



# Substitution konventioneller Werkstoffe in handgeführten Elektrowerkzeugen

Masterarbeit

verfasst von  
Alexander Stock

Leoben, 2010



Institut für Konstruieren in Kunst- und Verbundwerkstoffen

Vorstand: O.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Rudolf Wörndle

Montanuniversität Leoben



Hilti Entwicklungsgesellschaft m.b.H.

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Leoben, 8.3.2010

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. Stock', written in a cursive style.

(Alexander Stock, BSc.)

## Danksagung

Am Zustandekommen und Gelingen dieser Arbeit waren viele Personen direkt und indirekt beteiligt. Daher möchte ich all jenen Betreuern, Arbeitskollegen, Familienmitgliedern, Freunden, Unterstützern, Informanten, Studienkollegen, Universitätsangehörigen und meiner lieben Freundin Dominika Oktawiec meinen Dank aussprechen.

Mein größter Dank gilt der Hilti Entwicklungsgesellschaft und ihren Mitarbeitern aus dem Bereich „Drilling and Demolition“. Die umfassende Unterstützung und die herausragende Betreuung, vor allem durch Herrn Ferdinand Kristen, haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ebenso geht mein Dank an Herrn O.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Rudolf Wörndle, der die Betreuung seitens der Universität übernommen und dadurch die Durchführung ermöglicht hat. Herrn Dipl.Ing. Peter Zaucher möchte ich für die zusätzliche Beratung danken.

Für die Unterstützung auf meinem Lebensweg, der mich erst zu dieser Masterarbeit geführt hat, danke ich aus ganzem Herzen meiner Familie, allen voran meinen Eltern Evelyne und Herbert Stock.

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Substitution konventioneller Werkstoffe, insbesondere dem Ersatz von Metallen durch Polymere. Eine einheitliche und umfassende Vorgehensweise zur Beurteilung von Substitutionspotentialen wurde entwickelt. Mit Hilfe einer dafür erarbeiteten Methodik wurden Daten erfasst und ausgewertet, um die technische Eignung und Einsetzbarkeit von Polymeren als alternative Bauteilwerkstoffe zu beurteilen.

Am Beispiel des Produktportfolios eines Herstellers von handgeführten Elektrowerkzeugen wurden sämtliche Bauteile mit Substitutionspotential aufgezeigt. Neben dem Nachweis der prinzipiellen Eignung wurden auch wirtschaftliche Aspekte wie Wettbewerbsvorteile durch besseres Leistungsgewicht oder geringere Herstellkosten berücksichtigt.

Zusätzlich zur geräteübergreifenden Substitutionserhebung wurde für ein ausgewähltes Bauteil eine detaillierte Werkstoffsubstitution mit notwendigen Konstruktionsanpassungen, Simulationen und Tests durchgeführt. Als Ergebnis konnte die Funktion eines metallischen Kolbenbolzens in Kolben und Pleuelstange, die aus einem thermoplastischen Kunststoff bestehen, integriert werden. Die technische Eignung, sowie Kosten und Gewichtsvorteile wurden nachgewiesen.

Die Arbeit zeigt die Eigenheiten und Unterschiede von Kunststoffen und Metallen auf. Zusätzlich liefern die grobe und geräteübergreifende sowie die detaillierte Betrachtungsweise eine ganzheitliche Beleuchtung der Metallsubstitution.

## Abstract

The thesis deals with the substitution of conventional materials, particularly with the replacement of metals by polymers. A unified and comprehensive approach for the assessment of substitution potentials was developed. Using a procedural method, data evaluation has been made in order to verify the technical applicability of an alternative component material. Using the example of a hand-held power tools producers product portfolio, this approach was used for identification of all the components with substitution potential. Not only the proof of the fundamental suitability has been delivered, but also the economic aspects, such as competitive advantage through better power to weight ratio or lower manufacturing costs, were taken into account.

Additionally to the whole device substitution study, a precise component was selected. For this component, a replacements evaluation, including a material substitution survey, necessary construction adjustments, simulations and tests, have been carried out. As a result, the function of a metallic piston pin was integrated in the piston and connecting rod, which are made of a thermoplastic material. The technical suitability, the cost and the weight advantages were demonstrated.

The work bears the characteristics and differences between polymeric materials and metals into account. The combination of a rough and a detailed approach provides an integral examination of the substitution of metals.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ZIELSETZUNG .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>GRUNDLAGEN .....</b>	<b>3</b>
3.1	SUBSTITUTION.....	3
3.2	STEINBEARBEITUNG .....	3
3.3	MEIßELWERKZEUGE.....	5
3.3.1	<i>Einteilung</i> .....	5
3.3.2	<i>Getriebe</i> .....	6
3.3.3	<i>Elektropneumatisches Schlagwerk</i> .....	7
3.3.3.1	Funktionsprinzip .....	7
3.3.3.2	Betriebszustände .....	9
3.3.3.3	Bauformen .....	9
3.3.4	<i>Werkzeugaufnahme</i> .....	11
3.4	ANSPRÜCHE AN VERWENDETE WERKSTOFFE .....	11
3.4.1	<i>Verwendetes Schmiermittel</i> .....	12
3.4.2	<i>Staubeintrag und andere verschleißrelevante Verunreinigungen</i> .....	12
3.4.3	<i>Wärmebeständigkeit</i> .....	13
3.5	POLYMERE WERKSTOFFE IN HILTI TE-GERÄTEN.....	13
3.6	VERWENDETE HILFSMITTEL.....	15
3.6.1	<i>Programme</i> .....	15
3.6.1.1	CID .....	16
3.6.1.2	Unigraphics NX5.....	16
3.6.1.3	NX Nastran .....	16
3.6.2	<i>Versuche</i> .....	16
<b>4</b>	<b>POTENTIALERHEBUNG.....</b>	<b>18</b>
4.1	SYSTEMATISCHE VORGEHENSWEISE .....	18
4.2	POTENTIALERHEBUNG ANHAND EINES BEISPIELGERÄTES.....	21
4.2.1	<i>Farbliche Einteilung der Bauteile</i> .....	22
4.2.2	<i>Einteilung der gelben Bauteile</i> .....	24
4.2.3	<i>Betrachtung der gelben Bauteile</i> .....	27
4.2.4	<i>Betrachtung roter Bauteile</i> .....	34
4.2.5	<i>Schlussfolgerungen</i> .....	40
4.2.6	<i>Ergänzung</i> .....	43
4.3	POTENTIALERHEBUNG DER GESAMTEN TE FLOTTE .....	44
4.3.1	<i>Vorgangsweise</i> .....	44
4.3.1.1	Farbige Einteilung.....	45
4.3.1.2	Verlinkungen.....	47
4.3.2	<i>Potentialtabelle</i> .....	51
4.3.3	<i>Systematik der Bewertung</i> .....	55
4.3.4	<i>Geräteübergreifende Potentiale</i> .....	56

<b>5</b>	<b>POTENTIALUMSETZUNG.....</b>	<b>58</b>
5.1	BAUTEILAUSWAHL .....	58
5.2	FUNKTION DES KURBELTRIEBS .....	59
5.2.1	<i>Funktion des Kolbens</i> .....	60
5.2.2	<i>Funktion des Pleuels</i> .....	61
5.2.3	<i>Funktion des Bolzens</i> .....	61
5.3	STAND DER TECHNIK .....	62
5.4	BELASTUNGEN .....	62
5.4.1	<i>Mechanisch</i> .....	62
5.4.2	<i>Tribologisch</i> .....	67
5.4.3	<i>Thermisch</i> .....	69
5.4.4	<i>Umgebungsmedien</i> .....	69
5.5	WERKSTOFFAUSWAHL .....	70
5.5.1	<i>Ultramid A3WC4</i> .....	70
5.5.2	<i>Werkstoffmodifikationen</i> .....	71
5.5.2.1	<i>Strahlenvernetzen</i> .....	71
5.5.2.2	<i>Zusatzstoffe</i> .....	71
5.5.3	<i>Werkstoffvorschlag</i> .....	72
5.6	KONSTRUKTIONSKONZEPTE .....	72
5.6.1	<i>Montagespritzguss</i> .....	72
5.6.2	<i>Einteilig</i> .....	73
5.6.3	<i>Einteilig mit biegeweichem Bereich</i> .....	74
5.6.4	<i>Schnapphaken</i> .....	74
5.6.5	<i>Einfädeln</i> .....	75
5.6.6	<i>Auswahl des Konstruktionsprinzips</i> .....	75
5.7	PROTOTYPEN.....	76
5.8	SIMULATION .....	77
5.8.1	<i>Material</i> .....	78
5.8.2	<i>Vernetzung</i> .....	79
5.8.3	<i>Symmetrien und Zwangsbedingungen</i> .....	80
5.8.4	<i>Belastung</i> .....	83
5.8.5	<i>Vergleich der beiden Pleuel</i> .....	84
5.9	VERSUCHE UND TESTS .....	88
5.9.1	<i>Vergleichsmessung</i> .....	88
5.9.2	<i>Versuchsergebnisse</i> .....	89
5.9.3	<i>Verschleißerscheinungen</i> .....	91
5.10	VERARBEITUNGSVERFAHREN .....	92
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>96</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>98</b>
<b>8</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>101</b>
<b>9</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>103</b>

## 1 Einleitung

Hersteller von handgeführten Elektrowerkzeugen können langfristig nur dann im Wettbewerb mit anderen Anbietern bestehen, wenn sukzessive das Leistungsgewicht gesteigert wird. Gleichzeitig diktiert der Markt eine ständige Kostenverringering. Um beide Ziele erreichen zu können, müssen neue Wege beschritten werden. Ein sehr effektiver Weg ist die Metallsubstitution durch polymere Werkstoffe.

Unter Beachtung der Eigenschaften der Werkstoffe sind beim Ersetzen eines Metallbauteils durch ein entsprechend angepasstes Kunststoffbauteil enorme Kosteneinsparungen, bei gleichzeitiger Zunahme des Leistungsgewichtes, zu erzielen.

