
3.1.1 Mechanisch	29
3.1.2 Elektrisch	31
3.1.3 Thermisch	32
3.1.4 Lebensdauer	33
3.2 Problemanalyse	33
3.3 Lösungsgenerierung	35
3.4 Lösungsauswahl	38

4	Neues Magnetkonzept	39
4.1	„Blechen“ von Bauteilen in der vorgegebenen FE Umgebung	39
4.2	Vergleich der Konusgeometrie	41
4.2.1	Vergleich der rotations-symmetrischen mit der teilsymmetri- schen Geometrie	42
4.3	Erste wirtschaftliche Abschätzung	46
4.4	Risikoabschätzung	47
5	Virtuelles Prototyping	48
5.1	Konstruktionsprozess	48
5.2	Funktionsanalyse mittels FE	50
5.3	Abschliessende Risikoabschätzung	52
6	Umsetzung des neuen Magnetkonzepts	53
6.1	Prototypenbau	53
6.1.1	Musterauftrag	55
6.1.2	Lieferantenauswahl	55
6.1.3	Wareneingangskontrolle	55
6.2	Prüfung der Prototypen im Labor	56
6.2.1	Messung der Hubkraftkennlinien	58
7	Bewertung des neuen Magnetkonzepts	60
7.1	Hubkraftkennlinie	61
7.2	Wirtschaftliche Schlussbetrachtung	65
7.3	Bisherige Erkenntnisse	68
7.4	Verbesserungspotential	68
8	Zusammenfassung und Ausblick	69
8.1	Verbesserungsvorschläge	69
8.1.1	Beschichtung	69
8.1.2	Verbindung Spulenkörper und Gehäuse	70
8.1.3	Verbindung Anker und Ankerlagerung	70
8.1.4	Distanzscheibe	70
8.1.5	Gehäuse und Ankerbleche	70
8.2	Variantenbildung	71
8.3	Mögliche Arten der Applikation	71
8.3.1	Applikationsmöglichkeiten am Anker	71
8.3.2	Applikationsmöglichkeiten am Gehäuse	71
8.3.3	Applikationsmöglichkeiten am Spulenkörper	72
	Abbildungsverzeichnis	74
	Tabellenverzeichnis	77
A		79
A.1	Terminplan	80
A.2	FMEA	81
A.3	Musterauftrag; Strukturstückliste und Originalzeichnungen	86
A.4	Lieferantenangebote	98

A.5	Hubkraftkennlinien Labor	99
A.5.1	Messaufbau und Hubkraftkennlinien Drehteilmagnet	99
A.5.2	Messaufbau und Hubkraftkennlinien Stanzteilmagnet	102

Kapitel 1

Einleitung

Form, Grösse, Leistung und Wirkungsprinzipien von Aktoren sind genauso breit gefächert, wie ihre Einsatzmöglichkeiten. Neben den weit verbreiteten elektromechanischen Aktoren, sind vor allem noch hydraulische und pneumatische stark verbreitet. Das Einsatzgebiet von Aktoren reicht von mikroskopisch kleinen Anwendungen mit piezoelektrischen Aktoren bis hin zu Tonnen verschiebenden Stellmotoren. Jedes Aktorprinzip ist dabei einzigartig und nicht überall einsetzbar, genauso gibt es aber auch für die meisten Aufgabenstellungen mehr als einen Aktor.

1.1 Problemstellung

Es sind zwei Elektromagnete gegeben, die neu gestaltet werden sollen - entsprechend einer ersten Idee „Stanz- statt Drehteile“. Um dieses hohe Ziel zu erreichen soll erst der sog. Schwingmagnet, bestehend aus zwei L-förmigen Stahlteilen, die aus dem Vollen gefräst werden, einer rechteckig geformten Kupferspule, die auf eines der beiden L-förmigen Elemente aufgespresst ist, und einem Kunststoffrahmen mit dem beide Stahlelemente fest verschraubt sind, aus Stanzteilen aufgebaut werden. Dies sollte nicht weiter problematisch sein, da dieser Magnet eine rechteckige Grundform und nur wenige Funktionsmaße aufweist.

Bei erfolgreichem Abschluss dieses Projektes soll überprüft werden ob sich dieses Fertigungsverfahren für die Herstellung eines Drehteilmagneten eignet. Problematisch ist hierbei, dass auf kein Wissen bezüglich rechteckiger Hubmagnete zurückgegriffen werden kann. Aufgrund des hohen entwicklungstechnischen Risikos gilt das Projekt auch als erfolgreich abgeschlossen, falls es aus technisch oder ökonomisch nachvollziehbaren Gründen nicht möglich sein sollte, einen wesentlichen technischen oder ökonomischen Vorteil zu erarbeiten.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es zunächst theoretische Grundlagen, in Form von Simulationen, zu schaffen um den Schwingmagneten aus Stanzteilen herstellen zu können. Darauf folgend ist die Funktion des Drehteilmagneten zu untersuchen, und es soll versucht werden, mit aus anderen Fertigungsverfahren hergestellten Bauteilen und/oder einer Umgestaltung einzelner Bauteile ein technisch und ökonomisch interessantes Magnetkonzept zu erarbeiten.

1.3 Durchführung der Arbeit

Diese Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Firma Kendrion Binder Magnete GmbH, Bereich Magnetic Systems in Eibiswald. Einen wesentlichen Anteil hatten die Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung sowie die Abteilung für Industrial Engineering. Als technische Hilfsmittel standen mir zwei Rechner, Zugriff auf den Simulationsserver, ein Arbeitsplatz, sowie bei Bedarf diverse Laboreinrichtungen zur Verfügung. Speziell anzuführen sind hier noch die verwendeten Softwarepakete. Zur Simulation der magnetostatischen Eigenschaften von Elektromagneten kamen zwei Softwarepakete der Firma Ansoft Corporation zum Einsatz. Das erste ist Maxwell 2D Parametric, das zweite Maxwell 3D. Mit Maxwell 2D Parametric werden in der Regel rotationssymmetrische Elektromagnete simuliert. Der Vorteil an diesem Programm ist die Schnelligkeit gepaart mit der Möglichkeit Parameter (wie eine Bewegung) relativ leicht zu implementieren und somit die Veränderung des Magnetfeldes während der Hubbewegung darzustellen. Mit Maxwell 3D hat man unter anderem die Möglichkeit von der rotationssymmetrischen Geometrie abzuweichen. Der gravierendste Nachteil hierbei ist, dass aufgrund der 3-Dimensionalen Berechnung, der Rechenaufwand stark zunimmt, und es somit je nach Komplexität des Modells zu längeren Rechenzeiten kommt. Zusätzlich wurden noch Standard Officepakete eingesetzt, und zwar sowohl Microsoft Office als auch Suns Open Office. Die endgültige Version dieser Diplomarbeit wurde in LaTeX verfasst.

1.4 Ablauf des Projekts

Aufgrund der ursprünglichen Teilung in zwei Projekte, die beide innerhalb dieser Diplomarbeit abgehandelt werden sollten erfolgte auch eine entsprechende Nomenklatur der Projektdokumentation. Das erste der beiden Projekte, der Schwingmagnet, sollte primär dazu dienen möglichst schnell einen sehr einfach aufgebauten Elektromagneten mit Stanzteilen zu realisieren um Erfahrungen für das Hauptprojekt, einen Elektrohutmagneten, zu sammeln. Die Diplomarbeit gliederte sich zu Beginn in 4 Teile, der erste (Einschulung) und letzte (Abschlussdokumentation) waren eine Allgemeine Phase und somit auch mit einem A vor der Phasennummer gekennzeichnet. Der Schwingmagnet und dessen zugehörigen Dokumente erhielten ein S, dies war der 2. Teil der Diplomarbeit. Den 3. Teil bildete der Hubmagnet mit Bügel - daher die Bezeichnung B vor jedem Dokument. Zusätzlich war die Bearbeitung der beiden Magnetprojekte noch in je 3 Phasen unterteilt; der Parameterstudie, der Implementierung und der Umsetzung. Der endgültige Projektablaufplan (Abbildung 1.1) sah dann nach der Einschulung zwei sich teilweise überschneidende Parameterstudien-Phasen vor. Jene des Schwingmagneten bildete den Anfang und führte zusammen mit der des Bügelmagneten zu einer Vorstudie.

1.5 Resultierender Projektablauf

Noch während der Einarbeitungszeit fand ein Kundenbesuch bzgl. des Schwingmagneten statt. Aufgrund wirtschaftlicher Differenzen wurde das Projekt Schwingmagnet in der Folge verworfen, sollte aber zum Kennenlernen und besseren Verständnis elektromagnetischer Abläufe Teil der Diplomarbeit bleiben. Dennoch verschwand

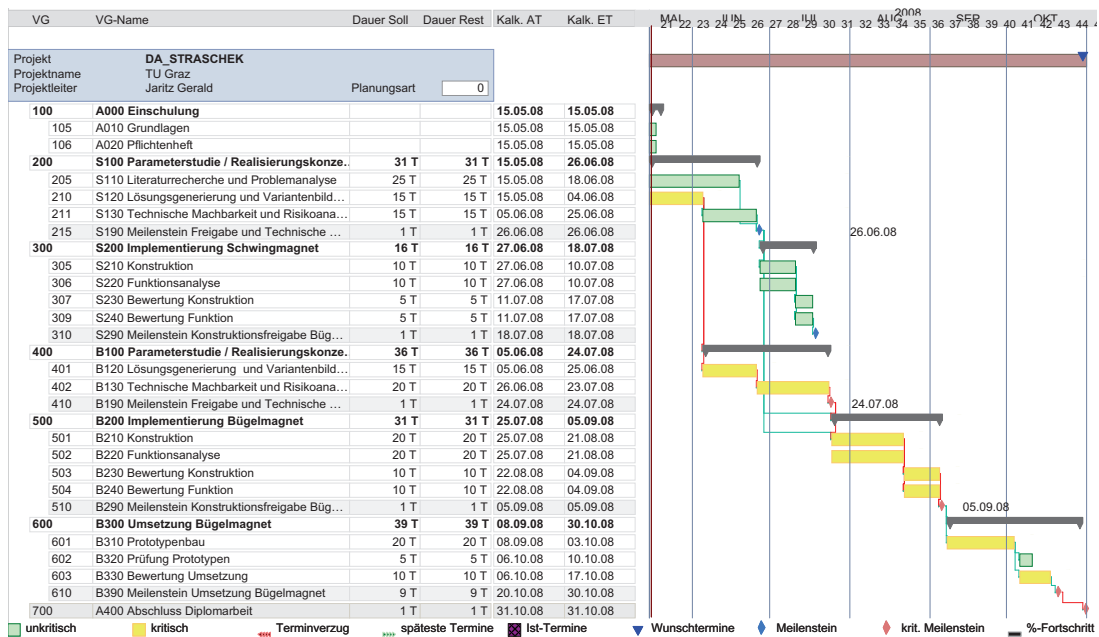


Abbildung 1.1: ursprünglicher Terminplan mit den einzelnen Phasen

das Projekt aus dem Projektablaufplan, wird allerdings in Kapitel 4.1 noch kurz behandelt.

1.6 Gliederung der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in folgende Abschnitte, die an dieser Stelle im Überblick beschrieben werden:

Theoretische Grundlagen, ab Seite 5

Dieser Abschnitt erläutert die theoretischen Grundlagen des Elektromagnetismus, der Methode der Finiten Elemente, sowie der Stanztechnik. Dies soll zum besseren Verständnis von Elektromagneten, den verwendeten Berechnungsmodellen und dem für das neue Magnetkonzept vorgesehenen Fertigungsverfahren führen.

Parameterstudie, ab Seite 29

In der Parameterstudie werden die technischen Anforderungen an das neu zu entwickelnde Magnetkonzept dargestellt. Daraus werden erste Lösungsansätze generiert und bewertet. Dies geschieht unter Zuhilfenahme technischer, Finite Elemente Methode, und wirtschaftlicher, Kostenanalyse und Schätzkalkulation, Gesichtspunkte. Neben dieser Vorauswahl eines tragfähigen Magnetkonzepts wird auch auf die möglichen Fertigungsverfahren eingegangen.

Neues Magnetkonzept, ab Seite 39

Ausgehend von der Parameterstudie wird nun das mögliche Magnetkonzept weiter verfeinert. Hierfür müssen zu Beginn grundlegende simulationstechnische Fragestellungen geklärt werden. Auch in Bezug auf die dem Konzept zu Grunde liegende

Form werden hier Untersuchungen durchgeführt. Beschlossen wird dieser Abschnitt mit einer genaueren Kalkulation und einer Risikoabschätzung.

Virtuelles Prototyping, ab Seite 48

Dieser Abschnitt widmet sich vor allem der konstruktiven Ausgestaltung des neuen Magnetkonzepts. Es wird ebenso auf die parallel zur Konstruktion ablaufende Finite Elemente Berechnung eingegangen. Eine Risikoabschätzung mittels ausführlicher FMEA¹ bildet hier den Abschluss des Abschnitts.

Umsetzung des neuen Magnetkonzeptes, ab Seite 53

In diesem Kapitel wird der Übergang vom virtuellen Prototypen zum tatsächlichen Prototypen beschrieben. Es wird sowohl auf konstruktiv bedingte Änderungen, die Lieferantenauswahl sowie auf die darauf folgenden Laboruntersuchungen eingegangen.

Bewertung des neuen Magnetkonzeptes, ab Seite 60

In der Bewertung des neuen Magnetkonzeptes wird vor allem auf die Unterschiede zwischen virtuellen und tatsächlich vorliegenden Prototypen eingegangen. Zusätzlich werden die ökonomischen Gesichtspunkte näher beleuchtet, vor allem in Bezug auf die Anzahl der zu fertigenden Elektromagnete.

Zusammenfassung und Ausblick, ab Seite 69

Im letzten Teil der Arbeit werden unabhängig von den bereits erfolgten Bewertungen im vorhergehenden Kapitel, noch einmal die Vor- und Nachteile zusammengefasst und beleuchtet. Auch wird hier ein Ausblick auf potentielle Optimierungsmöglichkeiten sowie Applikationsmöglichkeiten gegeben.

¹FMEA, Failure Mode and Effects Analysis

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

Bei den theoretischen Grundlagen wird zwar kurz auf die allgemeinen Grundlagen der Elektrotechnik, der Finite Elemente Rechnung und der Stanztechnik eingegangen, es ist jedoch nicht Sinn und Zweck dieser Arbeit ein Lehrbuch zu ersetzen. Aus diesem Grund beschränken sich die Grundlagen, auf denen die vorliegende Arbeit beruht, nur auf die hier im Detail angeführten Themen.

2.1 Grundlagen Elektromagnete

Üblicherweise beruht das Wirkungsprinzip von Elektromagneten auf dem sogenannten Reluktanzprinzip [1], dies bedeutet, dass im Gegensatz zu anderen magnetischen Aktoren, die sich die Lorentzkraft zu Nutze machen, hier die Grenzflächenkräfte genutzt werden. Somit versuchen Elektromagnete immer in eine stabile Endlage zu kommen. Da dies in der Regel eine einseitige Bewegung ist, muss die Rückführung über von aussen wirkende Kräfte (z.B. Federkräfte) geschehen [2].

2.1.1 Elektromagnetische Kräfte / Wirkprinzip

Um einen stromdurchflossenen Leiter bildet sich ein Magnetfeld aus. Nimmt man zum Beispiel einen unendlich langen stromdurchflossenen Leiter, so bildet sich ein Magnetfeld, dessen Feldbild aus konzentrischen Kreisen aufgebaut ist. (siehe Abbildung 2.1)

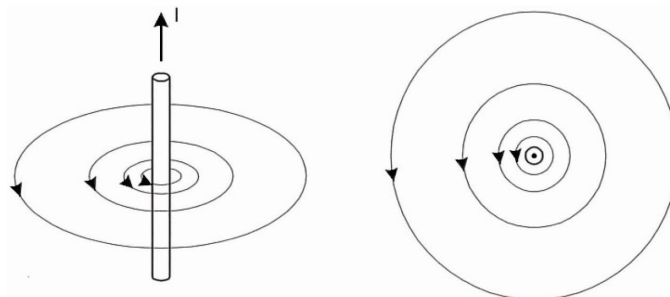


Abbildung 2.1: Magnetfeld eines unendlich langen stromdurchflossenen Leiters [2]

Die magnetische Feldstärke¹, \vec{H} , und die magnetische Flussdichte², \vec{B} , beschreiben das magnetische Feld. Folgt man dem Durchflutungsgesetz, dann gilt für das Linienintegral der magnetischen Feldstärke für einen Umlauf um den Leiter:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I = \Theta. \quad (2.1)$$

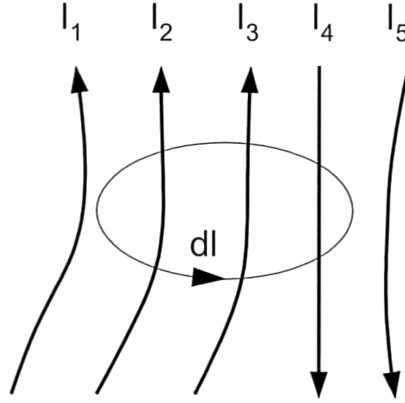


Abbildung 2.2: Durchflutung in mehreren stromdurchflossenen Leitern [2]

Zu beachten ist außerdem die Ausrichtung bzw. die Drehrichtung des magnetischen Feldes, es gilt hierbei die so genannte Rechtsschraubregel. Da die Summe der Ströme die von dem Umlaufweg berandete Fläche durchflutet, wird diese Stromsumme auch als Durchflutung³, Θ , bezeichnet. Für Abbildung 2.2 ergibt sich somit,

$$\Theta = I_2 + I_3 - I_4. \quad (2.2)$$

In Abbildung 2.3 ist ein einfacher magnetischer Kreis dargestellt. Berechnet man für die dort verwendete Spule die Durchflutung, so ist diese das Produkt aus Strom, I , und Windungszahl, w - wobei es für das magnetische Feld egal ist ob die Spule aus 1000 Windungen besteht, die mit 1 A bestromt wird, oder ob 100 Windungen mit je 10 A betrieben werden,

$$\Theta = w \cdot I. \quad (2.3)$$

Das Linienintegral der magnetischen Feldstärke ist, analog zur elektrischen Spannung, eine magnetische Spannung. Für die magnetische Spannung, $V_{1,2}$, zwischen den Punkten P_1 und P_2 gilt,

$$V_{1,2} = \int_{P_1}^{P_2} \vec{H} d\vec{l}. \quad (2.4)$$

Der Zusammenhang von magnetischer Feldstärke, \vec{H} , und magnetischer Flussdichte, \vec{B} , wird mit,

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (2.5)$$

beschrieben.

¹Der Skalar der magnetischen Feldstärke \vec{H} wird in A/m angegeben.

²Der Skalar der magnetischen Flussdichte \vec{B} wird in Vs/m² bzw. Tesla, T, angegeben. 1T = 1Vs/m².

³Die Durchflutung wird mit Θ gekennzeichnet und in Ampere, A, gemessen.

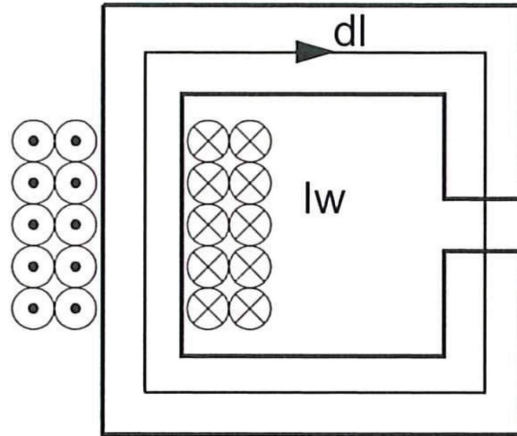


Abbildung 2.3: einfacher Magnetkreis [2]

Der Proportionalitätsfaktor, μ , zwischen Feldstärke, \vec{H} , und Flussdichte, \vec{B} , wird als Permeabilität bezeichnet. Die Permeabilität kennzeichnet den Einfluss verschiedener Materialien auf das magnetische Feld. Im allgemeinen Fall wird dieser Zusammenhang zwischen \vec{B} und \vec{H} durch eine Vektorfunktion mit einer richtungs-, orts- und feldstärkeabhängigen Permeabilität (Tensorgröße) bezeichnet. Die Richtungsabhängigkeit tritt bei anisotropen Stoffen, die Ortsabhängigkeit bei inhomogenen Stoffen und in Feldstärkeabhängigkeit bei nichtlinearen Stoffen auf.

Mit der relativen Permeabilität⁴, μ_r , in Kombination mit der Induktionskonstanten⁵, μ_0 , kann die absolute Permeabilität, μ , dargestellt werden. Die absolute Permeabilität, μ , ergibt sich dann,

$$\mu = \mu_0 \mu_r. \quad (2.6)$$

Die Differenz zwischen der magnetischen Flussdichte, \vec{B} , und dem Wert $\mu_0 \vec{H}$ wird als magnetische Polarisation, \vec{P}_m , bezeichnet,

$$\vec{P}_m = \vec{B} - \mu_0 \vec{H}. \quad (2.7)$$

Die magnetische Polarisation kennzeichnet somit den Beitrag, den das magnetische Material zur magnetischen Flussdichte leistet.

Die Magnetisierung, \vec{M} , definiert sich aus,

$$\vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H}. \quad (2.8)$$

Neben der Permeabilität, μ , wird auch die magnetische Suszeptibilität, χ , verwendet,

$$\chi = \mu_r - 1. \quad (2.9)$$

Ist die Permeabilität eines Stoffes von der magnetischen Feldstärke unabhängig spricht man von einem linearen Verhalten des Stoffes im Magnetfeld. Die üblicherweise verwendeten Eisenwerkstoffe zeigen hingegen einen nichtlinearen Verlauf. Der Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke und magnetischer Flussdichte ist bei diesen Materialien nicht linear und nicht eindeutig. Zum einen durch die Neumagnetisierung und dem danach folgenden Hystereseverhalten - siehe Abbildung 2.4.

⁴Die relative Permeabilität, μ_r , ist ein stoffspezifischer dimensionsloser Faktor

⁵Die Induktionskonstante, auch magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Vs/Am}$

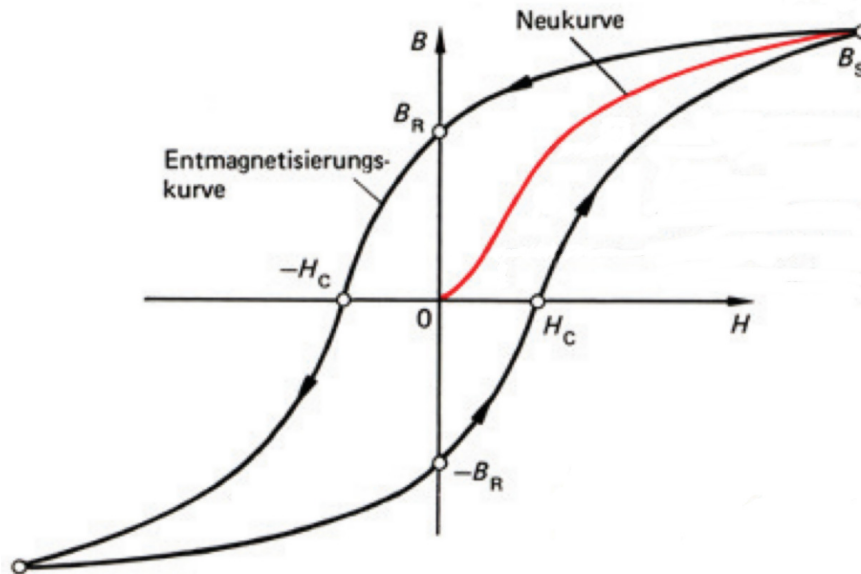


Abbildung 2.4: B-H-Kennlinie eines Eisenmaterials mit Restmagnetisierung, B_R , Koerzitivfeldstärke, H_C , und Neukurve [3]

2.1.2 Prinzipieller Aufbau eines Elektromagneten

Es hat sich im Laufe der Entwicklung der Elektromagnete trotz vieler unterschiedlicher konstruktiver Ausführungen ein einfaches Grundprinzip durchgesetzt.

Elektromagnete sind aus einer Spule und einem Eisenkreis mit dazugehörigem Arbeitsluftspalt aufgebaut. Der magnetische Kreis besteht in der Regel aus einem Anker, dem beweglichen Teil und einem Polkern, dem still stehenden auch Stator genannten Teil. Die Erregerspule besteht aus der Wicklung eines elektrisch isolierten stromdurchflossenen Leiters. Dieser meist aus Kupfer bestehende Leiter benötigt eine Isolation um Kurzschlüsse bzw. den sog. „Wicklungsschluss“ zu vermeiden. Nimmt man aus mehreren Elektromagneten zusammengesetzte Aktoren und elektromagnetische Schrittmotoren aus, so lassen sich Magnete im Wesentlichen in Topf-, U- und E-Magnete unterteilen, siehe auch Abbildung 2.5.

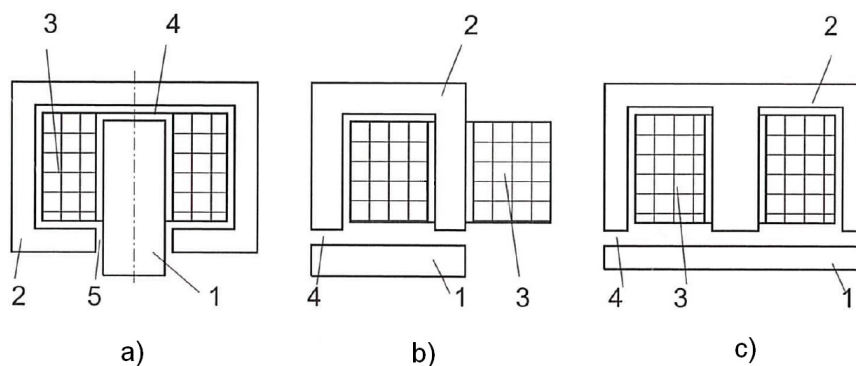


Abbildung 2.5: Grundformen von Elektromagneten: a) Topfmagnet, b) U-Magnet, c) E-Magnet, 1 Anker, 2 Polkern, 3 Erregerspule, 4 Arbeitsluftspalt, 5 parasitärer Luftspalt [2]

Ein wesentliches Kriterium für die Bewegung des Ankers und die Kraftaufbringung eines Magneten ist die Art und Größe des Arbeitsluftspaltes. Zu beachten ist bei der Gestaltung der Luftspalte aber auch, dass die parasitären Luftspalte so klein als möglich gehalten werden. Parasitäre Luftspalte sind solche, die das Magnetfeld zwar überbrücken muss, die sich aber infolge der Relativbewegungen der Bauteile untereinander nie ändern. Es tritt an diesen Spalten also ein erhöhter Widerstand auf, der den magnetischen Fluss behindert und somit die Leistung des Magneten verringert.

2.1.3 Technische Parameter

Es gibt zahlreiche wichtige Parameter bei der Gestaltung von Elektromagneten, doch haben für die grundlegende Auslegung nur wenige eine technische Relevanz. Der wichtigste Parameter ist die Hubkraftkennlinie, welche durch die Art des Materials und die Form des Arbeitsluftspaltes, der durch die Konusgeometrie definiert wird, wesentlich beeinflusst wird.

Materialkennwerte

Die Materialeigenschaften spielen eine wesentliche Rolle bei der Funktion eines Elektromagneten. Prinzipiell unterteilt man die magnetischen Werkstoffe in; dia-, para-, ferro-, ferri- und antiferromagnetisch.

Diamagnetisch ($\mu_r < 1$) Bringt man einen Stoff in ein magnetisches Feld, so induziert dieses in den Elektronenhüllen der Atome einen Strom, dessen Magnetfeld dem äußeren entgegengerichtet ist. In einem diamagnetischen Werkstoff schwächt sich also ein Magnetfeld ab.

Paramagnetisch ($\mu_r > 1$) Die Atome, Ionen oder Moleküle dieses Werkstoffs besitzen ein magnetisches Moment und richten sich parallel zum von außen wirkenden Magnetfeld aus. Dies bewirkt eine Verstärkung des Magnetfeldes im Material. Beim idealen paramagnetischen Werkstoff bricht das innere Magnetfeld komplett zusammen nachdem das äußere aufhört zu wirken.

Ferromagnetisch ($\mu_r \gg 1$) Sind die magnetischen Momente der einzelnen Teilchen nicht voneinander unabhängig, sondern richten sich spontan selbst parallel aus, so spricht man von Ferromagnetismus. Diese Kopplung ist aber nicht auf das ganze Material wirksam, sondern innerhalb der so genannten Weisschen Bezirke. Die Ausrichtung dieser ist statistisch gesehen so verteilt, dass der Gesamtkörper unmagnetisch erscheint. Durch ein äußeres Magnetfeld kann man aber die Weisschen Bezirke ausrichten. Dieses Gleichrichten bleibt im Gegensatz zum paramagnetischen Material allerdings auch nach dem Abschalten des äußeren Magnetfeldes erhalten. Man kann aber durch ein Erhitzen über die ferromagnetische Curie-Temperatur diese Magnetisierung wieder aufheben.

Ferrimagnetisch ($\mu_r \gg 1$) Auch hier sind die magnetischen Momente nicht ganz von einander unabhängig. Die Atommomente sind teilweise gegenseitig ausgerichtet, so dass sie sich gegenseitig kompensieren.

Antiferromagnetisch ($\mu_r > 1$) Ähnlich den ferrimagnetischen Werkstoffen. Bei diesen Werkstoffen tritt aber eine vollständige Kompensation der Atommomente auf, d.h. makroskopisch ist an diesen Werkstoffen keine Magnetisierung messbar.

Für eine genauere Einteilung der sehr wichtigen Ferro- und Ferrimagnetischen Werkstoffe in hart- bzw. weichmagnetische⁶ Werkstoffe ist auf die Koerzitivfeldstärke H_c ⁷ zu achten. Anhand der technisch sehr wichtigen BH-Kennlinie kann man diesen Unterschied in Abbildung 2.6 gut erkennen.

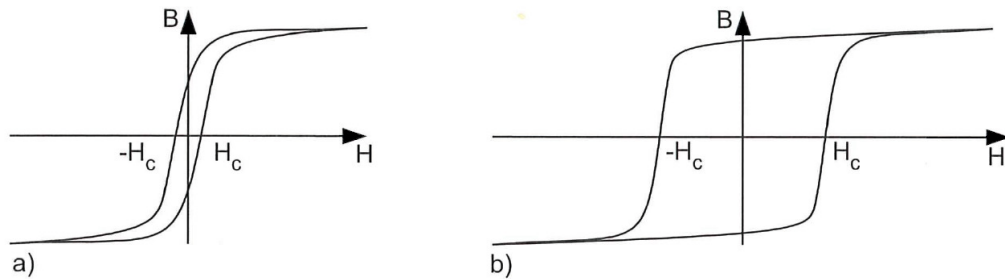


Abbildung 2.6: Qualitativer Verlauf der Hysteresekurve eines a) weichmagnetischen bzw. b) hartmagnetischen Werkstoffes [2]

Die Magnetisierungskurve (BH-Kennlinie/Hysteresese) kann auch für dia- und paramagnetische Materialien angeführt werden, hierbei handelt es sich dann um eine Gerade, die durch den Koordinatenursprung verläuft. Theoretisch müsste man für eine vollständige Beschreibung des magnetischen Verhaltens eines ferro- bzw. ferrimagnetischen Werkstoffes eine Magnetisierungskurve für jede mögliche Aussteuerung angeben. Allerdings ist es innerhalb der technisch üblichen Anwendungen ausreichend wenn man nur einige charakteristische Magnetisierungskurven, wie die Neukurve, Kommutierungskurve oder Grenzkurve angibt.

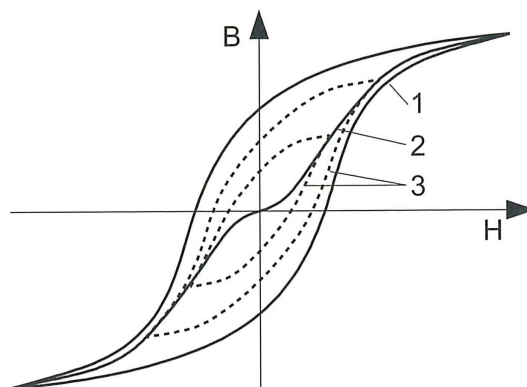


Abbildung 2.7: Grenzkurve (1), Kommutierungskurve (2), und innere symmetrische Hystereseschleifen (3) eines ferromagnetischen Werkstoffes [2]

⁶hartmagnetische Werkstoffe behalten nach ihrer Magnetisierung ein Magnetfeld über einen langen Zeitraum (Permanentmagnete), wohingegen weichmagnetische ihres verlieren und leicht ummagnetisierbar sind.

⁷Unter der Koerzitivfeldstärke versteht man das Feld H_c , welches erforderlich ist, um die Magnetisierung bzw. die Induktion, \vec{B} , zum Verschwinden zu bringen. [4]

Die Neukurve entsteht nur, wenn ein entmagnetisierter Werkstoff einem stetig steigenden magnetischen Feld ausgesetzt ist [5], siehe Abbildung 2.4 und 2.7.

Die Kommutierungskurve entsteht durch die Verbindung der Umkehrpunkte (Abbildung 2.7) der inneren Hystereseschleifen bei symmetrischer Aussteuerung [2].

Die Grenzkurve ist jene Hystereseschleife, die bei symmetrischer Aussteuerung des Materials bis zur Sättigung aufgezeichnet wird [2], siehe auch Abbildung 2.7.

Konusgeometrie

Durch die sogenannte Konusgeometrie versucht man den Arbeitsluftspalt entsprechend seinen Bedürfnissen bezüglich des Hubkraftkennlinienverlaufes zu gestalten. Wie in Abbildung 2.8 zu erkennen ist, ist ein Konus nicht zwangsläufig ein, wie man ursprünglich vielleicht erwartet, kegelförmiges Gebilde, sondern kann sehr unterschiedlich geformt sein.

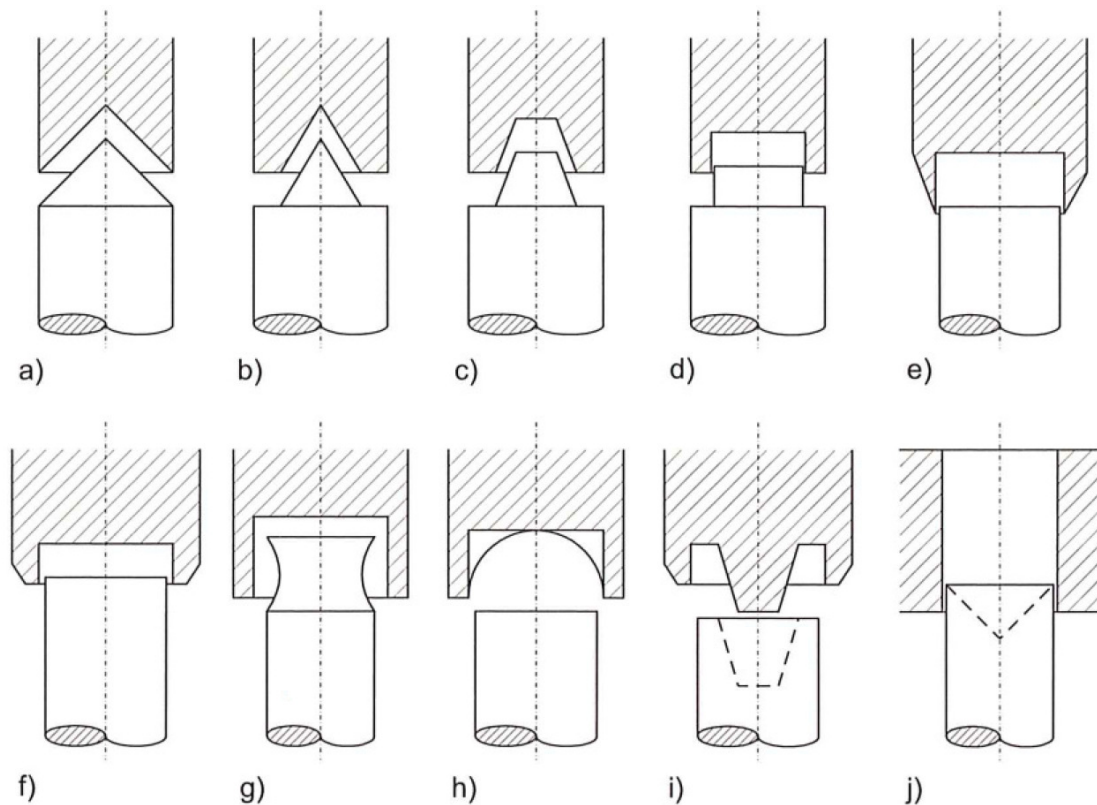


Abbildung 2.8: Häufig verwendete Ausführungen von Anker-Polkern Systemen bei Bügelmagneten zur Beeinflussung der Hubkraftkennlinie [2]

Hubkraftkennlinie

Der Hubkraftkennlinie kommt bei der Auslegung eines Elektromagneten besondere Aufmerksamkeit zu. Wie auch bei jedem anderen Kraft-Weg Diagramm ist die Fläche unter dieser Kurve gleich der Arbeit, nimmt man die Zeit für den zurückgelegten Weg mit in Betracht, ist es ein Einfaches die Leistung zu bestimmen. Meist wird aber direkt nach einer bestimmten Kraft verlangt und weniger nach einer Leistung. Die richtige Beeinflussung der Hubkraftkennlinie über die konstruktive Gestaltung des Arbeitsluftspaltes bedarf einiger Erfahrung, denn wie im folgenden Abschnitt 2.2 zu erkennen ist, sind die mathematischen Zusammenhänge bei komplexeren Formen nicht trivial. In Abbildung 2.9 sind einige einfache Zusammenhänge für unterschiedliche Anker-Polkernkombinationen zu sehen.

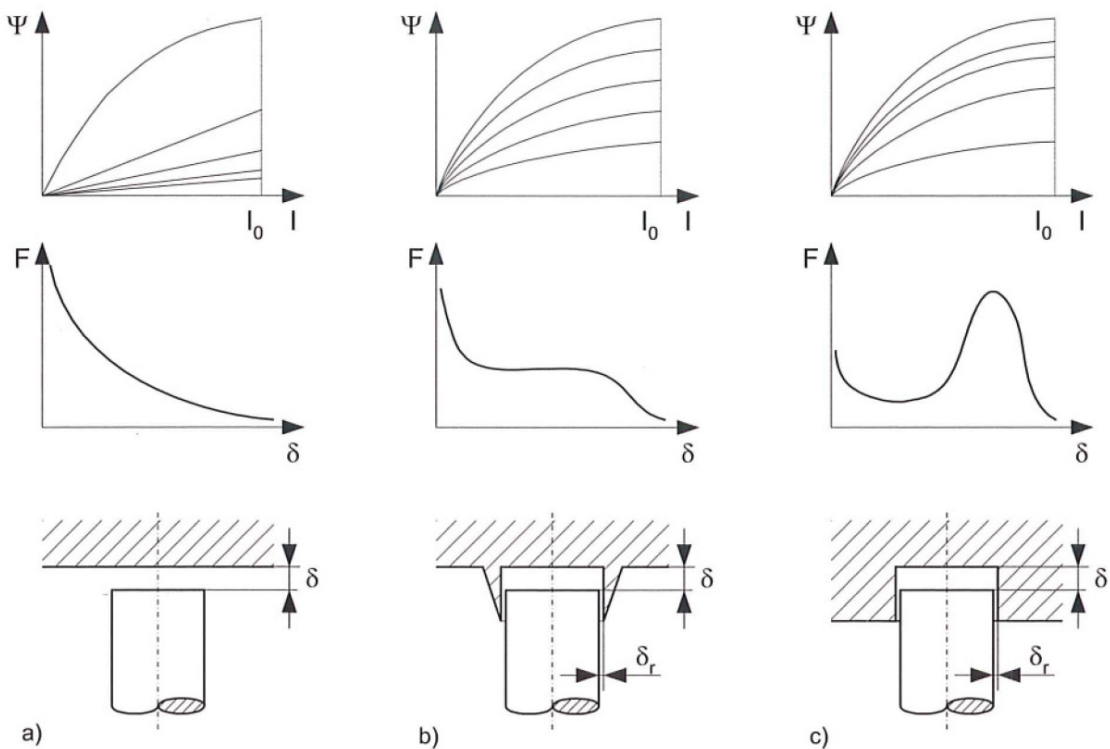


Abbildung 2.9: Qualitativer Verlauf der Hubkraftkennlinie und der Energieänderung im Ψ -I-Kennlinienfeld bei unterschiedlichen Polkernstücken [2]

Der verkettete Fluss, Ψ , der in Weber, Wb, bzw. Vs angegeben wird, ergibt sich aus der Windungszahl, w , und dem magnetischen Fluss, Φ ,

$$\Psi = w\Phi. \quad (2.10)$$

Der magnetische Fluss, Φ , ergibt sich aus der magnetischen Flussdichte, \vec{B} , und der durchflossenen Fläche, \vec{A} , bzw. aus dem magnetischen Widerstand, R_m , und der magnetischen Spannung, U_m ,

$$\begin{aligned} \Phi &= \int_A \vec{B} d\vec{A}, \\ \Phi &= \frac{U_m}{R_m}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.2 Grundlagen Finite Elemente

Die Basis für eine aussagekräftige Simulation von magnetischen Problemstellungen bildet auf der einen Seite das mathematische Modell der Finiten Elemente Methode und auf der anderen Seite genau definierte physikalische Gesetze, welche in diesem Fall die Maxwell'schen Gleichungen in differentieller Form darstellen. Schlussendlich benötigt man natürlich auch noch ein Programmpaket mit entsprechenden Schnittstellen um dies alles umzusetzen, was in der hier vorliegenden Diplomarbeit mittels Maxwell 2D und 3D geschah.

2.2.1 Differentielle Maxwell'sche Gleichungen

Aus den Grundgesetzen der Elektrizität und des Magnetismus lassen sich unter Zuhilfenahme des Nabla Operators [6],

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial}{\partial z} \vec{e}_z, \quad (2.12)$$

der einen symbolischen Vektor [7] darstellt, die folgenden vier Differentialgleichungen ableiten [8]:

Coulomb'sches Gesetz,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho, \quad (2.13)$$

Ampère'sches Durchflutungsgesetz ($\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$),

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}, \quad (2.14)$$

Faraday'sches Induktionsgesetz,

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0, \quad (2.15)$$

und das nichtvorhandensein freier magnetischer Ladungen,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0. \quad (2.16)$$

Die elektrische Flussdichte, \vec{D} , und die elektrische Feldstärke, \vec{E} , hängen über die Permittivität ⁸, ϵ , zusammen, [9]

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}. \quad (2.17)$$

Das magnetische Feld, \vec{B} , und dessen abgeleitete Feldgröße, \vec{H} , sind über die Magnetisierung, \vec{M} , des betreffenden Materials, sowie die Induktionskonstante, μ_0 , definiert [8],

$$\vec{M} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{H}. \quad (2.18)$$

Die Raumladungsdichte einer ruhenden Ladungsverteilung ist ρ_0 , die wegen der Längenkontraktion vergrößerte Raumladungsdichte für eine beliebige Geschwindigkeit,

⁸Die Permittivität $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, hierbei ist ϵ_0 die elektrische Feldkonstante und ϵ_r , die Permittivitätszahl, welche den Einfluss der Materie auf das elektrische Feld beschreibt.

\vec{u} , der Ladungsverteilung ist ρ . Die Einheit der Raumladungsdichte wird in Cm^{-3} angegeben [10].

Bewegt sich nun die freie Raumladungsdichte, ρ_f , mit der Geschwindigkeit, \vec{u} , ergibt sich die freie elektrische Stromdichte,

$$\vec{j}_f = \rho_f \vec{u} = \frac{\partial Q}{\partial V} \frac{\partial \vec{x}}{\partial t} = I_{(t)} \frac{\partial \vec{x}}{\partial t}, \quad (2.19)$$

mit der Einheit $\text{Cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ [10].

Die aus der Bewegung der freien Ladung resultierende Stromdichte, \vec{j}_f , die Polarisationsstromdichte in einem Dielektrikum, $\partial \vec{P} / \partial t$, und die äquivalente Stromdichte, $\vec{\nabla} \times \vec{M}$, führen zur gesamten Stromdichte,

$$\vec{J} = \vec{j}_f + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \vec{\nabla} \times \vec{M}, \quad (2.20)$$

mit der Einheit Am^{-2} [11].

Aus der gebundenen Ladungsdichte, $\rho_b = -\vec{\nabla} \cdot \vec{P}$, und der freien Ladungsdichte, ρ_f , ergibt sich die gesamte Ladungsdichte [11],

$$\rho = \rho_b + \rho_f. \quad (2.21)$$

Mit Ausnahme des Faraday'schen Induktionsgesetzes stammen die Gleichungen 2.13 - 2.16 aus der Beobachtung von stationären Vorgängen. Man kann daher nicht davon ausgehen, dass diese Gleichungen auch für zeitabhängige Felder gelten. Tatsächlich ist das Gleichungssystem nicht konsistent, was von James Clerk Maxwell 1865 entdeckt und später durch Experimente gezeigt wurde. Das nach ihm benannte modifizierte Gleichungssystem, die Maxwell'schen Gleichungen,

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad , \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad , \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0, \end{aligned} \quad (2.22)$$

bilden die Basis für die Finite Elemente Berechnung von elektromagnetischen Problemstellungen.

2.2.2 Diskretisierung und Modellbildung

Bei der Verwendung von finiten Elementen unterteilt man ein zu untersuchendes Gebiet, G , in endlich viele Teilgebiete (finite Elemente) [13]. Bei der Zerlegung eines Gebietes in konvexe Polygone ist zu beachten, dass sich die entstehenden Elemente nicht überlappen und das gesamte Gebiet ausgefüllt wird.

Die hier verwendete Software zerlegt zunächst das Untersuchungsgebiet mittels der Voronoi-Zerlegung, siehe Abbildung 2.10 und 2.11. Hierbei geht man von einem stationären Punktprozess, S , auf der Ebene, \mathbb{R}^2 , aus. Man zerlegt nun die Ebene so, dass jeweils alle Punkte die näher bei einem erzeugenden Punkt, x_i , liegen zueinander gehören, und eine Menge, $N(x_i)$, die sogenannte Zelle der Zerlegung, bilden.