Die größten Potentiale sind im Herzen von Elektrowerkzeugen, den mechanisch hoch belasteten, historisch bedingt, ausschließlich von Metallen bedienten Maschinenelementen zu finden. Ständige Weiterentwicklungen der polymeren Grundwerkstoffe und das große Spektrum an Möglichkeiten, die Werkstoffeigenschaften zu beeinflussen, ermöglichen den Kunststoffen auch die letzten Metallhochburgen, wenn auch nicht ganz einzunehmen, dann zumindest diese zum Teil für sich zu gewinnen.

Die große Herausforderung besteht darin, mechanische Anforderungen, physikalische Eigenschaften und wirtschaftliche Aspekte gleichermaßen zu betrachten und gegeneinander abzuwägen.

Hilti ist ein Anbieter von handgeführten Elektrowerkzeugen, der mit Kunststoffanwendungen bereits in die hoch belasteten Bereiche eindringt. Erste Erfolge im Bereich des Getriebes geben Anlass, die Substitutionsbestrebungen zu forcieren.

Um die Möglichkeiten der Kunststoffe für Anwendungen in Elektrowerkzeugen flächendeckend ergründen zu können, ist eine werkstoffspezifische Betrachtung notwendig, die den Kostenfaktor zwar berücksichtigt, diesen aber nicht als einziges Beurteilungskriterium heranzieht. Umfassendes Verständnis für die Funktion der Bauteile und Baugruppen, die Belastungen und die Werkstoffeigenschaften von Metallen und Kunststoffen, besonders aber für deren Unterschiede, sind für die Beurteilung von Substitutionspotentialen Voraussetzung.

Die Vielfalt der Bauteile verlangt nach neuen Methoden, die eine Untersuchung möglichst einfach, nachvollziehbar und vergleichbar machen, dabei aber nicht zu oberflächlich und verallgemeinernd sind.

Um nun bekannte Substitutionspotentiale umzusetzen, bedarf es lediglich eines Entwicklungsprozesses, wie er auch für jedes andere Bauteil benötigt wird. Zum ohnehin vorausgesetzten Funktions- und Lebensdauernachweis, gesellen sich zum Ergebnis der Entwicklung die angestrebte Steigerung des Leistungsgewichtes und die Verringerung der Herstellkosten.



## 2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist das Auffinden von Metallbauteilen in handgeführten Elektrowerkzeugen, die aufgrund ihrer Beanspruchungen und Umgebungsbedingungen durch Kunststoffbauteile ersetzt werden können.

Die Vielzahl an Bauteilen und deren unterschiedliche Belastungen verlangen nach einer systematischen Vorgehensweise. Eine möglichst umfangreiche, dabei aber einfache Methodik, die alle Substitutionsbestrebungen vereint und die dabei gesammelten Informationen zugänglich und nachvollziehbar macht, soll entwickelt werden.

Repräsentativ für handgeführte Elektrowerkzeuge, sollen TE-Geräte („TE“ ist die Bezeichnung für Geräte aus dem Bereich „Drilling and Demolition“ von Hilti) aus dem Hilti Portfolio untersucht werden. Die Vorgangsweise soll an die Ansprüche dieser Geräte angepasst werden.

Wirtschaftliche wie technische Aspekte sollen gleichermaßen in die Überlegungen miteinbezogen werden. Den Besonderheiten polymerer Werkstoffe soll Rechnung getragen werden, die Vorgangsweise daher speziell auf die Unterschiede zwischen Metall und Kunststoff aufmerksam machen.

Sind Substitutionspotentiale erkannt, soll eine Darstellung erarbeitet werden, die zugleich übersichtlich und einheitlich ist, und dabei zusätzliche Informationen durch den Vergleich ähnlicher Bauteile in unterschiedlichen Geräten liefert.

Diese Arbeitsinhalte sind unter dem Begriff Potentialerhebung zusammenzufassen. Die Vorgehensweise der Potentialerhebung soll dazu genutzt werden, Substitutionspotentiale in handgeführten Elektrowerkzeugen, am Beispiel der TE-Geräte von Hilti aufzuzeigen.

Am Beispiel eines ausgesuchten Bauteils soll der eigentliche Substitutionsvorgang samt Werkstoffauswahl, Konstruktionsanpassung und Geometrieoptimierung, unter Ausnutzung der Eigenschaften polymerer Werkstoffe, durchgeführt und dokumentiert werden. Diese beispielhafte Substitutionsumsetzung soll die vorliegende Arbeit abrunden.

## 3 Grundlagen

Die Grundlagen in diesem Kapitel sollen einen Überblick über die in dieser Arbeit betrachteten Geräte schaffen. Weiters werden die Systembereiche Antrieb, Getriebe und Schlagwerk beschrieben. Das grundlegende Verständnis für die Arbeitsweise von Geräten zur Steinbearbeitung soll dadurch vermittelt werden. Ein kurzer Überblick über spezielle Anforderungen an Werkstoffe für Anwendungen in Hammerwerkzeugen rundet dieses Kapitel ab.

### 3.1 Substitution

Unter Substitution sei in dieser Arbeit die Metallsubstitution durch polymere Werkstoffe, unter Berücksichtigung nötiger Konstruktionsanpassungen und Beeinflussung der Systemeigenschaften, zu verstehen. Das Ziel der Substitution leitet sich hauptsächlich aus wirtschaftlichen Gründen ab. Leistungsgewichte sollen verbessert, und gleichzeitig die Kosten verringert werden.

### 3.2 Steinbearbeitung

Ziel der Steinbearbeitung ist die Erstellung eines Lochs, in dem eine Befestigung angebracht werden kann. Diese Befestigung muss während der angestrebten Lebensdauer, definierten Mindestbelastungen widerstehen. Das Lochträgermaterial ist meist Beton.

Die Steinbearbeitung durch Hammerbohren unterscheidet sich zum gewöhnlichen Bohren durch die periodisch einwirkenden Hammerschläge. Diese Hammerschläge zertrümmern das zu bearbeitende Material, welches i.d.R. bei schlagartigen Beanspruchungen sprödes Bruchverhalten zeigt. Die Sprödigkeit erlaubt kein spanendes Bohren, wie es für Stahl oder Holz angewendet wird. Mit jedem Hammerschlag wird der Untergrund zertrümmert. Das Bohrklein wird durch die Rotation des Einsatzwerkzeuges entlang einer spiralförmig angeordneten Nut, genannt Wendel, abgeführt. Der Vorteil des Hammerbohrens liegt in der kurzen und großen Krafteinwirkung auf den Untergrund [1]. Hilti verwendet in seinen Geräten zur Schlagerzeugung ein elektropneumatisches (EP-)Schlagwerk (siehe Kapitel 3.3.3). Die Funktion des EP-Schlagwerks wird neben dem Setzen von Bohrungen auch für den undefinierten Materialabbau genutzt. Dazu wird das Schlagwerk ohne Rotation des Einsatzwerkzeuges eingesetzt.

Abbildung 1 zeigt eine vereinfachte Modellvorstellung für das Hammerbohren. Der rotierende Meißelbohrer wird schlagartig durch einen Hammer belastet.

Die mechanische Umsetzung des Hammerbohrens in Bauhämmern von Hilti ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Aufgabe des modellartigen Hammers, die Ausführung des Schlages, wird im elektropneumatischen Schlagwerk durch eine bewegliche Masse, dem so genannten Flugkolben übernommen. Dieser überträgt seinen Impuls über den Döpfer an das Werkzeug, was zu einem Abbau im Lochträgermaterial führt.

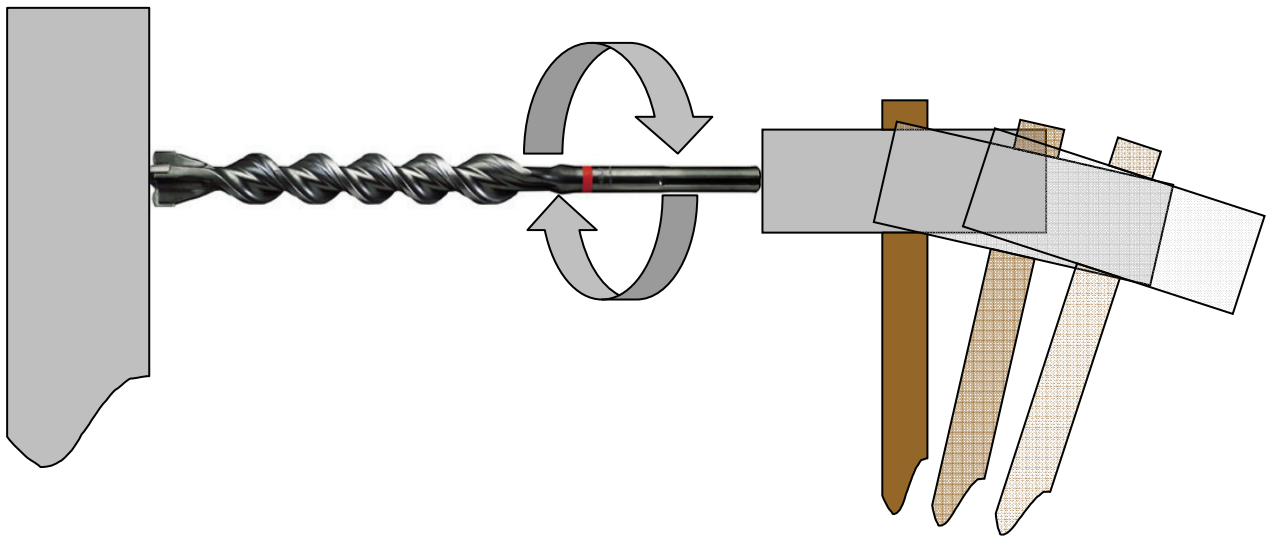


Abbildung 1: Modellartige Darstellung des Hammerbohrens

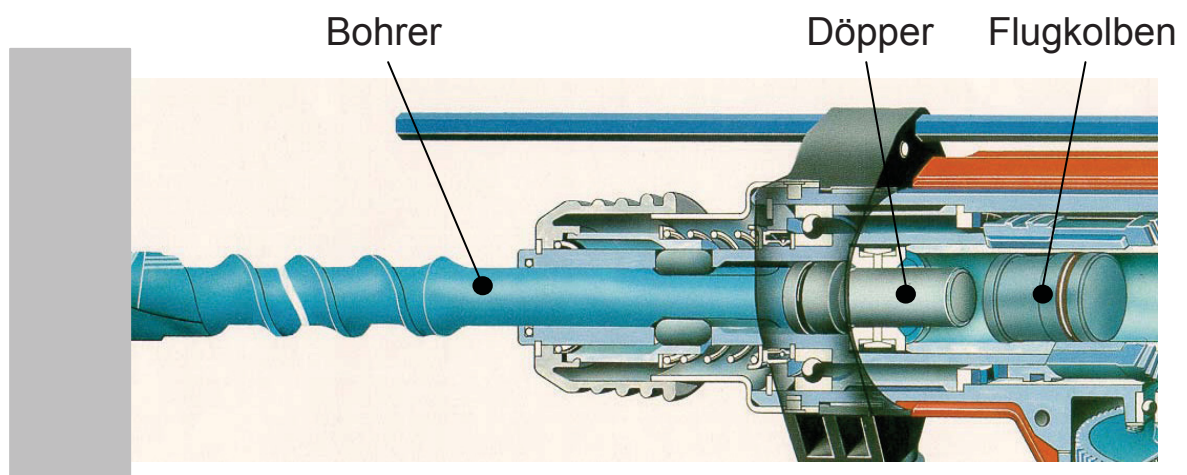


Abbildung 2: Elektropneumatisches Schlagwerk [2]

### 3.3 Meißelwerkzeuge

Meißelwerkzeuge werden in der Familie der handgeführten Elektrowerkzeuge den steinbearbeitenden Geräten zugeordnet. Im Unterschied zu den mit Pressluft betriebenen Pressluftschlämmern, erfolgt die Schlägerzeugung in Meißelwerkzeugen durch Umwandlung von elektrischer Energie. [2]

Bauhämmer werden je nach Gewicht, Funktion und Art des Abbauschwerpunktes in verschiedene Klassen eingeteilt. In Kapitel 3.3.1 wird eine mögliche Einteilung der Geräte am Beispiel von Hilti-Geräten geschildert.

#### 3.3.1 Einteilung

Hilti teilt seine Bauhämmer in folgende drei Kategorien ein:

Bohrhammer: Der Bohrhammer ist zum Bohren von Mauerwerk, Beton, Kunst- und Naturstein bestimmt. Er verfügt über ein rotierendes Maschinenwerkzeug mit eingebautem Hammerwerk. Für Bohrarbeiten in Kunststoff oder Holz kann das Schlagwerk abgeschaltet werden. Der Bohrhammer entspricht in dieser Betriebsart einer Bohrmaschine. Für kleinere Meißelarbeiten kann das Bohrwerk abgeschaltet werden, was der Betriebsart eines Schlaghammers entspricht. Bohrhämmer werden in Gewichtsklassen eingeteilt.

Kombihammer: Der Kombihammer verfügt über Bohr- und Schlagwerk. Im Gegensatz zum Bohrhammer liefert der Kombihammer eine wesentlich höhere Schlagarbeit. Dadurch ist diese Kategorie von Bauhämmern bereits für Abbrucharbeiten einsetzbar. Die Abschaltung des Schlagwerks ist möglich, der Einsatz als Bohrer aber nicht das Hauptanwendungsgebiet.

Meißelhammer: Der Meißelhammer verfügt im Gegensatz zu Bohr- und Kombihämmern nur über ein Schlagwerk.

Abbildung 3 zeigt die Einteilung einer Auswahl an Hammerwerkzeugen nach Einzelschlagenergie und Schlagfrequenz. Die unterschiedlichen Kenndaten, wirken sich auf das Einsatzgebiet aus. Ermöglicht wird das durch unterschiedliche mechanische Lösungen. Auf den nächsten Seiten wird eine Grundlage für das Verständnis der Komponenten von Bohr-, Kombi- und Meißelhämmern geschaffen.

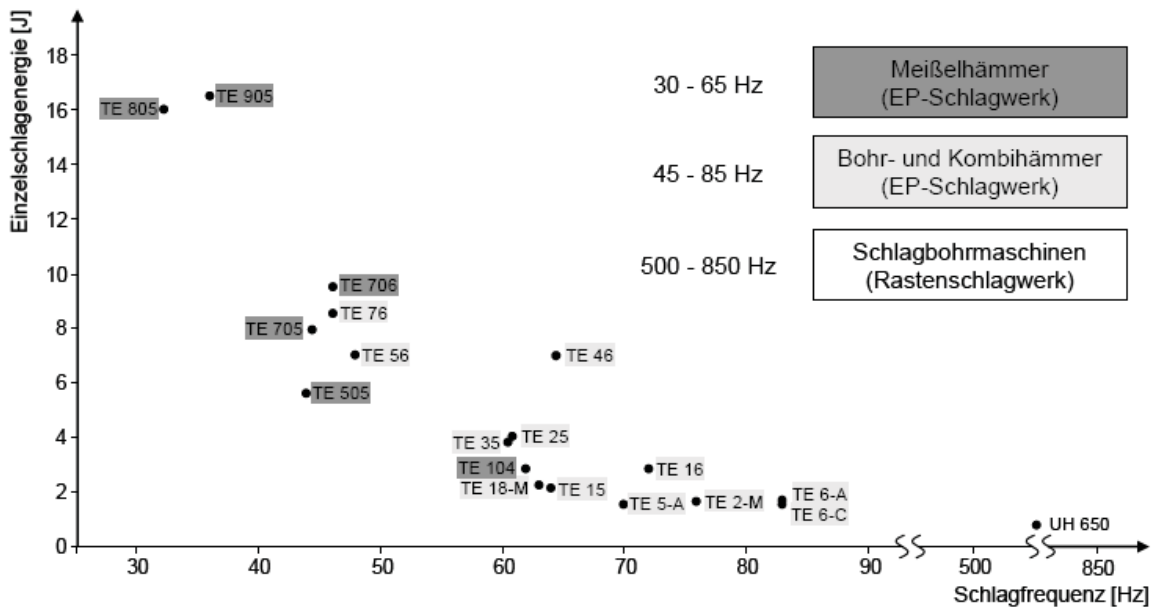


Abbildung 3: Einteilung der Hammerwerkzeuge nach Einzelschlagenergie und Schlagfrequenz [3]

### 3.3.2 Getriebe

Das Getriebe muss zusätzlich zur Untersetzung der hohen Motordrehzahlen die Energie in zwei Antriebsstränge aufteilen. Ein Teil bewerkstelligt die Rotation des Einsatzwerkzeuges, während der andere das Schlagwerk antreibt. Abbildung 4 stellt vereinfacht die Funktion des Getriebes dar. Je nach Bauform des Elektrowerkzeuges ist es unterschiedlich ausgeführt und übernimmt zusätzliche, meist sicherheitsrelevante Funktionen.

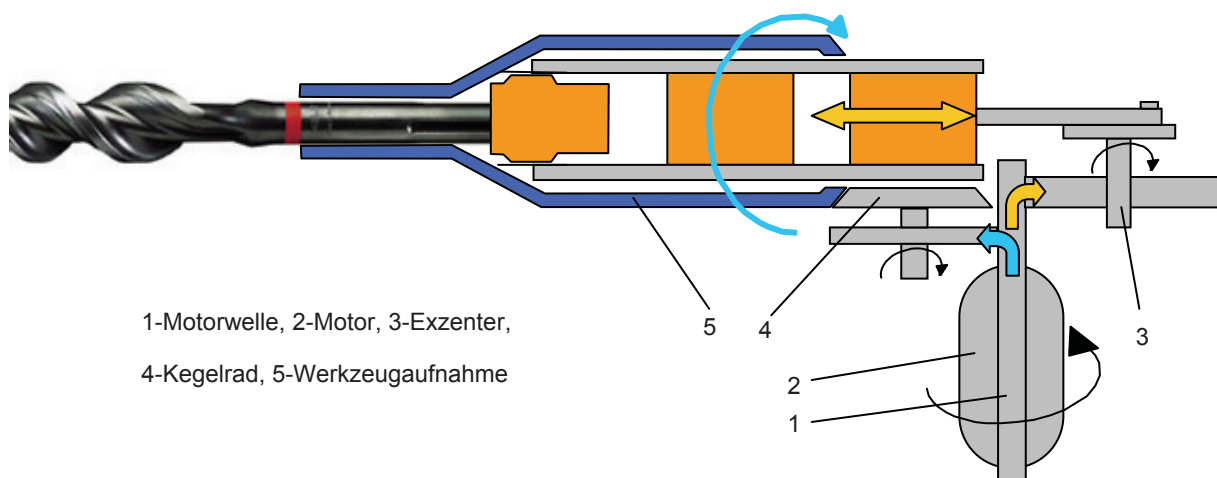


Abbildung 4: Funktionsweise des Getriebes

Der Motor (2) treibt die Motorwelle (1) mit Drehzahlen der Größenordnung  $10^4$  U/min an. Die Motorwelle besitzt am oberen Ende ein Ritzel, um die Rotation mit Untersetzung an Zahnräder weiterzugeben. Dabei sind folgende Bereiche zu unterscheiden: Der blaue Abtrieb treibt über ein Kegelrad (oder Kegelritzel) (4) und meist über weitere Zwischenelemente die Werkzeugaufnahme an. Das Einsatzwerkzeug wird dadurch in Rotation versetzt. Der gelbe Abtrieb treibt über den Exzenter (3) das Schlagwerk an, welches die axialen Hammerschläge ausführt.

Der blaue Abtrieb ist mit einer Rutschkupplung gegen zu hohe Drehmomente gesichert. Manche Rotorwellen in Hilti-Geräten bestehen aus zwei Teilen, deren Verbindung über eine Magnetkupplung hergestellt wird. Diese kann elektronisch die Drehmomentübertragung unterbrechen. Ausgelöst wird die Magnetkupplung durch einen Beschleunigungssensor, der Anwendungsfehler registriert. Diese Sicherheitseinrichtung ist an der Gerätebezeichnung durch den Beinamen ATC („Active Torque Control“) gekennzeichnet.