⁹Die elektrische Ladung, Q , und das Volumen, V , ergeben den Strom, I , zum Zeitpunkt, t , $\rightarrow I_{(t)} = \frac{\partial Q}{\partial t}$

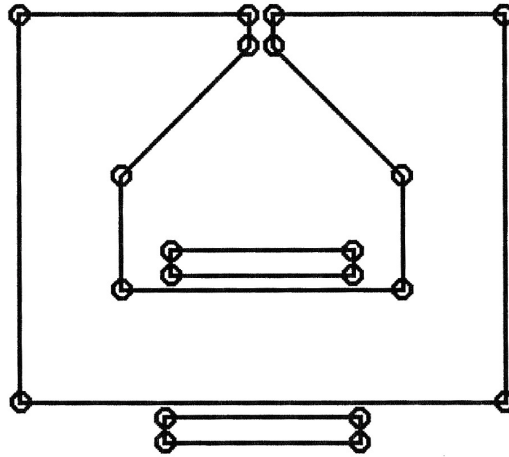


Abbildung 2.10: Umrissdarstellung des zu lösenden Gebiets, dient als Ausgangspunkt für die Voronoi-Zerlegung [12]

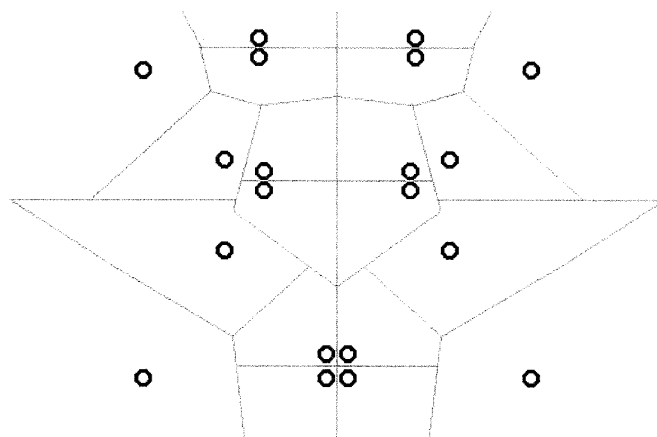


Abbildung 2.11: Voronoi Polygone [12]

Diese Flächen werden nun dadurch berechnet, dass zwischen x_i und alle umgebenden Punkte jeweils die Mittelsenkrechte konstruiert wird. Die gesuchte Fläche liegt (von x_i aus gesehen) innerhalb aller umgebenden Mittelsenkrechten, d.h. die Mittelsenkrechten bilden die Korngrenzen.

Man kann jeder Voronoi-Zerlegung eine Delaunay-Triangulation zuordnen. Mittels der Delaunay-Triangulation werden nun die Punkte miteinander verbunden (Abbildung 2.12), deren zugehörige Flächen aneinander liegen [14].

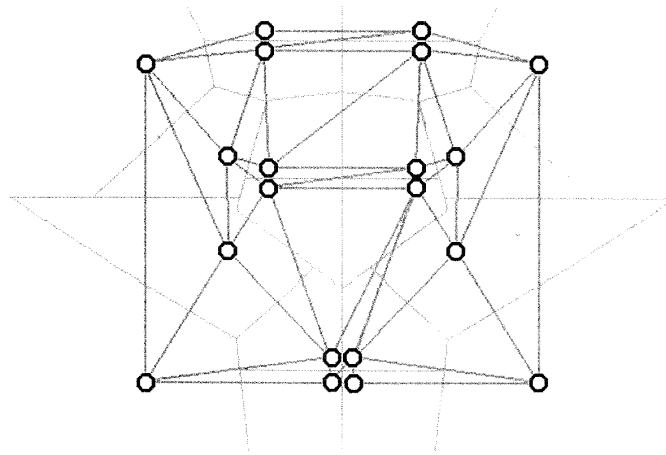


Abbildung 2.12: Delaunay Triangulierung [12]

Die Delaunay-Triangulation zerlegt die konvexe Hülle einer Menge an vorgegebenen Punkten so, dass im Inneren des Umkreises jedes einzelnen Dreieckes kein Punkt liegt (Abbildung 2.13). Bei der Verwendung der Delaunay-Triangulation im zweidimensionalen Fall gilt hierbei die bemerkenswerte Eigenschaft, dass unter allen möglichen Triangulierungen der vorgegebenen Punkte, der minimale Innenwinkel aller erzeugten Dreiecke maximiert wird. Diese Erkenntnis hat Bedeutung in Hinsicht auf die Konvergenztheorie [15].

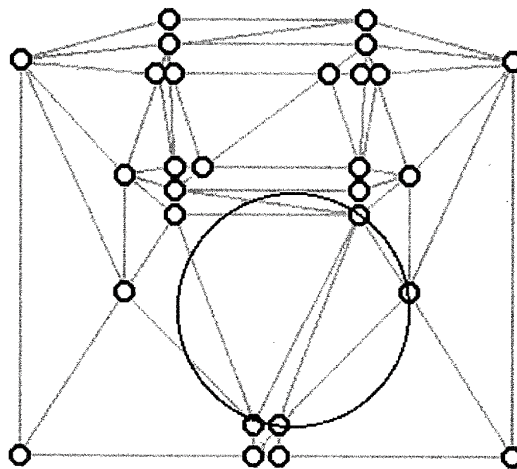


Abbildung 2.13: Umkreisbedingung der Delaunay Triangulierung [12]

2.2.3 Approximation und Variation

Nach der Diskretisierung ist es nun nötig mit den Maxwell Gleichungen (2.22) aus Abschnitt 2.2.1 mit Hilfe einer Interpolationsfunktion, eine Annäherung an die noch unbekannte Lösung, $\kappa = \kappa(x, y, z)$, für jedes Element zu finden. Im Fall einer zwei-dimensionalen Umgebung sind nun für 6 Punkte (3 Eckpunkte und 3 Mittelpunkte), bei einer dreidimensionalen Betrachtung für 10 Punkte die Lösungen der Feldgleichungen zu finden. Zur Approximation wird hier ein Polynom 2. Grades [16],

$$\kappa^e(x, y) = a^e + b^e x + c^e y + d^e x^2 + e^e xy + f^e y^2, \quad (2.23)$$

verwendet. Das elektrostatische Feld wird durch,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.24)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0, \quad (2.25)$$

beschrieben [8]. Geht man nun äquivalent zu der Feststellung vor, dass der Gradient einer skalaren Funktion das Skalarpotential ist, und setzt hierfür \vec{E} und Φ , so ergibt sich aus Gleichung 2.25:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\Phi. \quad (2.26)$$

Aus den Gleichungen 2.24 und 2.26 ergibt sich dann die Poisson Gleichung,

$$\vec{\nabla}^2 \Phi = \frac{-\rho}{\epsilon_0}. \quad (2.27)$$

Diese wird, vergleiche [12], in folgende Energiegleichung, $K(\Phi)$, übergeleitet,

$$K(\Phi) = \frac{1}{2} \int \left(\frac{\vec{\nabla}\Phi \cdot \vec{\nabla}\Phi}{\rho} + \Phi \cdot \epsilon_0 \right) dV. \quad (2.28)$$

Hieraus geht nun, bei Ansetzen der Bedingungen für jedes Dreieck, ein zu lösendes Gleichungssystem in Matrixform hervor,

$$\mathbf{A}\vec{x} = \vec{b}. \quad (2.29)$$

2.2.4 Lösung und Fehlerabschätzung

Zur Lösung des Gleichungssystems bietet die verwendete Software die Wahl zwischen dem Gauss Eliminations Verfahren (sog. direct solver) und dem Incomplete Choleski Conjugate Gradient Verfahren (sog. ICCG iterative solver).

Ausgehend von einem linearen Gleichungssystem,

$$\begin{array}{cccccc} a_{1,1}x_1 & + & a_{1,2}x_2 & + & \dots & + & a_{1,n}x_n & = & b_1 \\ a_{2,1}x_1 & + & a_{2,2}x_2 & + & \dots & + & a_{2,n}x_n & = & b_2 \\ \vdots & & \vdots & & \ddots & & \vdots & & \vdots \\ a_{m,1}x_1 & + & a_{m,2}x_2 & + & \dots & + & a_{m,n}x_n & = & b_m \end{array} \quad (2.30)$$

bestehend aus m linearen Gleichungen mit n Unbekannten x_1, \dots, x_n , mit den Koeffizienten $a_{i,j} \in \mathbb{R}$ und den Absolutgliedern $b_i \in \mathbb{R}$. Man kann hierfür nach dem

Zerlegen in die Koeffizientenmatrix, \mathbf{A} , den Spaltenvektor, \vec{x} , mit den unbekanntenen Komponenten, x_i , und den Spaltenvektor, \vec{b} , auch kurz,

$$\mathbf{A}\vec{x} = \vec{b}, \quad (2.31)$$

schreiben. Wenn $\vec{b} = 0$ spricht man von einem homogenen Gleichungssystem [7].

Gaußsches Eliminationsverfahren

Die Grundidee dieses Lösungsverfahrens ist es, $\mathbf{A}\vec{x} = \vec{b}$ mit der $\det(\mathbf{A}) \neq 0$ zu transformieren um auf ein oberes Dreieckssystem $\mathbf{U}\vec{x} = \vec{c}$ zu kommen, ohne dabei die Lösung, \vec{x} , zu verändern. Dann wird $\mathbf{U}\vec{x} = \vec{c}$ durch Rückwärtssubstitution gelöst [7][17].

Um die Lösung eines Gleichungssystems nicht zu verändern, gibt es drei Möglichkeiten der Umformung,

- das Subtrahieren des Vielfachen einer Gleichung von einer anderen,
- das Vertauschen zweier Gleichungen, oder
- die Multiplikation einer Gleichung mit einer Zahl $\alpha \neq 0$.

Incomplete Choleski Conjugate Gradient Verfahren

Das ICCG-Verfahren ist ein CG-Verfahren¹⁰ mit einer speziellen Aufbereitung der Ausgangsmatrix, der sogenannten Vorkonditionierung, in diesem Fall ist es die unvollständige Cholesky-Zerlegung. Voraussetzung für die Anwendung des CG-Verfahrens ist, dass die Koeffizientenmatrix, \mathbf{A} , hermitesch¹¹ und positiv definit¹² ist [18].

Cholesky-Zerlegung Die hier verwendete Art der Cholesky-Zerlegung ist ein Spezialfall und bedarf einer symmetrischen und positiv definiten Koeffizientenmatrix. Ausgehend vom linearen Gleichungssystem,

$$\mathbf{A}\vec{x} = \vec{b},$$

berechnet man die Cholesky Zerlegung von \mathbf{A} ,

$$\mathbf{A}\vec{x} = \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \vec{x} = \vec{b}. \quad (2.32)$$

Man setzt nun

$$\vec{y} = \mathbf{C}\vec{x} \quad (2.33)$$

und berechnet \vec{y} aus

$$\mathbf{C}^T\vec{y} = \vec{b}. \quad (2.34)$$

Und schlussendlich \vec{x} aus,

¹⁰CG, Konjugierte Gradienten Verfahren

¹¹Eine quadratische Matrix, \mathbf{A} , ist hermitesch, wenn $\mathbf{A} = \overline{\mathbf{A}}^T$ und $\overline{a_{i,k}} = a_{k,i}$ - Realteil symmetrisch, Imaginärteil schief-symmetrisch [6]

¹²Eine Matrix \mathbf{A} heisst dann positiv definit, wenn für jedes $x \neq 0$ stets $q(x) > 0$ folgt [7]

$$\mathbf{C}\vec{x} = \vec{y}. \quad (2.35)$$

Zwar ist es hierbei auch nötig das vorgegebene Gleichungssystem in zwei Systeme mit jeweils einer Dreiecksmatrix aufzuteilen, doch ist das einmal die Matrix, \mathbf{C} , und einmal die transponierte Matrix, \mathbf{C}^T , was zumindest keinen neuen Speicher im Rechner benötigt [19].

CG-Verfahren Hier wird auf einen allgemeinen Orthogonalitätsbegriff zurück gegriffen, der dem Problem angepasst ist. Ist \mathbf{A} symmetrisch und positiv definit, dann sind \vec{x} und \vec{y} konjugiert, wenn

$$\vec{x}^T \mathbf{A} \vec{y} = 0. \quad (2.36)$$

Der Grundgedanke dieser Methode besteht darin, statt das vorgegebene Gleichungssystem $\mathbf{A}\vec{x} = \vec{b}$ stur zu lösen, das Funktional,

$$\mathbf{N}(\vec{x}) = \frac{1}{2} \vec{x}^T \mathbf{A} \vec{x} - \vec{b}^T \vec{x} \quad (2.37)$$

schrittweise zu minimieren.

Der Gradient dieses Funktionals entspricht,

$$\text{grad} \mathbf{N}(\vec{x}) = \mathbf{A} \vec{x} - \vec{b}. \quad (2.38)$$

Ist das Funktional ein Minimum bei \vec{x}_0 , so verschwindet der Gradient an dieser Stelle,

$$\text{grad} \mathbf{N}(\vec{x}_0) = \mathbf{A} \vec{x}_0 - \vec{b} = 0, \quad (2.39)$$

und somit ist \vec{x}_0 die gesuchte Lösung.

Bei der Durchführung dieses Verfahrens ist zu beachten, dass der Vektor $\vec{r} = \mathbf{A}\vec{x} - \vec{b}$, der sogenannte Residuenvektor, gerade gleich dem Gradienten des Funktionals, \mathbf{N} , ist [19].

Fehlerabschätzung Die Abschätzung des Berechnungsfehlers geschieht über das Einsetzen der approximierten Lösung in die Poisson Gleichung (2.27),

$$\vec{\nabla}^2 \mathbf{A}^{\text{approx}} + \mu \mathbf{J} = R. \quad (2.40)$$

Da \mathbf{A} ja eine quadratische Funktion ist, ist R eine Konstante in jedem Dreieck. Der lokale Fehler in jedem Dreieck ist also proportional zu R . Summiert man die lokalen Fehler in jedem Dreieck und dividiert sie durch die gesamte Energie, so erhält man den gesamten Fehler,

$$\text{Fehler} = \sum_{i=1}^n \frac{|R(\text{lokal})_i|}{\text{Gesamtenergie}}. \quad (2.41)$$

Der Nachteil hieran ist logischerweise, dass an einzelnen lokalen Stellen bedeutende Fehler verbleiben können [12].

Verfeinerung Nach der Ermittlung des relativen Fehlers startet die Software automatisch den Verfeinerungsprozess, d.h. das aufgespannte Netz wird verfeinert, und es wird erneut die Lösung berechnet, so lange bis entweder die vorgegebene Anzahl an Durchläufen erreicht, oder der in % angegebene Energiefehler unterschritten wurde [12].

2.3 Grundlagen Stanztechnik

Stanzan ist ein spanloses Fertigungsverfahren das mit optimaler Werkstoffausnutzung bei geringem Abfall erlaubt große Mengen von sehr präzisen und komplizierten Werkstücken aus Metall oder anderen Werkstoffen in kurzer Zeit herzustellen, wodurch es in der globalen Wirtschaft eine wachsende Bedeutung erlangt. Stanzteile werden aus Bändern oder Platten in einer oder mehreren Arbeitsfolgen innerhalb einer Stanzmaschine spanlos gefertigt. Das gesamte Verfahren des Stanzens kann sich aus dem Trennen (Schneiden) und Umformen zusammensetzen, wobei zum Umformen das Biegen, Ziehen und Prägen gehört. Aber auch Fügen, Nieten, Gewindeschneiden, Widerstands- und Laserschweißen werden darin einbezogen, sodass sehr komplexe Teile in einer Stanzfolge vollständig bearbeitet werden. Die formgebenden Werkzeuge sind in der Regel zweiteilig, sie bestehen aus einem Ober- und Unterwerkzeug, werden aber gegebenenfalls durch querwirkende Werkzeuge ergänzt [20]. Als Arbeitsmaschinen werden mechanische und hydraulische Pressen verwendet, die eine geradlinige Hubbewegung ausführen. Die Form- und Maßgenauigkeit des Werkzeuges sowie die Führungsgenauigkeit der Maschine in der Arbeitsebene sind für die Fertigungsgenauigkeit der Stanzteile entscheidend. Für die Komplettbearbeitung komplexerer Bauteile mit mehreren Folgen werden immer längere Pressen in Richtung des Bandlaufs benötigt, wodurch auch im Bereich der Vorschubapparate eine Weiterentwicklung der Pressen statt fand.

Die konventionelle Stanztechnik mit Stanzteilen bei mittleren Toleranzforderungen und mittleren Hubfrequenzen, wird noch oft in Klein- und Kleinindustriebetrieben praktiziert. Wenn hier größere Losgrößen gefordert sind werden die Werkzeuge in der Regel aus Werkzeugstählen hergestellt. Die Maschinen sind wegen der besseren Zugänglichkeit meist in einer U-Form aufgebaut.

Die Hochleistungsstanztechnik erzeugt Stanzteile mit engen Toleranzen aus Blechen bis etwa 3 mm Dicke mit Hubfrequenzen bis zu 2000 Hüben pro Minute. Es werden vorwiegend Werkzeuge aus Hartmetallwerkstoffen auf mechanischen Pressen mit einer O-Rahmenbauweise verwendet. Mit einem Werkzeug können hierbei bis zu 500 Millionen Stanzteile produziert werden. Die Hochleistungsstanztechnik hat sich in den letzten Jahren dank ihrer hohen Produktivität und der Nachfrage in Elektronik- und Automobilindustrie gut entwickelt. Die Basis für diesen Erfolg und das Aufkommen der Hochleistungsstanztechnik als solche wurde in den 1970er Jahren mit der Entwicklung der Hochleistungsstanzautomaten mit Massenausgleich gelegt, welche erst die hohen Hubfrequenzen ermöglichten. In der Folge haben der Einsatz von Hartmetallen für die Werkzeuge, und die Bearbeitung dieser durch Präzisionsdrahtschneiden und Präzisionsschleifen, die Hochleistungsstanztechnik weiter gefördert.

Die Feinstanztechnik stellt Teile aus Blechen mit einer Stärke von etwa 2 bis 15 mm Dicke mit sehr engen Toleranzen und feinen (glatten) Schnittflächen her. Verwendung findet sie dort, wo Funktionsflächen mit kleinsten Maß- und Formtoleranzen und hoher Oberflächengüte verlangt werden. Die geschnittenen Oberflächen sind zudem gegenüber dem Grundwerkstoff verfestigt. Oft kann diese Technik aufwendige spanende Bearbeitungsverfahren komplett ersetzen. In den letzten Jahren

konnte vor allem durch die Pulvermetallurgie die Formenvielfalt der Stanzteile und die Standzeit der Werkzeuge erhöht werden.

Die Grossteilstanstechnik stellt aus großen Blechplatten z.B. Karosserieteile her. Außer dem Beschneiden der Teile finden dabei vor allem Biege- und Ziehoperationen statt. Vorteile hinsichtlich der Beanspruchung der gefertigten Teile bietet das Umformen von Platinen verschiedener Dicke (so genannten Tailored Blanks), welche durch Schweißen der Teile formgerecht vorbearbeitet werden.

Nibbel- und Laserschneiden eignen sich besonders für Werkstücke aus Blech mit Durchbrüchen, die aus größeren Blechplatinen hergestellt werden. Mit CNC-gesteuerten Maschinen können sehr komplizierte Formen ausgeschnitten werden. Die Entscheidung, ob mit Schneidwerkzeugen ausgeschnitten (genibbelt) oder mit Laserstrahl getrennt wird, ist von der Komplexität der Form und der Wirtschaftlichkeit abhängig. Durch anschließende Blechbiegeeinrichtungen ist die Herstellung von z.B. Gehäusen und Schaltkästen möglich.

2.3.1 Grundlagen des Schneidens

Schneiden ist ein spanloses Zerteilen von Werkstoff entlang einer Schnittlinie. Es wird zwischen Ausschneiden (Abbildung 2.14), einem Trennvorgang einer Außen- oder Innenform bei geschlossener Schnittlinie, und Abschneiden bzw. Ausklinken, bei offener Schnittlinie, unterschieden. Hierfür werden Werkzeuge verwendet, welche als Hauptbestandteile einen Schneidstempel und eine Schneidplatte aufweisen.

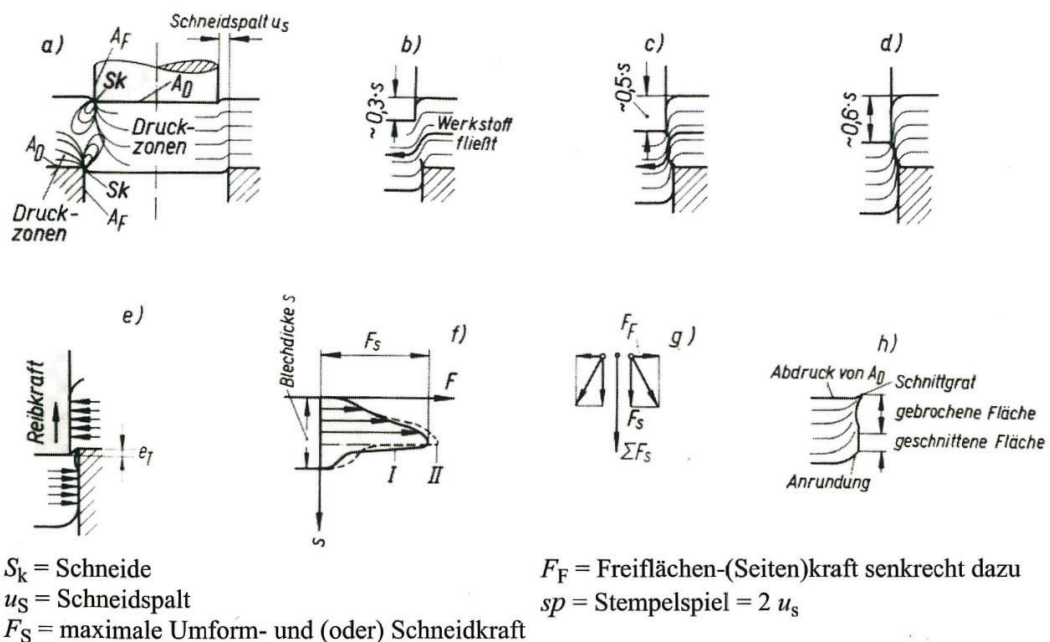


Abbildung 2.14: Schneidvorgang beim Lochen, d.h. geschlossene Schnittlinie. Die Schneide S_k (Schneidkante) ist die Durchdringungslinie der Schneidflächen A_D und A_F , welche den Schneidkeil bilden [20]

In Abbildung 2.14 ist der Schnitvorgang in seinen einzelnen Schritten dargestellt. 2.14 a) zeigt den Schneidbeginn nach elastischer Verformung, es ist der Beginn des Fließens (Plastische Verformung), in b) und c) ist das Ende des Fließvorganges dargestellt und der Beginn des Brechens, d) stellt das Bruchende und das Ende der Trennung dar, hier wirkt noch die Reibkraft, e) zeigt das Ende des Arbeitshubes, der Schneidstempel dringt in die Öffnung der Schneidplatte ein (Eintauchtiefe e_T). Das Kraft-Weg-Diagramm (die Fläche entspricht der Schneidarbeit) ist in f) dargestellt, in g) ist die Wirkungsrichtung der Schneidkraftvektoren zu sehen, und in h) schlussendlich die Aufteilung der Schnittfläche.

2.3.2 Das Feinschneiden

Das Feinschneiden (Abbildung 2.15) ist ein Lochen oder Ausschneiden, bei welchem die Scherzone auf der gesamten Schnittfläche auftritt. Das Werkstück wird hierbei von der Ringzacke, mit der Ringzackenkraft, F_R , außerhalb der Schnittlinie auf die Schneidplatte gespannt. Durch die Gegenkraft, F_G , wird das Werkstück gegen den Schneidstempel, auf den die Schneidkraft, F_S , wirkt, innerhalb der Schnittlinie gespannt. Der Schneidvorgang erfolgt im eingespannten Zustand.

Nach dem Schneidvorgang werden Ringzackenkraft und Gegenkraft zurückgenommen, das Werkzeug öffnet sich, die Ringzackenkraft, F_R , wird zur Abstreifkraft, F_{RA} , und die Gegenkraft, F_G , wirkt als Auswerferkraft, F_{GA} , und stößt das Teil aus der Schneidplatte.

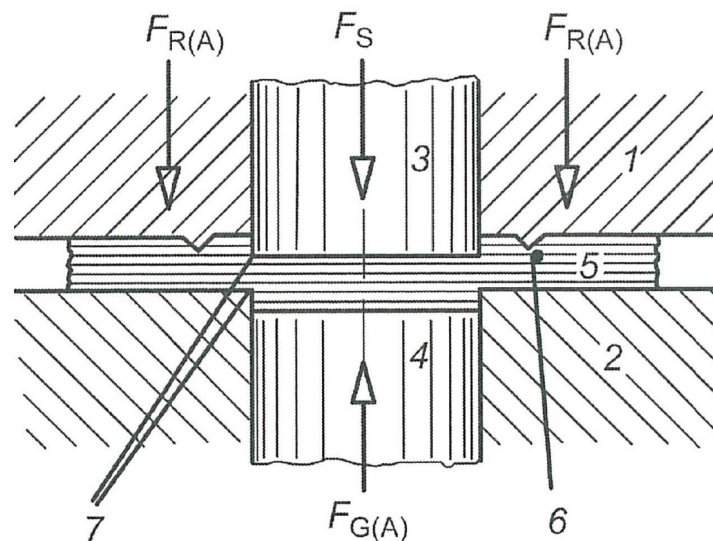


Abbildung 2.15: Feinschneiden; 1 Führung (Pressplatte), 2 Schneidplatte, 3 Schneidstempel, 4 Auswerfer, 5 Werkstück, 6 Ringzacke, 7 Schneidkeil [20]

Beim Feinschneiden werden Bleche über 1 mm Dicke mit einem Schneidspalt, u_s , von 0,5 - 0,6% der Blechdicke, bei gleichzeitiger Verhinderung des seitlichen Einzugs des Werkstoffes (mittels Ringzacke oder Blechklemmung) geschnitten. So entsteht eine Scherzone (Glattfläche) über die gesamte Schnittfläche, welche glänzend ist. In Abbildung 2.16 ist eine Gegenüberstellung der Schnittflächen bei Normal- und Feinschneiden zu sehen.

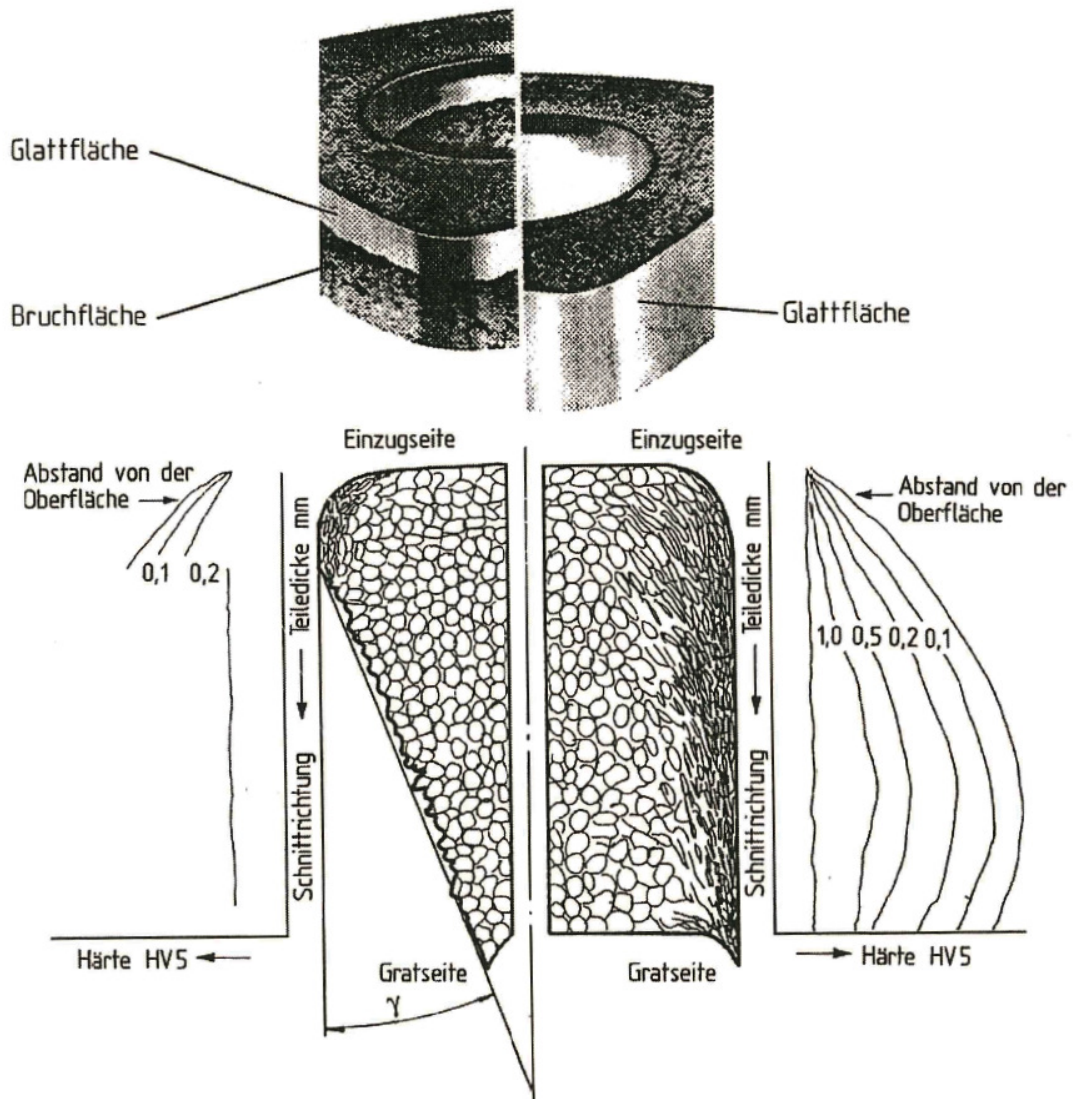


Abbildung 2.16: Schnittflächen mit Kaltaufhärtung, links beim Normalschneiden, rechts beim Feinschneiden [21]

Beim Hochleistungsschneiden von dünnen Blechen ist es möglich Maßtoleranzen von $\pm 0,003$ mm zu erreichen. Beispiele hierfür sind Chipträger oder lead frames der Elektronikindustrie. Beim Feinschneiden von Werkstücken mit 2 bis 12 mm Dicke und Breiten von 20 mm sind Maßtoleranzen von $\pm 0,025$ mm möglich. Wichtig hierbei ist, dass diese hohen Genauigkeitsanforderungen nur an den besonderen Funktionsmaßen erreicht werden.

Kräfte beim Feinschneiden

Schneidkraft, F_S Für die Bestimmung der Schneidkraft, F_S , ist es notwendig folgende Parameter zu kennen:

- die Länge der Schnittlinien, l [mm], unter Berücksichtigung der Schnittform,
- Blechdicke, s [mm],
- Schneidwiderstand bzw. spezifische Schneidkraft des Werkstoffes, k_s [N/mm²],
- Schärfe der Schneiden,
- Größe des Schneidspaltes,
- Oberflächengüte der Druck- und Freiflächen des Stempels und der Schneidfläche (siehe Abbildung 2.14), und
- Art der Schmierung.

In der Praxis werden rechnerisch aber nur die ersten drei Einflüsse verwandt. Die Schneidkraft, F_S [N], ergibt sich somit,

$$F_S = l \cdot s \cdot k_s. \quad (2.42)$$

Die spezifische Schneidkraft, k_s , wird, insofern sie nicht bekannt ist überschlägig aus der Festigkeit des Werkstoffes, R_e , ermittelt,

$$k_s = 0,8 \cdot R_e. \quad (2.43)$$

Die Ringzackenkraft, F_R , wird beim Feinschneiden wie in Abbildung 2.15 durch die Ringzacke aufgebracht. Die Ringzackenkraft ist abhängig von der Festigkeit des Werkstoffes, R_e , der Ringzackenlänge, l_R , der Ringzackenhöhe, h , und einem dimensionslosen Faktor, f_2 ,

$$F_R = f_2 \cdot l_R \cdot h \cdot R_e. \quad (2.44)$$

Der Faktor, f_2 , ist von der Form der Ringzacke abhängig, gebräuchlich ist ein Wert von ca. 4.

Die Gegenkraft, F_G , klemmt beim Feinschneiden das Stanzteil während des Schneidens zwischen den Stempeln und verhindert somit eine Verformungen des Werkstoffes. Sie ist von der Fläche, A_s , und der spezifischen Gegenkraft, q_G [N/mm²] abhängig,

$$F_G = A_s \cdot q_G. \quad (2.45)$$

Der Wert der spezifischen Gegenkraft liegt zwischen 20 und 70 N/mm², wobei der kleinere für dünne kleinflächige und der größere für dicke großflächige Werkstücke gilt.

2.3.3 Werkstoffe für Stanzteile

Stanzteile werden aus fast allen Werkstoffen, die in Form von Bändern, Platten oder Folien vorliegen und nicht splintern, hergestellt. Neben Metallen sind dies auch zahlreiche nichtmetallische Werkstoffe.

Nichtmetallische Werkstoffe

Nichtmetallische Werkstoffe dürfen nicht zu weich sein oder gar schmieren, d.h. sie dürfen nicht am Werkzeug oder an den Führungen bzw. Ausstoßeinrichtungen haften bleiben. Außerdem dürfen sie nicht zu spröde sein oder splintern. Geeignete Werkstoffe sind z.B. Filz, Textilien, PVC und faserverstärkte Kunststoffe.

Metallische Werkstoffe

Eisenwerkstoffe Hier sind fast alle Stähle, bis zu einem spezifischen Schneidwiderstand, k_s , von 1500 N/mm^2 verarbeitbar. Es gilt weiters, je feiner die Karbidkornverteilung und Karbidkorngrösse sind, desto geringer ist der Werkzeugverschleiß und desto geringer sind die Verformungen der erzeugten Stanzteile. Bei gehärteten Stählen liegt die Dehngrenze, $R_{p0,2}$, näher an der Zugfestigkeit, R_e , wodurch die Werkzeugauslegung schwieriger wird und mit dem Dynamikfaktor zu rechnen ist. Eine Auswahl fürs Feinschneiden geeigneter Stähle ist in [22] zu finden.

Nichteisenmetalle Reines Aluminium, reines Kupfer sowie Messing und nicht aushärtbare Aluminium-Magnesium-Legierungen lassen sich sehr gut Feinschneiden. Die Feinschneidfähigkeit hängt wesentlich von der chemischen Zusammensetzung, dem Walzgrad und dem Aushärtegrad des Bleches ab. Beim Feinschneiden von Kupfer-Beryllium-, Aluminium-Kupfer-Mangan- oder Aluminium-Zink-Magnesium-Legierungen sind besondere Maßnahmen bzgl. Schmiermittelzusätzen, sowie Sprödigkeit bzw. Zähigkeit der Werkstoffe zu treffen.

2.3.4 Paketieren in der Stanztechnik

Um komplexere Bauteile mittels Stanztechnik herstellen zu können, werden in der modernen Stanztechnik außer dem Schneiden und Umformen auch Fügevorgänge durchgeführt. Eine wesentliche Bedeutung hat hierbei das Paketieren von mehreren Blechen.

Stanzpaketieren mit Durchsetzungen

Mit Stanzpaketieren bezeichnet man den Herstellungsvorgang von zusammenhängenden Blechpaketen mit aus Blechband gestanzten Teilen, wie z.B. Statoren oder Rotoren von Elektromotoren, in einem Stanzfolgewerkzeug. Im Gegensatz hierzu wird das Paketieren von ausgestanzten Blechen außerhalb der Stanzmaschine in einer gesonderten Maschine oder Vorrichtung vorgenommen. Die Blechpakethöhe ist beim Stanzpaketieren in der Stanzmaschine vorwählbar. Es lassen sich Pakete beliebiger Höhe erzeugen.

Üblicherweise werden beim Stanzpaketieren die Bleche in der letzten Stanzfolge (siehe Abbildung 2.17) aufeinandergestapelt und dort miteinander verbunden, wobei

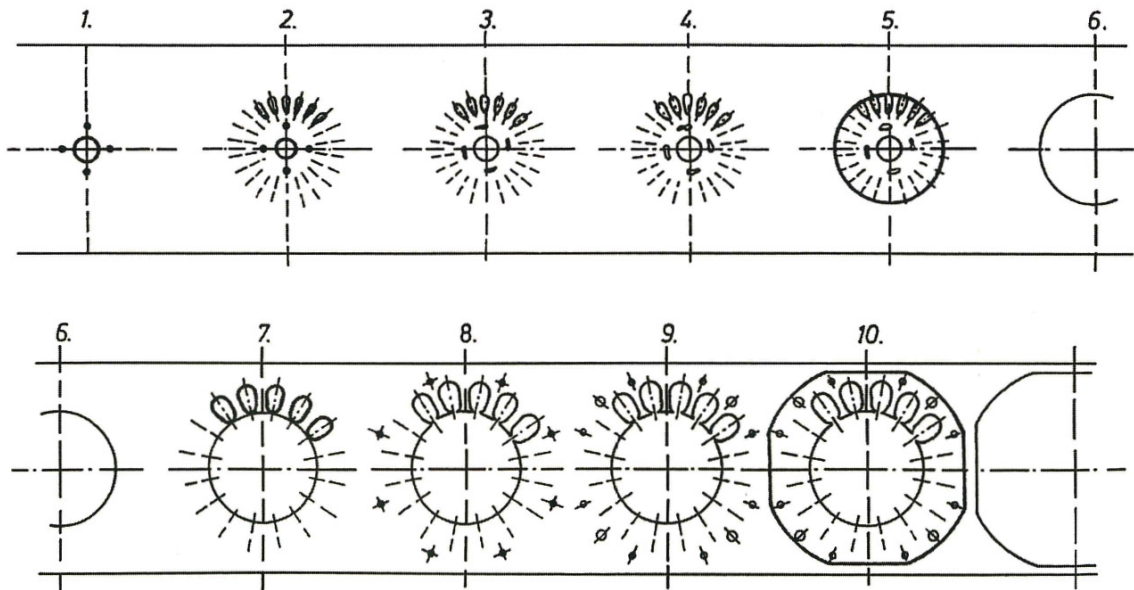


Abbildung 2.17: Stanzpaketierfolge in einem Stanzpaketierwerkzeug [20]

unterschiedliche Verbindungsmethoden zur Anwendung kommen. Nach einer gewissen Anzahl an Blechen wird die Verbindung unterbrochen, es werden dann einzelne Pakete aus der Maschine abtransportiert.

In der fünften Folge in Abbildung 2.17 werden die Bleche für den Rotor eines Elektromotors, in der zehnten werden die Bleche für den dazugehörigen Stator ausgestanzt und aufeinander gepresst.

Ein bekanntes Verfahren des Fügens innerhalb des Stanzvorganges beruht auf dem Prinzip des Tiefens (Durchsetzungen) und Verpressens der aufeinander ausgestanzten Bleche, siehe Abbildung 2.18.

Das erste Blech eines Paketes wird an den Fügestellen voll durchgestanzt, die darauffolgenden Bleche werden nicht voll durchgestanzt, sondern erhalten Durchsetzungen, die ineinander gepresst werden. Infolge der Aufweitung entstehen dabei Radialkräfte in den Durchsetzungen, die den Zusammenhalt der einzelnen Bleche bewirken. Die Voraussetzung für den Zusammenhalt ist eine hohe Präzision der Werkzeuge und der Stanzmaschine. Stempel und Matrize müssen in Toleranzen von $\pm 2\mu\text{m}$ hergestellt und in noch engeren Toleranzen von der Stanzmaschine geführt werden.

In der Regel hat dieses Paketieren die Aufgabe, das Handling der geblechten Pakete beim Transport und der Montage von Motoren oder Transformatoren zu erleichtern. Der endgültige Zusammenhalt der geblechten Pakete wird in der Montage hergestellt. Beispielsweise wird der Rotor auf eine Welle aufgedrückt und erhält so den erforderlichen Zusammenhalt.

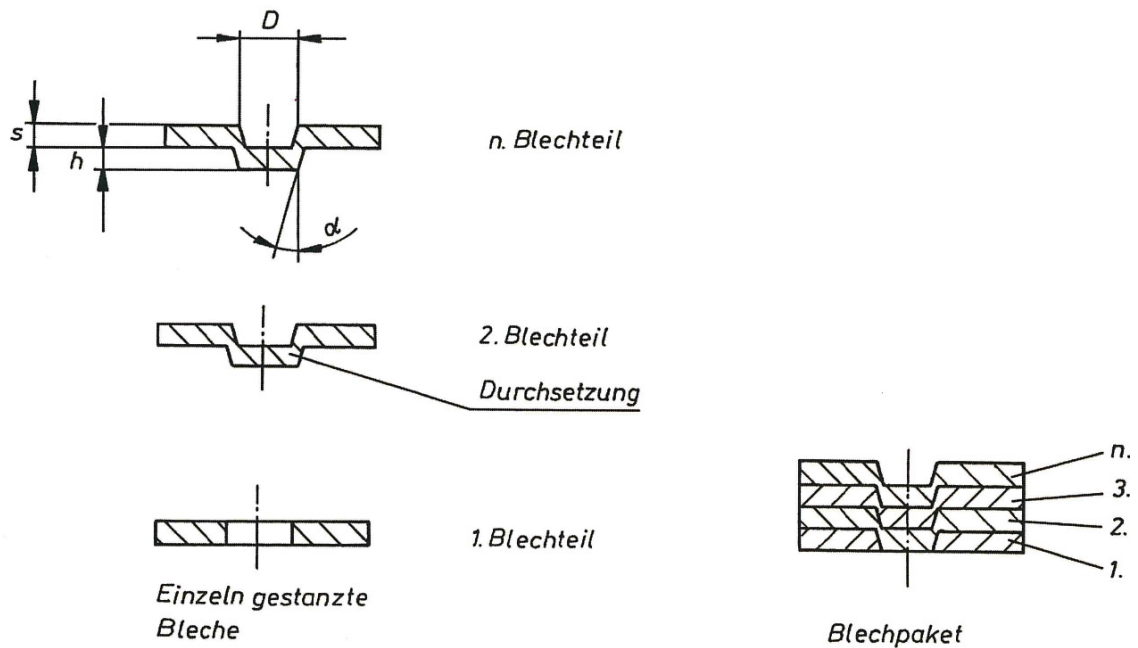


Abbildung 2.18: Prinzip des Stanzpaketierens von Blechteilen 1., 2 ... n. mit Durchsetzungen, D Durchmesser der Durchsetzung, s Blechdicke, h Durchsetzungstiefe, α Einziehwinkel [20]

Stanz-Laser-Paketieren

In Abbildung 2.19 ist das Prinzip des Stanz-Laser-Paketierens dargestellt. Der Ausschnitt A soll die Schweißweise für ein Bauteil mit Schweißstelle an der Innenwand verdeutlichen. Nach jedem Durchstanzen durch den Stempel, wird während dessen Aufwärtsbewegung ein Schweißvorgang durchgeführt, insofern die zu schweißende Stelle nicht verdeckt ist. In Bohrungen oder Ausnehmungen mit einem Durchmesser ab circa 4 mm kann eine fortlaufende Punktschweißnaht hergestellt werden. Setzt man mehrere Fokussiereinrichtungen ein, so ist man in der Lage innerhalb eines Stanzvorganges an mehreren Stellen ein Paket zu verschweißen, siehe Abbildung 2.20.

Im Dauerbetrieb ist es mit diesem Verfahren möglich Hubfrequenzen von bis zu 800 Hüben pro Minute zu erreichen. Zu beachten sind hierbei allerdings auch die Verschleißteile der Lasereinrichtung, die Lampen müssen in der Regel nach 10^6 bis 10^7 Lichtblitzen ausgetauscht werden. Meist wird dieses Verfahren nur eingesetzt um die Montage von Blechpaketen zu erleichtern (vgl. mit 2.3.4), hierbei werden dann für kleine Pakete Abreißkräfte von 50 bis 100 N verlangt. Es ist aber leicht möglich durch mehrere Schweißpunkte und längere bzw. intensivere Laserbestrahlung eine dauerhaftere Verbindung bei wesentlich höheren Abreißkräften zu erreichen.

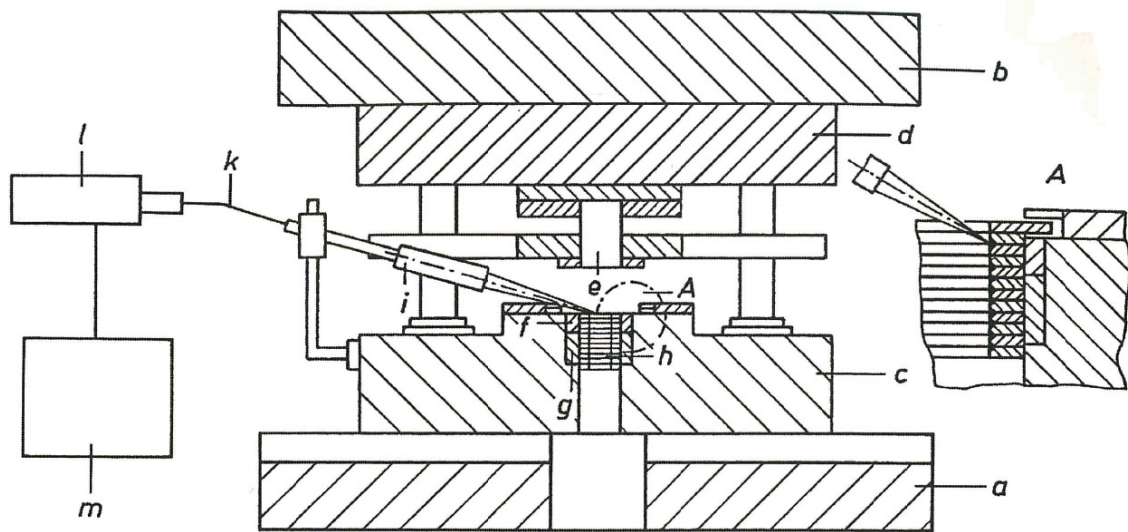


Abbildung 2.19: Maschine und Werkzeug für das Stanz-Laser-Paketieren, mit Ausschnitt A. a ist der Maschinentisch, b Stößel, c Unterwerkzeug, d Oberwerkzeug, e Stempel, f Matrize, g Bremse, h Paket, i Fokussiereinrichtung, k Lichtleiterkabel, l Laser, und m das Laseraggregat [20]

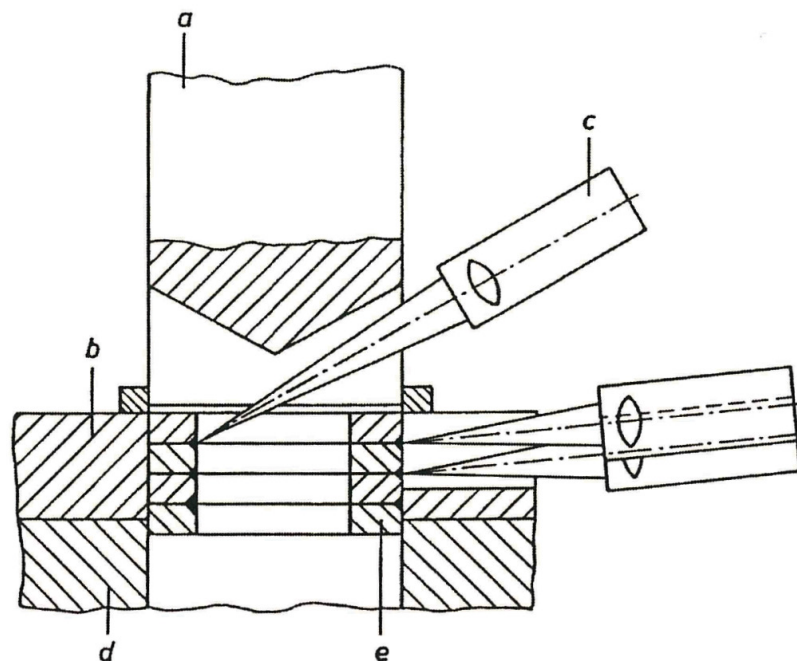


Abbildung 2.20: Prinzip des Laserschweißens beim Stanz-Laser-Paketieren mit mehreren Fokussiereinrichtungen. a Stempel, b Matrize, c Fokussiereinrichtung, d Bremse, e Paket [20]

Kapitel 3

Parameterstudie

Im Zuge der Konzeptphase werden die technischen Vorgaben ermittelt. Diese werden vom vorgegebenen Drehteilmagneten aus dessen Pflichtenheft abgeleitet. Neben diesen technischen Vorgaben spielt natürlich auch die Wirtschaftlichkeit eine große Rolle, daher wird noch während der Konzeptphase eine erste grobe Kalkulation der vermutlich auftretenden Herstellkosten des Stanzteilmagneten durchgeführt. Aus den Vorgaben kristallisieren sich dann die Probleme heraus, die mit Hilfe einer FMEA und einer FEM¹-Berechnung analysiert werden. Am Ende dieser Phase wird aus den vorhandenen Lösungsvorschlägen die vielversprechendste ausgewählt und weiter konkretisiert, siehe Kapitel 4.