### **3.3.3 Elektropneumatisches Schlagwerk**

Historisch gesehen, gibt es eine Vielzahl an Schlagwerkstechnologien. Die in dieser Arbeit behandelten Geräte sind ausschließlich mit elektropneumatischen Schlagwerken ausgestattet. In diesem Kapitel werden die Funktionsweise und Komponenten dieser Technologie erläutert.

#### **3.3.3.1 Funktionsprinzip**

In einem Rohr befinden sich ein oszillierender Kolben (Erregerkolben) und eine axial frei fliegende Masse (Flugkolben). Zwischen diesen beiden Kolben befindet sich ein Luftpolster, das bei Kompression als Luftfeder agiert. Die bei der Kompression aufgebaute Druckenergie wird in kinetische Energie des Flugkolbens umgewandelt, die über einen Impuls an den Döpper und von diesem weiter an das Einsatzwerkzeug übergeben wird. Die Energie die dazu benötigt wird, entsteht im Gerät und muss nicht, wie bei anderen Schlagwerken, vom Anwender, durch starkes Anpressen des Geräts an das zu bearbeitende Objekt, aufgebracht werden.

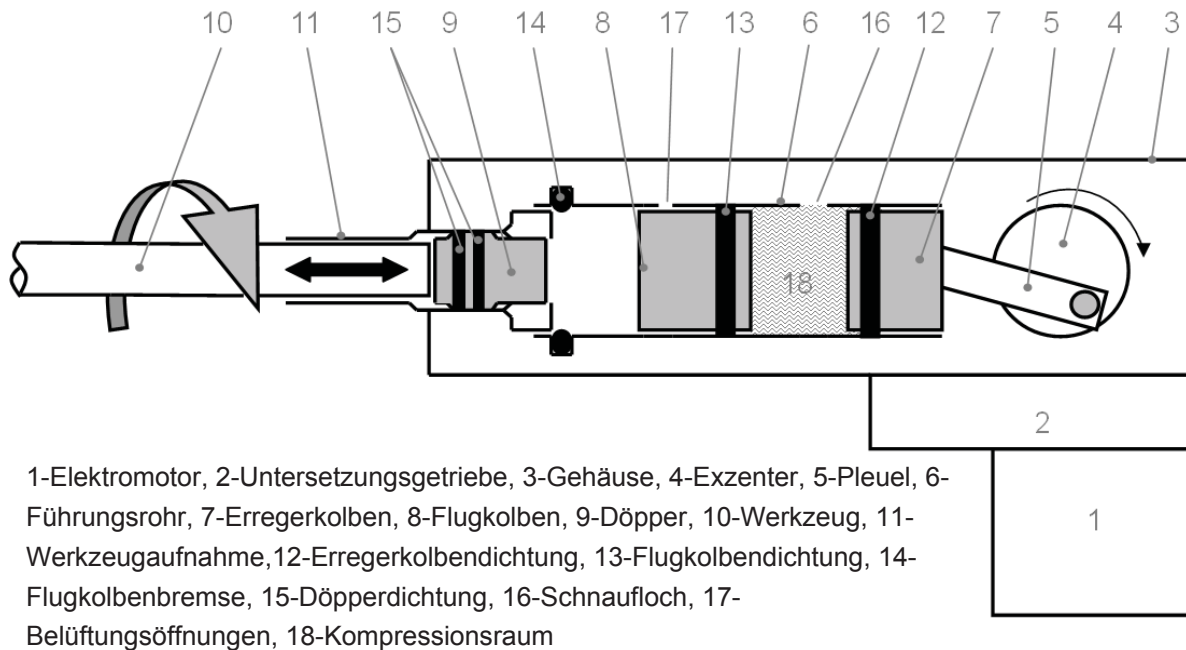


Abbildung 5: *Elektropneumatisches Schlagwerk (EP-Schlagwerk)*

In Abbildung 5 sind die wichtigsten Komponenten des elektropneumatischen Schlagwerks dargestellt. In den meisten Geräten wird die Rotationsbewegung des Motors (1) über einen Exzenter (4) und eine Pleuelstange (5) in eine Translation umgewandelt. Alternativ kann die Umwandlung der Rotation über einen Taumelantrieb erfolgen. Das Getriebe (2) dient der Drehzahluntersetzung und der Energieaufteilung zwischen Schlagerzeugung im Führungsrohr (6) und Drehbewegung. Erregerkolben (7) und Flugkolben (8) bilden im eingeschlossenen Raum im Führungszyylinder, mithilfe der Dichtungen (12+13), ein abgedichtetes Luftpolster aus. Die Ausgleichsbohrung (16) gewährleistet eine konstante Menge Luft im Kompressionsraum. Die Belüftungsbohrungen (17) stellen im Leerlauf den Druckausgleich sicher. Der Exzenter kann sich dadurch weiter drehen, ohne dabei den Flugkolben anzusaugen. Befindet sich das Schlagwerk im Arbeitspunkt, wird der Flugkolben durch die Rückwärtsbewegung des Erregerkolbens angesaugt. Nach Durchlaufen des hinteren Scheitelpunktes des Erregerkolbens, bewegt sich dieser auf den Flugkolben zu, was eine Kompression des Luftpolsters zur Folge hat. Der Druck steigt stark an, vermeidet durch diesen Anstieg eine Berührung der beiden Kolben und beschleunigt den Flugkolben in Richtung Döpfer (9). Die kinematische Energie des Flugkolbens wird als Impuls an den Döpfer weitergegeben, der seinerseits die Energie an das Werkzeug und dieses an den zu bearbeitenden Lochträger abgibt. Es gibt Schlagwerksausführungen in denen der Flugkolben seine Energie direkt auf das Werkzeug überträgt. Vorteil des Döpfers ist die Abdichtung des Schlagwerksinneren zur Vermeidung des Austritts von Schmiermittel und Eindringen von Staub und Schmutz. Die Flugkolbenbremse (14) bremst den Döpfer vor dem Aufprall auf die Werkzeugaufnahme (11). Diese Bremse ist

nicht in allen Geräten zu finden. Die Werkzeugaufnahme führt und sichert das Werkzeug axial, und überträgt je nach Gerätetyp die Rotation auf dasselbe.

### **3.3.3.2 Betriebszustände**

Neben den Betriebszuständen des Gerätes, die zwischen Bohren, Meißelbohren und Meißeln unterscheiden, müssen auch die Betriebszustände des Schlagwerks unterschieden werden.

Befindet sich das Schlagwerk im Arbeitspunkt, wird das Einsatzwerkzeug durch das Anlegen an den zu bearbeitenden Untergrund etwas in das Gerät verschoben. Dadurch werden auch Döpper und Flugkolben nach hinten verschoben. Der Flugkolben wird durch die Bewegung des Erregerkolbens angesaugt, die Luftfeder kann vorgespannt werden und der Flugkolben wird gegen den Döpper beschleunigt. Die Impulsübertragung endet erst im Medium, das bearbeitet werden soll.

Wird das Gerät vom Untergrund abgehoben, bewegt sich das Einsatzwerkzeug wieder nach vorne, Döpper und Flugkolben gelangen dabei in eine Position, bei der Luftausgleichsbohrungen im Führungsrohr freigelegt werden und das abermalige Ansaugen des Flugkolbens verhindert wird. Während der Erregerkolben im Führungsrohr oszilliert, erfolgt ein Gasaustausch im Führungsrohr ohne Wirkung auf das Schlagwerk. Dieser Betriebszustand nennt sich Leerlauf.

Der Übergang zwischen Arbeitspunkt und Leerlauf erfolgt nicht schlagartig. Die Dauer des Abstellens bzw. die Anzahl der Leerschläge sind vom Abstellverhalten des Schlagwerks abhängig. [3] Wird das Gerät vom Untergrund abgehoben, werden die Schläge nicht in den Untergrund geleitet, sondern müssen zu Beginn vom Gerät und vom Anwender aufgenommen werden. Die Belastungen sind sehr hoch und vor allem für Gehäuseteile kritisch. Der Leerschlag ist ungewollt, trotzdem nicht zu verhindern und oft Auslegungskriterium für betroffene Bauteile.

Es gibt noch weitere Betriebszustände. Leerlauf, Arbeitspunkt und Leerschlag decken jedoch die wichtigsten und kritischsten ab.

### **3.3.3.3 Bauformen**

Je nach Baugröße und Anforderungsprofil werden zwei häufige Bauformen des Elektropneumatischen Schlagwerks bei Hilti unterschieden.



- Erregerkolbenschlagwerk

Diese Bauform wird am häufigsten verwendet. Die Luftfeder befindet sich zwischen Schlag- und Erregerkolben, die mit den O-Ringen das Luftpolster zum Führungsrohr hin abdichten (Abbildung 6).

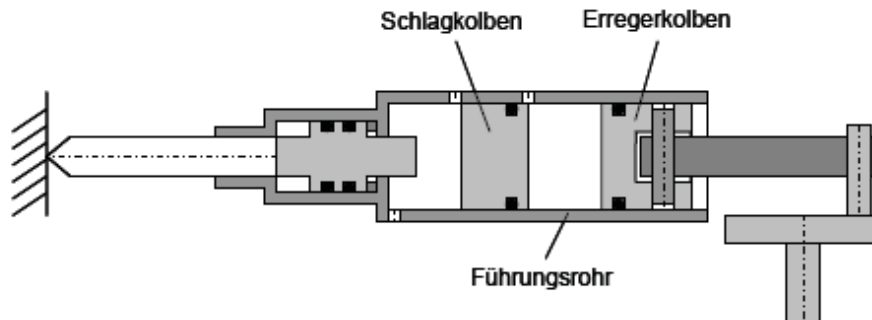


Abbildung 6: Erregerkolbenschlagwerk [3]

Diese robuste Bauform wird in Geräten der 5-10 kg-Klasse verwendet.

- Erregerzylinderschlagwerk

Bei dieser Bauform oszilliert ein Erregerzylinder im Führungsrohr, an dessen Innenfläche der Schlagkolben axial geführt wird. Die Luftfeder befindet sich hier zwischen dem Schlagkolben und dem Inneren des Erregerzylinders (Abbildung 7).

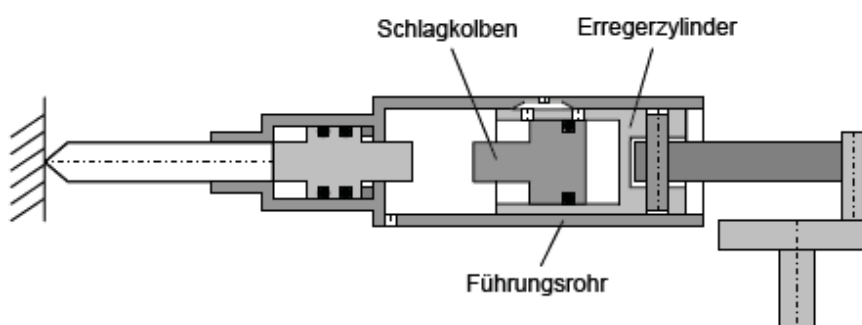


Abbildung 7: Erregerzylinderschlagwerk [3]

Anwendung findet das Erregerzylinderschlagwerk in Geräten der kleineren Gewichtsklassen.

### 3.3.4 Werkzeugaufnahme

Die Werkzeugaufnahme muss sicherstellen, dass das Einsatzwerkzeug eine dauerhafte Verbindung mit dem Elektrowerkzeug eingeht. Je nach Anwendung haben sich verschiedene Systeme durchgesetzt. In den betrachteten Geräten muss die Verbindung die Rotation und die axiale Translation übertragen können. Daraus lassen sich die Hauptanforderungen an die Werkzeugaufnahme definieren. Die Aufnahme selbst rotiert. Über Formschluss zwischen der Aufnahme und dem Werkzeug wird die Rotation übertragen. Weitere Nuten im Werkzeug verhindern große axiale Bewegungen des Einsatzwerkzeuges, wobei ein gewisser Bewegungsspielraum für die Funktion unabdingbar ist. Zu den gewöhnlichen Belastungen unter Normalbetrieb kommen sehr hohe, schlagartige Beanspruchungen durch Leerschläge hinzu.

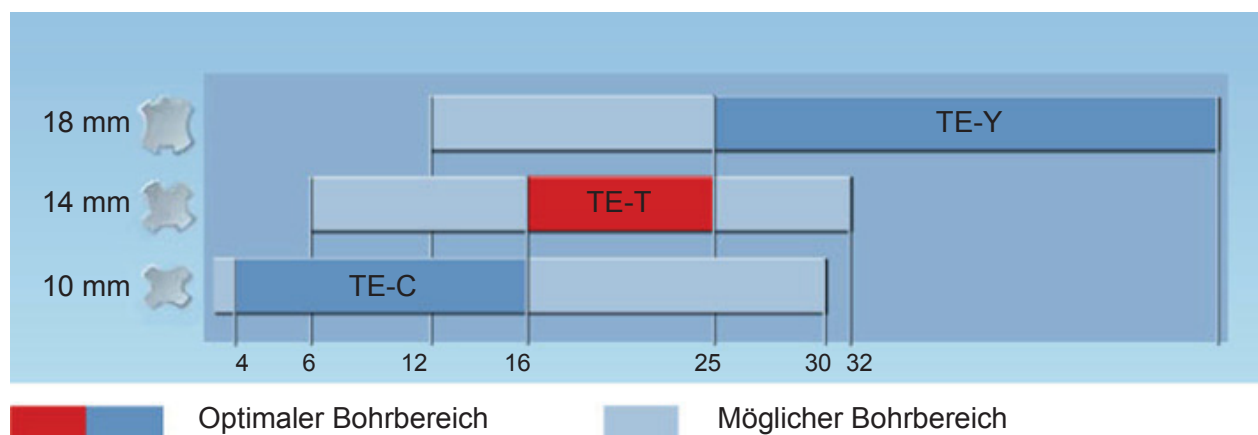


Abbildung 8: Einteilung der Werkzeugaufnahmen, vgl [2]

TE-Werkzeugaufnahmen von Hilti sind in drei Kategorien, laut Abbildung 8, unterteilt. Die Kategorien unterscheiden sich im Wesentlichen in ihrem Aufnahmedurchmesser und der Anzahl der Nuten der zugehörigen Einsatzwerkzeuge

## 3.4 Ansprüche an verwendete Werkstoffe

In diesem Kapitel werden Faktoren erörtert, welche die Eigenschaften von Bauteilen beeinflussen. Hier wird besonders auf Aspekte Rücksicht genommen, die für die Auslegung von polymeren Werkstoffen in den vorliegenden Geräten wichtig sind.

### 3.4.1 Verwendete Schmiermittel

Viele Bauteile kommen mit flüssigen oder pastenförmigen Medien in Kontakt. Je nach chemischem Aufbau der Polymere sind diese mehr oder weniger beständig gegen entsprechende Chemikalien. Liegt eine Unbeständigkeit vor, kann es zur Quellung des Werkstoffes und einer damit verbundenen Änderung der physikalischen und mechanischen Werte kommen. Der Diffusionsvorgang, durch den die Quellung hervorgerufen wird, ist stark temperaturabhängig und deshalb bei den vorliegenden Geräten besonders zu berücksichtigen. [4]

Hilti Bauhämmer werden je nach Bedarf mit Ölen oder Fetten geschmiert. Abhängig von deren Zusammensetzung ergeben sich erforderliche Chemikalienbeständigkeiten für die Bauteile.

In Tabelle 1 sind alle in Schmiermedien vorhandenen Chemikalien angeführt, mit denen die Bauteile in Kontakt kommen können.

Tabelle 1: Chemikalienaufkommen in Hilti Bauhämmern

Schmierstoffe	Verdicker / Additive
Polyglykole	Lithiumseifen
Polyalphaolefine	Triphenylthiophosphat
synthetischer Ester	Triarylphosphat
Isoparaffine	Triphenylphosphat
	Phosphorsäureester

### 3.4.2 Staubeintrag und andere verschleißrelevante Verunreinigungen

Trotz intensiver Bemühungen zur Vermeidung von Staubverschleppung ins Innere der Geräte, ist dieser Verschleißgrund nicht vollständig zu vermeiden. Während der Hübe, die das Schlagwerk über den Döpper und das Einsatzwerkzeug vollführt, gelangen Staubpartikel und andere Verunreinigungen unterschiedlichster Abrasivität über die Werkzeugaufnahme und die Döpperdichtungen ins Innere des Schlagwerks. Trotz getrennter Schmierräume von Schlagwerk und Getriebe, werden auch Verschleißerscheinungen im Getriebe beobachtet.

Zu dem eingebrachten Silizium- und Kalziumstaub kommt entstehender Metallabrieb hinzu. Das Vorhandensein dieser Verunreinigungen ist bei der Auslegung und Berechnung von bewegten Teilen in Schlagwerk und Getriebe zu berücksichtigen. [5]

### 3.4.3 Wärmebeständigkeit

Bei der Verwendung von Kunststoffen ist es unumgänglich, den Einfluss der Temperatur zu berücksichtigen. Physikalische Eigenschaften wie Elastizitätsmodul, Festigkeiten, Dämpfungseigenschaften und Schlagzähigkeiten sind stark davon abhängig. Ebenso spielt der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient bei der Dimensionierung und der Festlegung von Toleranzen eine größere Rolle als bei Stahl. Chemische Veränderungen bei Temperatureinfluss werden in Gegenwart von Sauerstoff als thermo-oxidative Prozesse bezeichnet und sind Bestandteil der Alterung. Bei sehr hohen Temperaturen kommt es auch unter Sauerstoffausschluss zu thermischer Alterung. [4]

Hilti TE-Geräte sind einem Temperaturbereich von -20°C bis +50°C durch Einwirkung von Außentemperaturen ausgesetzt. Bei längerem Betrieb der Geräte kommt es im Inneren zu Temperaturen jenseits der 100°C. Die höchsten Temperaturen werden im Schlagwerk gemessen. 150°C sind hier keine Seltenheit.

## 3.5 Polymere Werkstoffe in Hilti TE-Geräten

Aufgrund der bereits dargelegten Vorteile, die polymere Werkstoffe als Konstruktionswerkstoff für Bauteile in TE-Geräten von Hilti bieten, findet sich bereits eine sehr hohe Anzahl an Kunststoff- und Elastomerteilen in allen Bereichen der Geräte. Um ein Gefühl für die Verteilung zwischen Metall und Polymer zu vermitteln, wird diese in Abbildung 9 dargestellt. Die Gesamtheit der Bauteile wurde in die Bereiche Motor, Getriebe/Schlagwerk/Werkzeugaufnahme, Griff, Seitengriff und Gehäuse/Sonstige, und in die Werkstoffgruppen Metalle, Kunststoffe und Elastomere eingeteilt. Die Bereichseinteilung ist auch im Aufbau der Stücklisten zu finden. Kommt ein Bauteil mehrmals in einem Gerät vor, geht dieses nur einfach in die folgende Abbildung ein.