3.1 Technische Vorgaben

Die technischen Vorgaben sind aus den Musskriterien eines aktuell in Produktion befindlichen Magneten abgeleitet. Da es sich bei dem durchzuführenden Projekt um ein Innovationsprojekt handelt, werden gewisse produktspezifische Richtlinien welche sehr speziell sind, wie beispielsweise die Störaussendung auf das Bordnetz, hier ausgeklammert. Die Materialauswahl für das Konzept bleibt allerdings aufgrund der Vorschriften des GADSL² eingeschränkt, lediglich für den Prototypenbau wird hiervon abgewichen, da gewisse Werkstoffe nicht oder nur eingeschränkt bei den üblichen Verfahren zur Erstellung von Prototypen verarbeitet werden können.

3.1.1 Mechanisch

Die mechanischen Eigenschaften, die der Magnet erfüllen muss sind in erster Linie von der Hubkraftkennlinie und den Außenabmessungen geprägt. Diese wird durch den nötigen Hub und die Kräfte an vorbestimmten Messpunkten bestimmt. Hinzu kommen noch Bestimmungen für die Anzugs- und Abfallzeit, sowie deren Verzögerung.

¹FEM, Finite Elemente Methode

²GADSL, Global Automotive Declarable Substance List, Auflistung deklartionspflichtiger Stoffe in der Automobilindustrie [23]

Magnethub, s

Die Größe des Magnethub, s , wird durch die Differenz von Ausgangslage und Endlage definiert, wobei die Ausgangslage der maximalen Auslenkung des Magnetkolbens entspricht und die Endlage der minimalen Auslenkung des Magnetkolbens. Der benötigte Magnethub zur Überbrückung der Distanz Ausgangslage zu Endlage muss mindestens 6,5 mm betragen.

Anzugzeit, t_1

Die Anzugzeit, t_1 , welche nötig ist damit der Magnet seine Funktion erfüllt, entspricht der Zeit die vergeht, wenn der Magnet von seiner Ausgangslage in die Endlage gebracht wird. Die Anzugzeit soll 50 ms, bei einer Toleranz von ± 20 ms, betragen. D.h. sie darf 30 ms nicht unter- bzw. 70 ms überschreiten.

Abfallzeit, t_2

Die Abfallzeit, t_2 , entspricht der Zeit die der Magnet benötigt um bei montierter Blende mit Hilfe der Rückstellfeder von seiner Endlage in die Ausgangslage zurück zu kommen. Diese Zeit, t_2 , beträgt 60 ms, bei einer gegebenen Toleranz von -10 ms und +20 ms. Somit darf die Abfallzeit, t_2 , nicht unter 50 ms fallen bzw. über 80 ms ansteigen.

Magnetkraft, F_m

Die benötigte Magnetkraft, F_m , an vordefinierten Punkten des Magnethubs, s , ist mit das wichtigste Kriterium zur Auslegung des Magneten. Hier wird eine maximale und minimale Magnetkraft an den Positionen der Endlage 0,3 mm, Ausgangslage 6,5 mm sowie in der Mittellage 3 mm vorgegeben.

Abbildung 3.1 stellt die Magnetkraft, F_m , in Abhängigkeit des Magnethubs dar. Die Darstellung ist nur qualitativ, nicht aber quantitativ Charakters und soll einen Eindruck der Magnetkraft während des Anziehens (Bewegung von der Ausgangslage in die Endlage) wie auch des Abfallens (Bewegung von der Endlage in die Ausgangslage) des Magneten vermitteln.

In Tabelle 3.1 finden sich die an den bereits erwähnten Messpunkten vorgegebenen Werte für die Magnetkraft. Die Rückstellung in die Ausgangslage erfolgt mittels Feder. Die Federkräfte bei der Rückstellung sind hierbei an den einzelnen Messpunkten nicht näher definiert.

Position, s , in [mm]	0,3 (FL)	3	6,5 (AL)
Absoluter Minimalwert der Kraft bei Bewegung von AL zu FL in [N]	6,9	3,7	5,1
Absoluter Maximalwert der Kraft bei Bewegung von AL zu FL in [N]	9,8	4,8	6,0

Tabelle 3.1: vorgegebene Magnetkräfte

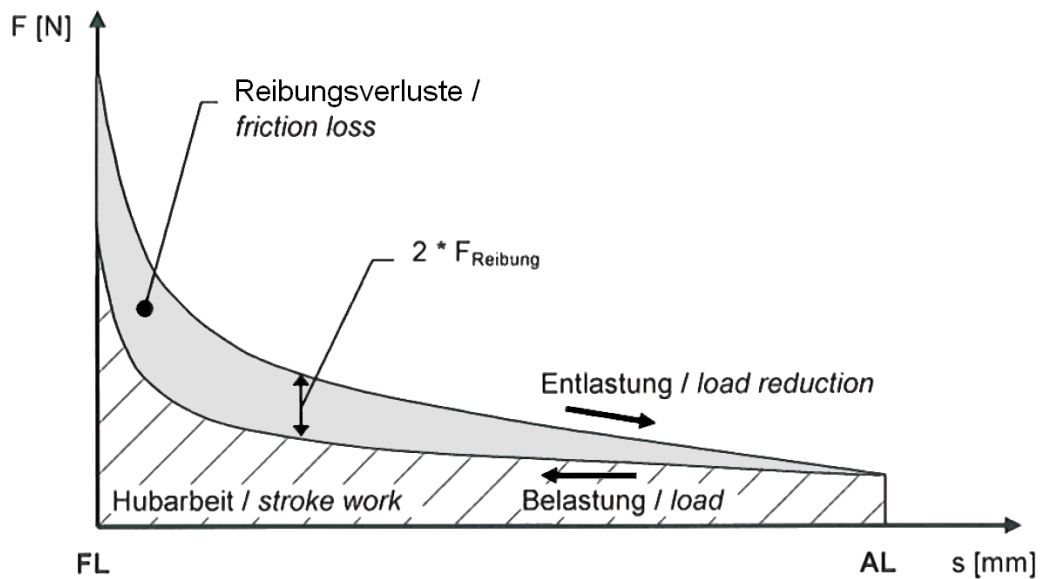


Abbildung 3.1: Magnetkraftverlauf über den Hub des Magneten, AL Ausgangslage, FL Endlage

Resthaltekraft, F_R

Die Resthaltekraft, F_R , ist möglichst gering zu halten. Sie ist die verbleibende Magnetkraft (durch die Restmagnetisierung) nach Wegfall der Spannung. Der Magnet darf nun nach einer einminütigen Beaufschlagung mit 16 VDC³, 5 Sekunden nach Wegfall der Spannung, maximal eine Resthaltekraft von 0,2 N aufweisen.

Außenabmessungen

Die maximalen Außenabmessungen sind nicht näher beschrieben, aufgrund der vorliegenden Konstruktionszeichnungen, und dem Kriterium deren Baugröße nicht zu überschreiten, wird vorläufig davon ausgegangen, dass der Magnet sowohl in seiner Höhe, Breite wie auch Länge ein Maß von 45 mm (ohne Applikation) nicht überschreiten darf.

3.1.2 Elektrisch

Die elektrischen Eigenschaften, welche der Magnet erfüllen muss sind größtenteils auf die Spule und Schaltplatine bezogen. Hierbei muss der Magnet unter schwankender Spannungs- bzw. Stromversorgung seine Funktion erfüllen. Auch sind Sicherheitsrelevante Kriterien wie die Überspannungsfestigkeit, die Schutzart und die elektromagnetische Verträglichkeit von Bedeutung. Da sich diese Eigenschaften aber primär auf die Schaltplatine und das nicht zu vermeidende magnetische Feld der Spule und dessen Wirkung auf umgebende Baugruppen beziehen, welche bei der Erstellung des Prototypen nicht zu den Hauptuntersuchungspunkten zählen, werden sie hier nicht näher konkretisiert.

³VDC, Volt Direct Current, Gleichspannung

Betriebsspannung, U_{Betrieb}

Die Versorgung des Magneten erfolgt über das Bordnetz des Fahrzeugs, die Betriebsspannung, U_{Betrieb} , schwankt hierbei zwischen $U_{\text{Betrieb, min}}$ 9 VDC und $U_{\text{Betrieb, max}}$ 16 VDC. Der Magnet muss also innerhalb dieses Bereichs seine Funktion ohne Beanstandung erfüllen können.

Betriebsstrom, I_{Betrieb}

Der Betriebsstrom, I_{Betrieb} , ergibt sich zwar aus der Versorgungsspannung und dem Innenwiderstand der Spule, doch ist er noch zusätzlich abhängig von der Eigenerwärmung der Spule sowie der Umgebungstemperatur des Magneten, da diese ja den elektrischen Widerstand verändern. Die Betriebsspannung darf auf keinen Fall über 1,2 A ansteigen. Zusätzlich zu dieser generellen Vorschrift gibt es noch Richtwerte für den Betriebsstrom bei bestimmten Temperaturen. Hierfür wird eine Betriebsspannung von 13,5 VDC beaufschlagt. Die Richtwerte für den Betriebsstrom, I_{Betrieb} , sind in Tabelle 3.2 dargestellt.

I_{Betrieb}	Umgebungstemperatur
0,98 A	-40°C
0,75 A	+20°C
0,56 A	+105°C

Tabelle 3.2: Richtwerte für den Betriebsstrom

Wicklungswiderstand, $R_{W(\vartheta_{\text{Spule}})}$

Die Höhe des Wicklungswiderstands der Spule, $R_{W(\vartheta_{\text{Spule}})}$, richtet sich im Wesentlichen nach der Windungsanzahl, verwendeten Drahtstärke und Drahtmaterial. Dieser soll bei einer Spulentemperatur, ϑ_{Spule} , von +20°C, 18,0 Ω betragen, und darf um maximal 5% nach unten oder oben abweichen. D.h. der minimal zulässige Spulenwiderstand beträgt 17,1 Ω und der maximale 18,9 Ω .

Induktivität, L

Die Induktivität, L , des Magneten ist ebenso begrenzt. Hierbei wird zwischen Induktivität mit und ohne Anker unterschieden. Mit Anker soll die Induktivität 390 mH betragen und darf nach unten und oben um maximal 25% abweichen, dies entspricht also einer maximalen Induktivität mit Anker von 487,5 mH und einer minimalen von 292,5 mH. Die Induktivität ohne Anker ist wesentlich geringer, sie beträgt 70 mH, die Toleranz beträgt hier ebenso $\pm 25\%$. Somit ergibt sich eine maximale Induktivität ohne Anker von 87,5 mH und eine minimale Induktivität von 52,5 mH.

3.1.3 Thermisch

Wie beinahe jedes andere technische Bauteil ist auch der Elektromagnet unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt. Diese ergeben sich aus der Umgebungstemperatur und der Eigenerwärmung, welche primär durch die Spule entsteht. Der Magnet muss sowohl im Betrieb als auch bei der Lagerung bei unterschiedlichen Temperaturen seine Funktionstüchtigkeit bewahren.

Die Umgebungstemperatur, $\vartheta_{\text{Umgebung}}$, innerhalb der der Magnet seine Funktion erfüllen muss, schwankt ohne Einbeziehen der Eigenerwärmung zwischen -40°C und $+105^{\circ}\text{C}$.

3.1.4 Lebensdauer

Die Lebensdauer technischer Bauteile ist ein wesentliches Qualitätskriterium. Durch die Montage in der Applikation ist der Magnet hohen Temperaturschwankungen bei stark wechselnden Belastungszyklen ausgesetzt. Es wird zur Vereinfachung, und da der Prototyp noch nicht für einen Lebensdauertest vorgesehen ist hier auf eine nähere Ausführung der unterschiedlichen Lebensdauertests bei wechselnden Umweltbedingungen verzichtet. Für die Auslegung des Konzepts, im speziellen der Lagerungen, wird von 200.000 Schaltspielen ausgegangen.

3.2 Problemanalyse

Probleme sind die Differenz zwischen dem IST- und der Vorstellung eines SOLL-Zustands [24]. Aus den technischen und wirtschaftlichen Anforderungen ergeben sich nun zahlreiche Probleme, siehe Tabelle 3.3, auf welche im folgenden näher eingegangen werden soll.

	IST-Zustand	Problembereich	SOLL-Zustand
technische Aspekte	Drehteile	Geometrie	Verzicht auf Drehteile
	Funktion erfüllen	elektromagnetische Eigenschaften	Funktion erfüllen
	unterschiedliche elektromagnetische Materialien	Sättigung Umgebungsbedingungen	Anzahl der verwendeten Materialien reduzieren
wirtschaftliche Aspekte	Herstellkosten von 2,20 €	Material / Arbeit reduzieren	Herstellkosten unter 2 €
	Anzahl der Teile	Arbeit / Logistikaufwand reduzieren	Anzahl der Teile reduzieren

Tabelle 3.3: Problemanalyse

Das aktuell vorliegende Magnetkonzept eines aus Drehteilen aufgebauten Hubmagneten soll nun gedanklich verworfen werden, und lediglich auf Basis dessen technischer Funktionen ein neues Konzept ausgearbeitet werden. Zu diesem Zweck wurde in einem ersten Schritt die Funktion abstrahiert und in einem ersten Brainstorming zu Papier gebracht, siehe 3.3. Für einen systematischen Ansatz des Brainstormings wurden zuvor folgende Gesichtspunkte festgelegt:

- System (Funktion),
- Art der Basisgeometrie,
- mögliche Materialien,
- Serientaugliche Fertigungsverfahren,
- Art der Lagerung der beweglichen Teile.

Neben dieser technischen Problemanalyse wurde auch eine ABC-Analyse der Herstellkosten durchgeführt, um festzustellen bei welchen Bauteilen das höchste Einsparpotential besteht. In Tabelle 3.4 findet sich eine Aufstellung der Herstellkosten, welche in Abbildung 3.2 noch bildlich dargestellt wird. Die kostenintensivsten Bauteile, Spule, Leiterplatte und Kolben sind eindeutig zu erkennen. Hier ist auch das höchste Einsparpotential, somit hat eine Neugestaltung und Kostenreduktion dieser Teile Vorrang.

Bauteil	Anteil an den Herstellkosten
Kupferspule	26,96%
Leiterplatte	20,99%
Kolben inkl. Scheibe u. Achse	18,18%
Spulenkörper	9,76%
Polkern	8,29%
Gehäuse	6,01%
Gleitlager groß	3,94%
Gleitlager klein	3,53%
Glasklebeband	1,95%
Ankersicherung	0,39%

Tabelle 3.4: Aufstellung der Herstellkosten

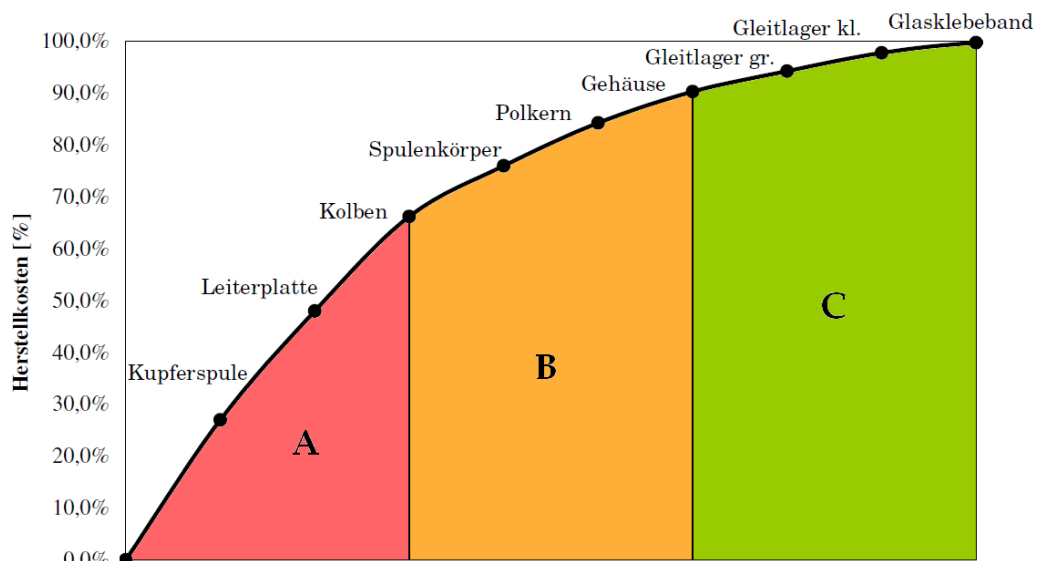


Abbildung 3.2: ABC-Kostenanalyse

3.3 Lösungsgenerierung

Erste Lösungsansätze wurden mittels eines Brainstorming erarbeitet, an dem jeweils zur Hälfte Experten aus der Entwicklungsabteilung sowie aus dem Bereich Industrial Engineering teilnahmen. Besonderes Augenmerk bei diesem ersten Versuch einer konkreteren Lösung des Problems näher zu kommen galt den zur Anwendung kommenden Fertigungsverfahren und deren Serientauglichkeit für größere Stückzahlen. Entsprechend der bereits erwähnten Gesichtspunkte (unter 3.2) wurde nun das Brainstorming durchgeführt:

System

Eine Veränderung der Funktion ist aufgrund der vorgegebenen Hubkraftkennlinie nicht möglich, es muss nach wie vor eine definierte Kraft über einen bestimmten Weg aufgebracht werden. Allerdings bestehen Möglichkeiten das Prinzip eines Hubmagneten auch mit anderen elektromagnetischen Antriebskonzepten zu umgehen, wie mit einem Drehmagnet und entsprechender Kraftumlenkung oder mit einem Linearmotor.

Geometrie

Geometrisch gibt es keinerlei Einschränkungen außer das vorgegebene Bauvolumen. Entscheidend bei Anwendung des Prinzips eines Hubmagneten ist die Konusgeometrie, deren Grundform kann rotationssymmetrisch, aber theoretisch auch einem 3-, 4- oder 6-Kant entsprechen.

Material

Bezüglich der verwendeten Materialien gibt es nur Einschränkungen aufgrund des GADSL Listings. Neben den klassischen elektromagnetischen Werkstoffen wurde aber auch der Einsatz von mit magnetisch leitfähigen bzw. von dauermagnetischen Werkstoffen durchsetzten Kunststoffen diskutiert.

Fertigungsverfahren

Um festzustellen welche Fertigungsverfahren sich für die Serienfertigung eignen, wurde vom Grundkonzept eines Hubmagneten ausgegangen, und dessen einzelne Funktionsteile bewertet, siehe Tabelle 3.5.

Es ist zu beachten, dass in Tabelle 3.5 unter Spritzguß davon ausgegangen wird, dass man hierfür einen Kunststoff verwendet, der mit magnetisch leitfähigen Material durchsetzt ist.

Lagerung

Ein letzter wichtiger Punkt ist die Art der Lagerung der beweglichen Teile. Hierfür werden aktuell bei einer geforderten Anzahl von 200.000 Schaltspielen, sog.

Fertigungsverfahren	Anker	Polkern	Bügel/ Gehäuse
Drehen/Fräsen	X	X	X
Stanzen (inkl. Biegen)	X	X	X
Spritzguß	X	X	
Metal Injection Moulding	X	X	
Strangpressen (inkl. Biegen/Stanzen)	X	X	
Rollbiegen	X	X	
Sintern	X	X	X
Walzen (inkl. Biegen/Stanzen)	X	X	X

Tabelle 3.5: Fertigungsverfahren

DU-Buchsen⁴ verwendet. Alternativ hierzu sind aber auch Messinghülsen, beschichtete Messinghülsen, ein mit Teflon beschichteter Polkern bzw. Gehäuse oder eine entsprechende Spulenkörperlagerung (ebenfalls durch eine Teflonbeschichtung verstärkt), möglich.

Zusätzliche Ideen

Nicht eindeutig den weiter oben erwähnten Gesichtspunkten zuordenbar, bzw. erst später entstanden, sind folgende Ideen:

- eine Reduktion der Bauteile durch die Kombination einzelner Funktionsteile, z.B. Polkern und Gehäuse,
- reduzieren der Anzahl der Lagerstellen von zwei auf eine,
- ersetzen der Kupferwicklung durch eine aus Aluminium,
- verzichten auf die Schaltplatine durch Integration in Spulenkörper, oder Änderung der Ansteuerung.

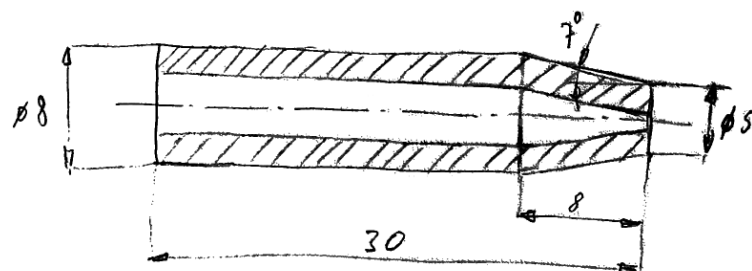


Abbildung 3.3: Entwurf eines hohlen rotationsymmetrischen Ankers

Aus diesen ersten Ideen entwickelten sich Skizzen, deren Grundidee nur eine leichte Veränderung des aktuellen Konzeptes war, siehe Abbildung 3.3 und 3.4.

⁴DU-Buchse, diese selbstschmierende Gleitlagerbuchse besteht aus 3 verschiedenen Materialschichten; einer Stahl- oder Bronzeplatte als Träger, einer porigen Imprägnierungsschicht aus Bronze für Wärmeleitung und Formstabilität, und einer Oberflächenbeschichtung aus Teflon, die gute Selbstschmierungs- und Gleiteigenschaften aufweist [25]

Abbildung 3.3 zeigt den Versuch eines hohlen Ankers, dessen Form gerollt oder durch Tiefziehen herstellbar sein sollte. In Abbildung 3.4 findet sich eine Abänderung zu einer rechteckigen Form eines ebenfalls innen hohlen Ankers. Darunter sind Varianten eines aus mehreren, teilweise versetzten Blechen aufgebauten Ankers.

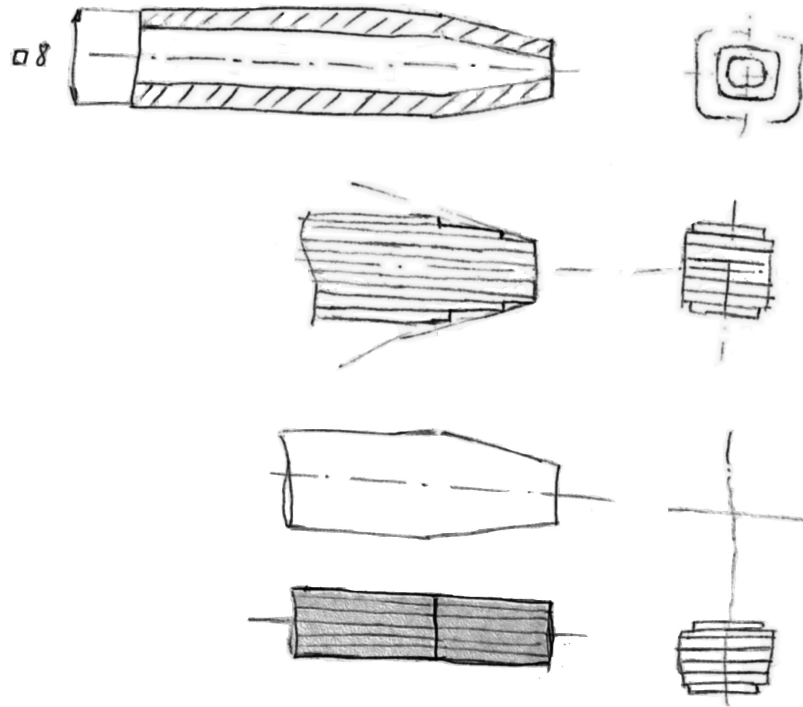


Abbildung 3.4: rechteckige Ankerformen

Die Kombination zweier Bauteile, nämlich Polkern und Gehäuse, wurde in Abbildung 3.5 dargestellt. Dieser Magnet kann sowohl rotationssymmetrisch, wie auch rechteckig ausgeführt werden.

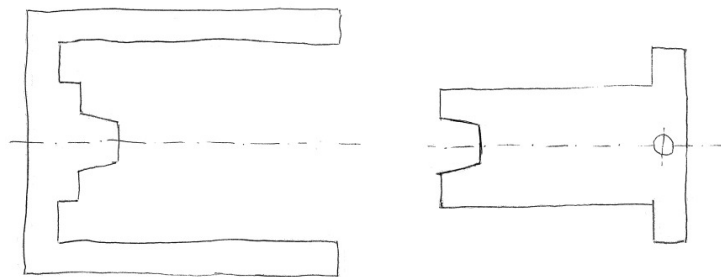


Abbildung 3.5: Kombination von Polkern und Bügel zu dem sog. Gehäuse (links), Anker (rechts)

3.4 Lösungsauswahl

Die erste Lösungsauswahl betraf die möglichen Formen, hierfür wurden obige Konzeptskizzen 3.3 bis 3.5, mit ähnlichen Abmessungen wie der vorliegende Drehteilmagnet in Maxwell 2D bzw. 3D in ihrer Ausgangs und Endlage, unter Zuhilfenahme der aktuellen Spule, für den Worst-Case simuliert. Hieraus ergab sich, dass ein hohler Anker die geforderte Kraft nicht aufbringen könnte.

Darauf folgte eine Vorauswahl der möglichen Fertigungsverfahren, hierbei wurde Wert auf die Eignung für die Herstellung hoher Stückzahlen (Ausgangsbasis sind 2,8 Mio Stück pro Jahr), bei möglichst guter Maßhaltigkeit, geringen Fertigungstoleranzen, sowie niedrigen Fertigungskosten, gelegt. In Tabelle 3.6 ist die zugehörige Nutzwertanalyse auszugsweise dargestellt. Diese beschränkt sich auf die Fertigung der aktuell kostenintensivsten Bauteile (Anker, Polkern). Die einzelnen Bewertungen der Kriterien erfolgte durch die Mitglieder der Industrial Engineering Abteilung, es wurde aus den ausgefüllten Bewertungsbögen ein Mittelwert gebildet. Betrachtet man die sich ergebenden Nutzwerte, so stellt man fest, dass die Stanztechnik den mit Abstand höchsten Nutzwert aufweist, gefolgt von Fräsen und Drehen, die die aktuell verwendeten Fertigungsverfahren darstellen.

	Gewichtung	Drehen	Fräsen	Stanzen	MIM
runde Geometrie	2	9,25	3,5	1,5	4,5
eckige Geometrie	3	0	9,5	9	9,5
Taktzeit	5	4,75	5	8,75	7,5
Fertigungstoleranz	5	6,5	6,25	5,5	4,5
Kosten pro Stück	8	3,75	3,5	7,5	5,5
Werkzeugkosten	8	7,75	8,25	3,5	3,25
Bearbeitbare Werkstoffe	7	8,5	9	7,5	3,25
		179,75	199,25	220,75	170,75

Tabelle 3.6: Nutzwertanalyse ausgewählter Fertigungsverfahren für Anker und Polkern

Bezüglich der eingesetzten Materialien wird an dieser Stelle noch keine Auswahl getroffen, da erst weiterführende Simulationen notwendig sind.

Kapitel 4

Neues Magnetkonzept

Ausgehend von der Ideenskizze in Abbildung 3.5 und der Nutzwertanalyse in Tabelle 3.6 wird ein Modell in der Simulationssoftware Maxwell 3D aufgebaut. Aufgrund mangelnder Erfahrung bezüglich Bauteilen, die aus mehreren Blechen aufgebaut sind, wird zum besseren Verständnis des Verhaltens solcher Bauteile, zunächst der sehr einfach aufgebaute Schwingmagnet untersucht.

Des Weiteren wird in diesem Kapitel ein Vergleich der Konusgeometrie eines Drehteilmagneten und eines aus Stanzteilen aufgebauten Magneten geführt, um zu sehen in wie weit die bisherigen reichen Erfahrungen in der Konstruktion von Drehteilmagneten auf Stanzteilmagnete übertragbar sind.

Das Kapitel wird mit einer ersten Schätzkalkulation für den simulierten Stanzteilmagneten und einer Risikoabschätzung beschlossen.

4.1 „Blechen“ von Bauteilen in der vorgegebenen FE Umgebung

Als „Blechen“ wird im Weiteren das Zerteilen eines Bauteils in eine bestimmte Anzahl gleich dicker Bleche bezeichnet. Dies ist wichtig, da ein grosser Teil der aus Stanzteilen aufgebauten Bauteile paketiert wird, siehe auch Kapitel 2.3. Zusätzlich zu der Aufteilung des Bauteilvolumens in einzelne Bleche kommt noch der Einfluss der Art des Paketierens hinzu. Durch die hiermit starke Erhöhung der Anzahl an Elementen für die Simulation in einer ohnehin schon sehr rechenintensiven 3D Umgebung steigt der Rechenaufwand selbst für einfache Magnete enorm. Hier soll nun anhand des Schwingmagneten untersucht werden, ob dieser Mehraufwand in der Modellbildung und Simulation notwendig ist um aussagekräftige Simulationsergebnisse zu erhalten.

Bevor es allerdings möglich ist ein Blechpaket möglichst realistisch zu simulieren, muss ermittelt werden wie groß der maximal zu erwartende Luftspalt zwischen den einzelnen Blechen ist. Hierfür wurden mehrere paketierte Bauteile im Labor von Kendrion Magnetic Systems mittels eines optischen Messprojektors¹ vermessen. Nimmt man zusätzlich zu den sich hieraus ergebenden Differenzmaßen die Oberflächenbeschichtung hinzu, so ergibt sich ein maximal zu erwartender Luftspalt von circa

¹Optischer Projektor mit Durchlicht und Aufsichtbeleuchtung, der je nach Objektiv eine bis zu 100-fache Vergrößerung erreicht, und mittels eingebauter Zieloptik und Längenmessenrichtung Distanzen vermessen kann.

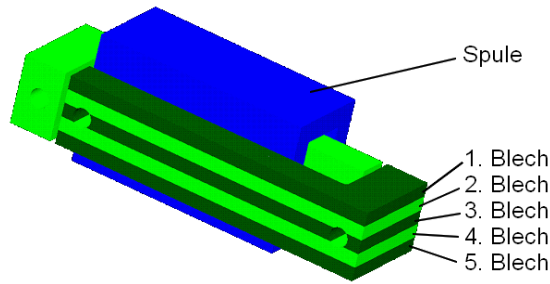


Abbildung 4.1: Schwingmagnet, L-förmige Bügel aus 5 Blechen aufgebaut (Darstellung aus Maxwell 3D)

0,01 mm. Mit diesen Kenntnissen wurde nun ein Simulationsmodell aufgebaut, welches in Abbildung 4.1 für den Fall eines aus 5 Blechen aufgebauten Blechpaketes zu sehen ist.

Das Materialvolumen der vollen Bauteile und der Bleche wurde stets gleich gehalten. D.h. es ergaben sich bei der schrittweisen Erhöhung der Anzahl der Bleche teilweise nicht handelsübliche Formate, wie beispielsweise eine Dicke von 0,635 mm pro Blech. Die angesetzte Zielgenauigkeit bei der Berechnung beträgt 1%.

Es werden nun beide L-förmigen Bügel des Magneten in Bleche aufgeteilt, beginnend bei einem Blech, also ohne zusätzlichen Luftspalte, dann zwei Bleche mit einem resultierenden parasitären Luftspalt, danach drei Bleche mit zwei resultierenden parasitären Luftspalten, usw. Da dieser Magnet nur einen kurzen Impuls ohne näher definierte Hubkraftkennlinie aufbringen muss, wird je Modellaufbau nur die Kraft zu Hubbeginn für den Worst-Case berechnet. Die Worst-Case-Bedingungen, entsprechen hier einer Versorgungsspannung von 9 V, kombiniert mit den 655 Windungen ergibt sich ein Strom von 0,72 A und in weiterer Folge 472 AW (Ampere Windungen). In Abbildung 4.2 sind die Ergebnisse der Simulationen für 1 bis 10 Bleche

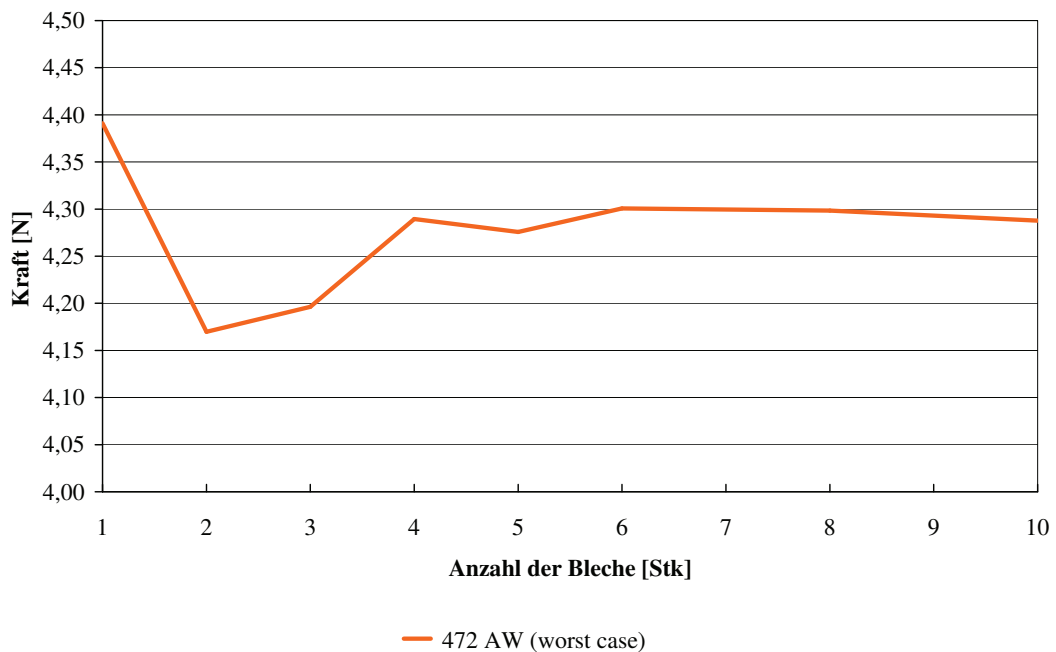


Abbildung 4.2: Kraftverlauf am Hubanfang des Schwingmagneten über Anzahl der Bleche

dargestellt. Der sich ergebende Verlauf lässt nun Interpretationen zu. Zu Beginn, beim Einfügen des ersten und zweiten Luftspalts, also bei zwei bzw. drei Blechen pro L-Bügel sinkt die Kraft relativ stark, um 5% ab. Danach erholt sich die Kraft und bleibt bis zur simulationstechnischen Grenze von 10 Blechen relativ konstant knapp 2% unter dem Vergleichswert des ungeteilten Schwingmagneten-Büfels.

Ab einer Anzahl von 12 Blechen verweigert das Vernetzungstool des verwendeten Berechnungsprogramm leider seine Dienste, da es zu nicht erkennbaren Unstetigkeiten in der Netzstruktur kommt. Es kann somit nicht mit absoluter Sicherheit gesagt werden, welchen Einfluss eine weitere Erhöhung der Anzahl der Bleche auf den Kraftverlust hat.

Bleibt die Anzahl der Bleche zwischen 4 und 10 Stück so beträgt der Fehler 1-2%. Somit sollte es für den folgenden Vergleich, bei einer Berechnungsgenauigkeit von 1%, völlig ausreichend sein, wenn die Bauteile als volle Körper, also ungeblecht dargestellt werden.

4.2 Vergleich der Konusgeometrie

Ziel ist es, einen quantitativen und qualitativen Vergleich der unterschiedlichen Konusgeometrien anzustellen. Weiters ist festzuhalten, dass nicht nur die Form der Konusgeometrie, sondern auch der Winkel einen großen Einfluss auf den Hubkraftverlauf eines Magneten hat. Dieser Konuswinkel wird ebenfalls weitestgehend gleich gehalten. Aufgrund kleiner konstruktiver Veränderungen beim Stanzteilmagneten entsteht ein Unterschied des Konuswinkel zum Drehteilmagneten von weniger als $0,1^\circ$. Dieser Unterschied ist aber verschwindend gering, berücksichtigt man übliche Fertigungstoleranzen (von $\pm 0,25^\circ$), sowie die Rechengenauigkeit des Simulationsprogramm von 1%.

Trotz ähnlichen Winkels in der Konusgeometrie bestehen nun zwischen den beiden verwendeten Geometrien noch zwei wesentliche Unterschiede:

- in der Größe der Konusfläche und somit im Luftspaltvolumen,
- im Volumen der Konusgeometrie.

Um nun einen Vergleich durchführen zu können wird versucht ein möglichst gleich großes Konusvolumen zu erreichen, damit keines der Vergleichsobjekte zu früh gesättigt ist, und somit das Ergebnis verfälscht, siehe auch der typische Verlauf der Grenzkurve (Sättigung) in den Abbildungen 2.4 und 2.7. Die Materialpaarungen, Lagerflächen, die Hublänge und Erregung durch die Wicklung sind bis auf ihre geometrische Form identisch angenommen.

In Tabelle 4.1 wird der für diesen Vergleich interessante Bereich des Ankers, nämlich die Konusgeometrie miteinander verglichen. Fertigungstechnisch notwendige Aussparungen, Bohrungen und zusätzliche Fasen bzw. Verrundungen wurden von den Testobjekten in diesem Bereich entfernt um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu verbessern. Der auftretende Unterschied in den Volumina beträgt weniger als 1%, der bei der Größe der Konusflächen hingegen etwa 50%, d.h. die Konusfläche des Ankers des Drehteilmagneten ist beinahe doppelt so groß wie die des Stanzteilmagneten.

In Abbildung 4.3 ist der Drehteilmagnet zu sehen, es handelt sich hierbei um eine Darstellung aus der Simulationssoftware Maxwell 3D. Die für den magnetischen Fluss und somit für die Erzeugung der magnetischen Kraft relevanten Komponenten

Drehteilmagnet				
Basisdurchmesser	6,02 mm	Konuswinkel	Konusfläche	Konusvolumen
Scheiteldurchmesser	4,4 mm	6,997°	108,837 mm ²	141,839 mm ³
Höhe	6,6 mm			
Stanzteilmagnet				
Basislänge	6 mm	Konuswinkel	Konusfläche	Konusvolumen
Scheitellänge	4,4 mm	6,911°	54,516 mm ²	140,712 mm ³
Höhe	6,6 mm			
Breite	4,1 mm			

Tabelle 4.1: Vergleich der Ankervolumina und Konusflächen der verwendeten Teile

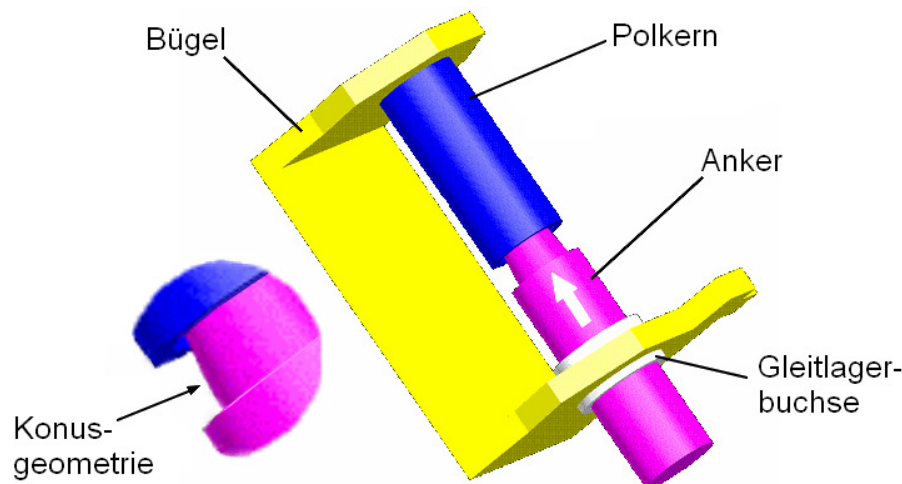


Abbildung 4.3: Drehteilmagnet ohne Spulenkörper und Spule (Darstellung Maxwell 3D)

des Drehteilmagneten werden betrachtet, die Spule, die zur Erzeugung des magnetischen Feldes dient, ist ausgeblendet um den Blick auf die Konusgeometrie freizugeben.

In Abbildung 4.4 ist der teilsymmetrische aus Stanzteilen aufgebaute Magnet dargestellt. Die Darstellung ist ebenfalls der Simulationssoftware Maxwell 3D entnommen. Hierbei zeigt sich im Unterschied zu Abbildung 4.3, dass zwischen Bügel und Polkern nicht mehr als Einzelteil unterschieden werden kann, da beide in einem Bauteil vereinigt wurden. Dieses Teil wird im Folgenden der Einfachheit halber als Gehäuse bezeichnet. Auch in dieser Abbildung ist die Spule ausgeblendet um einen Blick auf die Konusgeometrie freizugeben. Noch nicht dargestellt ist die Lagerbuchse, da die Art der Lagerung zu diesem Zeitpunkt noch nicht komplett geklärt ist.

4.2.1 Vergleich der rotationssymmetrischen mit der teilsymmetrischen Geometrie

Um einen technisch aussagekräftigen Vergleich zwischen dem Drehteil- und dem Stanzteilmagneten zu führen, werden nun die Hubkraftkennlinien beider Elektromagnete mit Maxwell 3D simuliert und gegenübergestellt.

Zu Beginn werden, siehe Abbildung 4.5, nur die Hubkraftkennlinien gegenüberge-

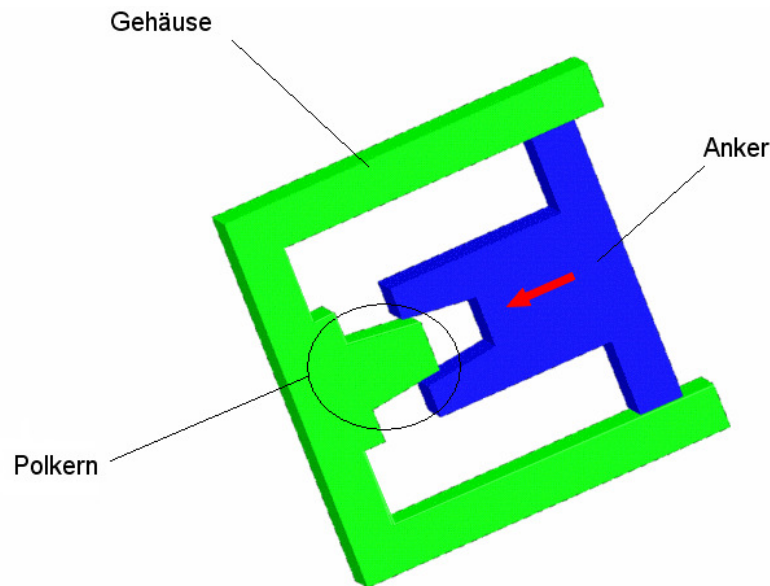


Abbildung 4.4: Stanzteilmagnet (Darstellung Maxwell 3D)

stellt, d.h. die absoluten auftretenden Kräfte am Drehteil- und am Stanzteilmagneten.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Haltekraft (bei 0 mm Hub) des Stanzteilmagneten wesentlich höher ist als jene des Drehteilmagneten, und dies, obwohl die Summe aus Konus- und Stirnflächen wesentlich geringer ist und das Volumen des Konus sich kaum unterscheidet. Der Unterschied beträgt an dieser Stelle circa 48%. Allerdings fällt die Hubkraft des Stanzteilmagneten relativ stark ab, und ab einem Hub von circa 2,5 mm fällt sie unter die des Drehteilmagneten. In Summe ist jedoch die Arbeit, das Integral unter der Kurve, die der Stanzteilmagnet verrichtet um 3,6% größer als die des Drehteilmagneten.

Um nun die beiden Magnete besser zu unterscheiden und den Hubkraftverlauf unabhängig von der Baugröße besser bewerten zu können wird anhand der Haltekraft (am Ende des Hubs) der Abfall der Hubkraft in % von dieser angegeben. Hierdurch ist es möglich eine qualitative Aussage über die Hubkraftkennlinie zu machen. Dieser Vergleich ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Man erkennt einen deutlicheren Unterschied im Kraftverlauf, als dies beim Vergleich der absoluten Kräfte der Fall war. Gut erkennbar ist auch die am Hubbeginn (Hub von 6,5 mm) geringere und gegen Hubende (Hub von 0 mm) stärkere Steigung beim Stanzteilmagnet, verglichen mit dem Drehteilmagneten.

Um das Verhalten des Kraftverlusts genauer beurteilen zu können wird nun für jeden Punkt der Hubkraftkennlinie das Verhältnis zum vorhergehenden Kraftwert berechnet - hierbei ergibt sich die Kennlinie aus Abbildung 4.7. Man kann erkennen, dass der Hubkraftverlust des Stanzteilmagneten über beinahe den gesamten Hub deutlich höher ist als jener des Drehteilmagneten, lediglich im Hubbereich von circa 4,5 bis 5 mm ist der Hubkraftverlust geringer.

Führt man obige Berechnung nun nicht vom Hubende mit der Haltekraft aus, sondern beginnt am Hubanfang, also bei 6,5 mm Hub, so erhält man den Kraftzugewinn, Abbildung 4.8. Hierbei übertrifft der Stanzteilmagnet den Drehteilmagnet ebenfalls deutlich, doch startet er auch auf einem niedrigeren Kraftniveau, wenn man sich auf Abbildung 4.5 bezieht.