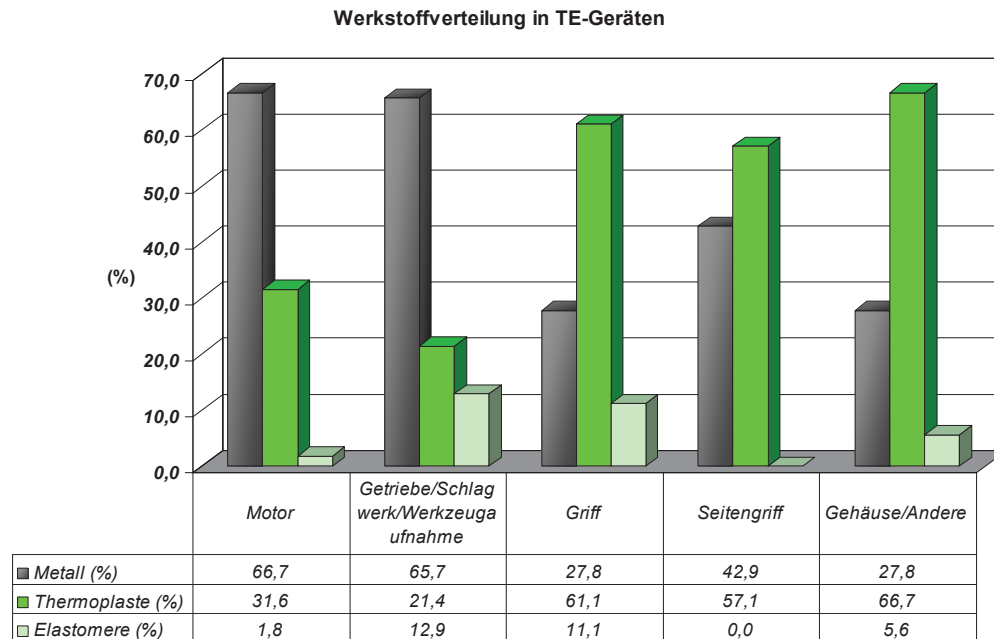


Abbildung 9: Werkstoffverteilung in TE-Geräten [26]

Etwa zwei Drittel der Bauteile in Motor und Getriebe/Schlagwerk/Werkzeugaufnahme sind aus Metall. Der Motor benötigt aufgrund seiner Funktion eine Reihe leitender Werkstoffe. Es gibt keine Möglichkeit diese durch polymere Werkstoffe zu ersetzen. Im Bereich der Mechanik des betrachteten Gerätes sind die Anforderungen an den Werkstoff eher im Bereich der Festigkeiten und Steifigkeiten zu finden. Ebenso kritisch wie die erforderliche elektrische Leitfähigkeit von Bauteilen, ist die Wärmeleitfähigkeit zu betrachten. Diese verhindert die Substitution der metallischen Werkstoffe, besonders in großen Bauteilen wie Getriebegehäuse oder Flansch. Dennoch ist in diesem Bereich das größte Substitutionspotential zu finden.

In den restlichen drei Bereichen ist der Anteil der Kunststoffe aktuell sehr hoch. Jegliche Teile, deren Anforderungen polymere Werkstoffe genügen, wurden bereits substituiert oder von Beginn an aus Kunststoff gefertigt. Kleinstteile und Normteile, deren Substitution wirtschaftlich und aus Gewichtsgründen keinen Sinn macht, heben den Anteil der metallischen Bauteile auf etwa ein Drittel.

Aus dieser Betrachtung geht der Bereich des Getriebes, des Schlagwerks und der Werkzeugaufnahme als interessantester Bereich für Substitutionsbestrebungen, hervor.

Zusätzlich zur Verteilung der Polymere im Gerät ist auch die Betrachtung der einzelnen Werkstoffe von Bedeutung. Der verschwindend kleine Anteil an Duroplasten ist in Form von Lacken oder Tränkharzen zur Isolierung im Motorbereich zu finden.

Elastomere werden als Dichtungs- und Dämpfelemente eingesetzt. NBR, HNBR, und in seltenen Fällen FPM, sind die Elastomere, die hauptsächlich Verwendung finden. HNBR stellt oft einen Kompromiss aus den in ihren Eigenschaften durchschnittlichen NBR Vulkanisaten und den in Preis und Eigenschaften wesentlich höher einzuordnenden Fluorkautschuken dar.

HNBR zeichnet sich vor allem durch die einstellbare Härte, die gute Temperaturbeständigkeit von über 150°C im Dauereinsatz (bei peroxidisch vernetzten, vollhydrierten Typen), die hohe Witterungs- und Chemikalienbeständigkeit und eine gute Kälteflexibilität aus. NBR mit vergleichbarer Chemikalienbeständigkeit, weist eine geringere Temperaturbeständigkeit als HNBR auf. Die Temperaturbelastung im Schlagwerk ist mit über 100°C bereits grenzwertig für NBR. FPM, mit einer Temperaturbeständigkeit von über 250°C, kurzzeitig sogar bis zu 300°C, hält ein sehr gutes Eigenschaftsprofil für die Anwendung in TE-Geräten bereit. Aufgrund des hohen Werkstoffpreises finden Fluorkautschuke selten Verwendung. [6]

Thermoplastische Polymere werden vor allem im Gehäuse und im Griffbereich eingesetzt. Es wird hauptsächlich PA6 und PA6.6 verwendet. Um die mechanischen und physikalischen Eigenschaften zu optimieren, werden auch gefüllte Typen verwendet. Kurzfasern aus Glas erhöhen die Schlagzähigkeit und werden beispielsweise in flächigen Gehäuseteilen genutzt. Spielen tribologische Eigenschaften eine Rolle, sind die Kurzfasern aus Kohlenstoff, da diese weniger abrasiv auf den Reibpartner wirken. Der Füllgrad hängt von den Anforderungen ab.

## 3.6 Verwendete Hilfsmittel

Dieser Abschnitt beschreibt die verwendeten Hilfsmittel, wie Programme und Untersuchungsmethoden.

### 3.6.1 Programme

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Metallsubstitution durch Kunststoffe in Produkten produzierender Unternehmen. Diese Unternehmen verfügen in der Regel über eine Ausstattung mit Microsoft Office-, CAD- und FEM-Programmen. Daraus ergeben sich auch die für diese Arbeit verwendeten Programme.

Microsoft Office wird als allgemein bekannt vorausgesetzt und an dieser Stelle nicht näher erläutert.

### **3.6.1.1 CID**

Das CID (Computer Integrated Description) ist das Stücklistenverwaltungsprogramm von Hilti. Ebenso finden sich hier Datenblätter zu Werkstoffen und Betriebsmittel sowie sämtliche Bauteilzeichnungen.

Bei der Erfassung von Informationen bezüglich der Metallsubstitution, kann ein großer Teil der benötigten Informationen mithilfe des CID beschaffen werden. Ebenso ist das Vorhandensein von Daten zu einem Gerät im CID Voraussetzung für die erarbeitete Vorgangsweise zur Metallsubstitution.

### **3.6.1.2 Unigraphics NX5**

„NX beschreibt die Produktreihe eines nach Funktionen modular aufgebauten CAD/CAM/CAE-Systems für den gesamten Konstruktions- und Fertigungsprozess von Siemens UGS PLM Solutions®. Basierend auf Unigraphics und I-DEAS ist NX ein offenes und flexibles 3D-System für Entwicklung und Konstruktion, Zeichnungserstellung, Simulation und Fertigung. Es ermöglicht Volumen- und Flächenkonstruktion in voll-, teil- und nicht-parametrisierter Form. In der aktuellen Version NX5 sind viele Neuerungen gegenüber den Vorgängern umgesetzt. NX basiert auf dem Parasolid-Kern.“ [7]

### **3.6.1.3 NX Nastran**

NX Nastran basiert auf der FEM-Software, die in den Sechzigerjahren von der NASA als „Nasa Structural Analysis System“ entwickelt wurde. NX Nastran ist ein voll in Unigraphics NX5 integriertes Simulationsmodul. Nastran bietet umfangreiche Möglichkeiten, lineare, nichtlineare, thermische und viele weitere Strukturprobleme zu simulieren. [25]

In dieser Arbeit werden statisch-lineare Probleme mit Hilfe von NX Nastran gelöst.

## **3.6.2 Versuche**

Trotz Computerunterstützung bei der Entwicklung und Konstruktion von Bauteilen, bleiben Versuche und Tests für den Informationsgewinn bezüglich Funktion und Lebensdauer ein essentieller Teil des Entwicklungsvorgangs.

Eine Versuchsanordnung, die zum Testen des Schlagwerks geeignet ist, ist der Kugelsumpf. Kleine Metallkugeln in einem Behälter dienen als Untergrund. In Kombination mit einer speziellen Meißelgeometrie entsteht die Simulation eines realen Meißelvorgangs. Möglichst realitätsnah eingespannt und gedämpft, kann das Testgerät gegen den künstlichen Untergrund bewegt werden. Nach Erreichen einer vorgegebenen Meißeltiefe wird das Gerät

wieder in Ausgangsposition gebracht und ein erneuter Meißelvorgang durchgeführt. Der Versuch läuft vollautomatisch. Das Versuchsprofil sieht nach mehreren Wiederholungen kurze Pausen vor, die das Überhitzen des Gerätes vermeiden. Die Wiederholrate des Meißelvorgangs ist in jedem Fall größer als bei der Anwendung am Bau.

Zur Messung der Einzelschlagenergie wird der Spannungsverlauf im Meißel, mit Hilfe eines Lasers, aufgezeichnet. Über den Spannungsverlauf lässt sich die Energie errechnen, die ein einzelner Schlag auf den zu bearbeitenden Untergrund ausübt.

Die Einzelschlagenergie wird als Qualitätsmerkmal für EP-Schlagwerke herangezogen. Die Funktion kann über Vergleichsmessungen der Energie nachgewiesen werden. Die Veränderung der Einzelschlagenergie weist auf eine Veränderung des Systemverhaltens und im schlimmsten Fall auf ein Fehlverhalten hin.



## 4 Potentialerhebung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Potentialerhebung und Vorauswahl der Bauteile in Hilti TE-Geräten bezüglich der Verwendung von Kunststoffen als Werkstoff. Eine übergeordnete und umfassende Untersuchung, die sich mit allen Bauteilen der wichtigsten TE-Geräte befasst, ist bis jetzt noch nicht durchgeführt worden. Hier wird die systematische Vorgangsweise beschrieben und die Ergebnisse angeführt.

Die Potentialerhebung zeigt Potentiale auf, die aufgrund der Funktion eines Bauteiles entstehen. Während Kugellager, Federelemente, Schrauben und andere Bauteile, aufgrund der Ansprüche an den Werkstoff, nicht durch Kunststoff ersetzt werden können, gibt es andere Bauteile deren Substitutionspotential nicht auf den ersten Blick auszuschließen ist. Mit eben diesen setzt sich die Potentialerhebung auseinander. Es wird nach Kriterien gesucht, die die Verwendung von Kunststoff im Bauteil ausschließt. Bauteile die keiner dieser Ausschlusskriterien unterliegen, gehen aus der Erhebung als Bauteile mit Substitutionspotential hervor.