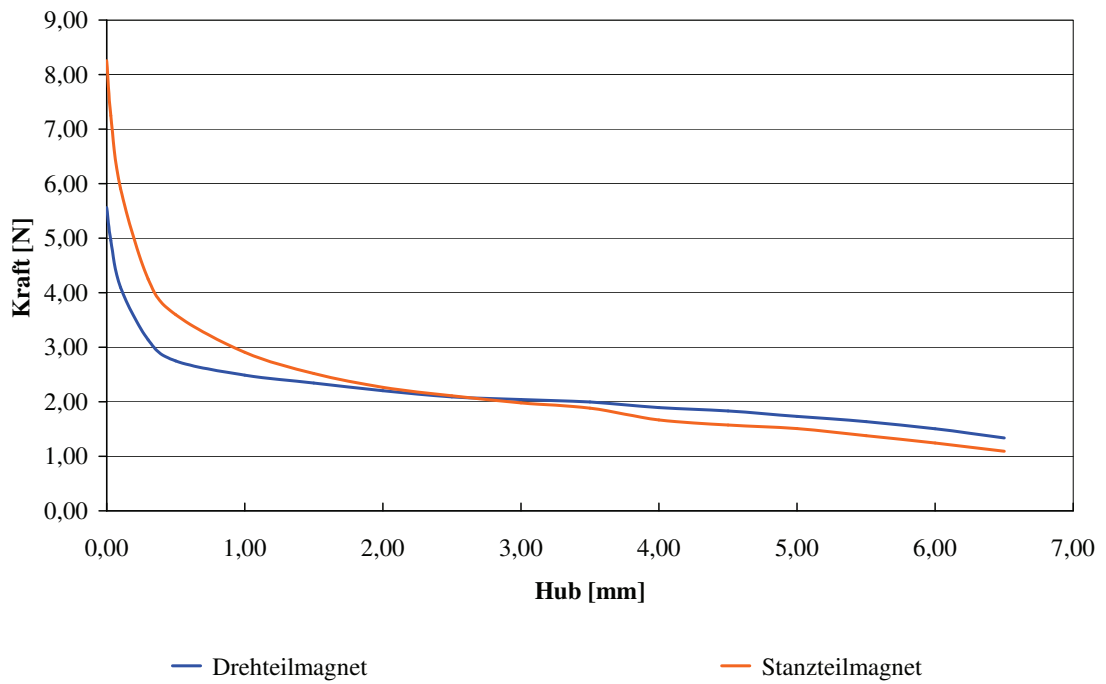


Abbildung 4.5: Hubkraftkennlinien des Drehteil- und Stanzteilmagneten

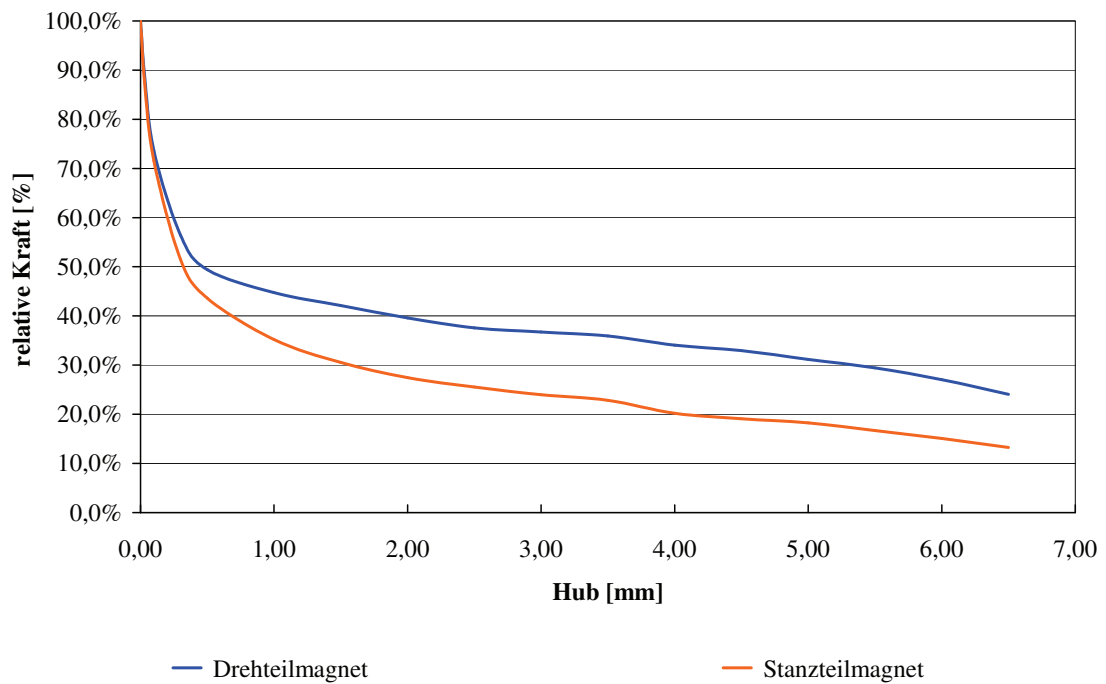


Abbildung 4.6: Verlauf der relativen Hubkräfte

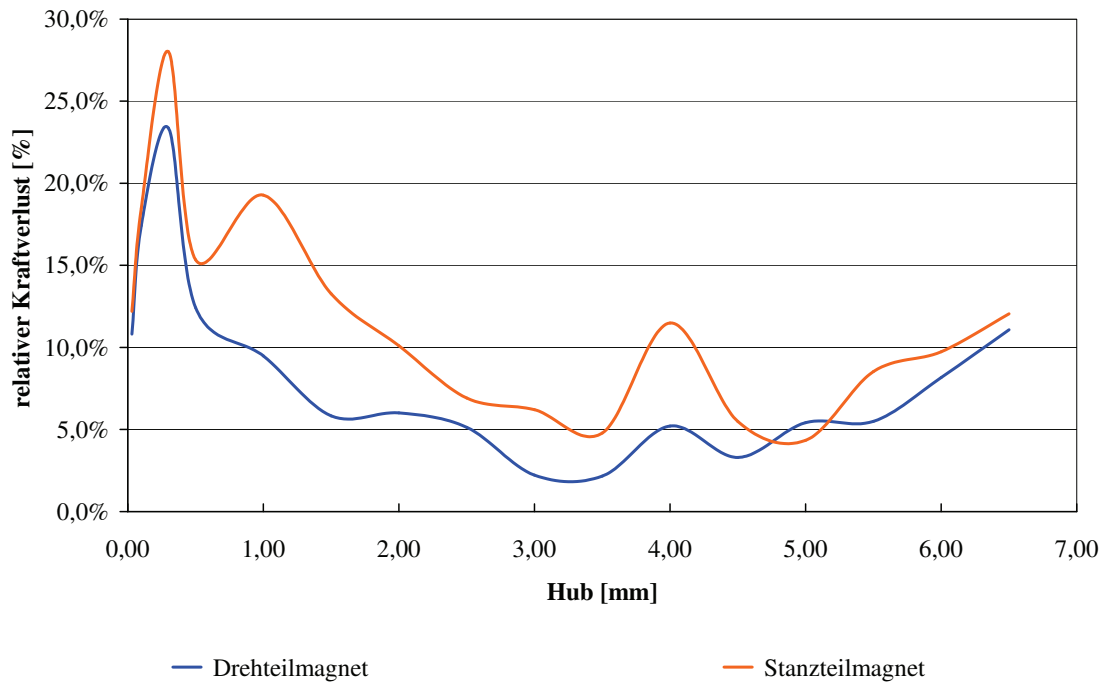


Abbildung 4.7: Vergleich des relativen Kraftverlustes

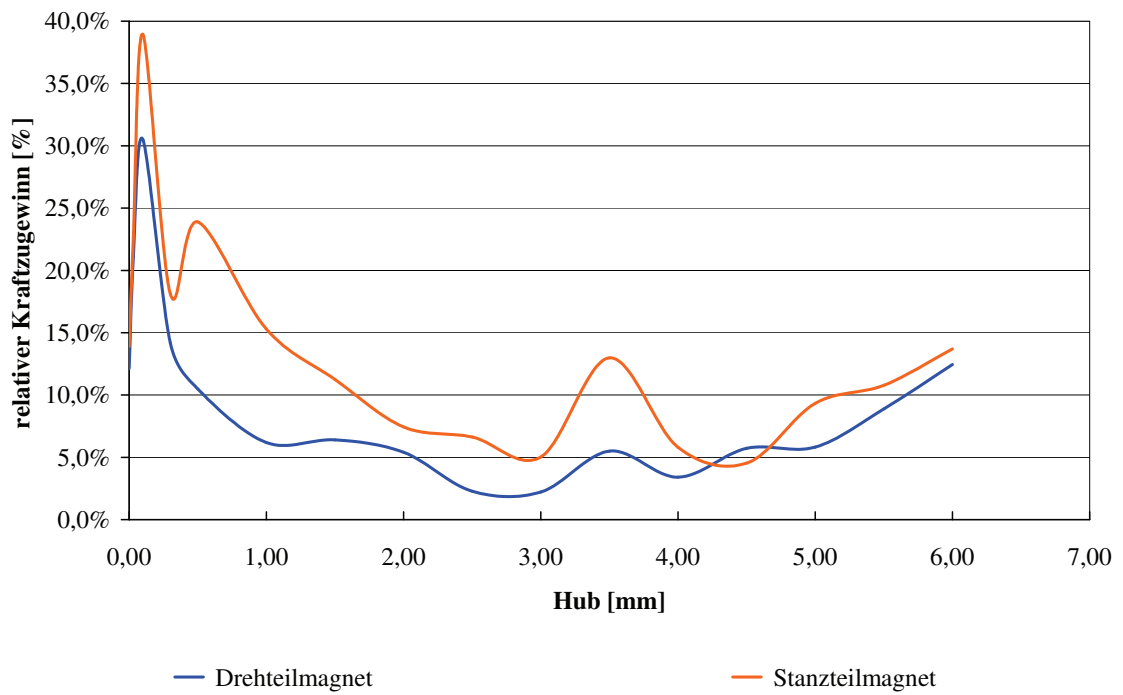


Abbildung 4.8: Relativer Kraftgewinn, ausgehend von der Ausgangslage bei 6,5 mm Hub

4.3 Erste wirtschaftliche Abschätzung

Nachdem das Prinzip elektromagnetisch umsetzbar scheint, ist es nötig eine Abschätzung der zu erwartenden Kosten vorzunehmen. Bei der Durchführung der Kalkulation konnte ich mich auf zwei sehr erfahrene Kollegen aus dem Bereich Industrial Engineering stützen. Nach dem Erstellen einer Stückliste, inklusive erster Materialauswahl und den ungefähren Ausmaßen der Bauteile bot sich das in Tabelle 4.2 dargestellte Ergebnis. Grundlage für die Kalkulation war eine angenommene Stückzahl von 2,8 Mio pro Jahr, unter Verwendung einer vollautomatischen Montageanlage, wie sie für den entsprechenden Drehteilmagneten aktuell auch genutzt wird. Die geschätzten Investitionen für die Montageanlage und die Werkzeuge des Stanzteilmagneten betragen 975.000 Euro, die aktuellen für den Drehteilmagneten in etwa 1,5 Mio Euro, auch hier wäre aufgrund des zu erwartenden geringeren Arbeitsaufwandes ein wesentlicher Kostenvorteil zu erwarten. Die detaillierte Kalkulation findet sich im Anhang.

Bauteil	Herstellkosten
Kupferspule	35,44
Leiterplatte	27,30
Anker	25,20
Gehäuse inkl. Polkern	25,20
Spulenkörper	5,25
Gleitlagerbuchse	3,15
Glasklebeband	2,55
Pins	2,10
Scheibe	1,05
Summe Materialkosten	118,75

Tabelle 4.2: Herstellkosten des Stanzteilmagneten, in Cent bei 2,8 Mio Stück pro Jahr

	Drehteilmagnet	Stanzteilmagnet
Materialkosten	1,2452	1,1875
Materialkosten gesamt	1,3061	1,2469
Arbeitskosten	0,3640	0,1500
Herstellkosten	1,6681	1,4000
inkl. VGK (20%)	2,0000	1,6800
inkl. Gewinn (20%)	2,4000	2,0100

Tabelle 4.3: Vergleich der Herstellkosten in Euro des Drehteil- und Stanzteilmagneten

4.4 Risikoabschätzung

Neben der Überprüfung der Hubkraftkennlinie und einer ersten wirtschaftlichen Abschätzung ist eine detailliertere FMEA nötig um den nächsten Meilenstein zu erreichen. Hierfür werden die zu diesem Zeitpunkt absehbaren möglichen Fehler für Spule, Anker, Gehäuse, Lagerung und deren Schnittstellen untersucht und bewertet. Die FMEA für die Spule, entsprechend Tabelle 4.4, ergibt keinerlei unwägbara

Möglicher Fehler	Fehlerfolge	B	Fehlerursache	A	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ
Veränderung Kupferdrahtquerschnitt	Magnet schaltet nicht	9	Kante beim Spulenkörper	2	Widerstandsmessung	2	36
Kraft nicht innerhalb Spezifikation	Magnete funktioniert nicht laut Spezifikation	8	Spulenberechnung falsch	3	HKKL	2	48
Nicht automatisierbar	Wirtschaftlichkeit nicht gegeben	5	Design	3	FMEA	3	75

Tabelle 4.4: FMEA für die komplette Spule, inkl. Spulenkörper

Risiken, im Gegensatz zu den Ergebnissen für Anker, Gehäuse, Lagerung und deren Schnittstellen. Der Grund hierfür ist das hohe Know-How-Level im Bereich der Spulenfertigung auf der einen Seite, und der zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausreichenden Informationen und Erfahrungen in Bezug auf die Anwendung von paketierte Blechen auf der anderen Seite. Die ausführliche FMEA findet sich im Anhang (A.2).

Kapitel 5

Virtuelles Prototyping

In der Implementierungsphase wird vor allem Wert auf die Konstruktion und die Funktionsanalyse gelegt. Schwerpunkt bei der Funktionsanalyse ist der Verlauf der Hubkraftkennlinie. Konstruktion und FEM liefen in dieser Phase über weite Strecken parallel ab, jedoch wurde ab einem gewissen Zeitpunkt die FEM Berechnung gestoppt, da nur noch minimale Änderungen an der Konstruktion durchgeführt wurden. Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine Risikoabschätzung.

5.1 Konstruktionsprozess

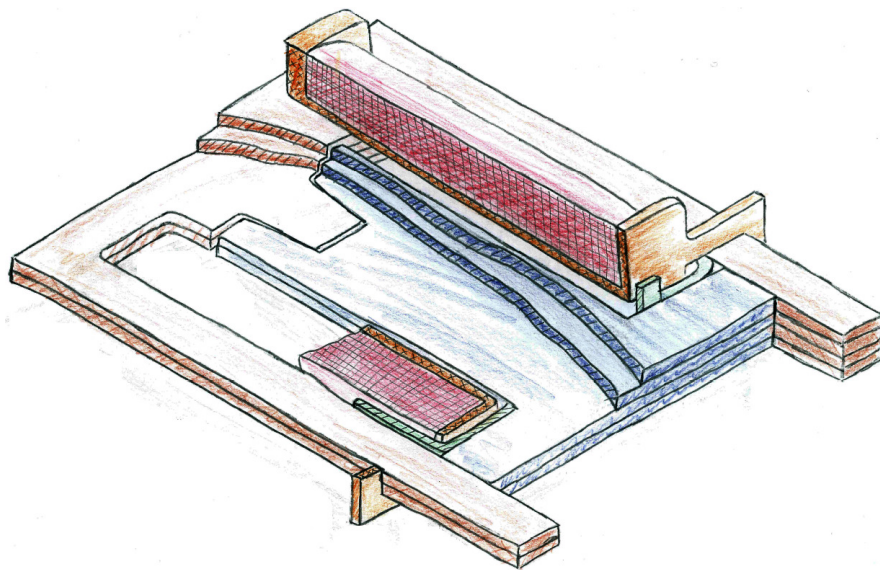


Abbildung 5.1: Entwurf des Stanzteilmagneten

Basierend auf dem Simulationsmodell aus Kapitel 4.2, wird ein kompletter Stanzteilmagnet entworfen. Hierfür war vor allem der Entwurf einer entsprechenden Lagerung des Ankers erforderlich. Inspiriert von der Befestigungsklemme eines CPU-Kühlkörpers entstand das Ankerlagerungsblech, welches in Abbildung 5.1 bzw. 5.2 grün dargestellt ist. Bei dieser Ankerlagerung handelt es sich um ein gebogenes Stanzteil, das auf den Anker aufgespresst wird, und das an seinen umgebogenen Lagerflächen mit einer Teflon-Beschichtung beaufschlagt ist um die Reibung zu reduzieren und die geforderte Lebensdauer zu erreichen. Die zweite Lagerstelle des

Ankers befindet sich im Spulenkörper, es handelt sich hierbei um eine Sonderbuchse, welche ebenfalls eine PTFE-Beschichtung¹ aufweist. Nach dieser ersten Konstrukti-

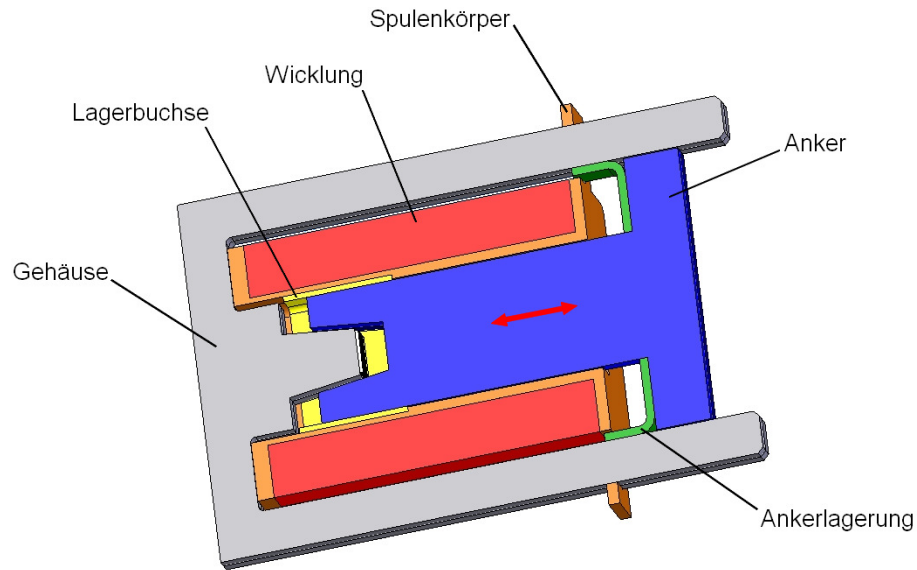


Abbildung 5.2: Erste 3D-Konstruktion (Darstellung aus Solid Works)

on ging es auf die Suche nach Schwachstellen. Als erstes wurden die umgebogenen Lagerflächen der Ankerlagerung von 5,5 mm auf 9,5 mm verlängert, damit diese auch über den gesamten Hub des Magneten stets seitlich vom Spulenkörper geführt werden, auch soll dies ein Verkanten verhindern. Des Weiteren wurde eine Bohrung von 2,5 mm Durchmesser im Anker zur Kraftübertragung vorgesehen. Der Durchmesser ergab sich aufgrund einer Kraftaufnehmervorrichtung im Labor, und ist somit schon eine erste Anpassung speziell für die Erstellung des Prototypen. Zusätzlich war es noch nötig den Spulenkörper besser zu fixieren und zu zentrieren, da auch dieser eine Lagerstelle aufweist, hierfür wurde am Boden des Spulenkörpers eine Nut vorgesehen mit deren Hilfe sich der Spulenkörper leicht auf das Gehäuse aufpressen lässt. Der Spulenkörper musste, um diese Nut ausführen zu können, auf 33 mm verlängert werden, hierdurch änderten sich die Abmessungen der Wicklung minimal, die Windungszahl blieb allerdings gleich.

Die im Spulenkörper eingepresste Lagerbuchse wurde von ihrer ursprünglichen Länge von 15 mm auf 10 mm verkürzt um leichter fertigbar zu sein, eine weitere Verkürzung ist bei Bedarf durchaus möglich, geht aber auf Kosten der Stabilität der Lagerung. Neben diesen Änderungen, um vor allem die Lagerungseigenschaften zu verbessern, war es auch noch nötig die Konusgeometrie anzupassen um möglichst nahe an die vorgegebene Hubkraftkennlinie zu kommen, siehe auch Kapitel 5.2.

¹PTFE-Beschichtung, Polytetrafluorethylen ist ein Kunststoff, der auch umgangssprachlich als Teflon bezeichnet wird.

5.2 Funktionsanalyse mittels FE

Die Funktionsanalyse erfolgt primär über die Simulation in Maxwell 3D, hinzu kommt aber während des konstruktiven Prozesses die Kollisionskontrolle von Solid Works. Im Weiteren wurde versucht die vorgegebene Hubkraftkennlinie so gut wie möglich nachzubilden.

Neben der Form der Konusgeometrie und deren Winkel haben auch die Fertigungstoleranzen einen entscheidenden Einfluss auf die Magnetkraft. So brachte das Hinzufügen der Ankerlagerung nicht nur eine stabilere Lagerung, sondern auch einen Anstieg der Magnetkraft von circa 10% über den gesamten Magnethub. Des Weiteren wurden die Stirnflächen um circa 5% verkleinert um die Haltekraft in der Endposition etwas zu mindern und der Konuswinkel wurde auf circa $5,2^\circ$ reduziert um die Steigung der Hubkraftkennlinie herab zu setzen. Weiters wurde der Luftspalt zwischen Anker und Gehäuse am oberen (T-förmigen) Ende des Ankers zwischen 0,1 und 0,2 mm variiert. Die folgenden Simulationen zeigten, dass eine Erhöhung des Luftspalts von 0,1 mm auf 0,15 mm eine Reduktion der Magnetkraft von 5% nach sich zieht, erhöht man den Luftspalt auf 0,2 mm so sind es sogar 7,5%. Durch diese Erkenntnisse konnten Maßnahmen getroffen werden um die Hubkraftkennlinie des Stanzteilmagneten gut an die des Drehteilmagneten anzunähern.

In Abbildung 5.3 ist deutlich die Annäherung der Hubkraftkennlinie des Stanzteilmagneten durch die Optimierungsmaßnahmen an die des Drehteilmagneten zu sehen. Im Folgenden ist stets von der optimierten Variante des Stanzteilmagneten die Rede, wenn der Stanzteilmagnet erwähnt wird.

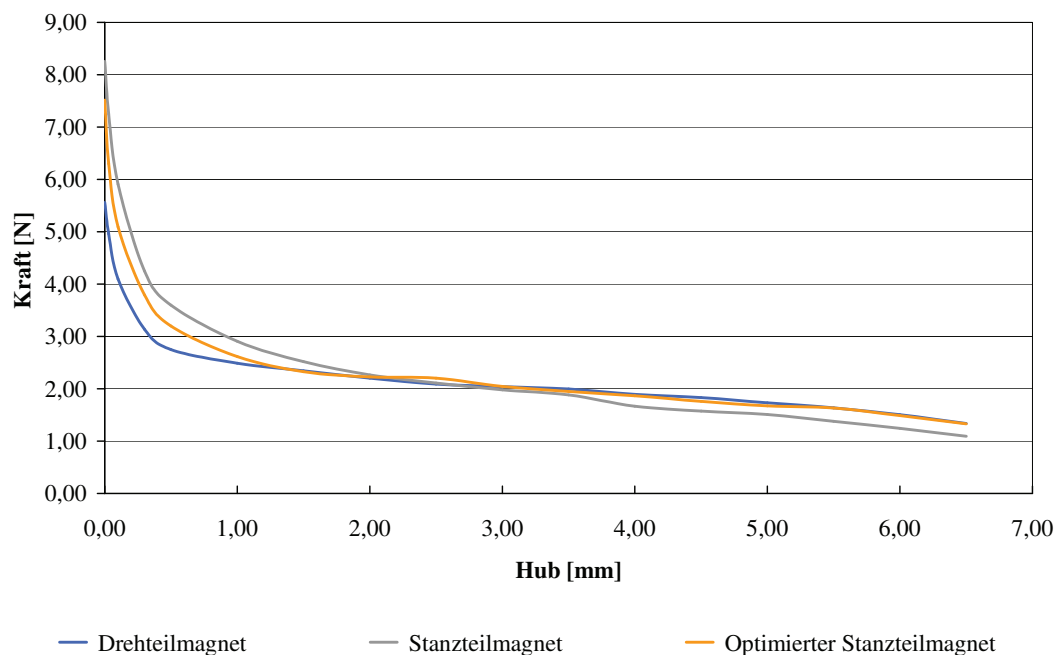


Abbildung 5.3: Hubkraftkennlinienvergleich zwischen Drehteilmagnet, Stanzteilmagnet und dem nun optimierten Stanzteilmagneten

Vergleicht man nun wie schon zuvor in Kapitel 4.2, die Hubkraft auf Basis der Haltekraft, so erhält man die relative Hubkraft, welche in Abbildung 5.4 dargestellt ist. Es bietet sich hier auf den ersten Blick ein ähnliches Bild wie in 4.6, doch ist die Anfangskraft (bei Hub 6,5 mm) um 20% höher als beim nicht optimierten Stanz-

teilmagneten, wodurch nun die Anfangskraft beinahe ident mit der des Drehteilmagneten ist. Vergleicht man die relativen Hubkräfte an den einzelnen simulierten Punkten, so zeigt sich, dass bei einem Hub von 1,5 mm die größte Differenz zwischen Drehteil und Stanzteilmagnet auftritt, sie beträgt hier 11%. Über den größten Teil des Hubes schwankt die Differenz aber nur zwischen 5 und 8%.

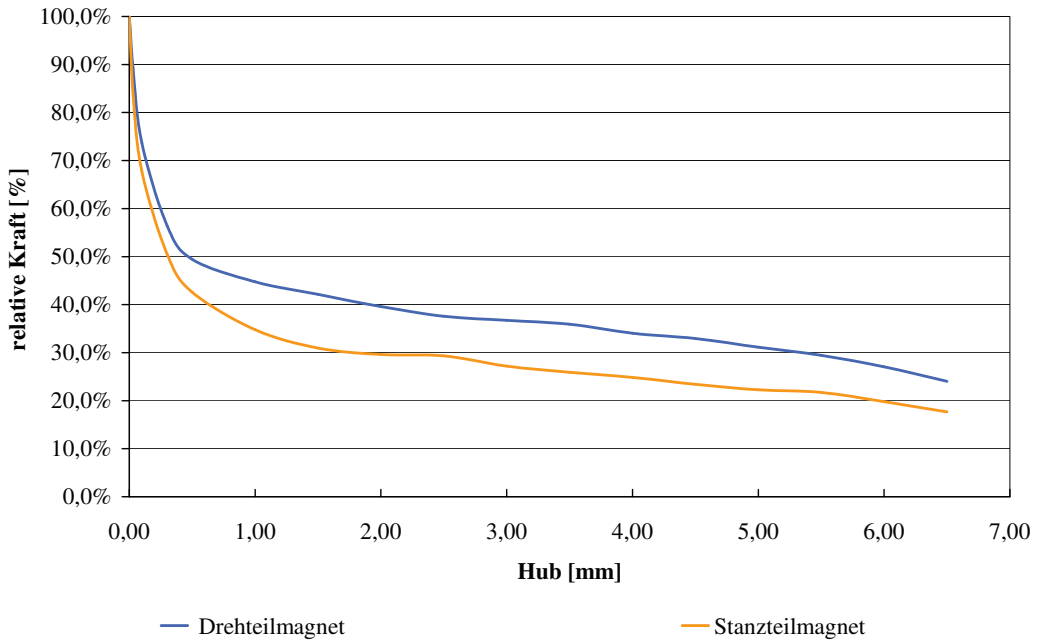


Abbildung 5.4: Vergleich der relativen Hubkraft

Um nun die Steigungen der Hubkraftkennlinien zu vergleichen wird wie in Kapitel 4.2, der relative Anstieg der Hubkraft, ausgehend von der Ausgangslage (bei 6,5 mm Hub) in einem Diagramm eingetragen, siehe Abbildung 5.5.

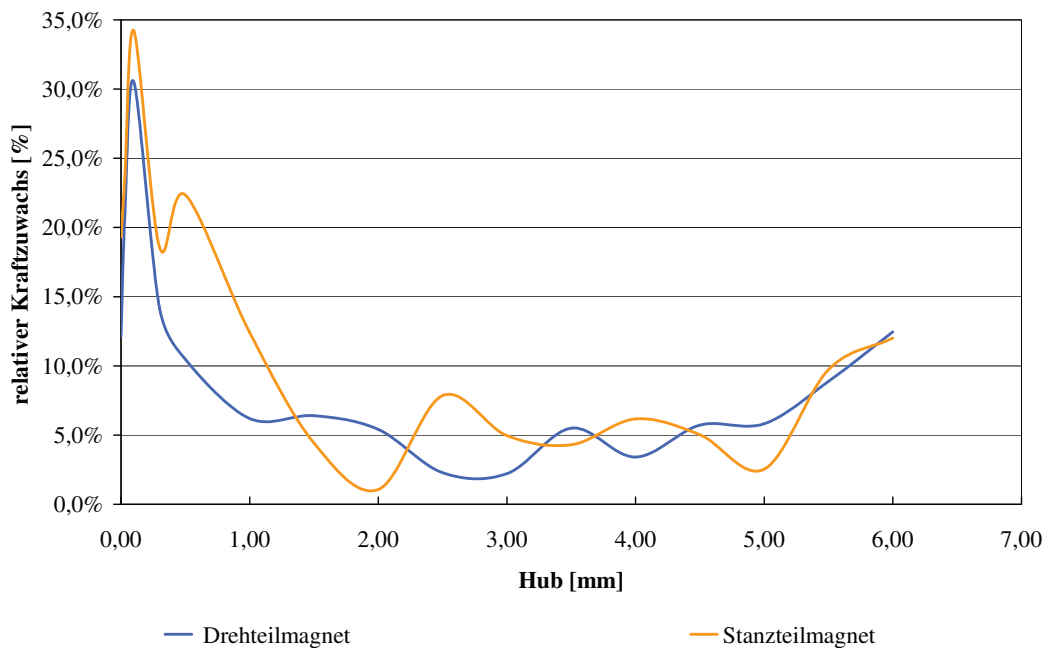


Abbildung 5.5: relativer Kraftzuwachs

5.3 Abschliessende Risikoabschätzung

Diese Projektphase wird wie schon die Vorangegangene mit einer FMEA beschlossen. Aufgrund neuer Erkenntnisse, durch Literatur, potentielle Lieferanten und der Weiterentwicklung des Konzepts, fällt diese FMEA deutlich detaillierter und positiver aus als jene am Ende von Kapitel 4.

Folgende Systemelemente wurden bewertet:

- Spule komplett,
- Anker,
- Gehäuse und Polkern,
- Lagerung,
- Distanzscheibe.

Um einen Überblick zu erhalten in welchen Bereichen laut FMEA die größten Risiken herrschen, sind in Tabelle 5.1 alle Fehlerursachen angeführt, die einen RPZ Wert von über 100 zur Folge haben.

Systemelement	Fehlerursache	RPZ
Spule komplett	Lagerung nicht für Lebensdauer ausgelegt	160
	Durchmesser Lager zu Gehäuse ungünstig	128
	Spule wackelt in Gehäuse	128
Anker	Lagerung nicht laut Zeichnung	120
	Schaltzeitanforderung nicht erfüllt	120
Gehäuse und Polkern	Beschichtung ungünstig	105
Lagerung	Materialspezifikation unzureichend	105
Distanzscheibe	Scheibe zu dick / nicht laut Zeichnung	105

Tabelle 5.1: Risikoreichsten Elemente aus der FMEA des Stanzteilmagneten

Die detaillierte FMEA ist im Anhang ab Seite 81 zu finden.

Kapitel 6

Umsetzung des neuen Magnetkonzepts

Die Umsetzung des Projekts stellt die letzte Phase vor der abschließenden Bewertung dar. Ziel ist das nun berechnete und konstruierte Modell als Prototypen zu realisieren und im Labor zu prüfen. Das Konzept und dessen Anwendbarkeit auf andere Projekte wird in Kapitel 7 behandelt.

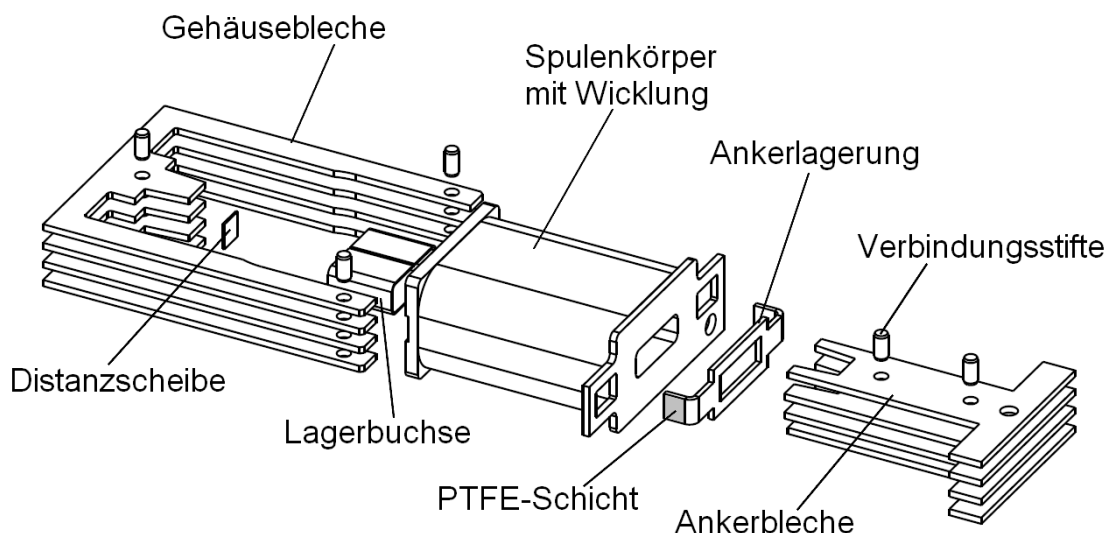


Abbildung 6.1: Explosionszeichnung des auf die Herstellung von Prototypen abgeänderten Stanzteilmagneten (Darstellung aus Solid Works)

6.1 Prototypenbau

Bei diesen Prototypen handelt es sich um Funktionsmuster, d.h. die Funktion soll zwar gegeben sein, die Fertigung und Montage erfolgten aber noch nicht unter serien-nahen Bedingungen. Dies bedeutet hierbei allerdings auch, dass bei den Abmessungen, den verwendeten Materialien sowie den Beschichtungen teilweise Kompromisse eingegangen werden müssen. Besonders beim Spulenkörper ergeben sich hierbei große Abweichungen zur ursprünglichen Konstruktion. Da die Innengeometrie des Spulenkörpers nicht nur zwei Passungen, sondern auch zahlreiche andere sehr enge Maßtoleranzen aufweist, ist es nicht möglich diesen wie sonst üblich über Rapid

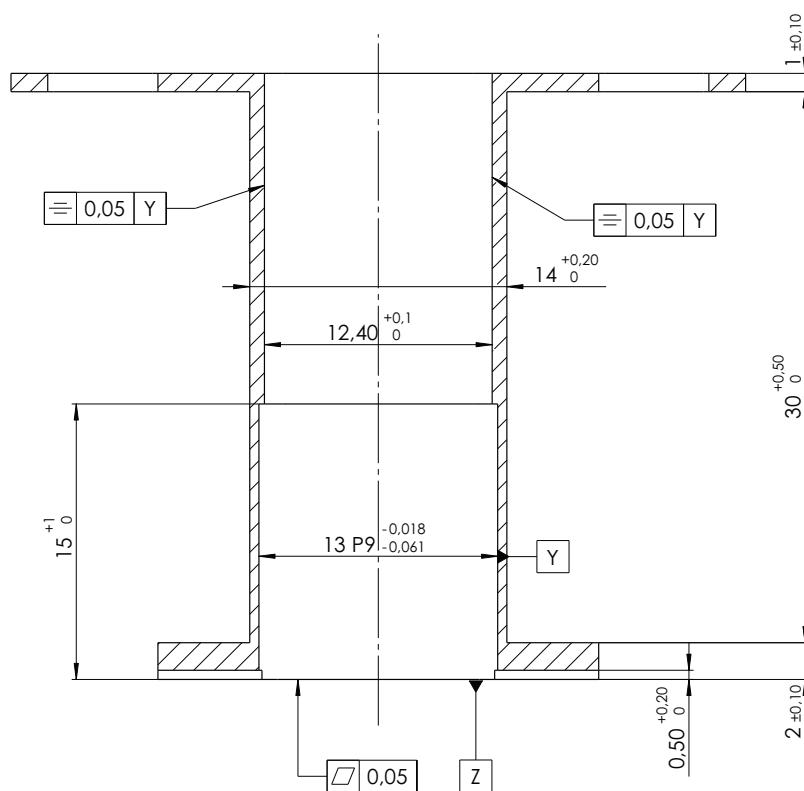


Abbildung 6.2: Schnittdarstellung des Spulenkörpers

Prototyping herzustellen, da hier die Toleranzen in der Regel über 0,5 mm liegen, was für diesen Spulenkörper nicht ausreichend ist, siehe Abbildung 6.2. Aufgrund dieser Einschränkung war die einzig praktikable Lösung für die geringe Stückzahl (5 Stück) ein Fräsen der Spulenkörper. Nun musste der Spulenkörper aber leicht abgeändert werden, da speziell die Innenradien unter Berücksichtigung der anderen Vorgaben sehr schwierig zu realisieren sind - die Innenradien wurden daher auf 1,5 mm vergrößert.

Im Zuge dieser Änderung musste auch die innen liegende Lagerbuchse abgeändert werden, die Radien wurden geändert. Zusätzlich musste noch die Wandstärke der Lagerbuchse reduziert werden, da es nicht möglich war ohne teuren und zeitintensiven Werkzeugbau die Innenseite der Lagerbuchse mit Teflon zu beschichten. Für die Prototypen kam nun eine Buchse zum Einsatz, die auf ihrer Innenseite mit einer PTFE-Folie¹ beklebt ist. Die Buchse als solches wurde per Drahtschneiden gefertigt, da auch hierfür sonst ein relativ aufwendiges Biegewerkzeug erzeugt hätte werden müssen.

Die Blechteile für den Anker wie auch das Gehäuse wurden ebenfalls per Drahtschneiden gefertigt, wobei es beim Gehäuse für die Prototypen eine weitere Besonderheit gab. Es wurde nämlich das gesamte Paket an der Lagerstelle noch einmal nachbearbeitet um eine relativ optimale Lagerfläche zu erzeugen, in einer eventuellen Serienfertigung ist aber eine derartige Nachbearbeitung vermutlich nicht praktikabel. Die Verbindung der Blechteile von Anker und Gehäuse erfolgt durch Verstiften und nicht wie sonst bei Serienstanzteilen durch Paketieren mittels Tiefens oder La-

¹PTFE-Folie, mit Polytetrafluorethylen beschichtetes Glasgewebeband, hier wurde ein selbstklebendes benutzt.

erschweißens. Weiters ist für die Prototypen noch die Verwendung einer üblichen Distanzscheibe gedacht, in der Serie ist aber beispielsweise eine spezielle Lackierung denkbar. Beschichtungstechnisch gibt es bis auf die Beschichtung der Lagerbuchse relativ geringe Abweichungen von einer möglichen Serienanwendung. Die Komponenten Anker (gesamt) und Gehäuse (gesamt) werden im zusammengebauten (verstifteten) Zustand mit einer 7 bis 14 μm dicken Schicht vernickelt. Die Ankerlagerung wird erst nach diesem Beschichten aufgebracht, da sie zuvor mit einer so genannten Molykote-Beschichtung² versehen wird um eine verbesserte Lauffläche zu erhalten.

6.1.1 Musterauftrag

Die übliche Vorgehensweise verlangt vor dem Bau eines Prototypen einen Musterauftrag und eine dazugehörige Musterbesprechung. Der Antrag wurde am 17. September 2008 gestellt, leider konnte die abschließende Musterbesprechung erst am 7. Oktober 2008 stattfinden. Die Zeit zwischen Antragerstellung und Musterbesprechung wurde zum Einholen einiger verbindlicher Richtangebote genutzt - wodurch dann bei der Musterbesprechung direkt eine Lieferantenauswahl getroffen werden konnte. Der komplette Musterauftrag mit allen Zeichnungen ist im Anhang zu finden.

6.1.2 Lieferantenauswahl

Trotz zahlreicher Anfragen gab es insgesamt nur von 8 Lieferanten konkrete Angebote für die unterschiedlichen Teile, da ein Großteil der potentiellen Lieferanten sich außer Stande sah innerhalb der geforderten Toleranzen zu fertigen. Der Großteil der Angebote für die Blechbauteile sah für deren Fertigung Drahtschneiden vor, lediglich ein Angebot schlug Laserschneiden mit nachträglicher Bearbeitung der Funktionsmaße vor. Dieses Angebot war deutlich das günstigste, konnte aber aufgrund der eingeschränkten Nacharbeit und des zeitlichen Rahmens nicht angenommen werden.

Die Auswahl der Lieferanten erfolgte nicht allein aufgrund der Herstellkosten der Einzelteile, sondern im Falle der Blechteile auch durch die leichte Erreichbarkeit und der guten Erfahrung mit dem Lieferanten. Auch hat dieser den Zusammenbau und eventuelle Nacharbeiten angeboten. Eine genauere Übersicht der Lieferantengebote findet sich im Anhang.

6.1.3 Wareneingangskontrolle

Es erfolgten Überprüfungen auf Vollständigkeit der Lieferungen, sowie auf die Maßhaltigkeit bzgl. der Funktionsmaße. Unglücklicherweise gab es Probleme bei der Beschichtung, was sich in einem extrem starken Kantenaufbau niederschlug, siehe Abbildung 7.7. Aufgrund dieser Probleme musste nachgearbeitet werden um die Prototypen überhaupt noch verwenden zu können.

²Molykote-Beschichtung: Beschichtung aus Molybdän(IV)-sulfid mit graphitartiger Struktur.

6.2 Prüfung der Prototypen im Labor

Nach der Montage der Prototypen wurden diese im Labor von Kendrion Binder Magnetic Systems auf ihre Funktion hin getestet. Um die Ergebnisse reproduzieren zu können wurden die Prototypen mit PT01 bis PT05 nummeriert, sowie während der Tests regelmässig Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit kontrolliert. Die Lufttemperatur schwankte innerhalb der Tage an denen Messungen durchgeführt wurden zwischen 22,7 und 23,4°C, die Luftfeuchtigkeit zwischen 33,7 und 41%.

Um die Ergebnisse vergleichen zu können wurden zusätzlich Exemplare des Drehteilmagneten vermessen, auf dessen Vorgaben der Stanzteilmagnet ausgelegt wurde. Die Drehteilmagneten entstammten der Serienfertigung und tragen die Bezeichnungen AL750, AL751 und AL752.

Vor der Messung der Hubkraftkennlinien kamen die grundlegenden elektrotechnischen und mechanischen Funktionstests, wie Widerstands-, Erwärmungsmessung oder das Messen des Ankergewichts.

Tabelle 6.1 zeigt die gemessenen Widerstände der Prototypen und der Vergleichsmagneten aus der Serie. Sowohl die Prototypen als auch die Vergleichsmagneten entsprechen den Spezifikationen.

Magnet	Widerstand [Ω]
PT01	17,258
PT02	17,354
PT03	17,423
PT04	17,315
PT05	17,261
AL750	17,798
AL751	17,784
AL752	17,827

Tabelle 6.1: Wicklungswiderstandsmessung

In Abbildung 6.3 ist der Messaufbau für die vorgeschriebene Erwärmungsmessung dargestellt. Hierfür werden die Magnete mit 12 VDC für 3 Stunden bestromt, und danach der Widerstand und die Temperatur gemessen, siehe Tabelle 6.2. Der erzielte Wert des Prototypen übertrifft den des Drehteilmagneten, und bleibt genau wie auch dieser innerhalb der Vorgaben.

	PT01	AL750
Spulenwiderstand	24,15 Ω	25,15 Ω
Temperaturänderung	+104,12 $^{\circ}\text{K}$	+106,89 $^{\circ}\text{K}$

Tabelle 6.2: Messwerte der Erwärmungsmessung

Sowohl Ankergewicht, Tabelle 6.3, als auch die Anzugszeit, T_{an} , Tabelle 6.4, entsprechen den geforderten Vorgaben. Die Messung der Resthaltekraft ergibt Abbildung 6.4. Hierfür wird der Magnet eine Minute lang mit 16 VDC bestromt und 5 Sekunden nach Wegfall der Spannung die Resthaltekraft gemessen, diese darf 0,2 N nicht überschreiten. PT02 und PT03 überschreiten diesen Wert deutlich, PT01 und PT04 überschreiten ihn ebenfalls knapp, lediglich PT05 bleibt recht deutlich unter dem Grenzwert.

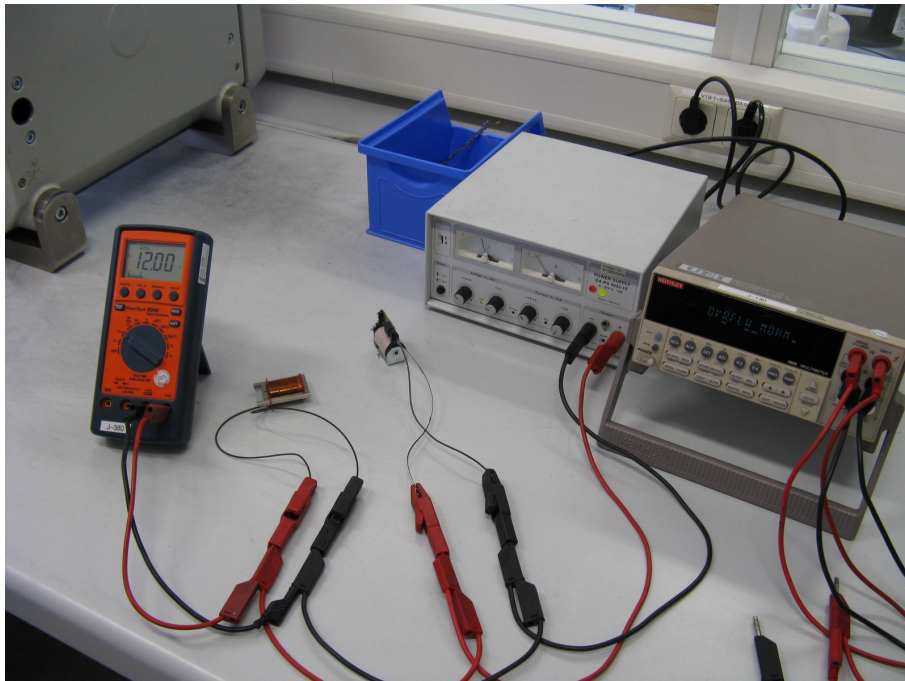


Abbildung 6.3: Schaltungsaufbau für die Erwärmungsmessung

Magnet	Ankergewicht [g]
PT01	14,5
PT02	14,5
PT03	14,6
PT04	14,6
PT05	14,4

Tabelle 6.3: Messung des Ankergewichts

Magnet	T_{an} für 6,5mm
PT01	26,25
PT02	25,80
PT03	24,50
PT04	27,20
PT05	24,40
AL750	28,20
AL751	28,20
AL752	28,30

Tabelle 6.4: Messwerte der Anzugszeit-Messung

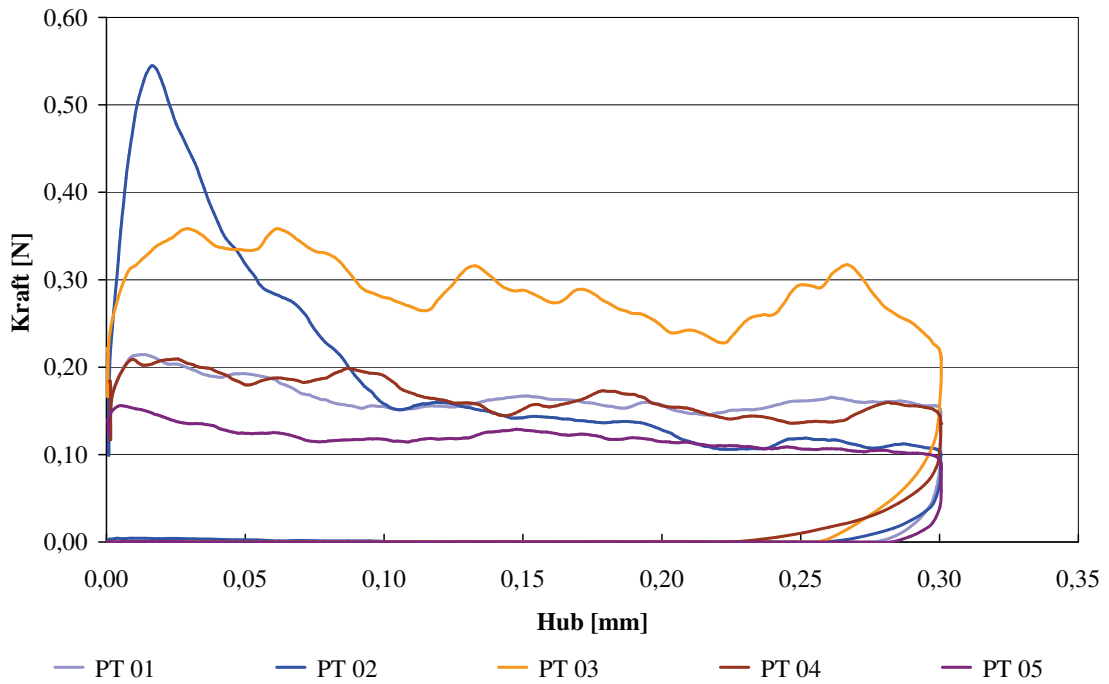


Abbildung 6.4: Resthaltekräften

6.2.1 Messung der Hubkraftkennlinien

In Kapitel 7 finden sich Darstellungen in denen die Hubkraftkennlinien von Stanz- und Drehteilmagneten, bei Nennbedingungen bzw. im Worst-Case miteinander verglichen werden. Die verbleibenden Hubkraftkennlinien der Prototypen und Drehteilmagnete finden sich im Anhang.

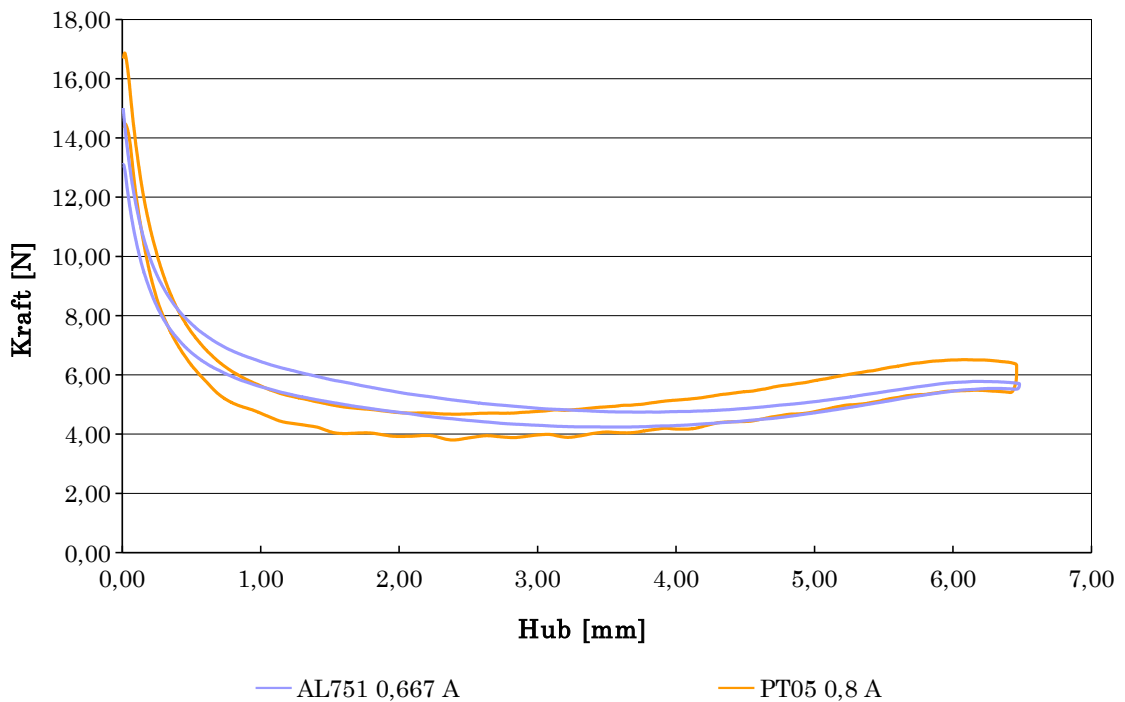


Abbildung 6.5: Vergleich der Hubkraftkennlinien AL751 bei Normalbedingungen und PT05 bei Übererregung

Aufgrund der etwas schlechter ausfallenden Hubkraftkennlinien der Prototypen, was reibungsbedingt ist, wird versucht mittels Übererregung diesen Unterschied zu kompensieren. Hierfür wird exemplarisch PT05 herangezogen und mit AL751 verglichen. AL751 wird mit einem Nennstrom von 0,667 A betrieben, während die Stromstärke für PT05 schrittweise erhöht wird. Um nun an den geforderten Messpunkten, 0,3 mm - 3,5 mm - 6,5 mm Hub, die vorgegebenen Mindestkräfte zu erreichen ist eine Übererregung auf 0,8 A notwendig, siehe Abbildung 6.5.

Kapitel 7

Bewertung des neuen Magnetkonzepts

Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse soll nun eine Bewertung des neuen Magnetkonzepts erfolgen. Besonderer Wert wird hierbei auf das Verhalten der Hubkraftkennlinie des Stanzteilmagneten gelegt.

In Abbildung 7.1 ist das neue Magnetkonzept in seiner aktuell vorliegenden Form, als ein aus Stanzteilen aufgebauter Elektromagnet, dargestellt. In Abbildung 7.2 ist zusätzlich eine Schnittdarstellung dieses Stanzteilmagneten zu sehen.

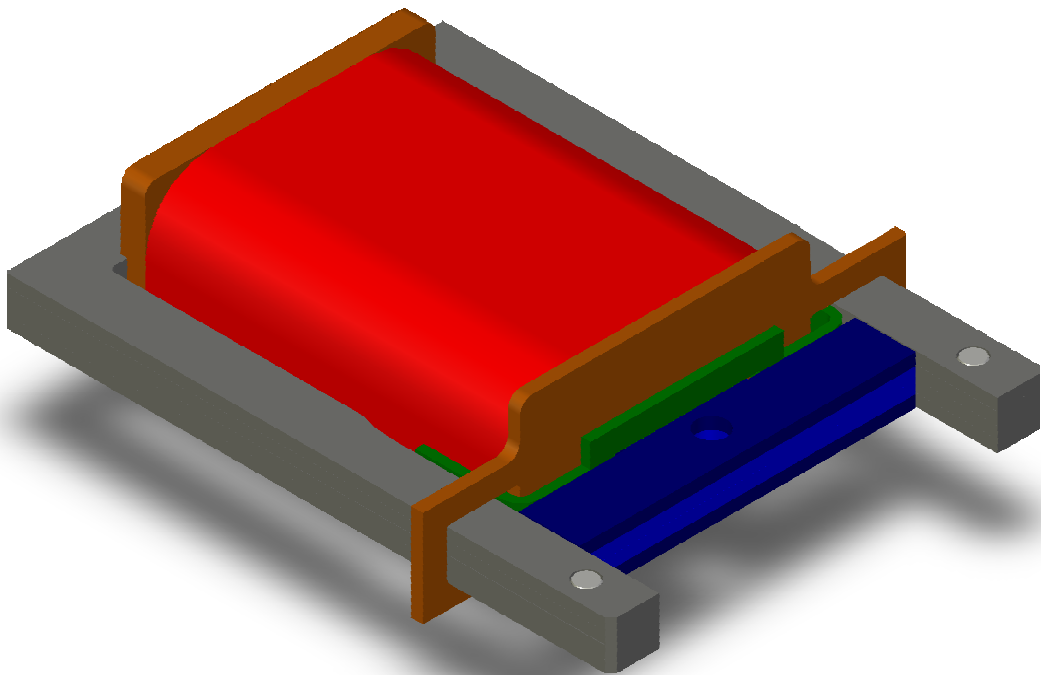


Abbildung 7.1: Stanzteilmagnet (Darstellung aus Solid Works)

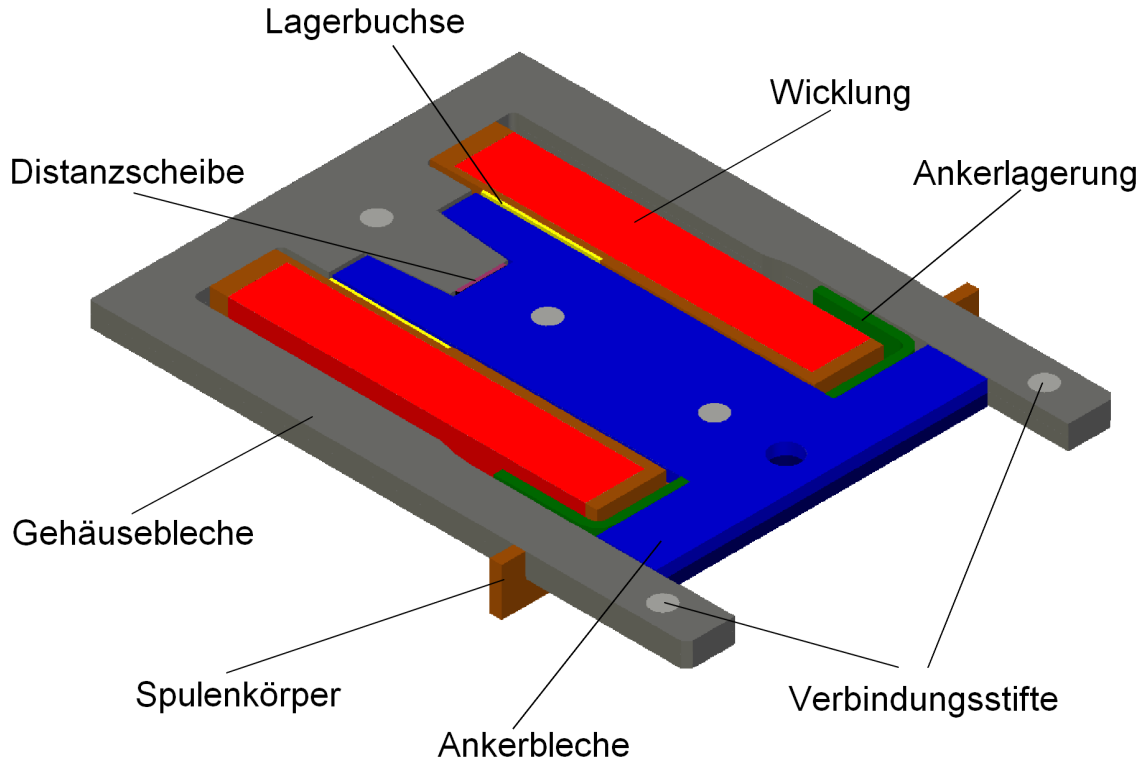


Abbildung 7.2: Stanzteilmagnet Schnittdarstellung (Darstellung aus Solid Works)

7.1 Hubkraftkennlinie

In Abbildung 7.3 ist die vorgegebene Hubkraftkennlinie des Drehteilmagneten abgebildet. Die untere der jeweiligen Hysteresekurven ist die mit Reibung behaftete Kennlinie, die obere die reibungsfreie. Der sich dazwischen befindliche Bereich bildet somit die Verluste durch die Reibung, die Reibungsarbeit, ab.

Der Betriebsstrom bei Nennbedingungen beträgt 0,667 A, unter Worst-Case-Bedingungen sind es 0,319 A. Der Nennstrom ergibt sich aus der Nennspannung von 12 V und dem Wicklungswiderstand von 18 Ω . Im Worst-Case erhöht sich der Wicklungswiderstand im Zuge der Spulenerwärmung von 105 K auf 25 Ω .

Die aus Blechen gefertigten Prototypen werden in der selben Messeinrichtung wie die aus Drehteilen aufgebauten Magnete geprüft. In Summe wurden 5 Prototypen erstellt und vermessen. Die Abweichungen gegenüber den Drehteilmagneten waren bei den Erwärmungs- und Widerstandsmessungen unter 1%.

Die Messwerte der Prototypen PT01 bis PT04 wurden gemittelt und ergaben die in Abbildung 7.4 zu sehenden Hubkraftkennlinien. Hierbei erkennt man einen sehr großen Anteil der Reibungsarbeit anhand der Hubkraftkennlinien. Die zittrige Hubkraftkennlinie erklärt sich durch die bei den Prototypen PT01 bis PT04 auftretenden Reibungsprobleme, mit denen ein leichtes Verkanten einhergeht.

Aufgrund der nicht zufriedenstellenden Messwerte wurde der Prototyp PT05 modifiziert. Hier wurde eine bereits in der Buchse verwendete PTFE Folie auf die Ankerlagerung aufgebracht, welche zu einer deutlichen Verbesserung der Hubkraftkennlinie führte, wie man Abbildung 7.5 entnehmen kann. Sie verbesserte nicht nur die Gleiteigenschaften, sondern verhinderte auch einen magnetischen Schluss, der durch die

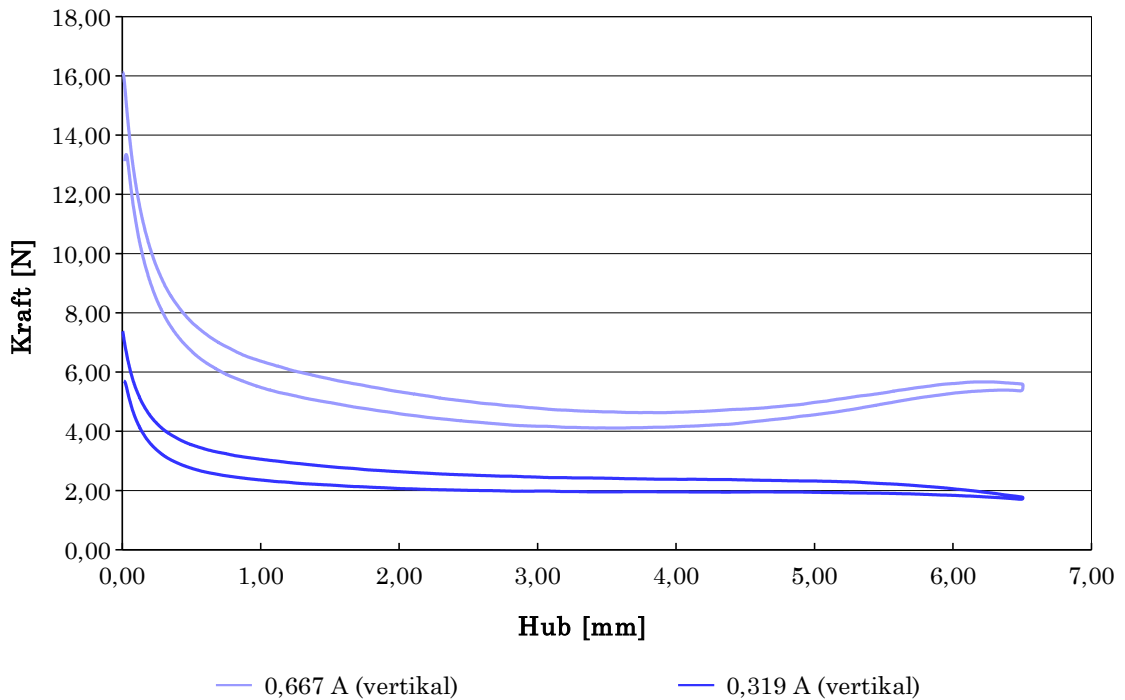


Abbildung 7.3: Hubkraftkennlinie Drehteilmagnet

nicht optimal erscheinende Molykote-Beschichtung auftreten konnte.

In Abbildung 7.6 sind der Durchschnittswert der Prototypen PT01 bis PT04, sowie der modifizierte Prototyp PT05, dem vorgegebenen Drehteilmagnet gegenüber gestellt. Man kann eine sehr deutliche Verbesserung durch die Modifikation an Prototyp PT05 erkennen.

Aufgrund des Kantenaufbaus durch die galvanische Behandlung der Prototypenbauteile, siehe Abbildung 7.7, war eine entsprechende Nacharbeit notwendig um die Teile wieder fügen zu können. Auch war die Funktion der Lagerung hierdurch stark beeinträchtigt. Die ursprüngliche Kontur des in Abbildung 7.7 dargestellten Bauteiles ist weiß eingezeichnet.

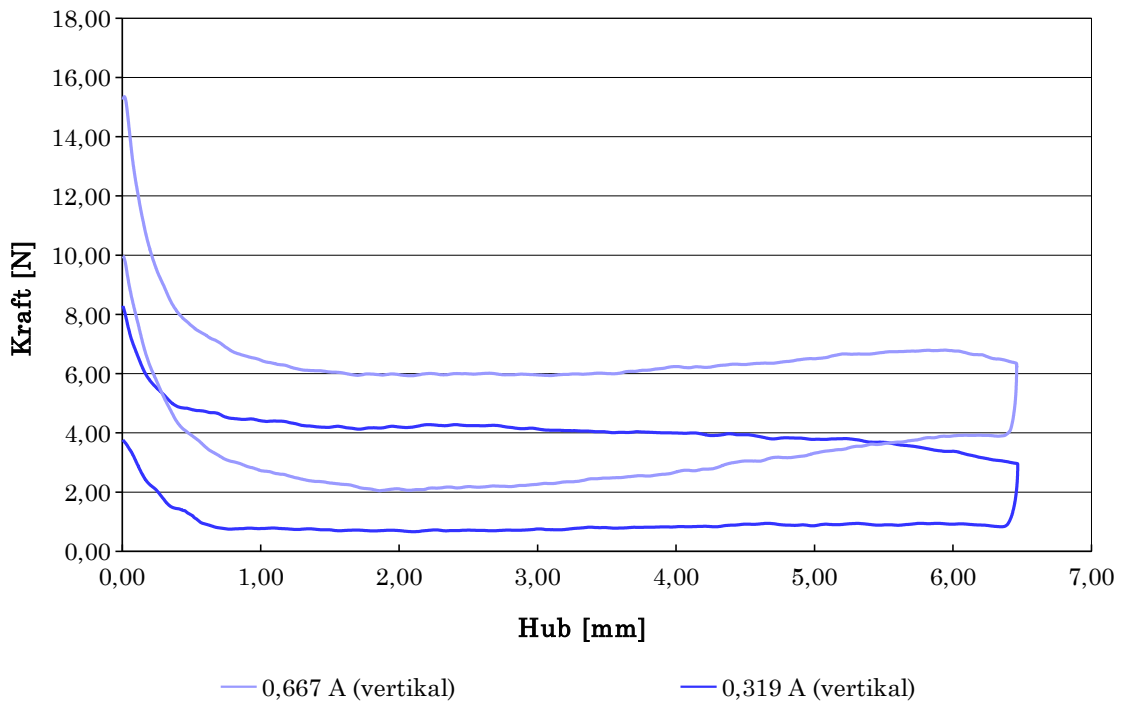


Abbildung 7.4: Gemittelte Hubkraftkennlinie der Prototypen Nr. 01 bis 04

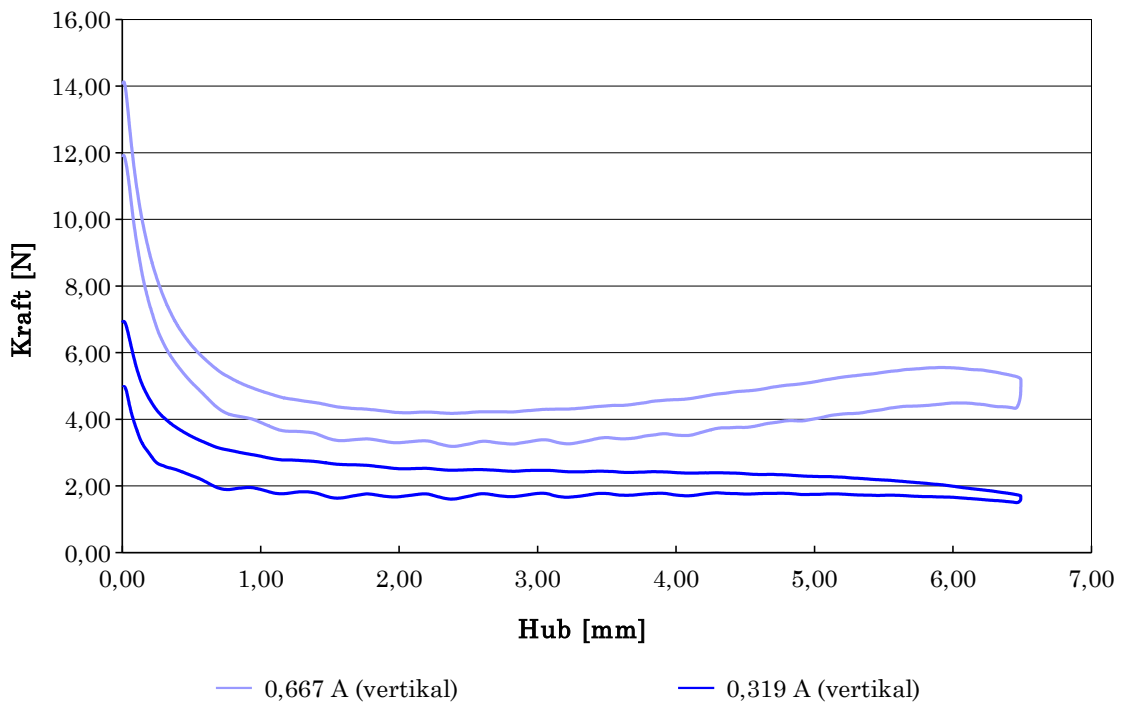


Abbildung 7.5: Prototyp Nr. 05

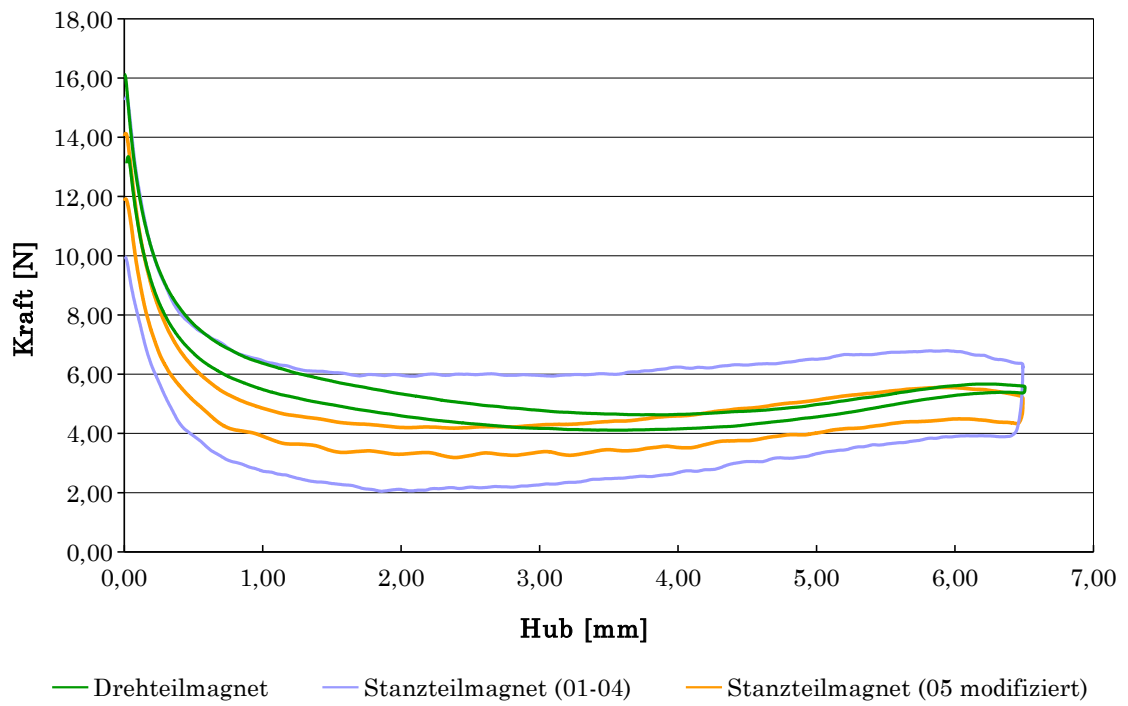


Abbildung 7.6: Vergleich der Prototypen mit dem Drehteilmagneten bei Nennbedingungen

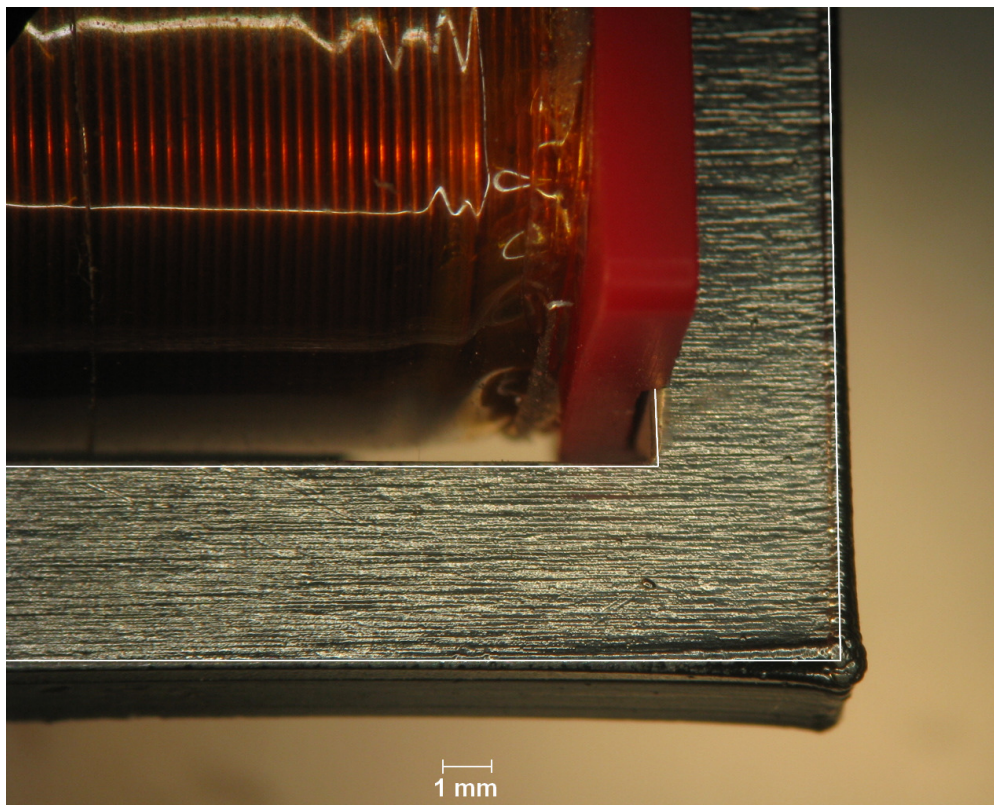


Abbildung 7.7: Kantenaufbau nach der Galvanik

7.2 Wirtschaftliche Schlussbetrachtung

Der erste Vergleich erfolgt für die aktuell auftretende Stückzahl des Drehteilmagneten von 2,8 Mio. - siehe Tabelle 7.1. Die hohen Investitionskosten ergeben sich durch die automatisierten Montageanlagen. Aufgrund der zu erwartenden geringeren Anzahl an Arbeitsschritten ist die Montageanlage für den Stanzteilmagnet günstiger. Die Werkzeugkosten für die Stanz- und Biegewerkzeuge wurden auf 165.000 Euro geschätzt und nehmen in diesem Vergleich somit nur einen relativ kleinen Anteil an den pro Stück Kosten.

	Drehteilmagnet	Stanzteilmagnet
Stückzahl	2.800.000	2.800.000
Materialkosten [€/Stück]	1,3061	1,2469
Arbeitskosten [€/Stück]	0,3640	0,1500
Herstellkosten [€/Stück]	1,6701	1,3969
Investitionskosten [€]	1.500.000,00	975.000,00

Tabelle 7.1: Kostenvergleich aktuelle Stückzahl

Um allerdings auch einen Vergleich mit der Klein- und Mittelserie zu haben wurden weitere Kalkulationen für Stückzahlen von 15.000 und 100.000 Stück durchgeführt, ein Auszug hiervon ist in den Tabellen 7.2 und 7.3 dargestellt. Die Materialkosten, Arbeitskosten und Herstellkosten sind hier in Euro pro Stück ohne Berücksichtigung der Investitionskosten angegeben, diese sind gesondert angeführt. Die Investitionskosten des Drehteilmagneten steigen aufgrund leicht erhöhter Kosten für Vorrichtungen, bei dem Stanzteilmagneten sind hingegen von Anfang an die selben Vorrichtungen und vor allem Werkzeugkosten zu erwarten, Details entnehme man dem Anhang. In beiden Fällen wird noch von manueller Montage ausgegangen.

	Drehteilmagnet	Stanzteilmagnet
Stückzahl	100.000	100.000
Materialkosten [€/Stück]	1,9125	1,6968
Arbeitskosten [€/Stück]	1,6502	1,0596
Herstellkosten [€/Stück]	3,5627	2,7564
Investitionskosten [€]	29.500,00	105.100,00

Tabelle 7.2: Kostenvergleich Mittelserie

In den Darstellungen 7.8 bis 7.10 sind die Herstellkosten pro Stück und Jahr, des Drehteil- und des Stanzteilmagneten, gegenüber gestellt. Unterschieden wird hierbei zwischen einer Auftragslaufzeit von einem, zwei und fünf Jahren. Somit ergibt sich bei einer Laufzeit von einem Jahr (Abbildung 7.8) ab einem Mindestvolumen von circa 95.000 Stück ein Kostenvorteil des Stanzteilmagneten gegenüber des Drehteilmagneten. Erhöht sich die Laufzeit eines Auftrages auf zwei Jahre (Abbildung 7.9), so reduziert sich der notwendige Mindestauftragsumfang auf circa 50.000 Stück pro Jahr. Steigt die Auftragslaufzeit auf fünf Jahre (Abbildung 7.10), so ist ein Auftragsumfang von rund 21.000 Stück pro Jahr nötig um durch den Einsatz des Stanzteilmagneten einen wirtschaftlichen Vorteil zu erlangen.

	Drehteilmagnet	Stanzteilmagnet
Stückzahl	15.000	15.000
Materialkosten [€/Stück]	2,4025	2,0536
Arbeitskosten [€/Stück]	1,8497	1,4412
Herstellkosten [€/Stück]	4,2522	3,4948
Investitionskosten [€]	26.500,00	105.100,00

Tabelle 7.3: Kostenvergleich Kleinserie

Wie man den Darstellungen 7.8 bis 7.10 entnehmen kann, sind die Herstellkosten des Stanzteilmagneten pro Stück ohne Berücksichtigung der Investitionskosten stets unter denen des vergleichbaren Drehteilmagneten.

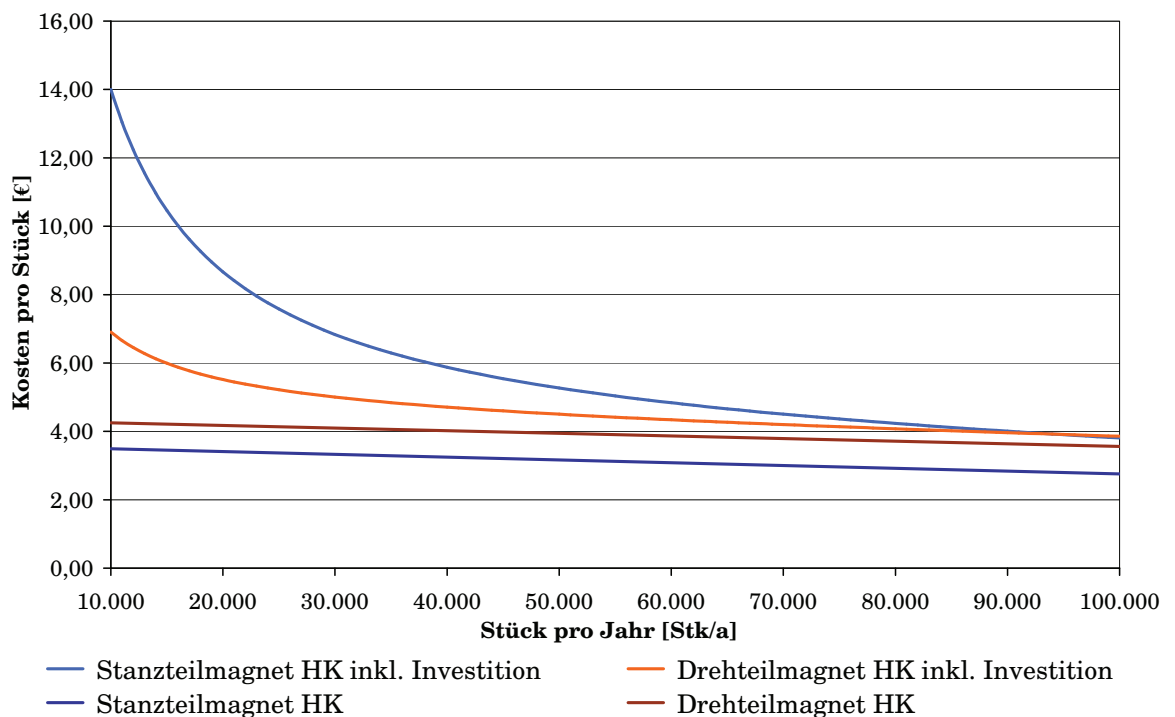


Abbildung 7.8: Gegenüberstellung der Herstellkosten für eine Auftragslaufzeit von einem Jahr

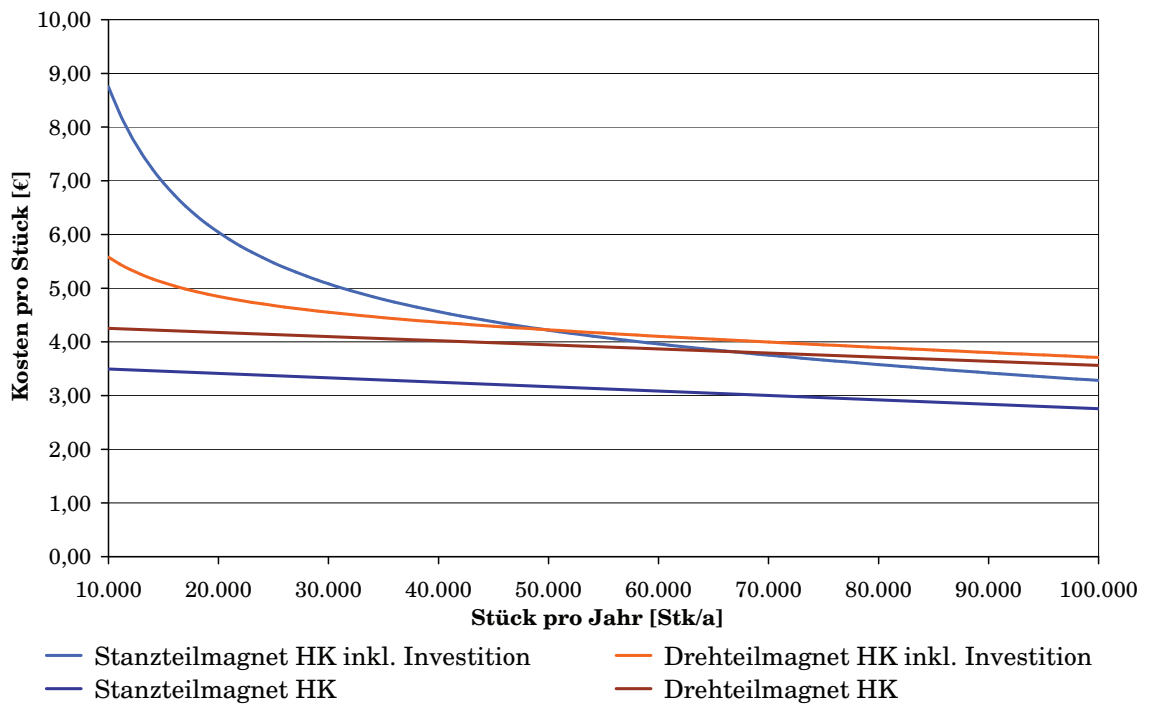


Abbildung 7.9: Gegenüberstellung der Herstellkosten für eine Auftragslaufzeit von zwei Jahren

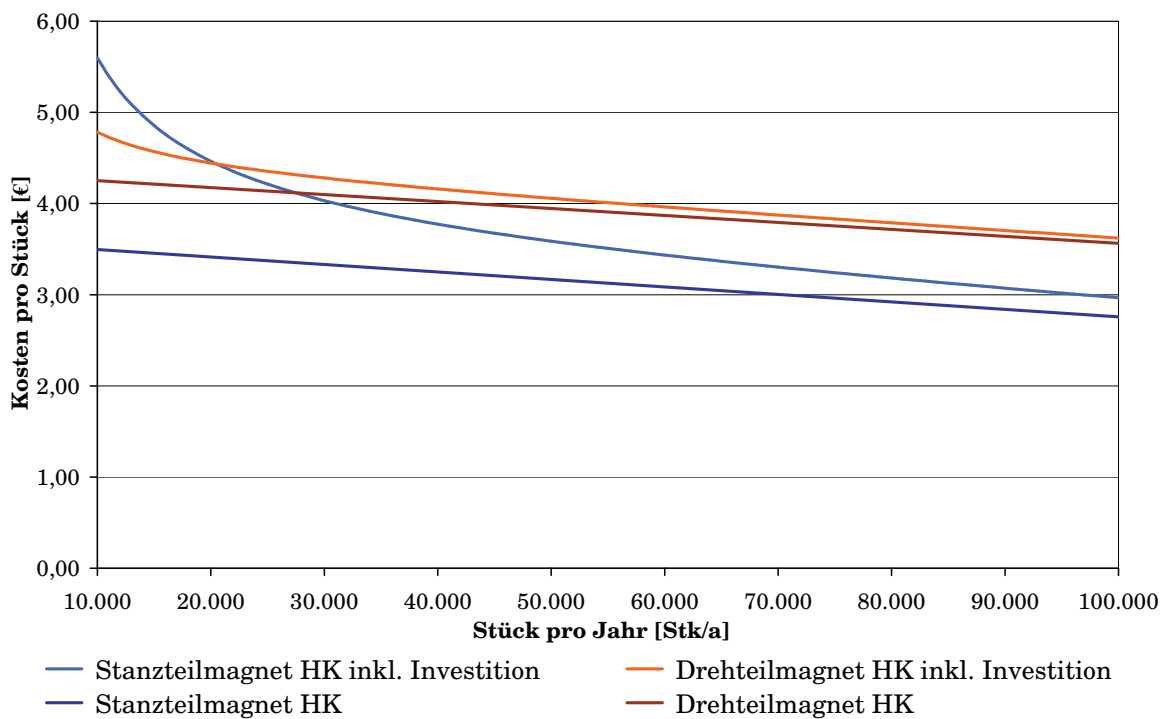


Abbildung 7.10: Gegenüberstellung der Herstellkosten für eine Auftragslaufzeit von fünf Jahren

7.3 Bisherige Erkenntnisse

Es konnte festgestellt werden, dass das Simulationsmodell mit dem Prototypen weitestgehend übereinstimmt. Auch sind die geschätzten Herstellkosten bei der wiederholten Kalkulation und für andere Stückzahlen durchwegs positiv. Bei sehr kleinen Serien nimmt der Anteil der Werkzeugkosten stark zu, womit davon auszugehen ist, dass sich hierbei nur bei einer längeren Produktlebensdauer der Einsatz dieses Konzepts rentiert. Zusätzlich besteht jedoch die Möglichkeit Stanzwerkzeuge auch für andere Magnete, die fast baugleich sind, weiter zu verwenden. Beispielsweise kann die Anzahl der Bleche, oder deren Dicke variieren.

7.4 Verbesserungspotential

Noch nicht zufriedenstellend gelöst ist die Ankerlagerung. Zwar scheint die Lagerung in der Sonderbuchse im Spulenkörper den Anforderungen zu genügen, doch die Art der Beschichtung des Ankerlagerungsbleches und eventuell auch dessen Form muss noch verbessert werden.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Das im Rahmen dieser Diplomarbeit erarbeitete Magnetkonzept kann nur einen ersten Schritt in Richtung einer erfolgreichen Produktentwicklung darstellen. Das Einsparpotential ist zwar erheblich, doch sind die Risiken nicht zu unterschätzen, auch wenn sie beherrschbar scheinen. Vom fertigungstechnischen Standpunkt aus gesehen ist klar fest zu halten, dass dieses Konzept realisierbar und ökonomisch sinnvoll scheint. Um diesen Weg möglichst erfolgreich weiter zu gehen ist es notwendig strukturiert und objektiv vorzugehen.

8.1 Verbesserungsvorschläge

Der Bau der Prototypen hat kleinere und größere Schwachstellen der vorliegenden Konstruktion aufgezeigt, die teilweise sogar die Funktionstüchtigkeit einschränkten. Die hier angeführten Verbesserungsvorschläge zielen vor allem auf die konstruktiven Lösungen und nicht auf das neue Magnetkonzept als solches ab.

8.1.1 Beschichtung

Besonders problematisch scheint die Beschichtung des Ankerlagerungsbleches. Die verwendete Molykotebeschichtung erfüllt nicht annähernd die erhoffte Wirkung, ein zusätzliches Auftragen von Graphit auf die Ankerlagerungsfläche brachte eine deutlich messbare Verbesserung, die Hubkraftkennlinie stieg je nach Prototyp um circa 10-20%.

Zusätzlich bzw. alternativ könnte eine Beschichtung des Gehäuses eine Verbesserung bringen.

Zu favorisieren ist aber nach dem aktuellen Erkenntnisstand eine PTFE-Beschichtung bzw. bei geringen Anforderungen an die Lebensdauer und Betriebstemperatur, das Aufbringen einer PTFE-Folie, wie schon bei PT05 angewendet.

Ein weiteres Beschichtungsproblem trat bei den aus Blechen paketierte Bauteilen auf. An den besonders dünnen Querschnitten und vorstehenden Kanten entstanden beträchtliche Aufbaukanten, die die Funktion beeinträchtigen bzw. eine Nacharbeit nach sich ziehen. Es sollte daher untersucht werden ob die bei der Beschichtung der Prototypen aufgetretenen Probleme nur ein Einzelfall waren.

Zusätzlich sind aber auch konstruktive Maßnahmen wie Abschrägungen oder ein stufenförmiger Aufbau, wie beim aktuell verwendeten Anker, in Betracht zu ziehen.

8.1.2 Verbindung Spulenkörper und Gehäuse

Die Verbindung von Spulenkörper und Gehäuse war zwar für die Laborprüfungen ausreichend, doch ergaben sich zwei konstruktive Probleme.

Die Presspassung zwischen der Nut im Boden des Spulenkörpers und dem Gehäuse funktioniert zwar, doch durch die Aufbaukanten und die Radien an den Bauteilen ist die Verbindung relativ labil. Es sollte die Nut am Spulenkörper etwas vertieft werden, oder was auch die Zentrierung des Spulenkörpers verbessern würde, eine Nut quer zur aktuellen Spulenkörpernut im Gehäuse angebracht werden, mit passendem Gegenteil am Spulenkörper. Dies könnte auch die Eigenschaften der Lagerung deutlich verbessern.

Die Verbindung am oberen Ende des Spulenkörpers mit den „Ohren“ am Gehäuse ist zwar ebenfalls funktionsfähig, doch führt diese dazu, dass das Gehäuse wie ein Sportbogen zusammen gebogen wird. Trotz des vermeintlich weichen und nachgiebigen Werkstoff des Spulenkörpers, führt diese Verbindung zu einem dauerhaft zusammengedrückten Gehäuse, was vor allem negative Auswirkungen auf die Lagerung hat. Trotz der ohnehin schon sehr engen Toleranzen für den Prototypen musste hier nachgearbeitet werden um eine leichtgängige Lagerung zu erreichen. Es ist daher unbedingt erforderlich eine oder zwei Nuten quer zur Blechrichtung außen am Gehäuse anzubringen, damit dieses Zusammenspannen nicht auftritt, aber trotzdem ein Verrutschen des Spulenkörpers in Arbeitsrichtung unterbunden wird.

8.1.3 Verbindung Anker und Ankerlagerung

Die Verbindung Anker/Ankerlagerung war an und für sich ausreichend, allerdings ist zu befürchten, dass die Ausschussrate aufgrund der hohen Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit der Press- sowie der Spielpassung, relativ groß sein könnte. Ein Verzicht auf die Presspassung an den Ankerblechen, zu Gunsten der ohnehin schon vorhandenen Spielpassung, würde in Kombination mit einer Sicherung des Ankerlagerungsbleches durch z.B. kleben, löten, schweißen oder verstemmen, die Fertigung dieser Teile erleichtern.

8.1.4 Distanzscheibe

Für den Prototypen wurde alternativ zu den bisher üblichen Distanzscheiben getestet, ob nicht sogar die bereits zur Lagerung verwendete PTFE-Folie hierfür geeignet ist. Dies muss zumindest für die hier geforderte Resthaltekraft verworfen werden, siehe auch Abbildung 6.4.

8.1.5 Gehäuse und Ankerbleche

Beim vorliegenden Prototypen wurde das Gehäuse noch aus 4 Blechen gefertigt, in der letzten Kalkulation wird aber schon damit gerechnet das gesamte Gehäuse aus einem 4 mm dicken Blech zu stanzen. Neben dieser Änderung am Gehäuse besteht auch die Möglichkeit den Anker aus einem entsprechend dicken Blech zu stanzen. Voraussetzung hierfür ist allerdings die Realisierung einer Spulenkörperlagerung und

somit der Verzicht auf eine Lagerbuchse, dies würde auch die Kosten noch einmal deutlich senken.

8.2 Variantenbildung

Neben den bereits angeführten kurzfristigen konstruktiven Verbesserungen bietet das neue Magnetkonzept, trotz der vermeintlichen Einschränkungen aufgrund der verwendeten Stanzwerkzeuge, die Möglichkeit der Produktvariation, ohne Anschaffung neuer Stanzwerkzeuge für Anker und Gehäuse, und zwar durch:

- eine Veränderung der Baugröße durch das Erhöhen oder Senken der Anzahl der verwendeten Bleche,
- das Verwenden dickerer oder dünnerer Bleche, was allerdings Auswirkungen auf die Standzeiten und die Fertigungsgenauigkeiten hat,
- eine Kombination aus der Variation der Anzahl der Bleche sowie deren Dicke,
- die Verwendung anderer Bleche, was allerdings auch wieder Auswirkungen auf die Standzeit und die Fertigungsgenauigkeit haben kann,
- durch die Kombination von Blechen aus unterschiedlichen Materialien, d.h. Werkstoffe mit unterschiedlichen magnetischen und/oder mechanischen Eigenschaften, z.B. eine Kombination aus Aluminium und Stahl, oder aus magnetischen und magnetisch nicht leitfähigen Materialien, oder einbinden von Permanentmagneten, theoretisch könnte sogar eine Gummitrennscheibe o.ä. eingefügt werden, wobei die praktische Anwendung hierfür noch offen ist.