Die Potentialerhebung zeigt Tendenzen auf, erhebt jedoch nicht den Anspruch eine Anleitung zur Substituierung potentieller Metallbauteile durch Kunststoffbauteile zu sein. Eine weitere umfangreiche Untersuchung jedes einzelnen Bauteils ist für die eigentliche Substituierung unumgänglich. Erst dadurch können die tatsächlichen Spannungen und Dehnungen im Bauteil, Änderungen im Wärmehaushalt des Gerätes und andere Einflüsse berechnet werden.

### 4.1 Systematische Vorgehensweise

An die Vorgangsweise bei der folgenden Erhebung gibt es zweierlei Hauptanforderungen. Es gilt sowohl bei der Gewinnung an Informationen als auch bei der Aufbereitung und Darstellung der gewonnenen Daten, möglichst effizient vorzugehen. Die Vielzahl an Bauteilen bei der großen Anzahl an Geräten multipliziert sich zu einer sehr großen Anzahl an Informationen, die gesammelt werden müssen. Um diese Anzahl einzuschränken, soll vorab geklärt werden, welche Geräte überhaupt betrachtet werden sollen.

Zum Verständnis wird angeführt, wie sich die Geräte des Bereichs D&D einteilen lassen: Grundsätzlich werden wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, die Geräte in Bohr-, Kombi- und Meißelhämmer unterteilt. Die erste Ziffer der Nummer in der Gerätebezeichnung beschreibt die Gewichtsklasse des Geräts. Somit ist die TE 60 der Gewichtsklasse von 6 kg zuzuordnen. Entsprechend ist die TE 706 der Gewichtsklasse von 7 kg zuzuordnen. Der Vorgänger der TE 706, das Gerät mit der Bezeichnung TE 705, ist ebenfalls der Gewichtsklasse von 7 kg zuzuordnen. Zukünftig werden die Bezeichnungen

jedoch nicht mehr fortlaufend durchnummeriert (z.B. 705 → 706), sondern die Nummer um eine zweite Nummer, die der Generation entspricht, ergänzt. Deshalb ist die vollständige interne Bezeichnung für das aktuell in Entwicklung befindliche Nachfolgegerät der TE 706, TE 700 01, wobei 01 für erste Generation steht. Diese Nomenklatur wurde beim Gerät TE 60 bereits früher eingeführt. Die TE 60 befindet sich in der Entwicklungsgeneration 03.

Für die Potentialerhebung sollen Geräte der aktuellsten Generation herangezogen werden. Dabei muss auf den Entwicklungsstand der Geräte geachtet werden. Voraussetzung für eine nähere Betrachtung ist ein vollständiger Satz Zeichnungen. Ist die Entwicklung eines neuen Gerätes in einem Stadium, in dem noch keine Klarheit über das genaue Aussehen der Einzelteile und den Aufbau der Baugruppen herrscht, ist eine Potentialerhebung im Detail nicht möglich.

Aufbauend auf diese Anforderungen ergibt sich das in Tabelle 2 dargestellte Geräteportfolio.

Tabelle 2: Geräteportfolio

Bezeichnung	Typ	Schlagwerksantrieb
TE 2M 02	Bohrhammer	Taumelantrieb
TE 6 A 03	Bohrhammer	Exzenterantrieb
TE 30 01	Kombihammer	Exzenterantrieb
TE 40 01	Kombihammer	Exzenterantrieb
TE 50 02	Kombihammer	Exzenterantrieb
TE 60-3	Kombihammer	Exzenterantrieb
TE 70 02	Kombihammer	Exzenterantrieb
TE 80 01	Kombihammer	Exzenterantrieb
TE 300 01	Meißelhammer	Exzenterantrieb
TE 600 01	Meißelhammer	Exzenterantrieb
TE 706	Meißelhammer	Exzenterantrieb
TE 1000 01	Meißelhammer	Exzenterantrieb

Im Folgenden wird eine Kategorisierung der Bauteile eines Gerätes vorgenommen. Von Beginn an können viele Bauteile von Substitutionsbestrebungen ausgenommen werden. Gründe hierfür sind in den Anforderungen und Systemeigenschaften zu finden, andere sind wirtschaftlicher Art.

Aufgrund der Vorteile, die Kunststoffe in technischen Anwendungen bieten, gibt es ständige Substitutionsbestrebungen bei Hilti TE-Geräten. Im Laufe der Zeit haben sich dadurch viele Informationen über die Anwendungsmöglichkeiten von Kunststoffen angesammelt. An der Entwicklung eines Gerätes sind verschiedene Abteilungen und Teams beteiligt. Jede Abteilung strebt dabei ein Optimum an. Dabei entstehen viele Ideen, wie alternative Werkstoffe eingesetzt werden können. Wird eine solche Idee umgesetzt, ist die Information in Form des Ergebnisses für jeden

ersichtlich. Wird eine Idee jedoch nicht umgesetzt, bleiben die Ideen und Erfahrungen beim entsprechenden Konstrukteur und sind nur bedingt der gesamten Entwicklung zugänglich. Bildhaft kann daher von einer Grauzone gesprochen werden, die den Informationsstand bezüglich Substitutionsbestrebungen betrifft. Um sich weiter einer bildhaften Sprache zu bedienen, kann das Ziel dieser Erhebung auch darin beschrieben werden, Farbe in die graue Monotonie der Substitutionsbestrebungen zu bringen. Abbildung 10 illustriert die Vorgehensweise.

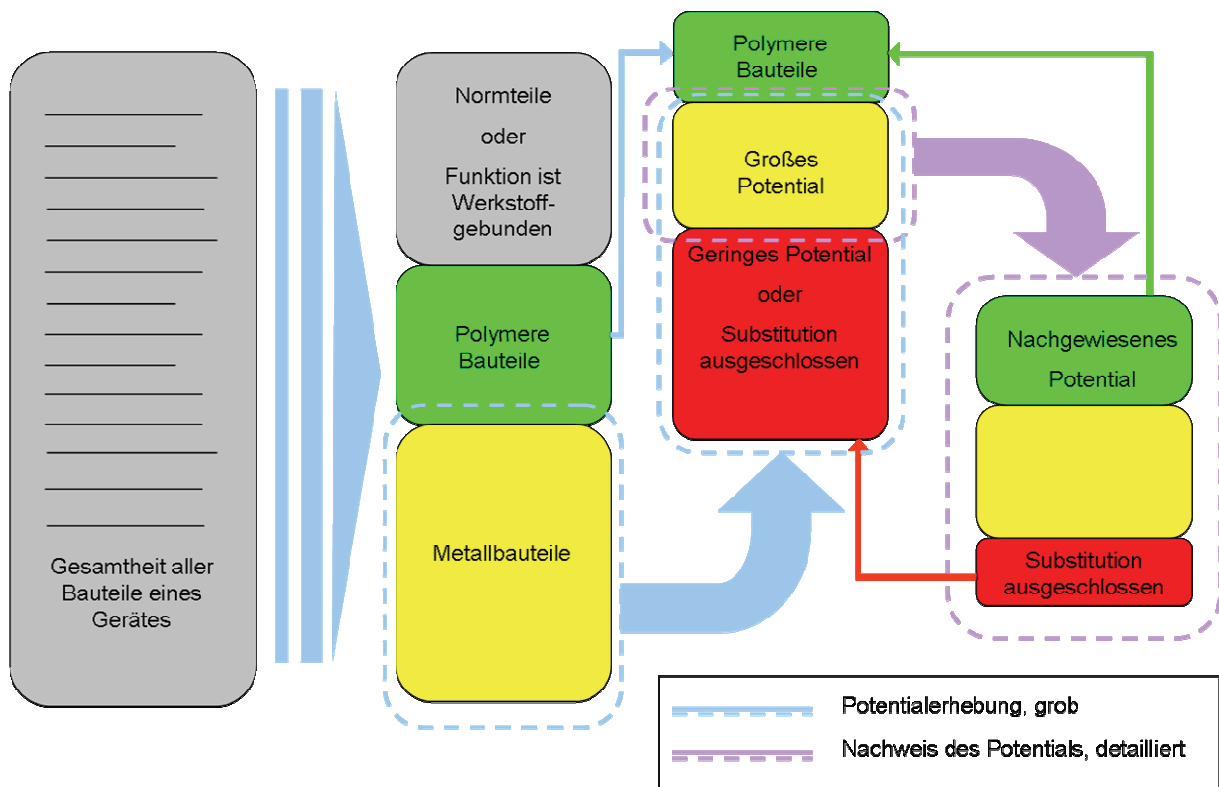


Abbildung 10: Systematische Vorgangsweise der Potentialerhebung

Die Abbildung 10 ist in zwei Bereiche geteilt. Die grobe Potentialerhebung, die sich auf alle Bauteile bezieht, ist hellblau gekennzeichnet. Die eigentliche Substitution mit Nachweis der Eignung eines Kunststoffes als Werkstoff für ein Bauteil, ist violett gekennzeichnet.