8.3 Mögliche Arten der Applikation

Aufgrund der zahlreichen möglichen Anwendungen für Elektromagnete wird hier nur auf die Form der Anbindung eingegangen.

8.3.1 Applikationsmöglichkeiten am Anker

Neben der Verwendung von Stiften bzw. Bolzen in Bohrungen zur Kraftübertragung besteht die Möglichkeit direkt aus den Ankerblechen Verbindungselemente zu formen. Durch ein Verlängern einer oder mehrerer Ankerbleche und dem Ausstanzen eines Hakens, einer Bohrung, einer Nut oder einer anderen beliebigen Form, in Kombination mit einem Biegewerkzeug sind zahlreiche Möglichkeiten für eine effiziente und anwendungsgerechte Kraftübertragung denkbar.

8.3.2 Applikationsmöglichkeiten am Gehäuse

Hier bieten sich Möglichkeiten, die im Wesentlichen denen des Ankers ähneln. Doch ist die Formenvielfalt, sowie die Kombination unterschiedlicher Elemente aufgrund geringerer Einschränkungen (keine fix vorgegebene Bewegungsrichtung) grösser. Das Spektrum reicht von einfachen Klipps, Schlitzern, über Bohrungen bis hin zu ausgefallenen Formen, eventuell sogar deutlich grösseren Blechen, die schon Teil des Gehäuses der übergeordneten Applikation sein können.

8.3.3 Applikationsmöglichkeiten am Spulenkörper

Der Spulenkörper bietet aufgrund seiner Fertigung als Spritzgussteil eine ebenfalls große Formenvielfalt. Neben den bereits erwähnten Applikationsmöglichkeiten bei Anker und Gehäuse, könnte man den Spulenkörper voll in das Gehäuse integrieren.

Einige der in 8.3.1 bis 8.3.3 erwähnten Applikationsmöglichkeiten sind in Abbildung 8.1 dargestellt.

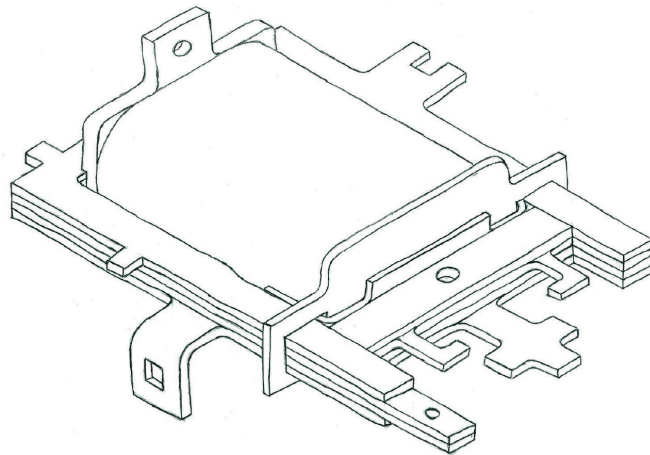


Abbildung 8.1: Einige mögliche Applikationen

Literaturverzeichnis

- [1] Huth, G., Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik; Vortragssammlung, Margret Schneider, 2004
- [2] Kallenbach, E., Eick, R., Quendt, P., Ströhla, T., Feindt, K., Kallenbach, M., Elektromagnete, B.G. Teubner Stuttgart-Leipzig-Wiesbaden, 2003
- [3] Hering, E., Martin, R., Stohrer, M., Physik für Ingenieure, Springer 2008
- [4] Kittel, C., Einführung in die Festkörperphysik, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2006
- [5] Raith, W., Schaefer, C., Elektromagnetismus, Walter de Gruyter, 1999
- [6] Bartsch, H.-J., Taschenbuch mathematischer Formeln, Fachbuchverlag Leipzig, 1998
- [7] Meyberg, K., Vachenauer, P., Höhere Mathematik 1, Springer, 1997
- [8] Jackson, J. D., Witte, C., Muller, K., Klassische Elektrodynamik, Walter de Gruyter, 2006
- [9] Moeller, F., Frohne, H., Löcherer, K.-H., Müller, H., Grundlagen der Elektrotechnik, Vieweg+Teubner Verlag, 2005
- [10] Freund, J., Spezielle Relativitätstheorie für Studienanfänger: Ein Lehrbuch, vdf Hochschulverlag AG, 2005
- [11] Lorrain, P., Corson, D.-R., Lorrain, F., Streubel, J., Elektromagnetische Felder und Wellen, Walter de Gruyter, 1995
- [12] Ansoft Corporation, Training Seminar for Maxwell 2D, Ansoft Corporation, 2002
- [13] Steinke, P., Finite-elemente-methode: Rechnergestützte Einführung, Springer, 2007
- [14] Antebboth, S., Simulation des elektromechanischen Verhaltens von PZT mit realer Domänenstruktur, kassel university press GmbH, 2007
- [15] Roos, H.-G., Numerische Behandlung partieller Differentialgleichungen, Vieweg+Teubner Verlag, 2005
- [16] Neuman de Souza, J., Dini, P., Lorenz, P., Telecommunications and Networking, Springer, 2004

- [17] Bollhöfer, M., Mehrmann, V., Numerische Mathematik, Vieweg+Teubner Verlag, 2004
- [18] Hanke-Bourgeois, M., Grundlagen der numerischen Mathematik und des wissenschaftlichen Rechnens, Vieweg+Teubner, 2006
- [19] Hermann, N., Höhere Mathematik, Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2004
- [20] Hellwig, W., Spanlose Fertigung: Stanzen, Vieweg Verlag, 2006
- [21] Birzer, F., Hochleistungswerkzeuge in der Stanztechnik (Umform- und Feinschneidtechnik) Lehrgang Nr. 25972/62.249 der Technischen Akademie Esslingen am 9. u. 10.11.2000
- [22] C.D. Wälzholz, Produktkatalog, <http://www.cdw.de/Produkte>, Abfrage 10.01.2009
- [23] <http://www.gadsl.org>, Global Automotive Declarable Substance List (GADSL), Version 1.0, Global Automotive Stakeholder Group (GASG), 01.09.2008
- [24] Haberfellner, R., Nagel, P., Becker, M., Büchel, A., Systems Engineering Methodik und Praxis, Verlag Industrielle Organisation Zürich, 10.Auflage, 1999
- [25] http://www.ttv-dichtungen.de/gleitlagerstandard_content.html, Abfrage 20.10.2008

Abbildungsverzeichnis

1.1	ursprünglicher Terminplan mit den einzelnen Phasen	3
2.1	Magnetfeld eines unendlich langen stromdurchflossenen Leiters [2]	5
2.2	Durchflutung in mehreren stromdurchflossenen Leitern [2]	6
2.3	einfacher Magnetkreis [2]	7
2.4	B-H-Kennlinie eines Eisenmaterials mit Restmagnetisierung, B_R , Koerzitivfeldstärke, H_c , und Neukurve [3]	8
2.5	Grundformen von Elektromagneten: a) Topfmagnet, b) U-Magnet, c) E-Magnet, 1 Anker, 2 Polkern, 3 Erregerspule, 4 Arbeitsluftspalt, 5 parasitärer Luftspalt [2]	8
2.6	Qualitativer Verlauf der Hysteresekurve eines a) weichmagnetischen bzw. b) hartmagnetischen Werkstoffes [2]	10
2.7	Grenzkurve (1), Kommutierungskurve (2), und innere symmetrische Hystereseschleifen (3) eines ferromagnetischen Werkstoffes [2]	10
2.8	Häufig verwendete Ausführungen von Anker-Polkern Systemen bei Bügelmagneten zur Beeinflussung der Hubkraftkennlinie [2]	11
2.9	Qualitativer Verlauf der Hubkraftkennlinie und der Energieänderung im Ψ -I-Kennlinienfeld bei unterschiedlichen Polkernstücken [2]	12
2.10	Umrissdarstellung des zu lösenden Gebiets, dient als Ausgangspunkt für die Voronoi-Zerlegung [12]	15
2.11	Voronoi Polygone [12]	15
2.12	Delaunay Triangulierung [12]	16
2.13	Umkreisbedingung der Delaunay Triangulierung [12]	16
2.14	Schneidvorgang beim Lochen, d.h. geschlossene Schnittlinie. Die Schneide S_k (Schneidkante) ist die Durchdringungslinie der Schneidflächen A_D und A_F , welche den Schneidkeil bilden [20]	21
2.15	Feinschneiden; 1 Führung (Pressplatte), 2 Schneidplatte, 3 Schneidstempel, 4 Auswerfer, 5 Werkstück, 6 Ringzacke, 7 Schneidkeil [20]	22
2.16	Schnittflächen mit Kaltaufhärtung, links beim Normalschneiden, rechts beim Feinschneiden [21]	23
2.17	Stanzpaketierfolge in einem Stanzpaketierwerkzeug [20]	26
2.18	Prinzip des Stanzpaketierens von Blechteilen 1., 2 . . . n. mit Durchsetzungen, D Durchmesser der Durchsetzung, s Blechdicke, h Durchsetztiefe, α Einziehwinkel [20]	27
2.19	Maschine und Werkzeug für das Stanz-Laser-Paketieren, mit Ausschnitt A. a ist der Maschinentisch, b Stößel, c Unterwerkzeug, d Oberwerkzeug, e Stempel, f Matrize, g Bremse, h Paket, i Fokussiereinrichtung, k Lichtleiterkabel, l Laser, und m das Laseraggregat [20]	28

2.20	Prinzip des Laserschweißens beim Stanz-Laser-Paketieren mit mehreren Fokussiereinrichtungen. a Stempel, b Matrize, c Fokussiereinrichtung, d Bremse, e Paket [20]	28
3.1	Magnetkraftverlauf über den Hub des Magneten, AL Ausgangslage, FL Endlage	31
3.2	ABC-Kostenanalyse	34
3.3	Entwurf eines hohlen rotationssymmetrischen Ankers	36
3.4	rechteckige Ankerformen	37
3.5	Kombination von Polkern und Bügel zu dem sog. Gehäuse (links), Anker (rechts)	37
4.1	Schwingmagnet, L-förmige Bügel aus 5 Blechen aufgebaut (Darstellung aus Maxwell 3D)	40
4.2	Kraftverlauf am Hubanfang des Schwingmagneten über Anzahl der Bleche	40
4.3	Drehteilmagnet ohne Spulenkörper und Spule (Darstellung Maxwell 3D)	42
4.4	Stanzteilmagnet (Darstellung Maxwell 3D)	43
4.5	Hubkraftkennlinien des Drehteil- und Stanzteilmagneten	44
4.6	Verlauf der relativen Hubkräfte	44
4.7	Vergleich des relativen Kraftverlustes	45
4.8	Relativer Kraftgewinn, ausgehend von der Ausgangslage bei 6,5 mm Hub	45
5.1	Entwurf des Stanzteilmagneten	48
5.2	Erste 3D-Konstruktion (Darstellung aus Solid Works)	49
5.3	Hubkraftkennlinienvergleich zwischen Drehteilmagnet, Stanzteilmagnet und dem nun optimierten Stanzteilmagneten	50
5.4	Vergleich der relativen Hubkraft	51
5.5	relativer Kraftzuwachs	51
6.1	Explosionszeichnung des auf die Herstellung von Prototypen abgeänderten Stanzteilmagneten (Darstellung aus Solid Works)	53
6.2	Schnittdarstellung des Spulenkörpers	54
6.3	Schaltungsaufbau für die Erwärmungsmessung	57
6.4	Resthaltekraft	58
6.5	Vergleich der Hubkraftkennlinien AL751 bei Normalbedingungen und PT05 bei Übererregung	58
7.1	Stanzteilmagnet (Darstellung aus Solid Works)	60
7.2	Stanzteilmagnet Schnittdarstellung (Darstellung aus Solid Works)	61
7.3	Hubkraftkennlinie Drehteilmagnet	62
7.4	Gemittelte Hubkraftkennlinie der Prototypen Nr. 01 bis 04	63
7.5	Prototyp Nr. 05	63
7.6	Vergleich der Prototypen mit dem Drehteilmagneten bei Nennbedingungen	64
7.7	Kantenaufbau nach der Galvanik	64
7.8	Gegenüberstellung der Herstellkosten für eine Auftragslaufzeit von einem Jahr	66

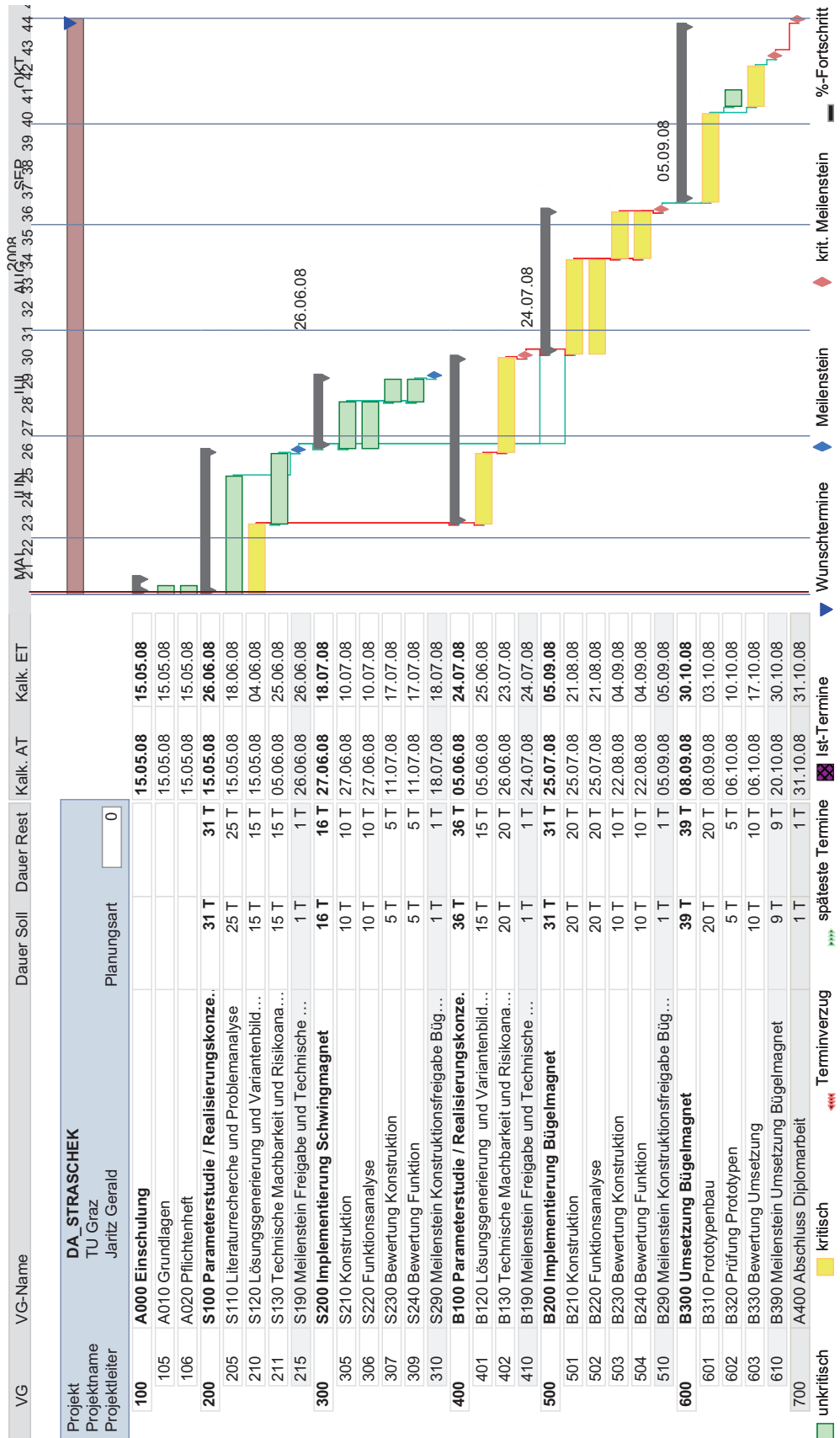
7.9	Gegenüberstellung der Herstellkosten für eine Auftragslaufzeit von zwei Jahren	67
7.10	Gegenüberstellung der Herstellkosten für eine Auftragslaufzeit von fünf Jahren	67
8.1	Einige mögliche Applikationen	72
A.1	Messaufbau Drehteilmagnet vertikale Aufspannung	99
A.2	Messaufbau Drehteilmagnet horizontale Aufspannung	100
A.3	Drehteilmagnet horizontal	100
A.4	Drehteilmagnet vertikal	101
A.5	Drehteilmagnet Vergleich vertikale und horizontale Lage	101
A.6	Messaufbau Stanzteilmagnet horizontal liegende Aufspannung	102
A.7	Messaufbau Stanzteilmagnet horizontal stehende Aufspannung	102
A.8	Messaufbau Stanzteilmagnet vertikal Aufspannung	103
A.9	PT01 horizontal liegend	104
A.10	PT01 horizontal quer	104
A.11	PT01 vertikal	105
A.12	PT02 horizontal liegend	105
A.13	PT02 horizontal quer	106
A.14	PT02 vertikal	106
A.15	PT03 horizontal liegend	107
A.16	PT03 horizontal quer	107
A.17	PT03 vertikal	108
A.18	PT04 horizontal liegend	108
A.19	PT04 horizontal quer	109
A.20	PT04 vertikal	109
A.21	PT05 horizontal liegend	110
A.22	PT05 horizontal quer	110
A.23	PT05 vertikal	111

Tabellenverzeichnis


3.1	vorgegebene Magnetkräfte	30
3.2	Richtwerte für den Betriebsstrom	32
3.3	Problemanalyse	33
3.4	Aufstellung der Herstellkosten	34
3.5	Fertigungsverfahren	36
3.6	Nutzwertanalyse ausgewählter Fertigungsverfahren für Anker und Pol- kern	38
4.1	Vergleich der Ankervolumina und Konusflächen der verwendeten Teile	42
4.2	Herstellkosten des Stanzteilmagnetes, in Cent bei 2,8 Mio Stück pro Jahr	46
4.3	Vergleich der Herstellkosten in Euro des Drehteil- und Stanzteilma- gnetes	46
4.4	FMEA für die komplette Spule, inkl. Spulenkörper	47
5.1	Risikoreichsten Elemente aus der FMEA des Stanzteilmagnetes . . .	52
6.1	Wicklungswiderstandsmessung	56
6.2	Messwerte der Erwärmungsmessung	56
6.3	Messung des Ankergewichts	57
6.4	Messwerte der Anzugszeit-Messung	57
7.1	Kostenvergleich aktuelle Stückzahl	65
7.2	Kostenvergleich Mittelserie	65
7.3	Kostenvergleich Kleinserie	66

Anhang A

A.1 Terminplan



A.2 FMEA

FMEA Konstruktion																
																
System: Untersystem: X Teil: Hubmagnet; Stanz- statt Drehteile Modell Jahr(e)/Fahrzeuge: ... Team: Gerald Jaritz, Stefan Straschek, Stefan Strommayer																
Konstruktionsverantwortung: Stefan Straschek Abschlusstermin:																
Vorgesetzter: Gerald Jaritz Erstellt: 03.11.2008 Bearbeitet: 03.11.2008																
Nummer: 1.1 Seite: 1/5																
Funktion	Fehlerart	Fehlerfolge	B	Fehlerursache	A	Vermeldungs- maßnahme	E	RPZ	Empf. Maßnahme	V/T	Getr. Maßnahme	B	A	E	RPZ	
Systemelement: Spule KPL																
[Spule KPL.] Herstellbar- / Mon- tierbar- / Automati- sierbarkeit	Wicklung nur schwer her- stellbar (Rechteckspule)	Stückzahl ist nicht fertigbar	6	⚠️ Wicklungsauslegung un- günstig - Toleranz Anzahl Windungen zu groß Cu-Drahtdurchmesser zu gering ⚠️ Cu-Drahtqualität unzurei- chend spezifiziert Spulenberechnung falsch ⚠️ Spulenkörper ungünstig ausgelegt - kann unzurei- chend fixiert werden ⚠️ Materialspezifikation un- zureichend eingegrenzt - schwanken zu stark ⚠️ Spulenkörper ungünstig ausgelegt - kann unzurei- chend fixiert werden	3 siehe Wickeldaten- blatt 2 siehe Spek. 1 siehe Spek. 3 Verweis Spulenbe- rechnung 3 Siehe Zeichnung 2 siehe Datenblatt 3 Siehe Zeichnung	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster WE-Prüfung, Wi- derstandsmessung Funktionsmuster Vergleichsrechnung Funktionsmuster Funktionsmuster Funktionsmuster Funktionsmuster	4 2 4 3 4 4 4 4	72 24 24 54 72 48 72								
[Spule KPL.] HK/KL sicherstellen	Hubkraft zu schwach Anker bleibt stecken	Reklamation	8	⚠️ Wicklungsauslegung un- günstig - Toleranz Anzahl Windungen zu groß Cu-Drahtdurchmesser zu gering ⚠️ Cu-Drahtqualität unzurei- chend spezifiziert Spulenberechnung falsch Wickeldurchmesser falsch ermittelt - falsche Klasse berücksichtigt ⚠️ Lagerung nicht für Le- bensdauer ausgelegt	3 siehe Wickeldaten- blatt 1 siehe Spek. 3 Verweis Spulenbe- rechnung 3 siehe Wickeldaten- blatt 3 Siehe Zeichnung 4 Siehe Zeichnung	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster Hubkraftkennlinie Funktionsmuster WE-Prüfung, Wi- derstandsmessung Funktionsmuster Vergleichsrechnung Vergleichsrechnung Funktionsmuster Lebensdauertest	4 4 2 4 3 3 4 5	96 96 32 32 72 72 96 160							8 2 5 (80)	
		Reklamation	8	⚠️ Spule KPL lässt sich nicht montieren												
		Reklamation	8	⚠️ Anker bleibt stecken												

Funktion	Fehlerart	Fehlerfolge	B) Fehlerursache	A) Vermeidungsmaßnahme	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ Empf. Maßnahme	VIT	Geotr. Maßnahme	B	A	E	RPZ		
A [Spule KPL] HKKL sicherstellen	A Anker bleibt stecken	A Reklamation	1 8	⚠️ ungünstiges Material gewählt	3 Siehe Zeichnung	Funktionsmuster	4	96							
				⚠️ Materialspezifikation unzureichend eingegrenzt - schwanken zu stark	2 siehe Datenblatt	Funktionsmuster	4	64							
				⚠️ Spule wackelt in Gehäuse / Polkern	4 Siehe Zeichnung	Funktionsmuster	4	128							
				⚠️ Lagerung nicht für Lebensdauer ausgelegt	4 Siehe Zeichnung	Lebensdauertest	5	160	V: ⚠️ Lagerart NEU definieren -> Messung	Straschek, Stefan 30.11.2008		8	2	5	(80)
				⚠️ Reibung zu hoch	3 Siehe Zeichnung	Funktionsmuster	4	96							
				⚠️ Lagerung fällt heraus / wackelt	3 Siehe Zeichnung	Funktionsmuster	4	96							
				8	Reklamation	3 Luft- und Kriechstreifen zu gering (elektrischer Überschlag)	3 siehe FEM-Rechnung	Vergleichsrechnung	3	72					
						⚠️ unzureichende Störfestigkeit gegenüber Endladung - ungünstige Isolierung / Isolierstoffklasse Cu-Draht	3 siehe Wickeldatenblatt	Funktionsmuster	4	96					
						⚠️ Lebensdauer durch wackeln nicht gewährleistet	3 siehe Spek.	Funktionsmuster	4	96					
						⚠️ nicht für auftretende Temperaturen geeignet	3 siehe Spek.	Funktionsmuster	4	96					
[Spule KPL] thermische Beständigkeit	kein Isolationsschutz vorhanden	Erwärmung zu stark Reklamation	5	⚠️ nicht für auftretende Temperaturen geeignet	3 siehe Spek.	Funktionsmuster	4	96							
			8	⚠️ Isolierung (Isolierstoffklasse) für auftretende Temperaturen nicht geeignet	3 siehe Spek.	Funktionsmuster	4	96							
			8	Reklamation	3 Spulenberechnung falsch	3 Verweis Spulenberechnung	Vergleichsrechnung	3	72						
				Eigenwärmerung im worst case zu groß	3 Wicklungsauslegung ungünstig - Toleranz Anzahl Windungen zu groß	3 siehe Wickeldatenblatt	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	96						
					Wickeldurchmesser falsch ermittelt - falsche Klasse berücksichtigt	3 siehe Wickeldatenblatt	Vergleichsrechnung	3	72						
					⚠️ Materialeigenschaft nicht ausreichend (Spröde, löst sich...)	3 siehe Spek.	Funktionsmuster	4	96						
				Spulenkörper wird aufgrund hoher Temperaturen zerstört	Reklamation	8	⚠️ ungünstiges Material gewählt	3 Siehe Zeichnung	Funktionsmuster	4	96				
						Spulenberechnung falsch	3 Verweis Spulenberechnung	Vergleichsrechnung	3	72					
						8	⚠️ Materialspezifikation unzureichend eingegrenzt - schwanken zu stark	3 siehe Spek.	Funktionsmuster	4	96				
						⚠️ Kolben ungünstig toleriert - Einfluss der Toleranznutzung / Oberflächenrauigkeit zu groß	3 Siehe Zeichnung	Funktionsmuster	4	96					
			⚠️ Beschichtung ungünstig / unzureichend spezifiziert	2 siehe Spek.	Lebensdauertest	5	80								
			⚠️ Lagerung nicht lt. Zeichnung	3 Eingangskontrolle	Lebensdauertest	5	120								
Systemelement: Anker															
[Anker] Auslösung Applikation	Anker bleibt hängen/stecken	Reklamation	8	⚠️ Materialspezifikation unzureichend eingegrenzt - schwanken zu stark	3 siehe Spek.	Funktionsmuster	4	96							
			⚠️ Kolben ungünstig toleriert - Einfluss der Toleranznutzung / Oberflächenrauigkeit zu groß	3 Siehe Zeichnung	Funktionsmuster	4	96								
			⚠️ Beschichtung ungünstig / unzureichend spezifiziert	2 siehe Spek.	Lebensdauertest	5	80								
			⚠️ Lagerung nicht lt. Zeichnung	3 Eingangskontrolle	Lebensdauertest	5	120								

Funktion	Fehlerart	Fehlerfolge	B	Fehlerursache	A	Vermeidungsmaßnahme	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ	Empf. Maßnahme	VIT	Geotr. Maßnahme	B	A	E	RPZ
A [Anker] Auslösung Applikation	Achse lockert sich / fällt heraus	Lebensdauer nicht erfüllt Reklamation	7	⚠ Kolben ungünstig toleriert - Einfluss der Toleranzausnutzung / Oberflächenrauigkeit zu groß	3	Siehe Zeichnung	Funktionsmuster	4	96							
			8													
[Anker] HKKL sicherstellen	HKKL zu schwach / schwankt zu stark	Reklamation	8	⚠ Materialspezifikation unzureichend eingegrenzt - schwanken zu stark FEM Simulation falsch	3	siehe FEM-Rechnung	Vergleichsrechnung	3	72							
			8		⚠ Lagerung nicht lt. Zeichnung			3		Eingangskontrolle	5	120				
[Anker] Schaltzeiten gewährleisten	Remanenz - Anker löst sich verzögert	Nacharbeit	7	⚠ nicht laut Zeichnung	3	Siehe Zeichnung	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	84							
			7		⚠ ungünstiges Material gewählt			2		siehe Spek.	4	56				
	Schaltzeit verändert sich über Lebensdauer	Lebensdauer nicht erfüllt	7	⚠ Beschichtung ungünstig / unzureichend spezifiziert ⚠ Kolben ungünstig toleriert - Einfluss der Toleranzausnutzung / Oberflächenrauigkeit zu groß	3	Siehe Zeichnung	Funktionsmuster	5	70							
			7		⚠ Lagerung nicht lt. Zeichnung			3		Eingangskontrolle	5	105				
	Schaltzeit zu lange - Anker löst sich verzögert	Reklamation	8	⚠ nicht laut Zeichnung	3	Siehe Zeichnung	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	96							
			8		⚠ Disanzscheibe falsches Material			2		siehe Spek.	4	64				
	Anzugszeit zu lange	Schaltzeitforderung beim Kunden n.i.O. Reklamation	6	⚠ Lagerung nicht lt. Zeichnung	3	Eingangskontrolle	Lebensdauerfest	5	120							
			6		⚠ Lagerung nicht lt. Zeichnung			3		Eingangskontrolle	5	120				
[Anker] Herstellbar-/Montierbar-/Automatisierbarkeit	Anker löst sich nicht montieren	Stückzahl ist nicht fertigbar Reklamation	8	⚠ Beschichtung ungünstig / unzureichend spezifiziert	2	siehe Spek.	Lebensdauerfest	5	80							
			6		⚠ ungünstiges Material gewählt			2		siehe Spek.	4	48				
	Scheibe löst sich nicht auf Achse fügen	Stückzahl ist nicht fertigbar	6	⚠ Materialspezifikation unzureichend eingegrenzt - schwanken zu stark ⚠ nicht laut Zeichnung	3	Siehe Zeichnung	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	72							
			6		⚠ Disanzscheibe falsches Material			2		siehe Spek.	4	48				
[Anker] Lebensdauer sicherstellen	Anker verschiebt zu stark	Lebensdauer nicht erfüllt	7	⚠ Materialspezifikation unzureichend eingegrenzt - schwanken zu stark ⚠ Lagerung nicht lt. Zeichnung	3	siehe Spek.	Funktionsmuster	4	84							
			7		⚠ ungünstiges Material gewählt			2		siehe Spek.	4	48				
Systemelement: Gehäuse / Polkern																
					3	Eingangskontrolle	Lebensdauerfest	5	105							

Funktion	Fehlerart	Fehlerfolge	B	Fehlerursache	A	Vermeidungs- maßnahme	Entdeckungs- maßnahme	E	RPZ	Empf. Maßnahme	VIT	Geotr. Maßnahme	B	A	E	RPZ
[Gehäuse / Pol- kern] HKKL sicherstellen	Hubkraft zu schwach / schwankt zu stark	Reklamation	8	ungünstiges Material ge- wählt (zu hohe Remanenz/ Sättigungsflusdichte zu ge- ring)	3	siehe FEM-Rech- nung	Vergleichsrechnung	3	72							
				Abmessungen unzureich- end spezifiziert	3	siehe FEM-Rech- nung	Vergleichsrechnung	3	72							
				Grundauslegung Konuswin- kel, -tiefe und Polkernlänge ungünstig	3	siehe FEM-Rech- nung	Vergleichsrechnung	3	72							
				⚠ Materialspezifikation un- zureichend eingegrenzt - schwanken zu stark	3	siehe Spek.	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	96							
				FEM Simulation falsch	3	siehe FEM-Rech- nung	Vergleichsrechnung	3	72							
				⚠ Gehäuse / Polkern nicht laut Zeichnung	3	Eingangskontrolle	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	96							
				⚠ Materialspezifikation un- zureichend eingegrenzt - schwanken zu stark	3	siehe Spek.	Funktionsmuster	4	72							
				⚠ Polkern ungünstig tole- riert - Einfluss der Toleran- zerausnutzung / Oberflächen- rauigkeit zu groß	3	Siehe Zeichnung	Funktionsmuster	4	72							
				⚠ Polkern ungünstig tole- riert - Toleranzfelder über- schneiden sich mit Anker	3	Siehe Zeichnung	Funktionsmuster	4	72							
				⚠ Gehäuse / Polkern nicht laut Zeichnung	3	Eingangskontrolle	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	96							
				⚠ Gehäuse / Polkern nicht laut Zeichnung	3	Eingangskontrolle	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	96							
				Abmessungen unzureich- end spezifiziert	3	siehe FEM-Rech- nung	Vergleichsrechnung	3	72							
				⚠ Gehäuse / Polkern nicht laut Zeichnung	3	Eingangskontrolle	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	96							
				⚠ Beschichtung ungünstig / unzureichend spezifiziert	3	siehe Spek.	Lebensdauerfest	5	105							
Systemelement: Lagerung (Messingbuchse & Anker)																
[Lagerung (Mes- singbuchse & An- ker)]	Lagerung lockert sich	Stückzahl ist nicht fertigbar	6	⚠ Formtoleranzen/Abmes- sungen unzureichend spezi- fiziert	3	siehe Spek.	Funktionsmuster	4	72							
[Lagerung (Mes- singbuchse & An- ker)]	Lagerung schwer / unzurei- chend montierbar	Stückzahl ist nicht fertigbar	6	⚠ Formtoleranzen/Abmes- sungen unzureichend spezi- fiziert	3	siehe Spek.	Funktionsmuster	4	72							
[Lagerung (Mes- singbuchse & An- ker)]	Hubkraft zu schwach / schwankt zu stark	Reklamation	8	⚠ Beschichtung ungünstig / unzureichend spezifiziert	3	siehe Spek.	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	96							
[Lagerung (Mes- singbuchse & An- ker)]	Schalzeiten außerhalb der Spezifikation	Reklamation	8	⚠ Oberflächenbeschaffen- heit Anker ungünstig	3	siehe Spek.	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	96							
[Lagerung (Mes- singbuchse & An- ker)]	Schalzeiten ge- währleisten	Reklamation	8	⚠ ungünstiges Material ge- wählt	3	siehe Spek.	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	96							
[Lagerung (Mes- singbuchse & An- ker)]	Schalzeiten ge- währleisten	Reklamation	8	⚠ Oberflächenbeschaffen- heit Anker ungünstig	3	siehe Spek.	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	96							

Funktion	Fehlerart	Fehlerfolge	B	Fehlerursache	A	Vermeidungs- maßnahme	Entdeckungs- maßnahme	E	RPZ	Empf. Maßnahme	VIT	Geotr. Maßnahme	B	A	E	RPZ	
[Lagerung (Mess- singbuchse & An- ker)] Lebensdauer si- cherstellen	Gleitlager verschiebt, zu stark / zu starker Abrieb	Lebensdauer nicht erfüllt	7	<p>⚠ Materialspezifikation un- zureichend eingegrenzt - schwanken zu stark</p> <p>⚠ Oberflächenbeschaffen- heit Anker ungünstig</p>	3 siehe Spek.	3 siehe Spek.	Lebensdauerfest	5	105								
[Lagerung (Mess- singbuchse & An- ker)] Beständigkeit	"Gleitschicht" nutzt sich zu schnell ab	Lebensdauer nicht erfüllt	7	<p>⚠ Oberflächenbeschaffen- heit Anker ungünstig</p> <p>⚠ Beschichtung ungünstig / unzureichend spezifiziert</p>	3 siehe Spek.	3 siehe Spek.	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	84								
Systemelement: Distanzscheibe																	
[Distanzscheibe] HKKL sicher stellen	Hubkraft zu schwach	Reklamation	8	⚠ Anker bleibt kleben	3 siehe Spek.	3 siehe Spek.	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	96								
[Distanzscheibe] Lebensdauer erfül- len	Distanzscheibe bricht / löst sich von Anker	Lebensdauer nicht erfüllt	7	<p>⚠ Anker bleibt kleben</p> <p>⚠ Scheibe zu dick / nicht laut Zeichnung</p> <p>⚠ ungünstige / falsche Ma- terialwahl</p>	3 siehe Spek.	3 siehe Spek.	Hubkraftkennlinie Funktionsmuster	4	84								
					3 Eingangskontrolle	3 siehe Spek.	Lebensdauerfest	5	105								
					2 siehe Spek.	2 siehe Spek.	Lebensdauerfest	5	70								

A.3 Musterauftrag; Strukturstückliste und Originalzeichnungen

MT08091701

Strukturstückliste

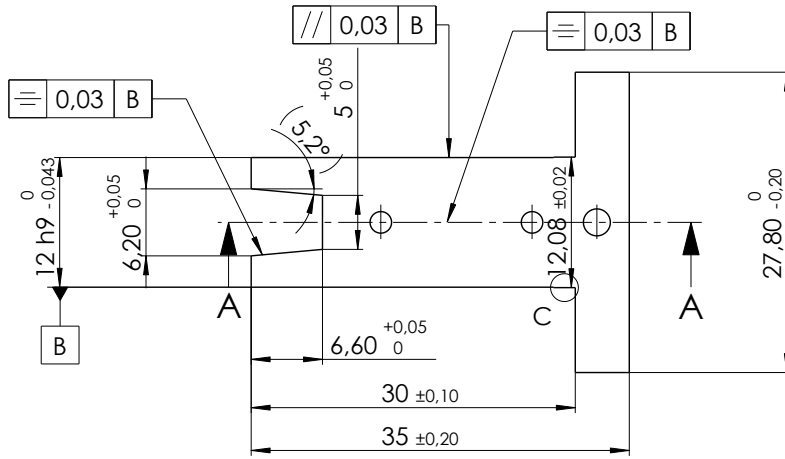
Datum 16.09.2008
 Bearbeiter Straschek Stefan

Zeichnungsnr. 40E68516A01V01
 Benennung Stanzteilmagnet

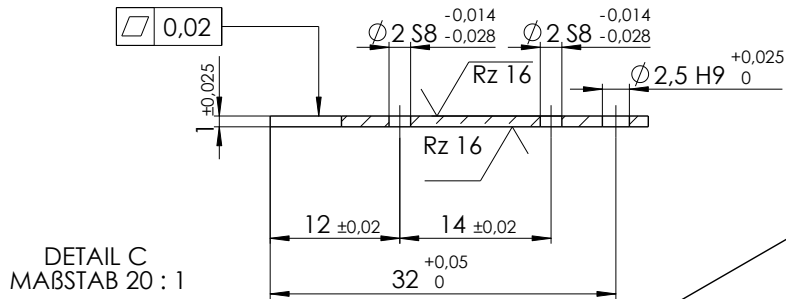
Ebene	Teilenummer / Benennung	Zeichnungsnummer / Norm / Art. Nr.	Stück / Menge	Stück / Menge(gesamt)
1	Spule gesamt	30E4311699100	1	5
2	Spulenkörper	30E4311699101	1	5
2	Lagerbuchse	40E68516A01907	1	5
2	CuL 0,300 EN 60317-13 W210 G1	-	0,0452 kg	0,226 kg
2	Litze beidseitig verzinkt und 4mm abisoliert	407003	2	10
2	Klebeband	417402	0,08 m	0,4 m
1	Gehäuse gesamt	40E68516A01100	1	5
2	Gehäuse	40E68516A01101	4	20
2	Zylinderstift Ø2x4	DIN 12771 B	3	15
2	Scheibe	40E68516A01001	1	5
1	Anker gesamt	40E68516A01300	1	5
2	Anker	40E68516A01301	2	10
2	Anker (klein)	40E68516A01302	2	10
2	Ankerlagerung	40E68516A01303	1	5
2	Zylinderstift Ø2x4	DIN 12771 B	2	10

\685\DA STRASCHKA\Submagnet\101

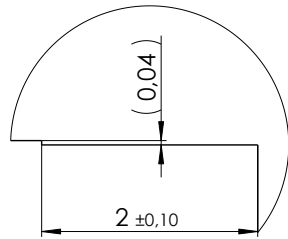
For this drawing we reserve all rights. Without our permission it may neither be copied nor made accessible to third persons. All patent trademark and other right in and to this drawing and design are expressly reserved by Kendrion Binder Magnete GmbH. (DIN ISO 18016)



SCHNITTDARSTELLUNG A-A
MAßSTAB 2 : 1

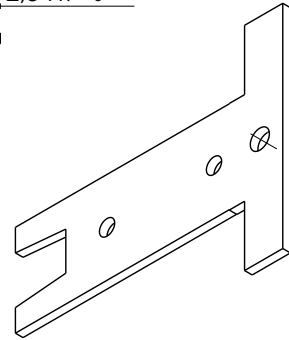


DETAIL C
MAßSTAB 20 : 1



✓ Rz 4
(✓ Rz 16)

alle unbemaßten Radien 0,2mm
alle unbemaßten Fasen 0,5mm x 45°

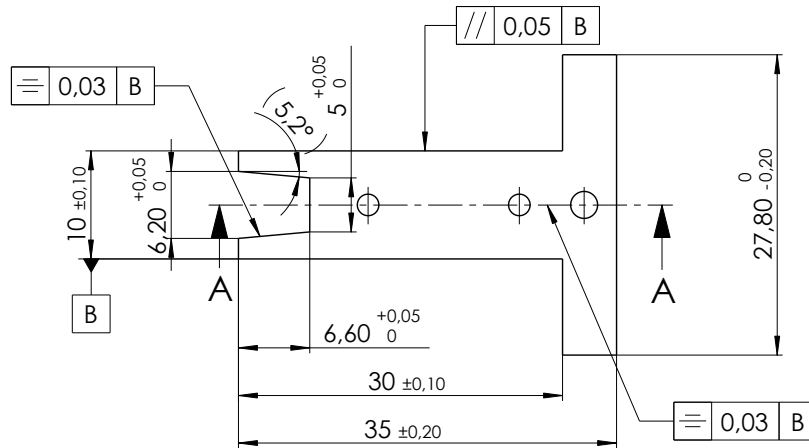


Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlagen, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugelassen. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Alle Rechte für den Fall der Patentierung oder Gebrauchsmuster Eintragung vorbehalten. (DIN ISO 18016)

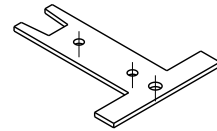
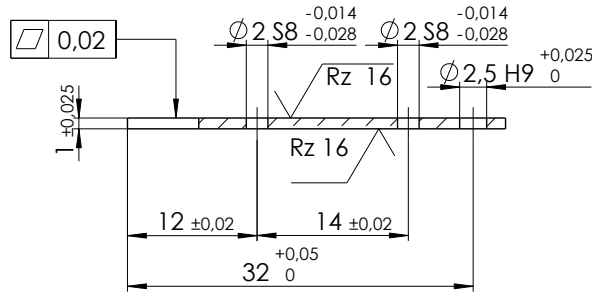
Projektionsmethode PROJECTION		ISO 128-1 (E)		Werkstückkanten WORK PIECE EDGES ISO 13715		L-0,1 +0,1		Nennmassbereich / NOMINAL SIZE RANGE 0,2...0,5 mm	
				Allgemeintoleranz GENERAL TOLERANCE DIN ISO 2768-mK		Oberfläche SURFACE ISO 1302 Reihe 3		Längenmasse LENGTH DIMENSION ± 0,05 mm	
				Datum		Name		Maßstab / SCALE 2:1	
				Bearb. DRAWN 31.08.2008		ssk		Radien, Fasen RADIA, CHAMFERS ± 0,1 mm	
				Gepr. CHECK.				Art.Nr. / MAT.-NO.	
								Werkstoff, Ausgangsteil / MATERIAL, INITIAL PART	
								DC01	
								Benennung / DESCRIPTION	
								Anker	
								Zeichnungsnummer / DRAWING NO.	
								40E68516A01301	
								Status	
								Ä	
Zust. REV. I.		Anz. Qty.		Änderung REV. DESC.		Datum DATE		Name	
								Ers. f. / REPL.	
								Format / SIZE DIN-A4	
								SolidWorks	



For this drawing we reserve all rights. Without our permission it may neither be copied nor made accessible to third persons. All patent trademarks and other rights in and to this drawing and design are expressly reserved by Kendrion Binder Magnete GmbH. (DIN ISO 18016)



SCHNITTDARSTELLUNG A-A
MAßSTAB 2 : 1



$\sqrt{Rz 4}$ ($\sqrt{Rz 16}$)

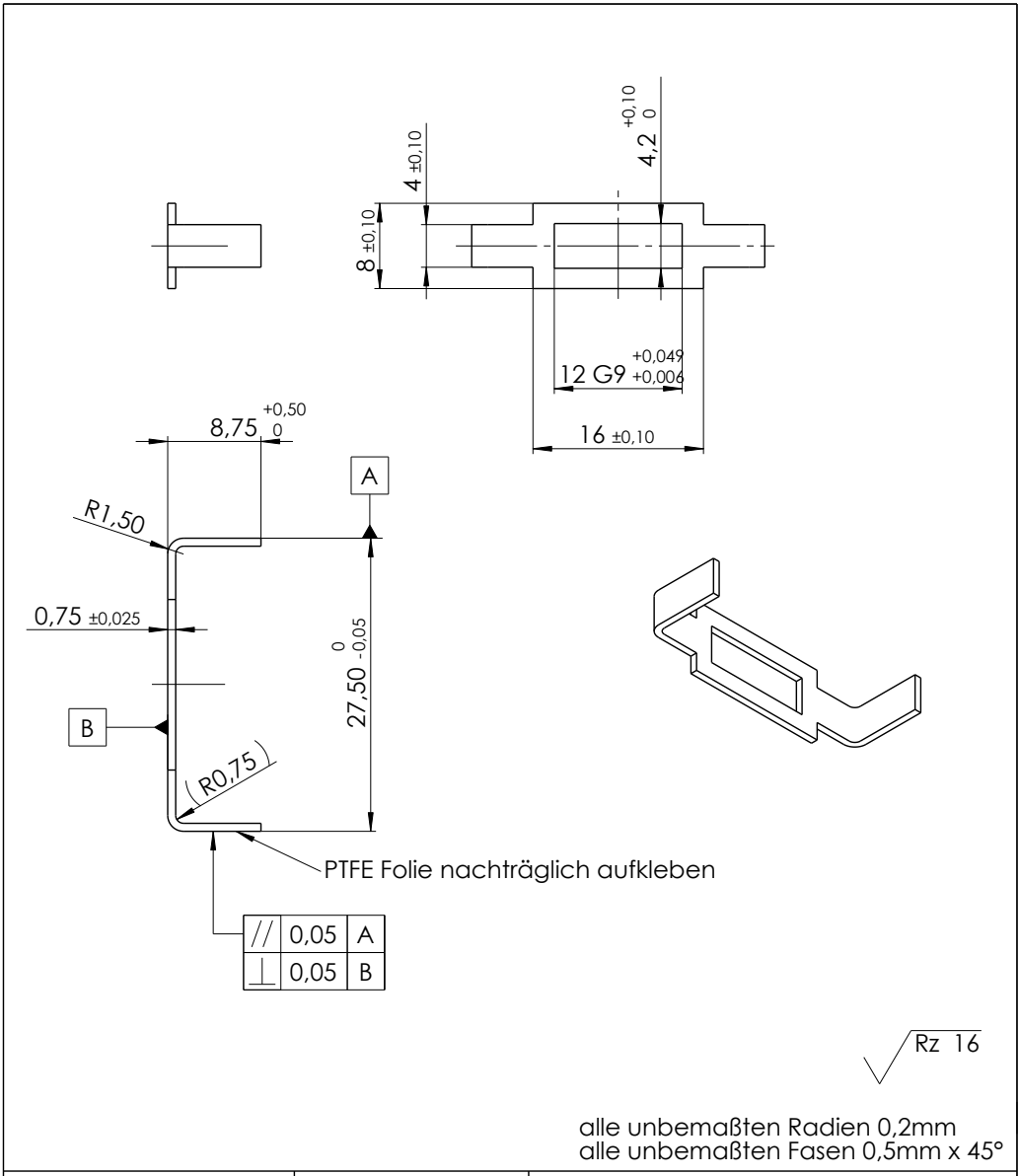
alle unbemaßten Radien 0,2mm
alle unbemaßten Fasen 0,5mm x 45°

Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlagen, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugelassen. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Alle Rechte für den Fall der Patentierung oder Gebrauchsmuster Eintragung vorbehalten. (DIN ISO 18016)

Projektionsmethode PROJECTION		ISO 128-1 (E)		Werkstückkanten WORK PIECE EDGES ISO 13715		Nennmassbereich / NOMINAL SIZE RANGE 0,2...0,5 mm	
				L-0,1 +0,1		Längenmasse LENGTH DIMENSION ± 0,05 mm	
				Allgemeintoleranz GENERAL TOLERANCE DIN ISO 2768-mK		Radien, Fasen RADIA, CHAMFERS ± 0,1 mm	
				Oberfläche SÜRFÄCHE ISO 1302 Reihe 3		Maßstab / SCALE 2:1	
				Datum		Ar.Nr. / MAT.-NO.	
				Name		Werkstoff, Ausgangsteil / MATERIAL, INITIAL PART	
				Benennung / DESCRIPTION		DC01	
				Bearb. DRAWN		Anker (klein)	
				12.08.2008			
				Gepr. CHECK.			
						Zeichnungsnummer / DRAWING NO.	
						40E68516A01302	
						Status	
						Ä	
Zust. REV. I.	Anz. Qty.	Änderung REV. DESC.	Datum DATE	Name NAME	Ers. f. / REPL.		Format / SIZE DIN-A4
							SolidWorks



For this drawing we reserve all rights. Without our permission it may neither be copied nor made accessible to third persons. All patent trademarks and other rights in and to this drawing and design are expressly reserved by Kendrion Binder Magnete GmbH. (DIN ISO 18016)

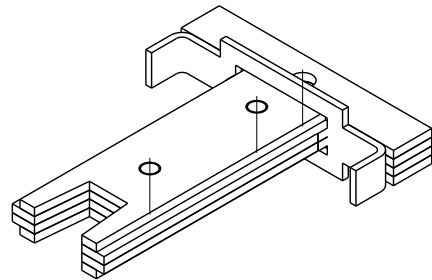
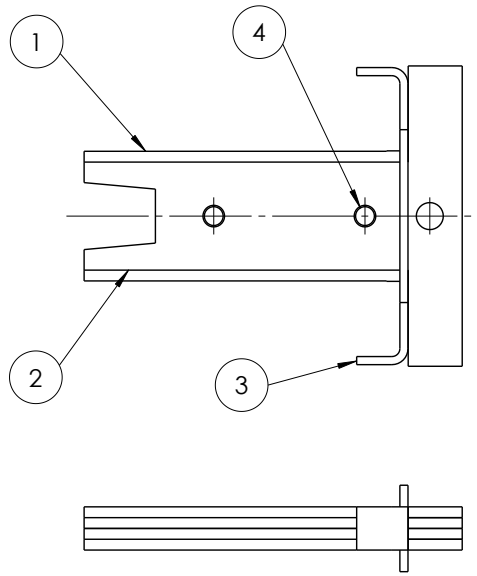


Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlagen, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugelassen. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Alle Rechte für den Fall der Patentierung oder Gebrauchsmuster Eintragung vorbehalten. (DIN ISO 18016)

Projektionsmethode PROJECTION		ISO 128-1 (E)		Werkstückkanten WORK PIECE EDGES ISO 13715		Nennmassbereich / NOMINAL SIZE RANGE 0,2...0,5 mm	
				Allgemeintoleranz GENERAL TOLERANCE DIN ISO 2768-mK		Längenmasse LENGTH DIMENSION ± 0,05 mm	
				Oberfläche SURFACE ISO 1302 Reihe 3		Radien, Fasen RADIA, CHAMFERS ± 0,1 mm	
				Datum Date		Maßstab / SCALE 2:1	
				Name Name		Art.Nr. / MAT.-NO.	
				Bearb. DRAWN 22.08.2008		Werkstoff, Ausgangsteil / MATERIAL, INITIAL PART DC01	
				Gepr. CHECK.		Benennung / DESCRIPTION Ankerlagerung	
						Zeichnungsnummer / DRAWING NO. 40E68516A01303	
						Status Ä	
Zust. REV. I.		Anz. Qty.		Änderung REV. DESC.		Ers. f. / REPL.	
				Datum DATE		Format / SIZE DIN-A4	
				Name NAME		SolidWorks	



For this drawing we reserve all rights. Without our permission it may neither be copied nor made accessible to third persons. All patent trademarks and other rights in and to this drawing and design are expressly reserved by Kendrion Binder Magnete GmbH. (DIN ISO 18016)



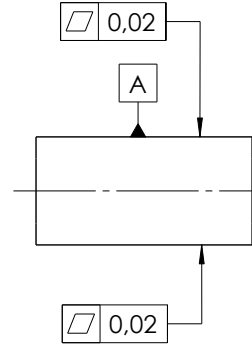
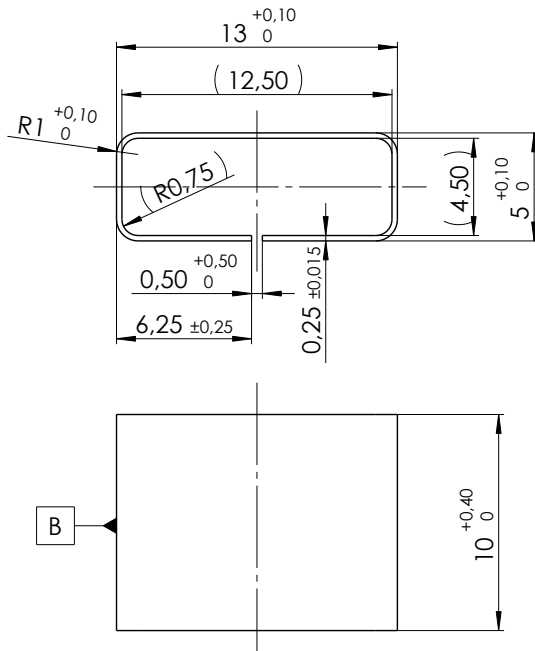
4	Zylinderstift	Ø2x4 - DIN 12771 B
3	Ankerlagerung	40E68516A01303
2	Anker (klein)	40E68516A01302
1	Anker	40E68516A01301
Pos.	Benennung	Zeichnungs Nr. / Norm

Projektionsmethode PROJECTION			ISO 128-1 (E)	Werkstückkanten WORK PIECE EDGES ISO 13715		L-0,1 +0,1	Nennmassbereich / NOMINAL SIZE RANGE 0,2...0,5 mm			
				Allgemeintoleranz GENERAL TOLERANCE DIN ISO 2768-mK	Oberfläche SURFACE ISO 1302 Reihe 3	Längenmasse LENGTH DIMENSION	± 0,05 mm	Radien, Fasen RADIA, CHAMFERS	± 0,1 mm	
				Datum	Name	Maßstab / SCALE 2:1				
				Bearb. DRAWN	12.08.2008	ssk	Ar.Nr. / MAT.-NO.			
				Gepr. CHECK.	-	-	Werkstoff, Ausgangsteil / MATERIAL, INITIAL PART			
						diverse -				
						Benennung / DESCRIPTION				
						Anker gesamt				
						-				
						Zeichnungsnummer / DRAWING NO.				
						40E68516A01300				
						Status				
						Ä				
Zust. REV. I.	Anz. Qty.	Änderung REV. DESC.	Datum DATE	Name			Ers. f. / REPL.		Format / SIZE DIN-A4	SolidWorks

Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlagen, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugelassen. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Alle Rechte für den Fall der Patentierung oder Gebrauchsmuster Eintragung vorbehalten. (DIN ISO 18016)

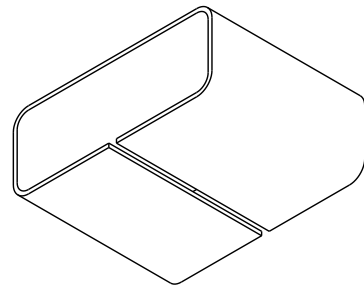


For this drawing we reserve all rights. Without our permission it may neither be copied nor made accessible to third persons. All patent trademarks and other rights in and to this drawing and design are expressly reserved by Kendrion Binder Magnete GmbH. (DIN ISO 18016)



B steht normal (90°) auf A, $\pm 0,25^\circ$ ($0^\circ 15'$)

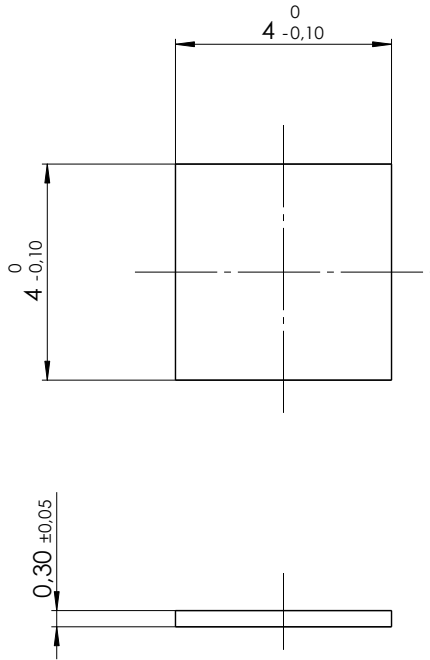
$\sqrt{Rz 16}$



Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlagen, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Alle Rechte für den Fall der Patentierung oder Gebrauchsmuster Eintragung vorbehalten. (DIN ISO 18016)

Projektionsmethode PROJECTION		ISO 128-1 (E)		Werkstückkanten WORK PIECE EDGES ISO 13715		Nennmassbereich / NOMINAL SIZE RANGE 0,2...0,5 mm	
				Allgemeintoleranz GENERAL TOLERANCE DIN ISO 2768-mK		Längenmasse LENGTH DIMENSION $\pm 0,05$ mm	
				Oberfläche SURFACE ISO 1302 Reihe 3		Radien, Fasen RADIA, CHAMFERS $\pm 0,1$ mm	
				Datum		Maßstab / SCALE 4:1	
				Name		Art.Nr. / MAT.-NO.	
				Bearb. DRAWN 10.09.2008		Werkstoff, Ausgangsteil / MATERIAL, INITIAL PART CuZn37	
				Gepr. CHECK.		Benennung / DESCRIPTION Buchse	
						Zeichnungsnummer / DRAWING NO. 40E68516A01907	
						Status Ä	
Zust. REV. I.		Anz. Qty.		Änderung REV. DESC.		Ers. f. / REPL.	
Datum DATE		Name NAME		Format / SIZE DIN-A4		SolidWorks	

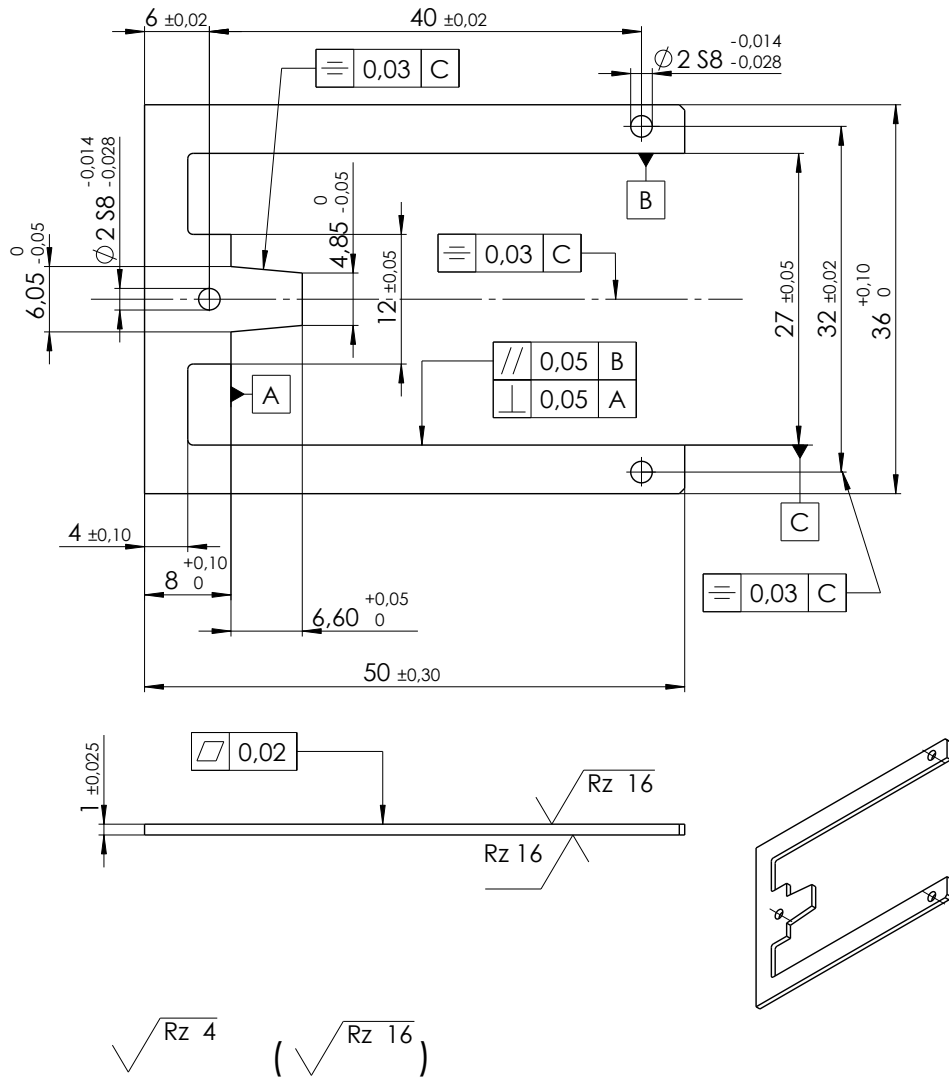
For this drawing we reserve all rights. Without our permission it may neither be copied nor made accessible to third persons. All patent trademarks and other rights in and to this drawing and design are expressly reserved by Kendrion Binder Magnete GmbH. (DIN ISO 18016)



Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlagen, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugelassen. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Alle Rechte für den Fall der Patentierung oder Gebrauchsmuster Eintragung vorbehalten. (DIN ISO 18016)

Projektionsmethode PROJECTION			ISO 128-1 (E)	Werkstückkanten WORK PIECE EDGES ISO 13715		Nennmassbereich / NOMINAL SIZE RANGE 0.2...0.5 mm	
				Allgemeintoleranz GENERAL TOLERANCE DIN ISO 2768-mK	Oberfläche SURFACE ISO 1302 Reihe 3	Längenmasse LENGTH DIMENSION	± 0,05 mm
				Datum	Name	Maßstab / SCALE	10:1
				Bearb. DRAWN	9.09.2008	Art.Nr. / MAT.-NO.	± 0,1 mm
				Gepr. CHECK.	-	Werkstoff, Ausgangsteil / MATERIAL, INITIAL PART	-
						Benennung / DESCRIPTION	Scheibe
						Zeichnungsnummer / DRAWING NO.	40E685A00001
						Ers. f. / REPL.	Format / SIZE DIN-A4
						Status	Ä
REV.I.	Anz.	Änderung	Datum	Name			SolidWorks
	Qty.	REV. DESC.	DATE	NAME			

For this drawing we reserve all rights. Without our permission it may neither be copied nor made accessible to third persons. All patent trademarks and other rights in and to this drawing and design are expressly reserved by Kendrion Binder Magnete GmbH. (DIN ISO 18016)



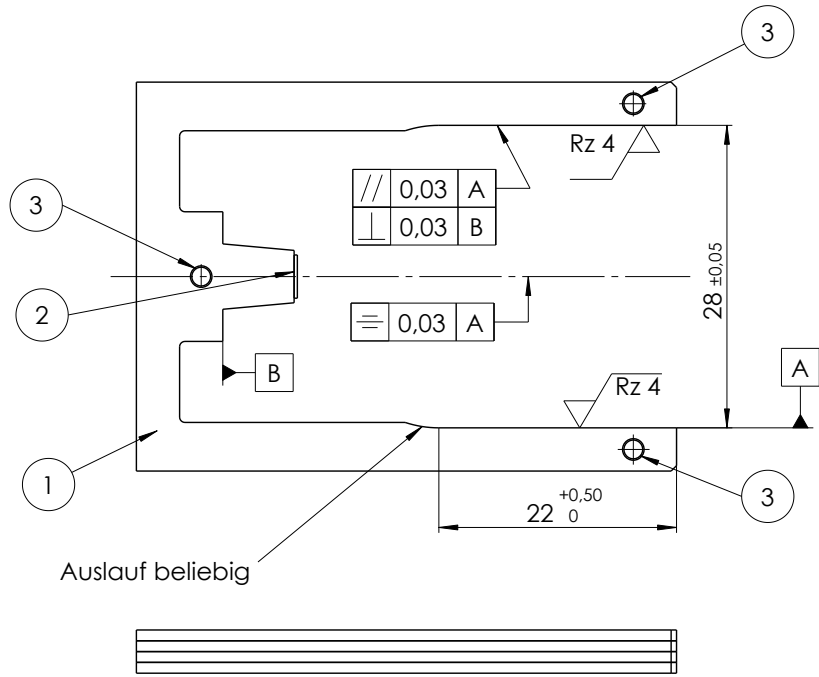
alle unbemaßten Radien 0,2mm
alle unbemaßten Fasen 0,5mm x 45°

Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlagen, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Alle Rechte für den Fall der Patentierung oder Gebrauchsmuster Eintragung vorbehalten. (DIN ISO 18016)

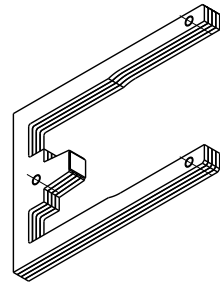
Projektionsmethode PROJECTION		ISO 128-1 (E)		Werkstückkanten WORK PIECE EDGES ISO 13715		Nennmassbereich / NOMINAL SIZE RANGE 0,2...0,5 mm	
				Allgemeintoleranz GENERAL TOLERANCE DIN ISO 2768-mK		Längenmasse LENGTH DIMENSION ± 0,05 mm	
				Oberfläche SURFACE ISO 1302 Reihe 3		Radien, Fasen RADIA, CHAMFERS ± 0,1 mm	
				Datum Date		Maßstab / SCALE 2:1	
				Name Name		Art.Nr. / MAT.-NO.	
				Bearb. DRAWN 20.08.2008		Werkstoff, Ausgangsteil / MATERIAL, INITIAL PART DC01	
				Gepr. CHECK.		Benennung / DESCRIPTION Gehäuse	
						Zeichnungsnummer / DRAWING NO. 40E68516A01101	
						Status Ä	
Zust. REV.1.	Anz. Qty.	Änderung REV. DESC.	Datum DATE	Name NAME	Ers. f. / REPL.		Format / SIZE DIN-A4 SolidWorks



For this drawing we reserve all rights. Without our permission it may neither be copied nor made accessible to third persons. All patent trademarks and other rights in and to this drawing and design are expressly reserved by Kendrion Binder Magnete GmbH. (DIN ISO 18016)



3	Zylinderstift	∅2x4 - DIN 12771 B
2	Scheibe	40E68516A01001
1	Gehäuse	40E68516A01101
Pos.	Benennung	Zeichnungs Nr. / Norm

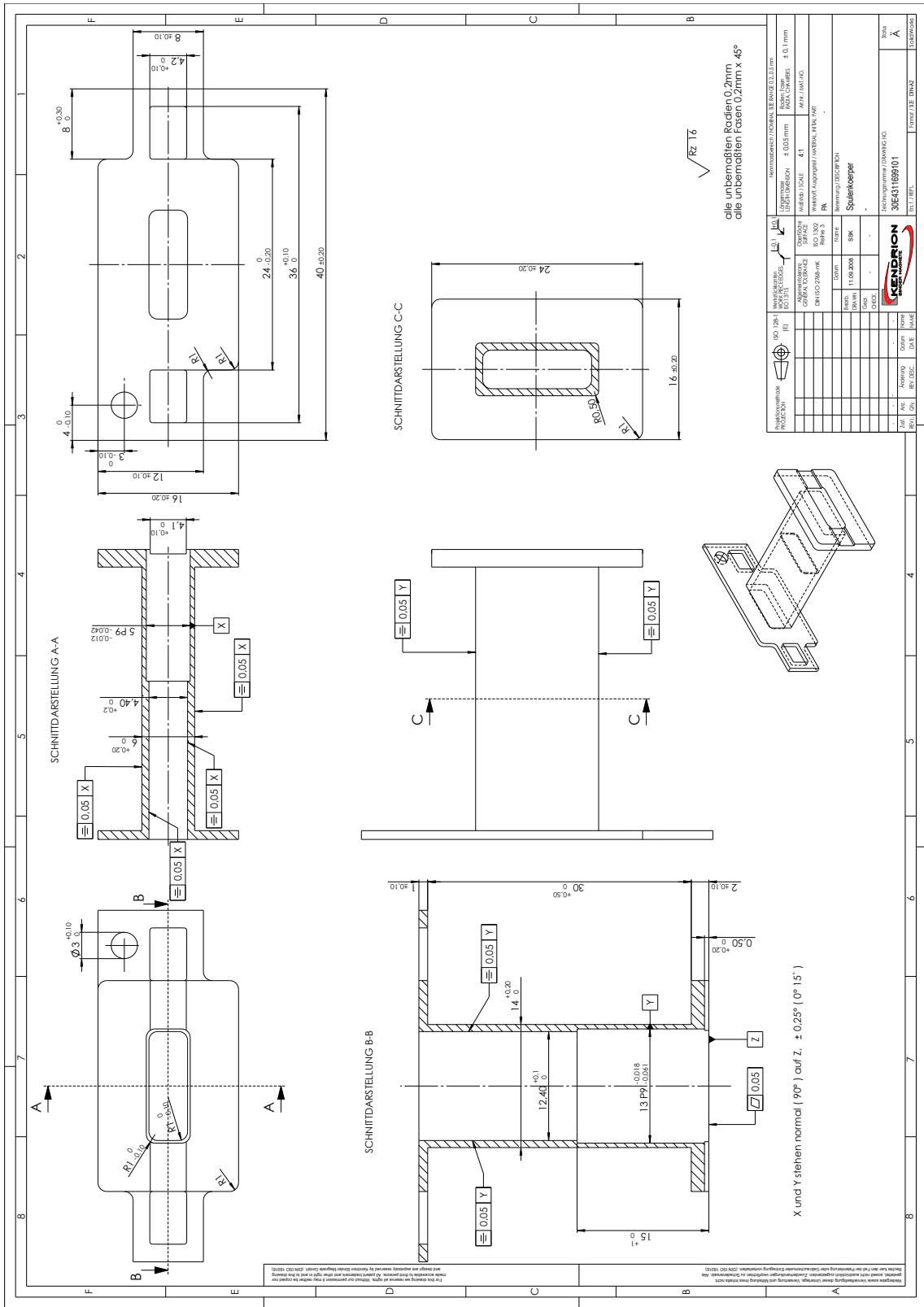


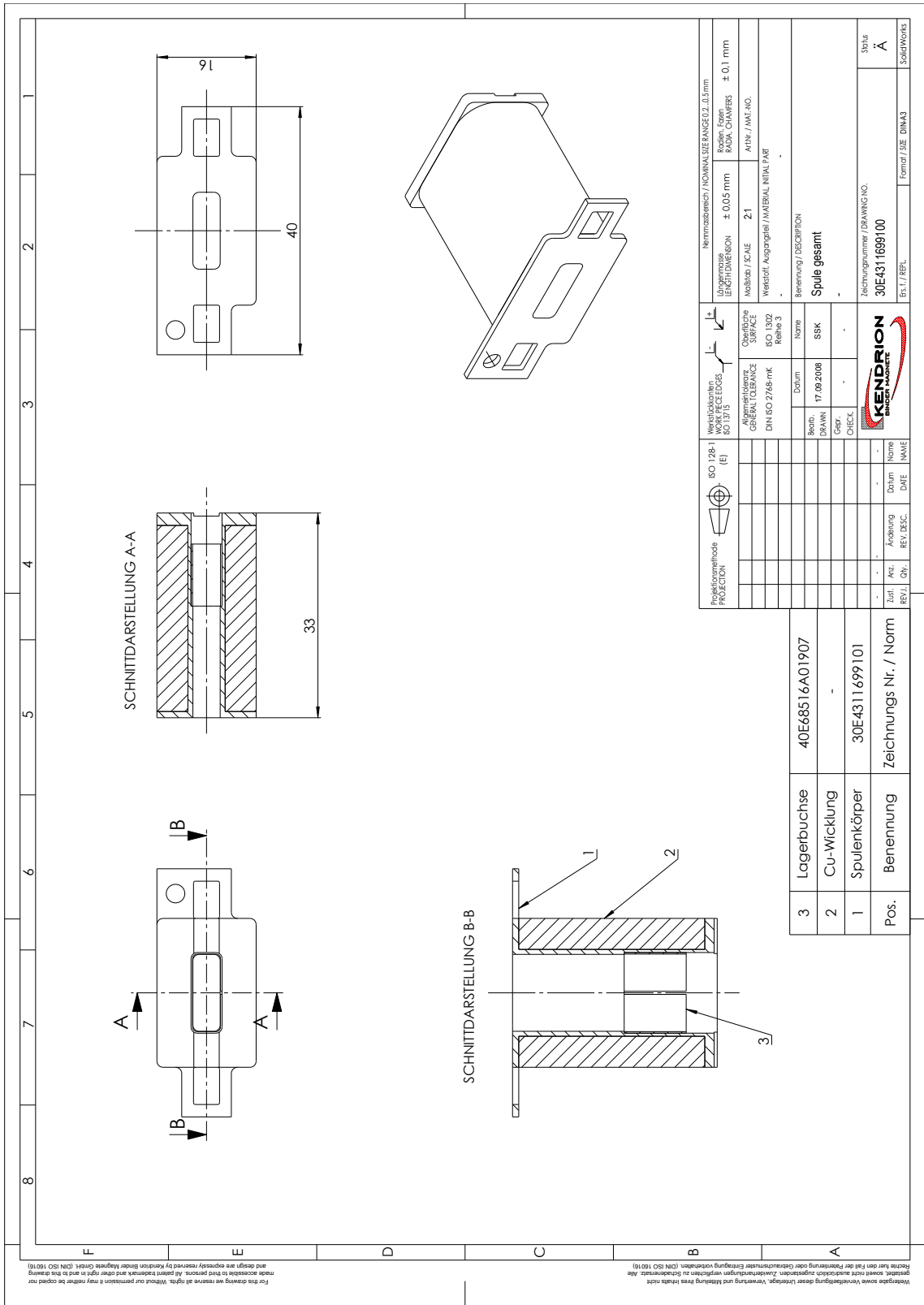
$\sqrt{Rz\ 16}$ ($\sqrt{Rz\ 4}$)

Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlagen, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Alle Rechte für den Fall der Patentierung oder Gebrauchsmuster Eintragung vorbehalten. (DIN ISO 18016)

Projektionsmethode PROJECTION		ISO 128-1 (E)	Werkstückkanten WORK PIECE EDGES ISO 13715		Nennmassbereich / NOMINAL SIZE RANGE 0.2...0.5 mm	
					Längenmasse LENGTH DIMENSION	± 0,05 mm
					Radien, Fasen RADIA, CHAMFERS	
					± 0,1 mm	
					Maßstab / SCALE	2:1
					Art.Nr. / MAT.-NO.	
					Werkstoff, Ausgangsteil / MATERIAL, INITIAL PART	
					diverse	
					Benennung / DESCRIPTION	
					Gehäuse gesamt	
					-	
					Zeichnungsnummer / DRAWING NO.	
					40E68516A01100	
					Status	
					Ä	
Zust. REV. I.	Anz. Qty.	Änderung REV. DESC.	Datum DATE	Name NAME	Ers. f. / REPL.	Format / SIZE DIN-A4
-	-	-	-	-		SolidWorks







For this drawing we reserve all rights. Without our permission it may neither be copied nor made accessible to third persons. All patent trademarks and other rights in and to the drawing and design are expressly reserved by Kendrion Binder Magnet GmbH. (DIN ISO 15019)

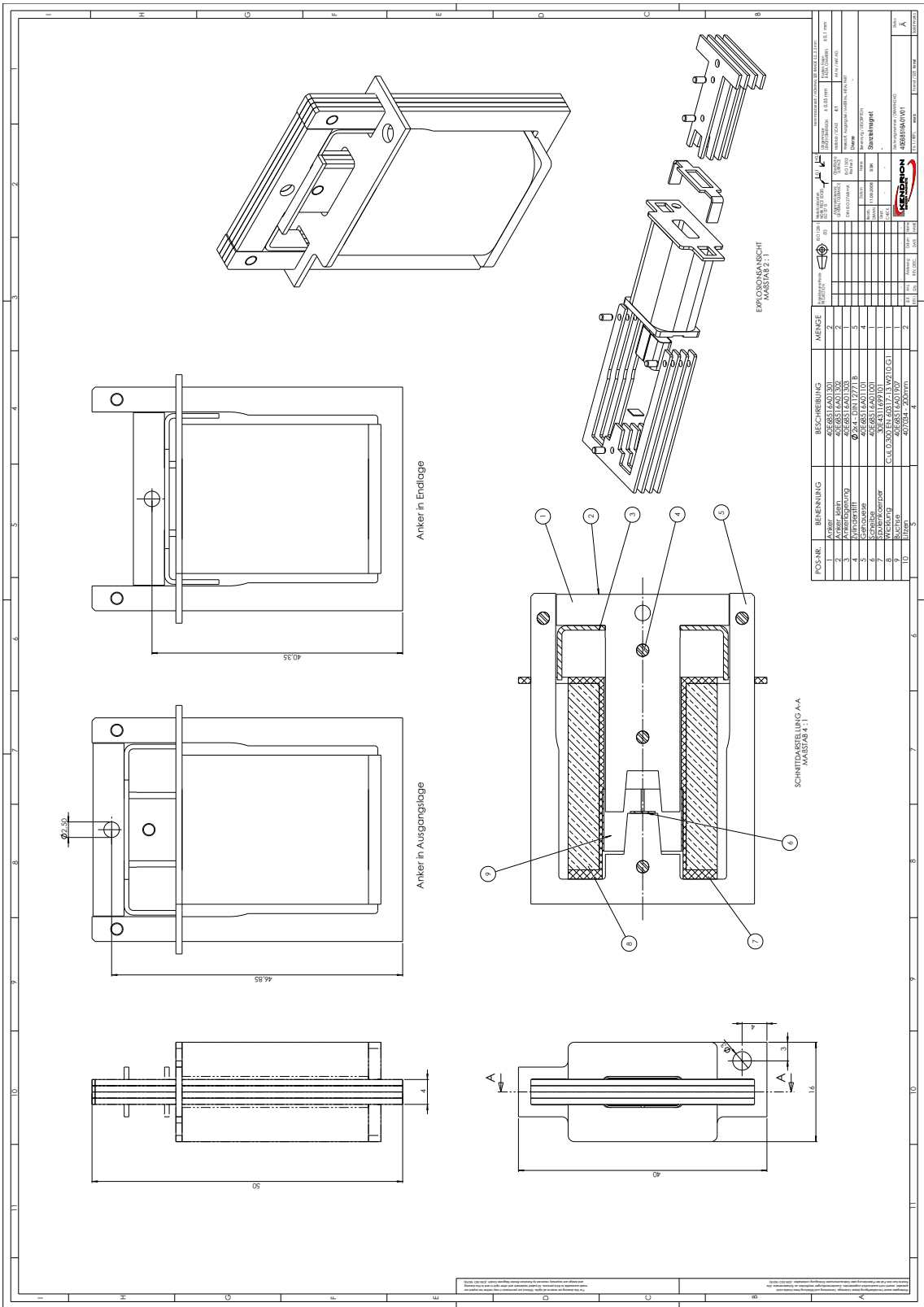
Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, Vervielfältigung und Verbreitung, auch auszugsweise, ist ohne schriftliche Genehmigung der Kendrion Binder Magnet GmbH. (DIN ISO 15019)

Projektionsmethode PROJECTION	ISO 128-1 (E)	Werkstoffnormen MATERIAL SPECIFICATIONS DIN ISO 7183	Werkstoff MATERIAL	ISO 1302 Reihe 3	ISO 1302 Reihe 3	Werkstoff / SCALE 2:1	Nennmaßbereich / NOMINAL RANGE $\pm 0,5$ mm	Werkstoff / MATERIAL ROSA, CHAMBERS	Werkstoff / MATERIAL INITIAL PART AWIN / MAT.-NO.	Werkstoff / MATERIAL TOLERANCE $\pm 0,1$ mm
ISO 128-1 (E)		Werkstoffnormen MATERIAL SPECIFICATIONS DIN ISO 7183	Werkstoff MATERIAL	ISO 1302 Reihe 3	ISO 1302 Reihe 3	Werkstoff / SCALE 2:1	Nennmaßbereich / NOMINAL RANGE $\pm 0,5$ mm	Werkstoff / MATERIAL ROSA, CHAMBERS	Werkstoff / MATERIAL INITIAL PART AWIN / MAT.-NO.	Werkstoff / MATERIAL TOLERANCE $\pm 0,1$ mm
Bezeichnung / DESCRIPTION		Bezeichnung / DESCRIPTION	Spule gesamt							
Zust. / Rev. / Chg.		Zust. / Rev. / Chg.								
Benennung / NAME		Benennung / NAME	30E4311699100							
Datum / DATE		Datum / DATE	17.09.2008							
Änderung / REV. / DEC.		Änderung / REV. / DEC.								
Pos.		Pos.	30E4311699100							
Zeichnungs Nr. / Norm		Zeichnungs Nr. / Norm	40E48516A01907							
Benennung		Benennung	Spulenkörper							
Lagerbuchse		Lagerbuchse	40E48516A01907							
Cu-Wicklung		Cu-Wicklung								



SCHNITTDARSTELLUNG B-B

SCHNITTDARSTELLUNG A-A



A.4 Lieferantenangebote

Lieferanten		Fertigungsart	Preis 5 Stk.	Preis 10 Stk.	Lieferzeit ab Bestellung	Ansprechpartner(e-mail, tel.nummer)
Benennung Spulenkörper	Modelshop Vienna Sebra	Fräsen nicht möglich	3900		8WT	helmut.sagaadin@modelshop-vienna.com office@sebra.at
Zeichnungsnummer 30E4311699101	WIK MTC-Gaich CNC Fuchshofer	Fräsen Fräsen Fräsen	507,5 2750 1070		10WT 10WT 5WT	info@wik-technik.at office@mtc-gaich.at hannes.fuchshofer@fuchshofer.at
Benennung Lagerbuchse	Lieferanten Modelshop Vienna Francesconi Mastro	Fertigungsart Drahtschneiden-Laserschneiden nicht möglich Draht geschnitten	Preis 5 Stk. 370 509	Preis 10 Stk.	Lieferzeit ab Bestellung 8WT 3 Wochen	Ansprechpartner(e-mail, tel.nummer) helmut.sagaadin@modelshop-vienna.com robert.grabner@francesconi.co.at ewald.jancai@mastro.at
Zeichnungsnummer 40E68516A01907						
Benennung Gehäuse	Lieferanten Modelshop Vienna Francesconi Mastro Michler GmbH	Fertigungsart Drahtschneiden-Laserschneiden nicht möglich Draht geschnitten Laserschneiden	Preis 5 Stk. 370 488	Preis 10 Stk.	Lieferzeit ab Bestellung 8WT 3 Wochen 162,25 10WT	Ansprechpartner(e-mail, tel.nummer) helmut.sagaadin@modelshop-vienna.com robert.grabner@francesconi.co.at ewald.jancai@mastro.at office@michler.at
Zeichnungsnummer 40E68516A01101						
Benennung Anker	Lieferanten Modelshop Vienna Francesconi Mastro Michler GmbH	Fertigungsart Drahtschneiden-Laserschneiden Draht geschnitten Laserschneiden	Preis 5 Stk. 370 430	Preis 10 Stk.	Lieferzeit ab Bestellung 8WT 3 Wochen 10WT 138,5	Ansprechpartner(e-mail, tel.nummer) helmut.sagaadin@modelshop-vienna.com robert.grabner@francesconi.co.at ewald.jancai@mastro.at office@michler.at
Zeichnungsnummer 40E68516A01301						
Benennung Anker(klein)	Lieferanten Modelshop Vienna Francesconi Mastro Michler GmbH	Fertigungsart Drahtschneiden-Laserschneiden nicht möglich Draht geschnitten Laserschneiden	Preis 5 Stk. 370 430	Preis 10 Stk.	Lieferzeit ab Bestellung 8WT 3 Wochen 10WT 138,5	Ansprechpartner(e-mail, tel.nummer) helmut.sagaadin@modelshop-vienna.com robert.grabner@francesconi.co.at ewald.jancai@mastro.at office@michler.at
Zeichnungsnummer 40E68516A01302						
Benennung Ankerlagerung	Lieferanten Modelshop Vienna Francesconi Mastro	Fertigungsart Drahtschneiden-Laserschneiden nicht möglich Draht geschnitten	Preis 5 Stk. 370 329	Preis 10 Stk.	Lieferzeit ab Bestellung 8WT 3 Wochen	Ansprechpartner(e-mail, tel.nummer) helmut.sagaadin@modelshop-vienna.com robert.grabner@francesconi.co.at ewald.jancai@mastro.at
Zeichnungsnummer 40E68516A01303						

A.5 Hubkraftkennlinien Labor

A.5.1 Messaufbau und Hubkraftkennlinien Drehteilmagnet



Abbildung A.1: Messaufbau Drehteilmagnet vertikale Aufspannung



Abbildung A.2: Messaufbau Drehteilmagnet horizontale Aufspannung

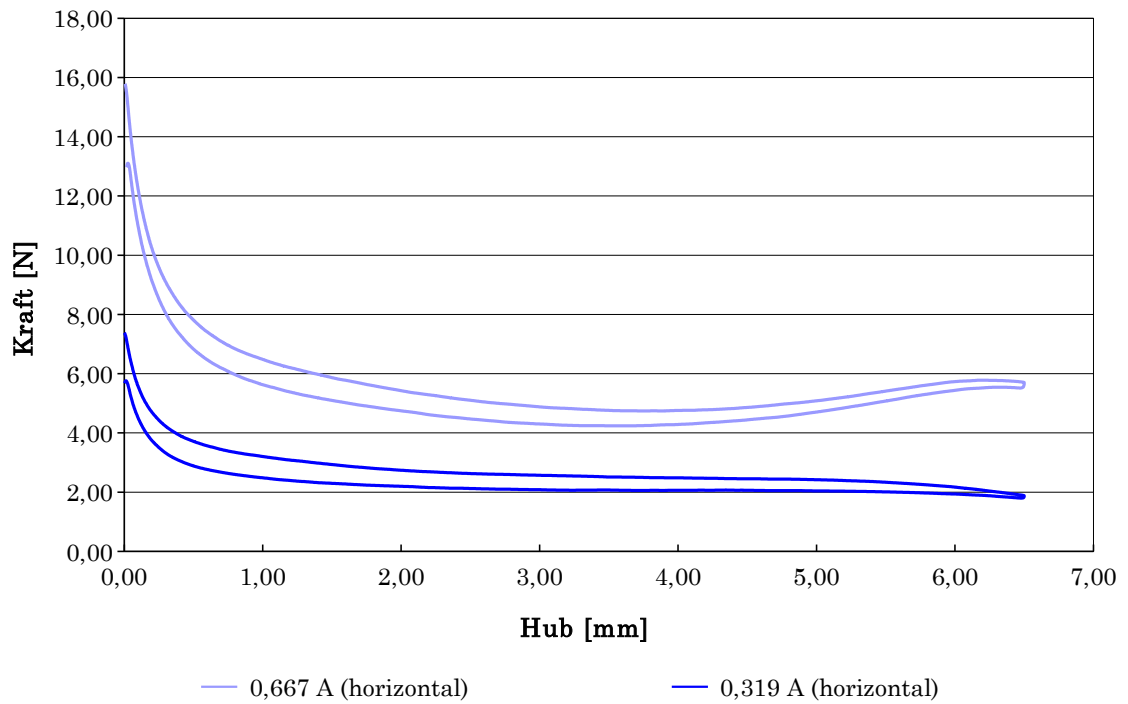


Abbildung A.3: Drehteilmagnet horizontal

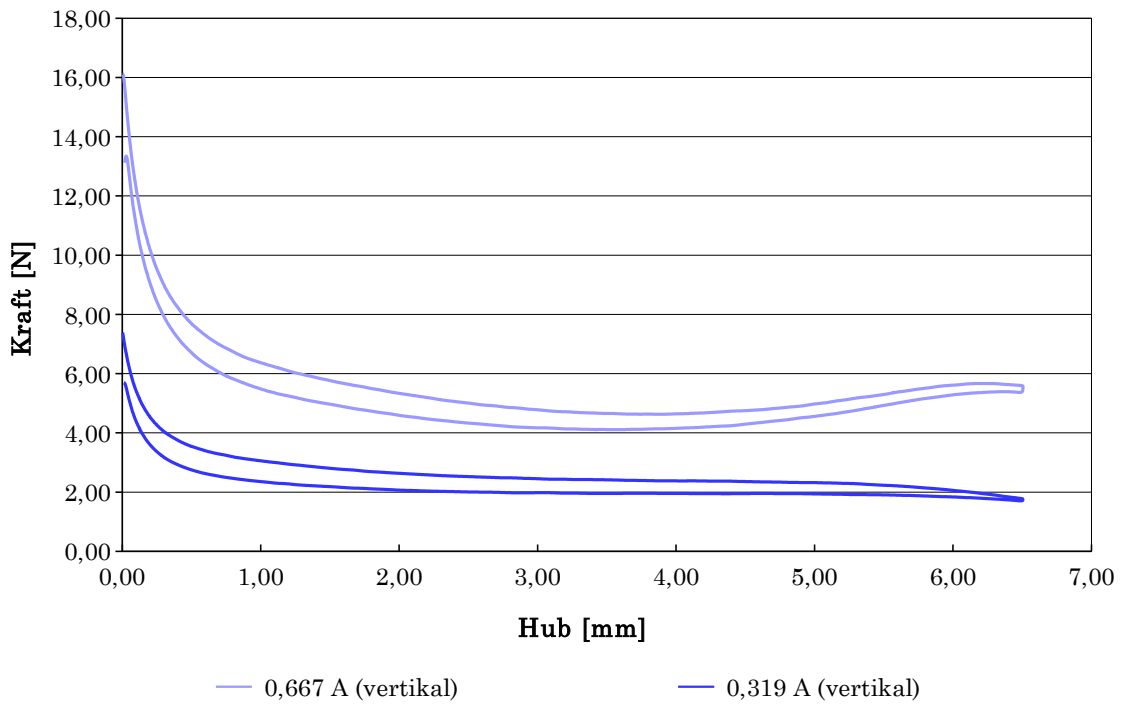


Abbildung A.4: Drehteilmagnet vertikal

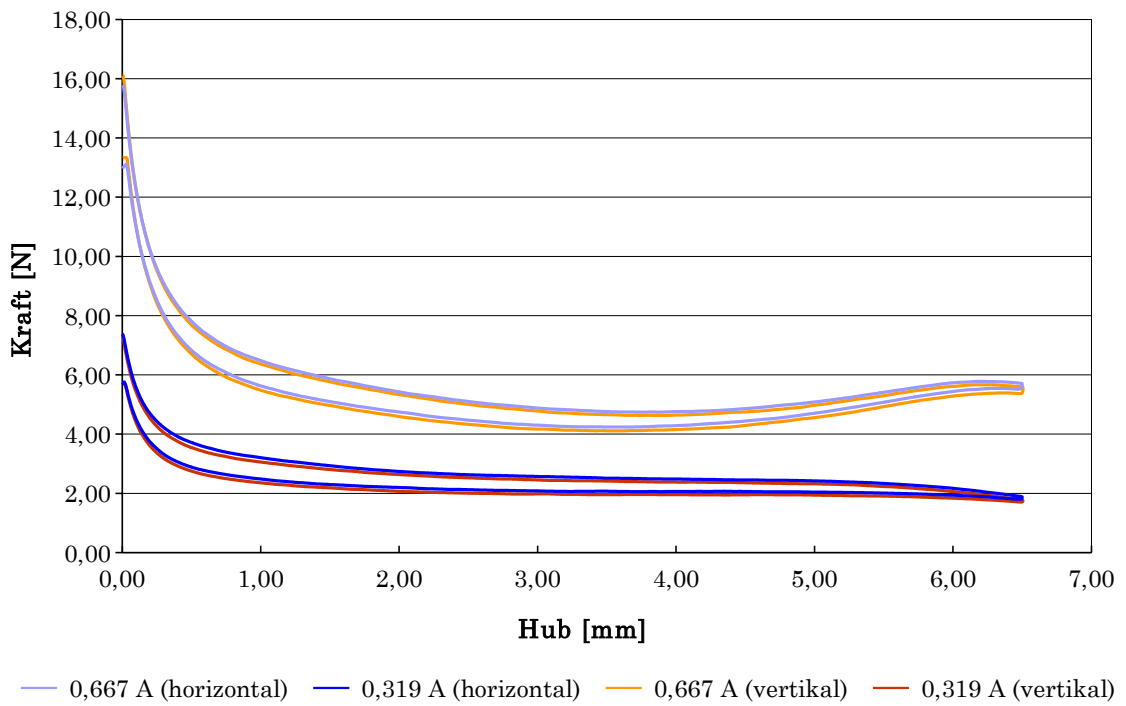


Abbildung A.5: Drehteilmagnet Vergleich vertikale und horizontale Lage

A.5.2 Messaufbau und Hubkraftkennlinien Stanzteilmagnet

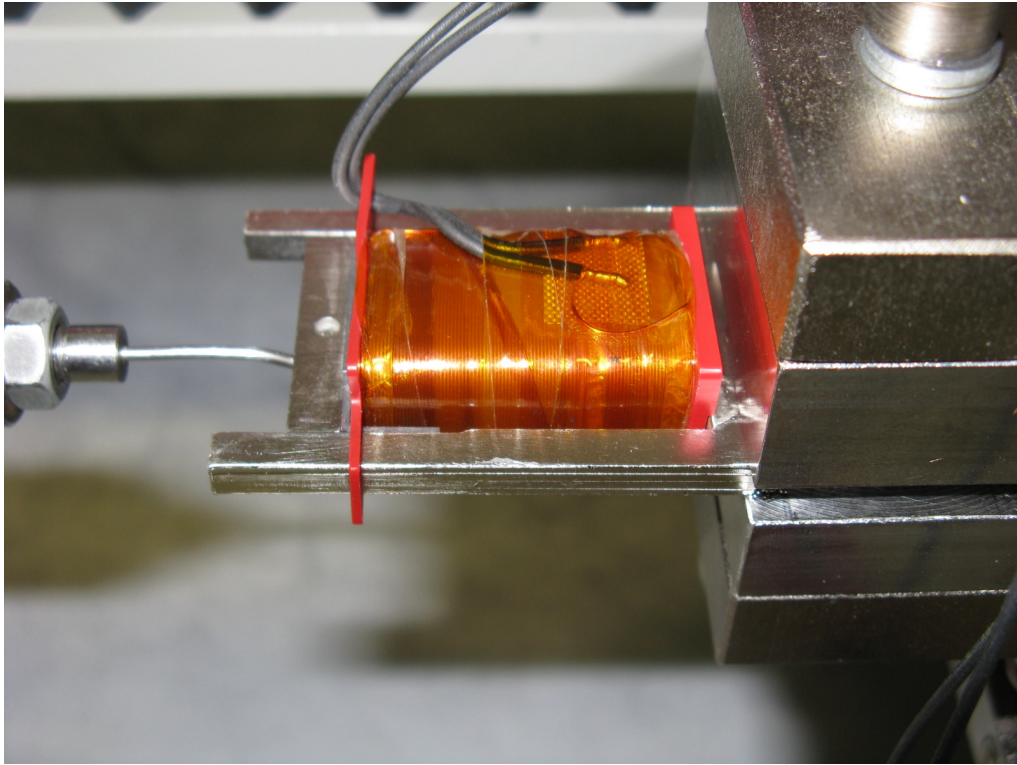


Abbildung A.6: Messaufbau Stanzteilmagnet horizontal liegende Aufspannung

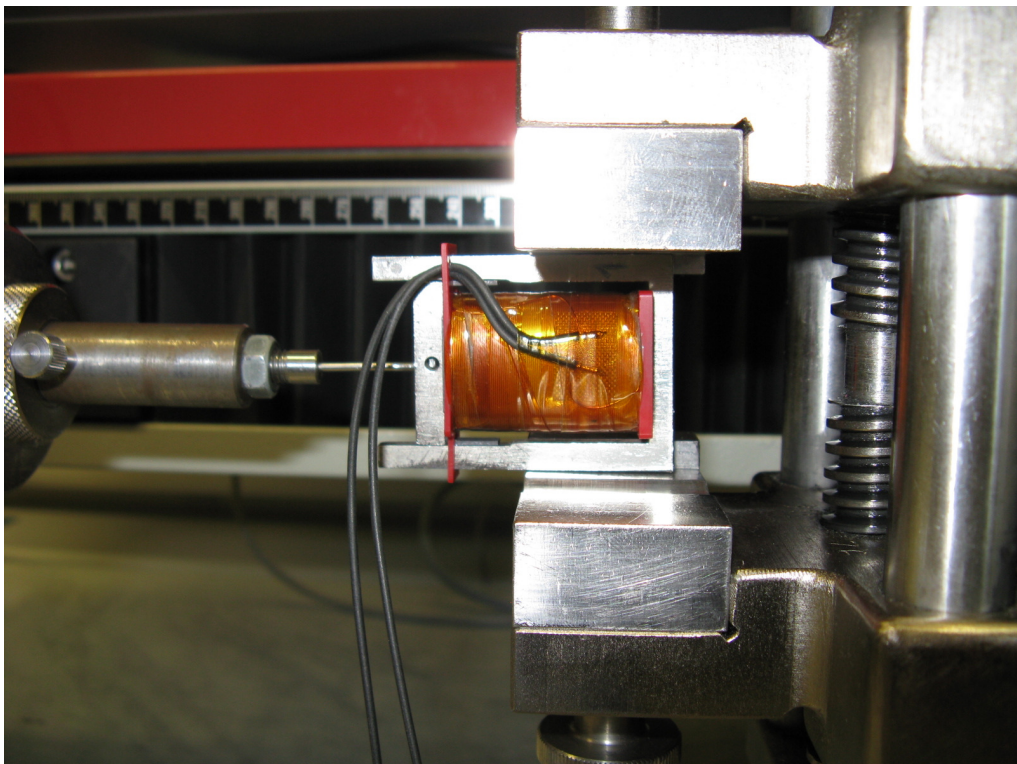


Abbildung A.7: Messaufbau Stanzteilmagnet horizontal stehende Aufspannung

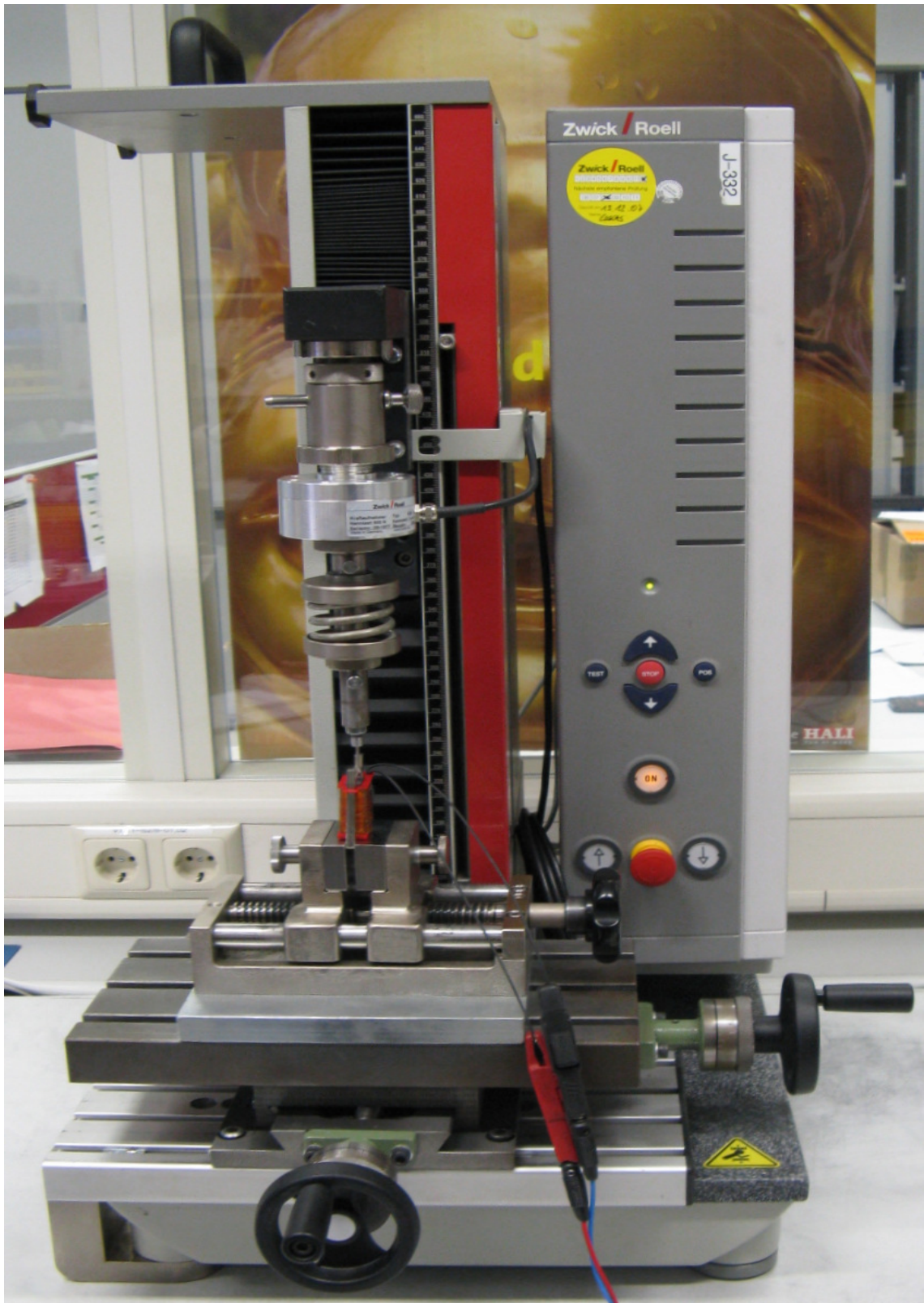


Abbildung A.8: Messaufbau Stanzteilmagnet vertikal Aufspannung

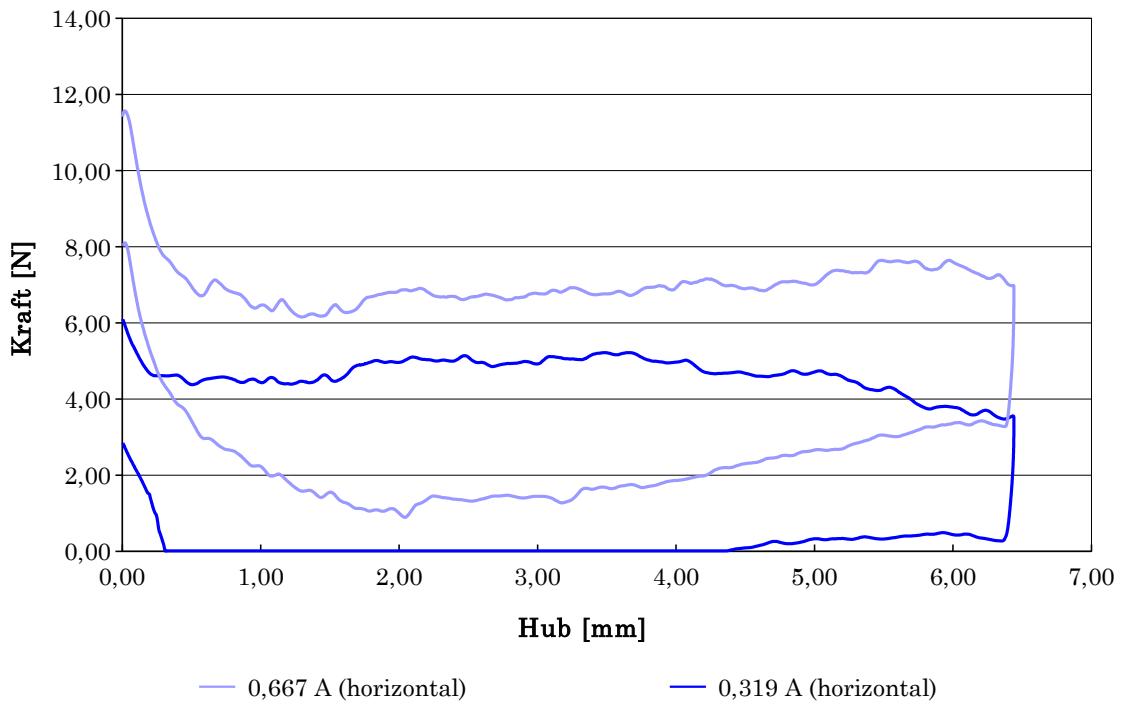


Abbildung A.9: PT01 horizontal liegend

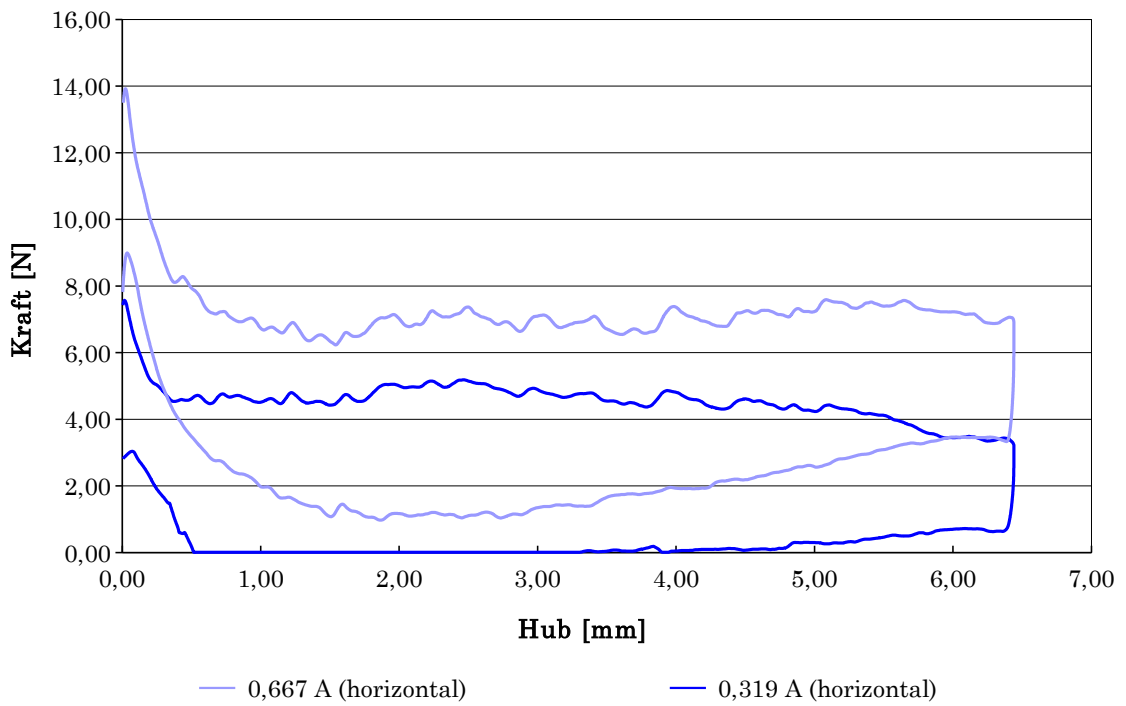


Abbildung A.10: PT01 horizontal quer

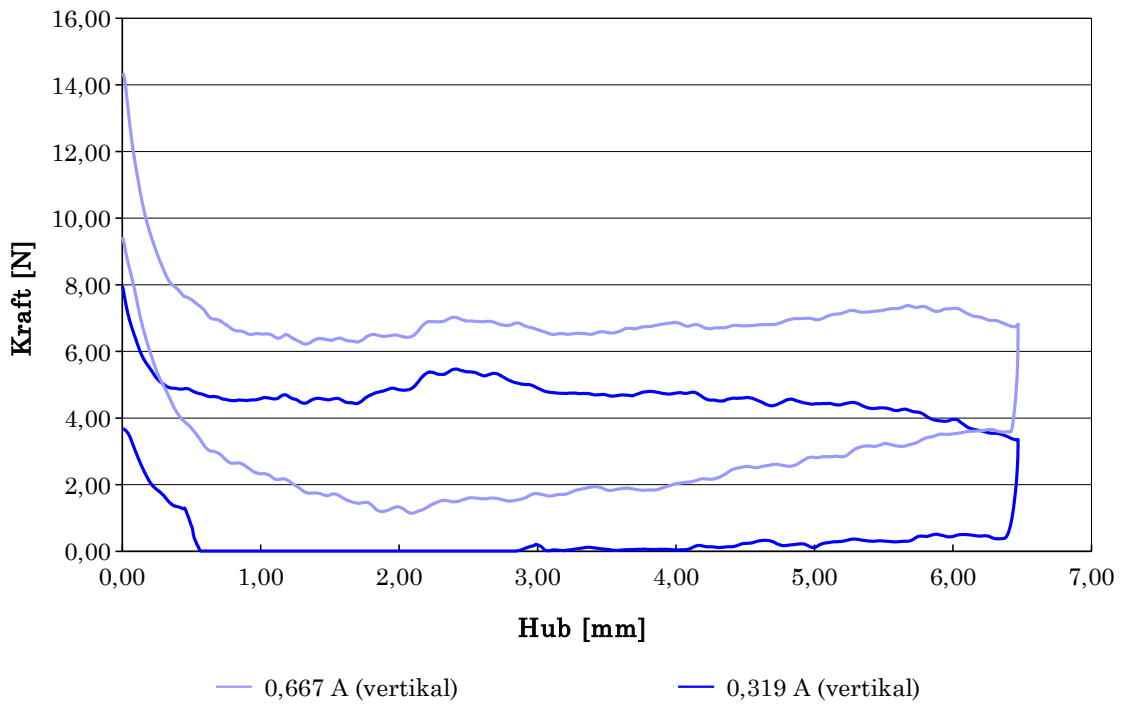


Abbildung A.11: PT01 vertikal

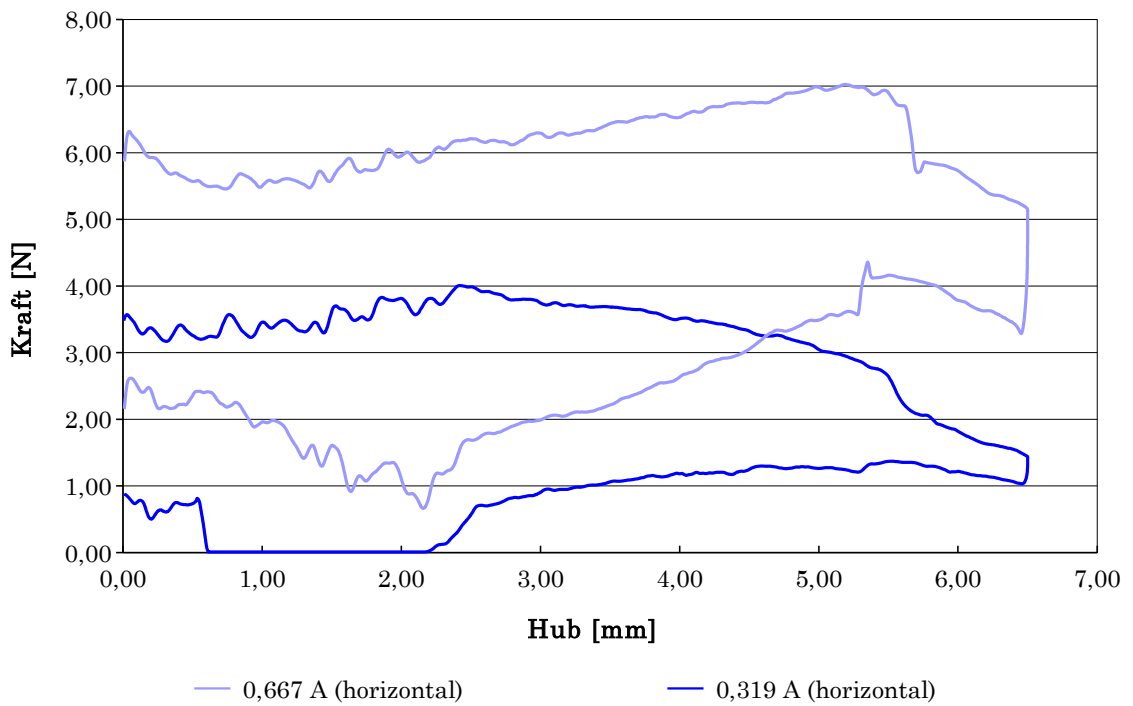


Abbildung A.12: PT02 horizontal liegend

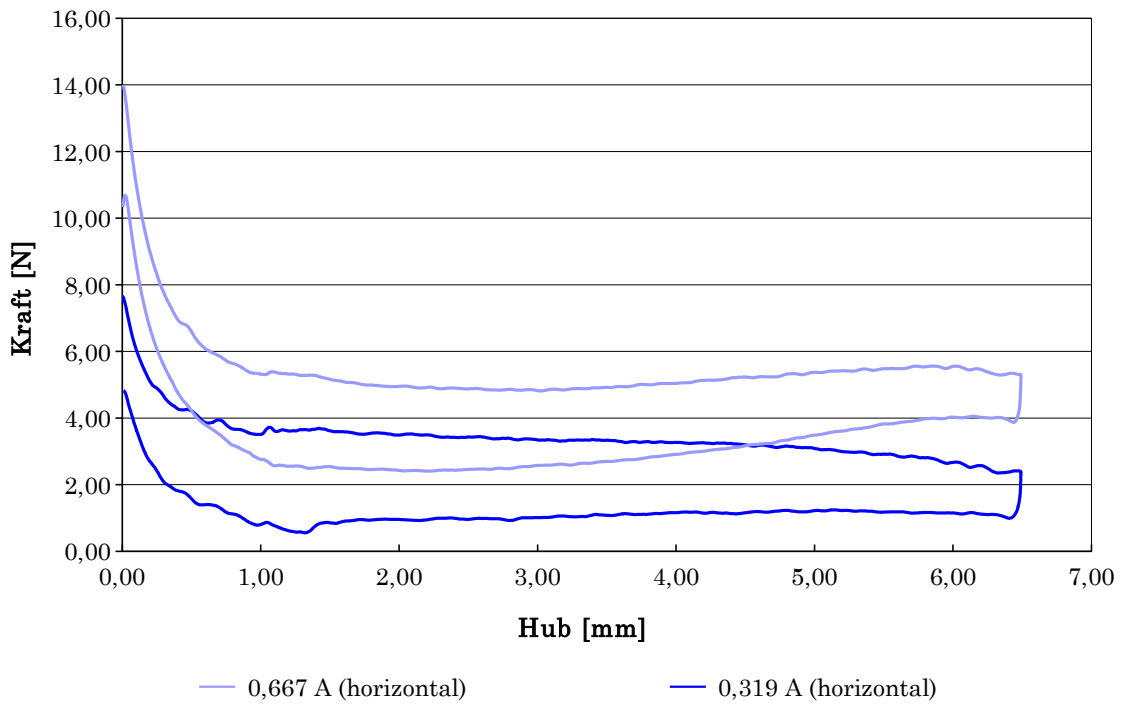


Abbildung A.13: PT02 horizontal quer

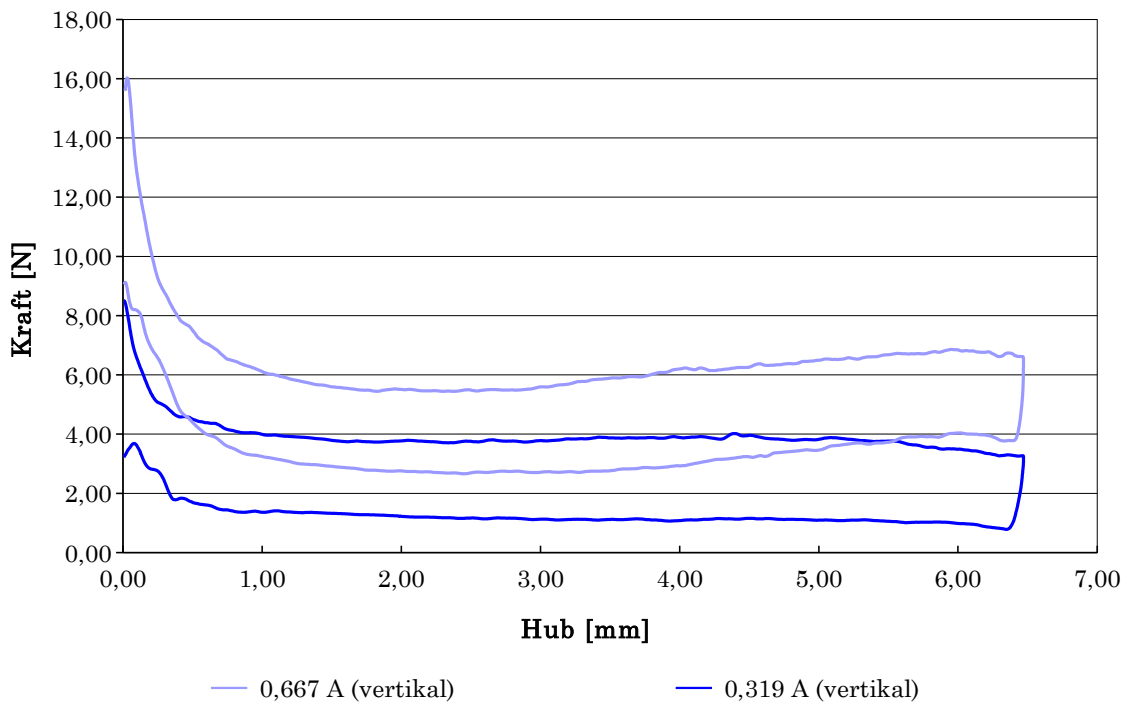


Abbildung A.14: PT02 vertikal

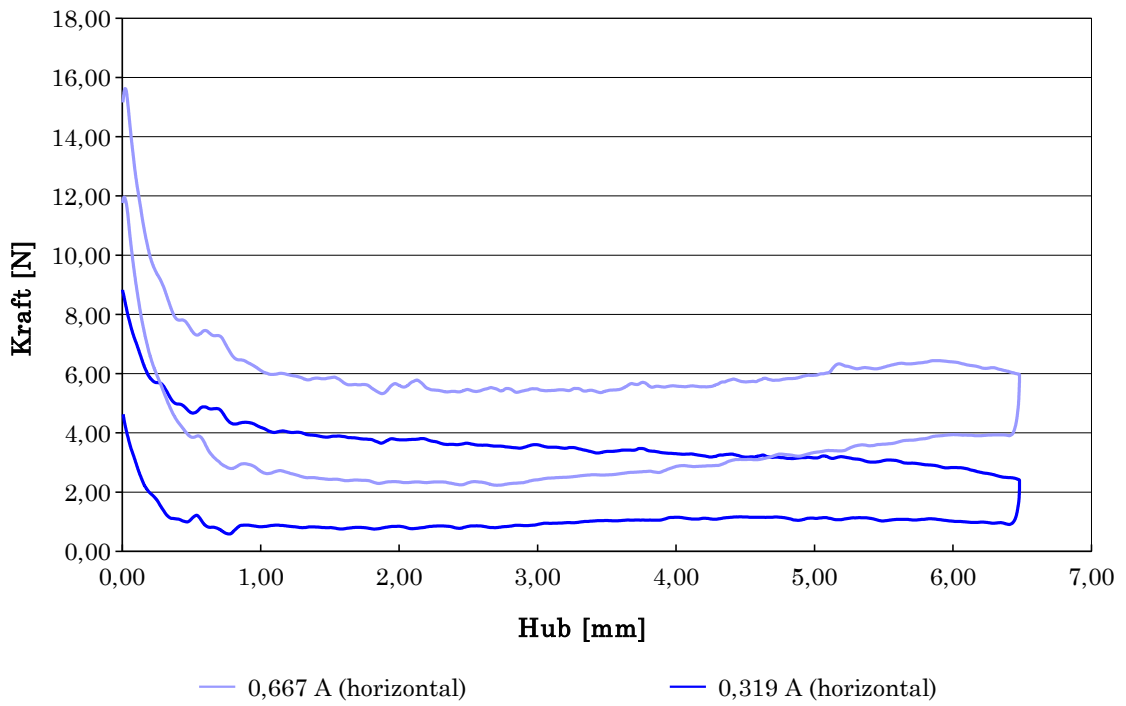


Abbildung A.15: PT03 horizontal liegend

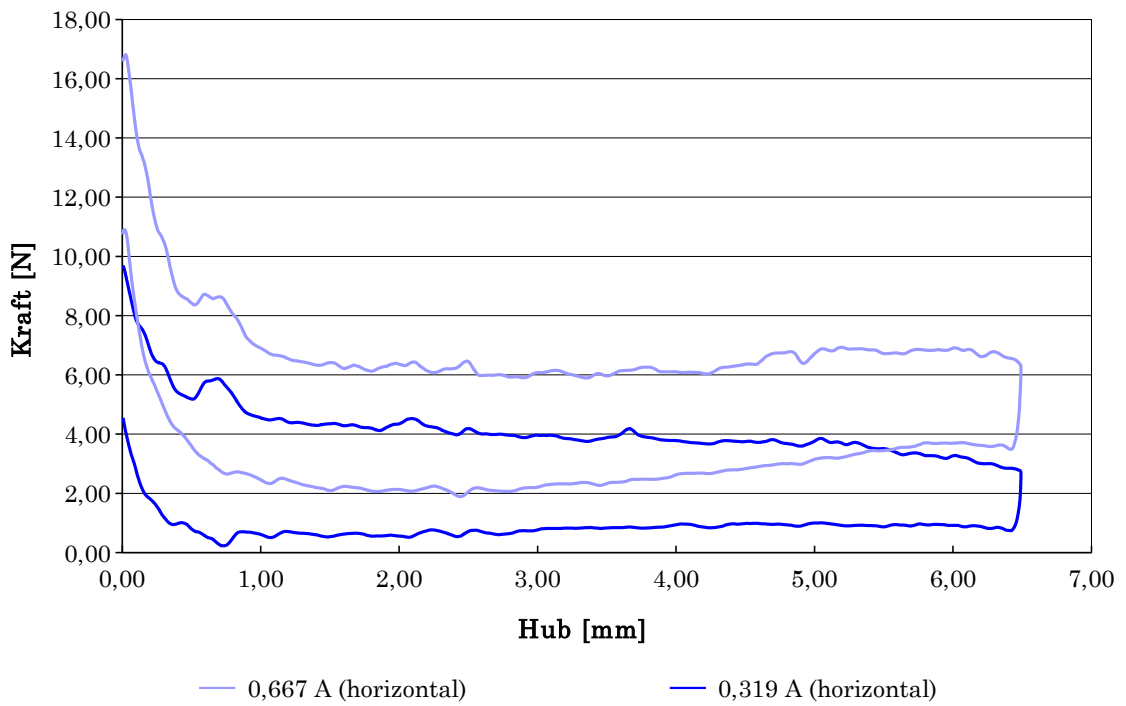


Abbildung A.16: PT03 horizontal quer

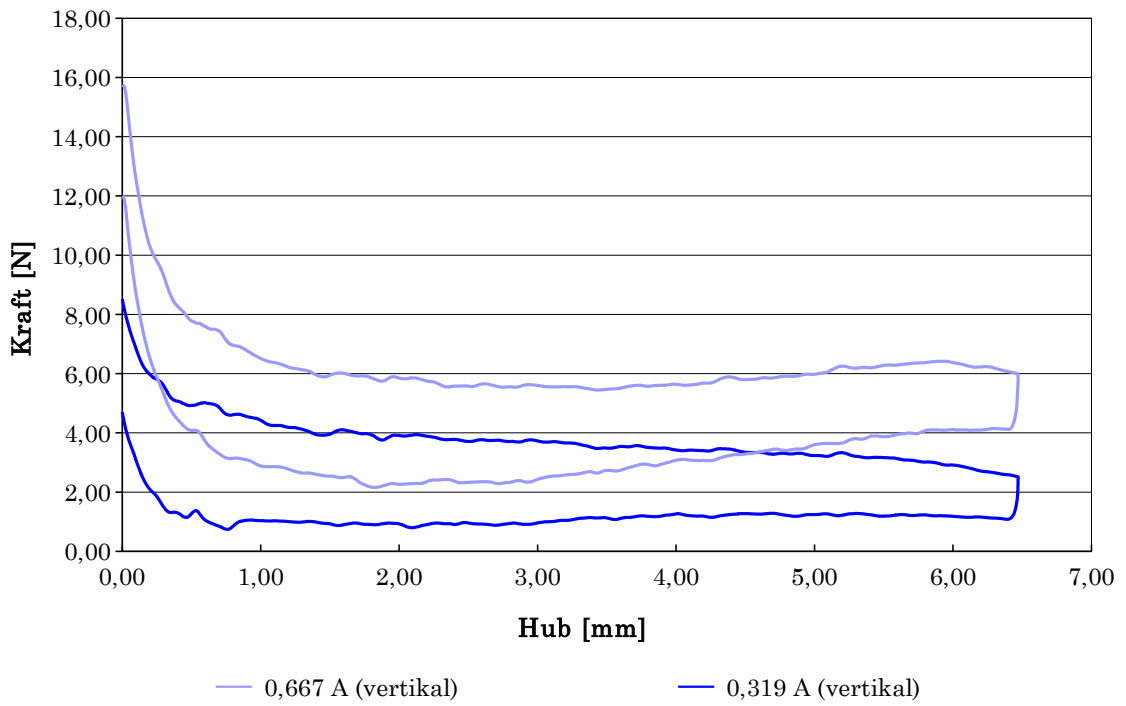


Abbildung A.17: PT03 vertikal

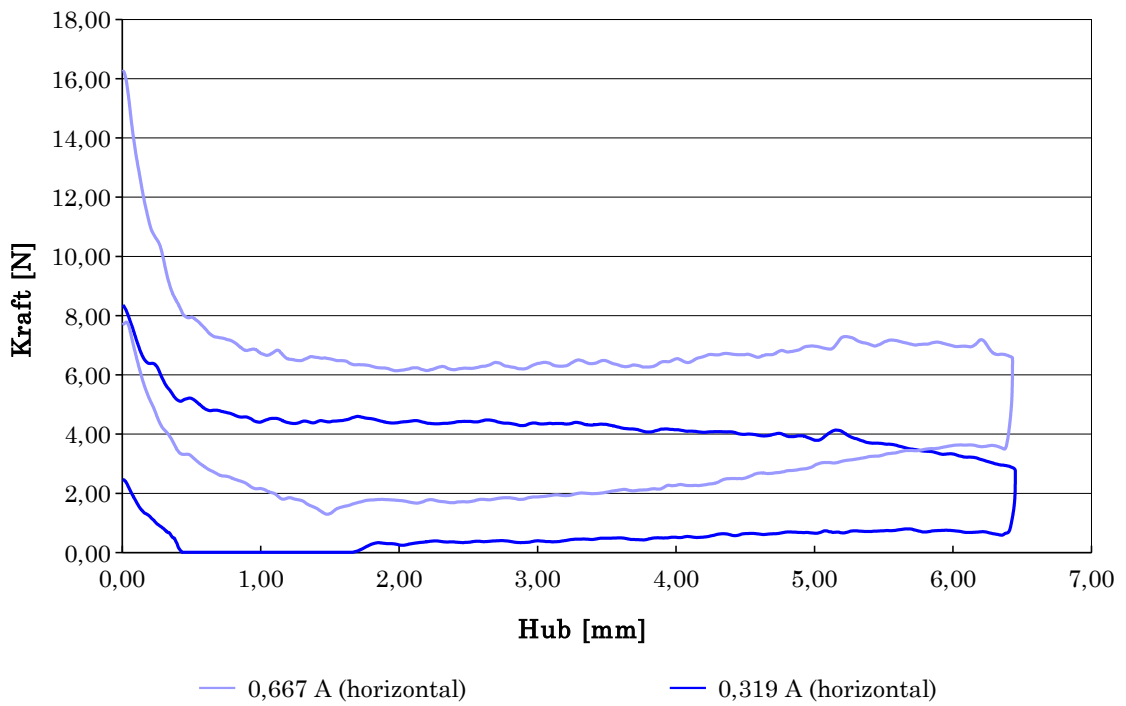


Abbildung A.18: PT04 horizontal liegend

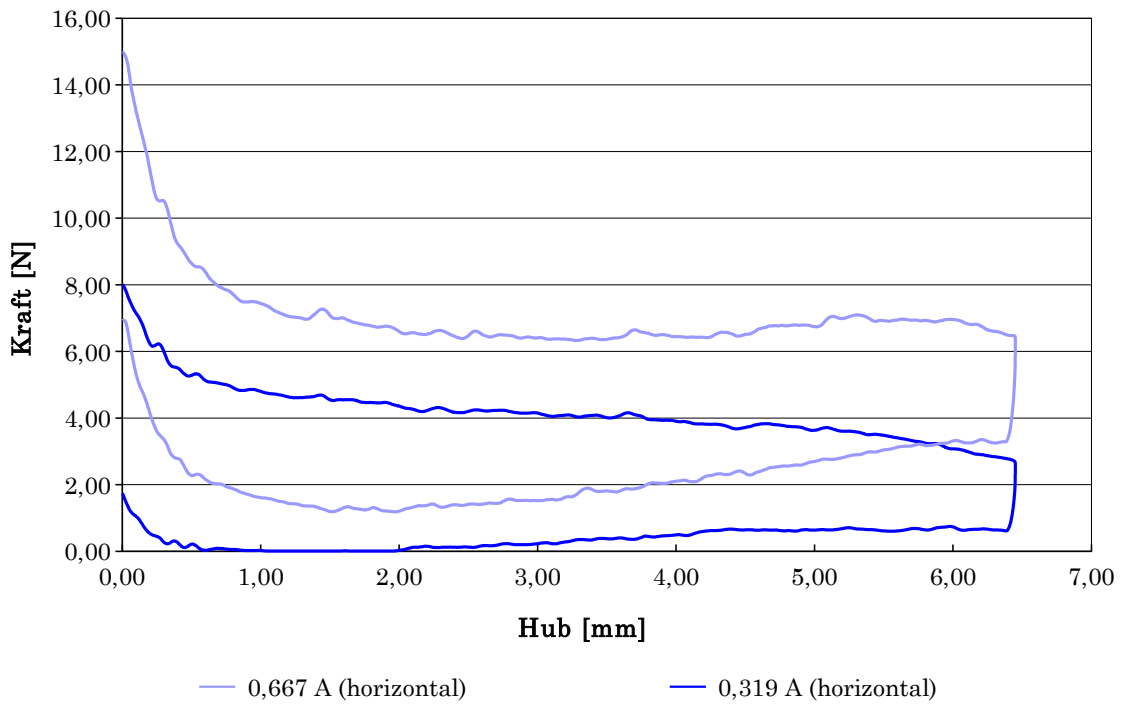


Abbildung A.19: PT04 horizontal quer

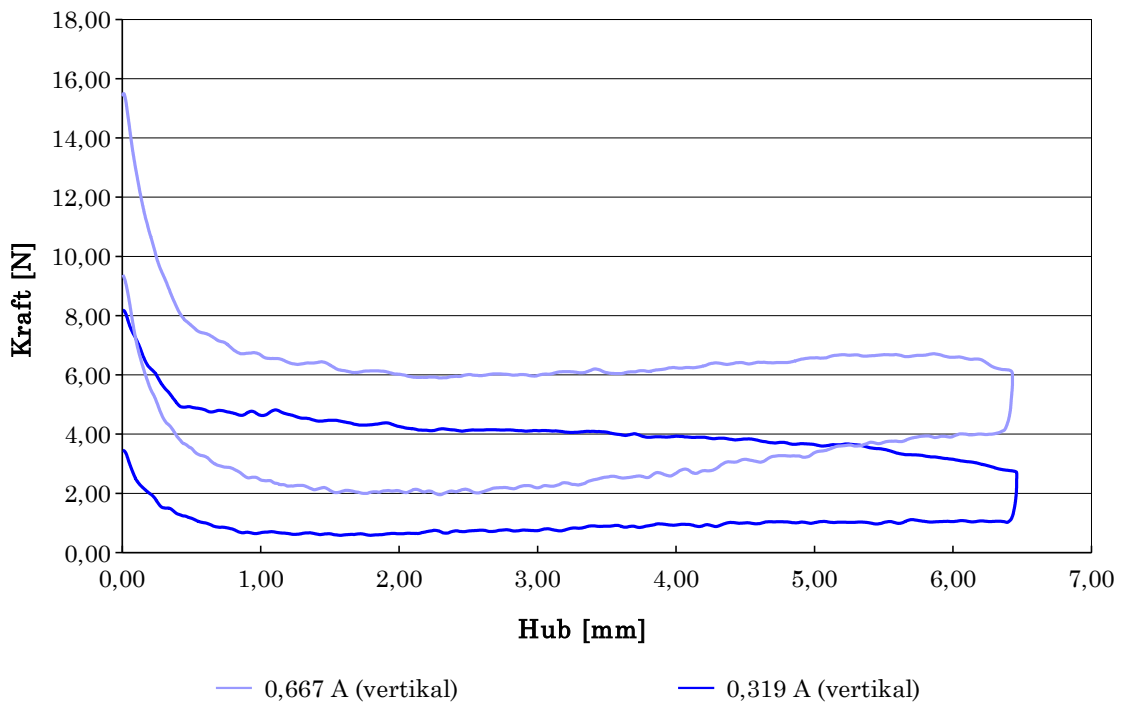


Abbildung A.20: PT04 vertikal

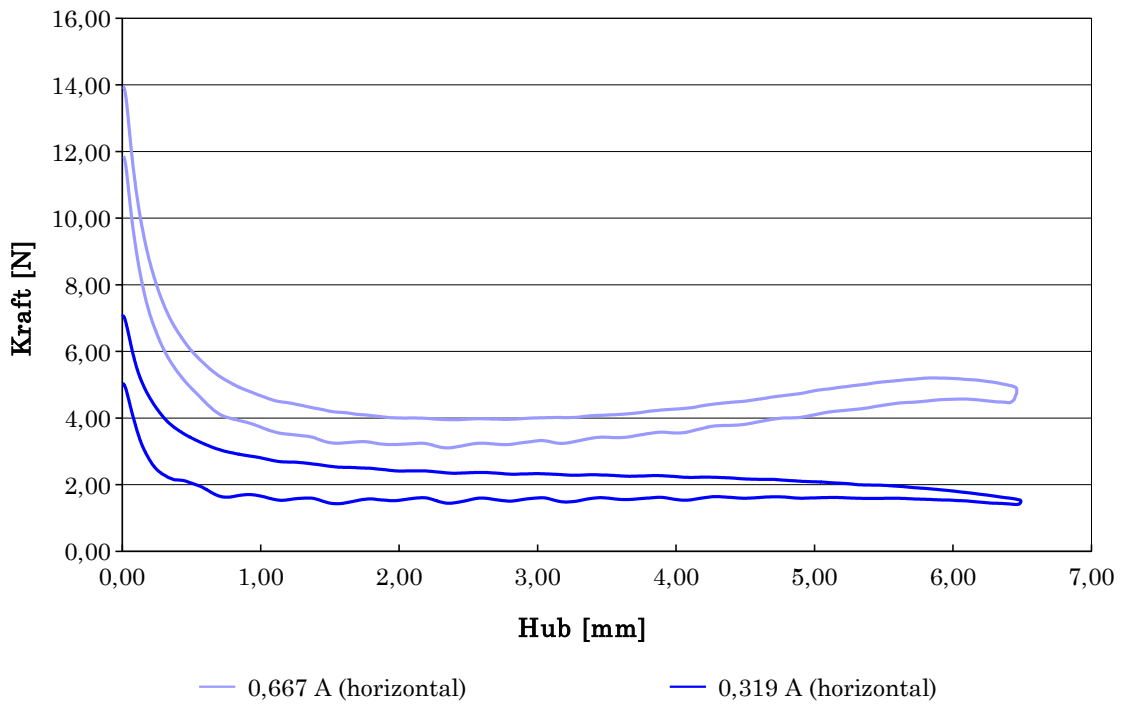


Abbildung A.21: PT05 horizontal liegend

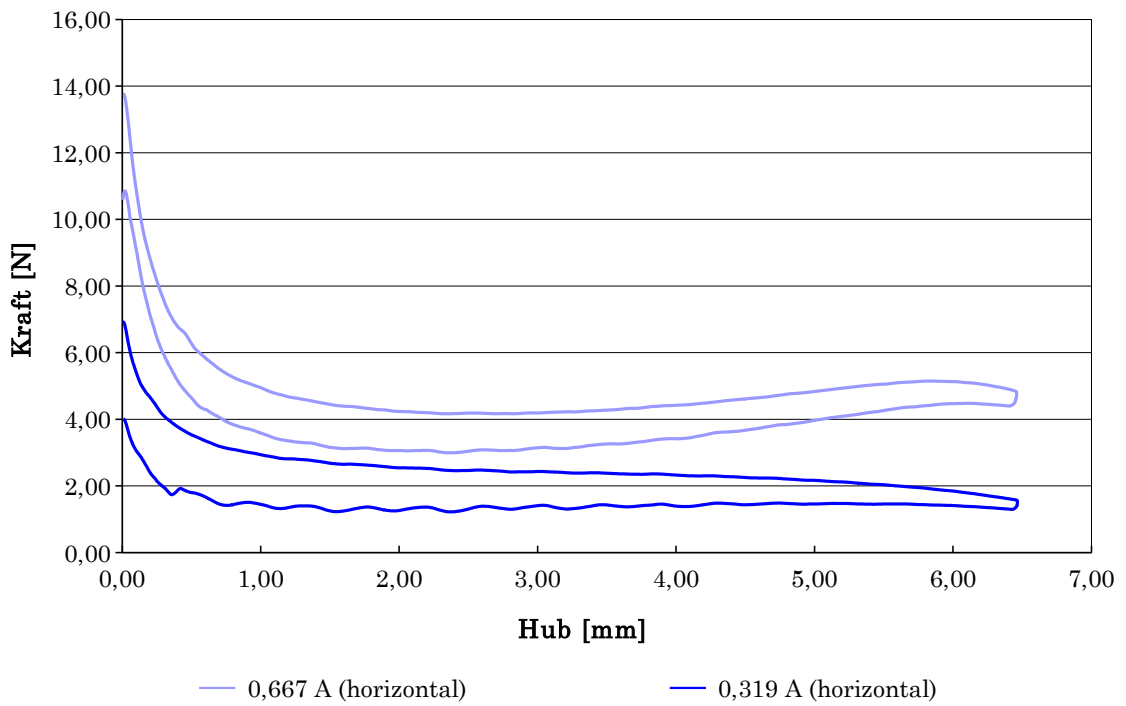


Abbildung A.22: PT05 horizontal quer

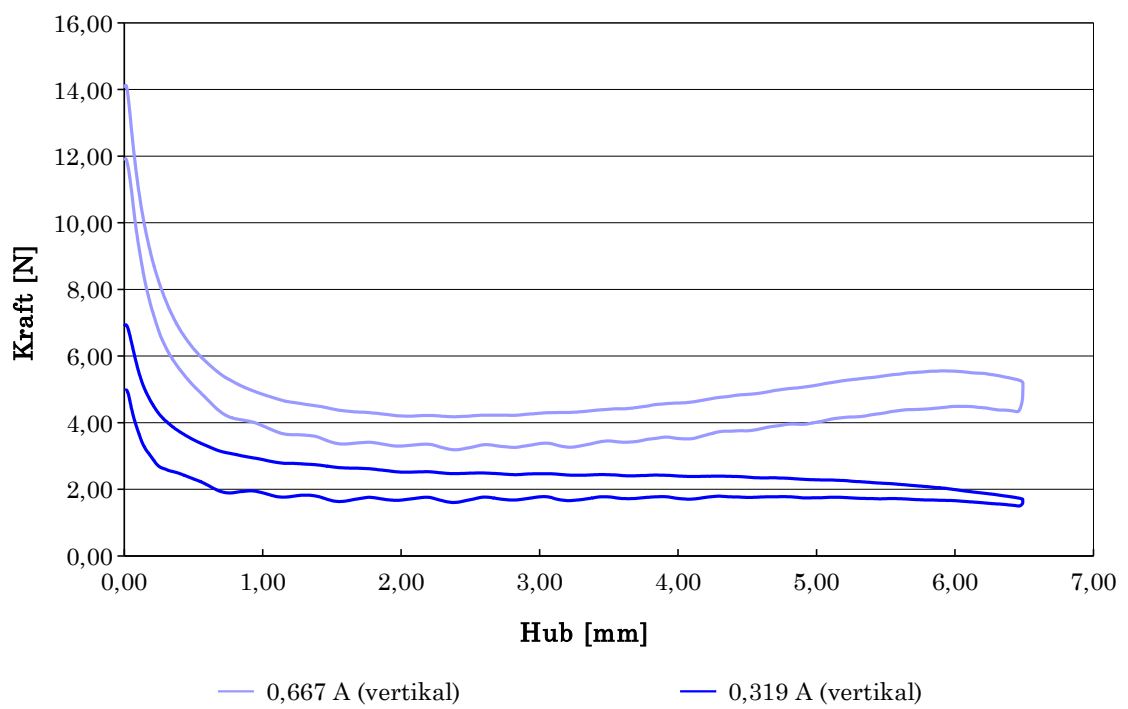


Abbildung A.23: PT05 vertikal