In einem ersten Schritt werden alle Bauteile in drei Bereiche eingegliedert. Der erste Bereich beinhaltet Teile, deren Funktion werkstoffgebunden ist. Schrauben, Federn, Sicherungselemente und andere Normteile sind diesem Bereich zuzuordnen. Weiters gibt es Anforderungen, wie elektrische Leitfähigkeit oder ausgeprägte Wärmeleitfähigkeit, denen Kunststoffe nicht genügen können. Diese Bauteile können von weiteren Betrachtungen ausgenommen werden, bleiben daher auch grau gekennzeichnet. Dem zweiten Bereich sind polymere Bauteile zuzuordnen. Mit dem Ziel einer Ampeldarstellung werden diese Teile mit grün gekennzeichnet. Übrig bleiben

alle metallischen Bauteile, die nicht auf den ersten Blick von einer möglichen Substitution auszuschließen sind. Die gelbe Kennzeichnung steht für den ungenauen Informationsstand bezüglich des Substitutionspotentials. Dieser gelbe Block beinhaltet nun alle Bauteile, über die Informationen eingeholt werden müssen. Das CAD-Modell gibt Aufschluss über die Wirkflächenpaarungen und Bauraum. Durchgeführte Berechnungen beleuchten die Belastungen und Ausreizung des derzeitigen Werkstoffes und zuständige Entwickler haben umfassendes Wissen zu den einzelnen Teilen. Diese Gesamtheit an Informationen fließt in die Beurteilung des Substitutionspotentials des einzelnen Bauteils ein. Aufgrund der Vielzahl an Bauteilen, die dieser Untersuchung unterzogen werden muss, kann im Einzelnen die Eignung eines polymeren Werkstoffes nicht nachgewiesen werden. Daher werden anhand der gewonnenen Information Bauteile von einer möglichen Substitution ausgeschlossen. Die Ausschlussgründe können mechanische Beanspruchungen, benötigte physikalische Eigenschaften oder abermals wirtschaftlicher Art sein. Ist einer dieser Gründe einem Bauteil zuzuordnen, wird dieser mit der Farbe rot gekennzeichnet. Wird aus der ersten Einteilung die grüne Kategorie der polymeren Bauteile übernommen, ergibt sich mit den potentiellen, gelb gekennzeichneten Substitutionskandidaten und den roten ausgeschlossenen Bauteilen, die angestrebte Ampeldarstellung.

Werden die Bauteile aller Geräte auf diese Art kategorisiert, können auf einen Blick Bauteile mit Substitutionspotential ausgemacht werden. Dadurch wird die Auswahl von Bauteilen für weitere Substitutionsprojekte erheblich vereinfacht. Die gesammelten Informationen werden vereinheitlicht und ebenfalls zugänglich gemacht. Dadurch dienen sie als Ersatz für umfangreiche Recherchearbeiten zu Beginn einer jeden bauteilspezifischen Substitutionsbestrebung. Bezüglich der Beschreibung der Systematik des Potentialnachweises sei auf Kapitel 5 verwiesen.

Um eine erste Vorstellung bezüglich der Durchführung der Erhebung zu bekommen, wird ein Gerät beispielhaft herangezogen und der beschriebenen Kategorisierung unterzogen.

Kapitel 4.2 beschreibt die praxisrelevante Vorgehensweise anhand der TE 60-3. Die dabei erlangten Erfahrungen werden für das weitere Vorgehen genutzt. Diese erste Erhebung zeigt aber auch die Funktion und Anforderungen an Gerät, Baugruppen und Bauteile auf.

## **4.2 Potentialerhebung anhand eines Beispielgerätes**

Um die in Kapitel 4.1 beschriebene Vorgangsweise in die Praxis umzusetzen, wird beispielhaft ein Gerät ausgewählt und das Vorgehen evaluiert. Die Auswahl des Gerätes basiert auf zwei Kriterien. Erstens soll das Gerät möglichst aktuell sein, da in älteren Geräten Metallbauteile zu finden sind, die in neuen Geräten, bereits substituiert, als Kunststoffteil zu finden sind. Zweitens soll das Gerät in seiner Funktion möglichst einer großen Anzahl anderer Geräte ähneln. Da der Großteil der zu untersuchenden Geräte

Kombihämmer sind und die TE 60-3 ein Kombihammer mittlerer Gewichtsklasse ist, fällt die Wahl auf dieses, aktuell noch in Entwicklung befindliche Gerät. Der Entwicklungsstand beinhaltet bereits durchkonstruierte Bauteile mit im CID hinterlegten Zeichnungen. Die Grundlage für eine Betrachtung ist demnach gewährleistet.

Der Kombihammer TE 60-3 ATC ist ein Gerät der 6 kg-Klasse, verfügt über die Sicherheitseinrichtung ATC („Active Torque Control“), die mechanisch in Form einer Magnetkupplung ausgeführt ist. Diese Kupplung unterbricht bei hohen Beschleunigungswerten des Gerätes (z.B. Festfahren im Bohrloch) die Drehmomentübertragung vom Motor zum Getriebe. Sowohl der Antriebsstrang für das Schlagwerk, als auch der Drehantrieb, werden schlagartig unterbrochen. Das übertragene Drehmoment wird null. Im Unterschied dazu überträgt das Getriebe beim Durchrutschen der Rutschkupplung das maximale Moment.

Ausgestattet mit der Werkzeugaufnahme TE-Y, beträgt das Gewicht des Gerätes 7,6 kg, bei einer Antriebsleistung von 1200 W.

Der Rotationsantrieb und der Schlagwerksantrieb können gemeinsam betrieben oder einzeln abgeschaltet werden.

#### **4.2.1 Farbliche Einteilung der Bauteile**

Als erster Anhaltspunkt fungiert die Stückliste, die sich als Excel-Datei aus dem CID exportieren lässt. In der Liste sind sämtliche Bauteile eingetragen. Zusätzlich finden sich die Werkstoffe darin. Die Hierarchie der Stückliste spiegelt den Aufbau einzelner Bau- und Montagegruppen wider. Die Filtermöglichkeit „AutoFilter“ in Excel bietet brauchbare Möglichkeiten, uninteressante Einträge auszublenden. Um diese Funktion nutzen zu können werden die Einträge um die Kategorien „Normteil oder werkstoffgebundene Funktion“, „Polymerteil“ und „relevantes Bauteil“ erweitert. Zutreffende Markierungen werden in der jeweiligen Zeile durch ein „x“ gesetzt. Diese Vorgangsweise ermöglicht das rasche Filtern der Bauteile. Nun können den Bauteilen erstmals die Farben nach dem Schema in Kapitel 4.1 zugeordnet werden. Grau markierte Bauteile sind mit ihren Ausschlusskriterien in Tabelle 3 auszugsweise angeführt.

Tabelle 3: Grau gekennzeichnete Bauteile, Auszug, TE 60-3 ATC

<b>Bezeichnung</b>	<b>Ausschlusskriterium</b>
Blechteil	Geringes Volumen, geringe Herstellkosten
Druckfeder	Hoher E-Modul gefordert, Relaxation unerwünscht
Kugellager	Normteil, hohe Axiallasten
Druckfeder	E-Modul, Relaxation unerwünscht
Stecker	Elektrische Leitfähigkeit benötigt
Flugkolben	Hohe Masse benötigt
Magnet	Magnetisierbarkeit benötigt
Döpper	Hohe Masse benötigt

Es gibt eine Vielzahl an Bauteilanforderungen, die den Einsatz von Kunststoffen unmöglich oder unnötig machen. Ebenso sind dabei geforderte Systemeigenschaften zu berücksichtigen. Am Beispiel des Döppers ist die Wichtigkeit der Systemeigenschaften gut erkennbar. Während das Bauteil aus Kunststoff den Anforderungen an Festigkeiten und Steifigkeiten gewachsen sein könnte, bringt die geringere Dichte einen funktionsverhindernden Nachteil mit sich. Das System Schlagwerk mit Döpper kann ohne große Döppermasse nicht funktionieren. Diese Überlegungen gelten für alle Schlagwerke dieser Ausführung. Somit können alle Döpper aus weiteren Betrachtungen ausgenommen werden. Ebenso gelten solch umfassende Ausschlussgründe für Federn, Schrauben, elektrisch leitende Bauteile, mechanisch hoch belastete Bauteile bei eingeschränktem Bauraum und andere Teile.

Der endgültige Ausschluss von einer Substitution grau hinterlegter Gerätebestandteile kann aber nicht gemacht werden. Durch umfassende Konstruktionsänderungen und Änderungen gesamter Systeme, können auch in diesem Bereich metallische Werkstoffe substituiert werden. Federn können durch Gummibauteile ersetzt werden, wenn die Systemeigenschaften es zulassen. Kunststoffteile können auch in Hybridbauweise gefertigt werden, um hoch beanspruchte Stellen mit Einsätzen zu verstärken. Diese Überlegungen sprengen den Rahmen dieser Diplomarbeit und sollten bei Bedarf in eigenen Projekten untersucht werden.

Tabelle 4: Gelb gekennzeichnete Bauteile, Auszug, TE 60-3 ATC

Bezeichnung	Überprüfungskriterium
Lagerbock	Lasten
Werkzeugaufnahme	Lasten
Flansch	Lasten, Wärmeleitung
Zahnrad	Lasten, Zahnfußfestigkeit, Flankenpressung
Klinke MIM	Lasten
Ring	Lasten

Den gelben Bauteilen ist zu Beginn kein eindeutiges Ausschlusskriterium zuzuordnen. Aus ist ersichtlich, dass hier vor allem die Belastungen ausschlaggebend für die Beurteilung des Substitutionspotentials sind. Um an Werte für die Belastungen zu kommen, werden Berechnungsberichte oder Erfahrungen der zuständigen Entwickler herangezogen.

Der dritte Bereich erfasst sämtliche, grün zu kennzeichnende, polymere Bauteile.

#### 4.2.2 Einteilung der gelben Bauteile

Die vorangegangene Vorgehensweise ermöglicht das gezielte Betrachten der relevanten Bauteile. Die gelben Bauteile werden nun auf deren Substitutionspotential überprüft. Um die tatsächliche Eignung eines polymeren Materials zur Substitution eines Metalls nachzuweisen, ist ein sehr großer Aufwand nötig. Sämtliche Anforderungen müssen überprüft werden. Die dazu nötigen Untersuchungen können nicht für alle Bauteile innerhalb des Zeitraumes einer Diplomarbeit durchgeführt werden. Die zweite Möglichkeit, die Gruppe der gelben Bauteile weiter einzuteilen, ist der Ausschluss von Bauteilen von weiteren Substitutionsbestrebungen. Dazu wird gezielt nach Kriterien gesucht, die die Verwendung von polymeren Werkstoffen ausschließt. Im Gegensatz zur ersten Einteilung in der bereits eine Vielzahl an Bauteilen aufgrund von offensichtlichen Kriterien ausgeschlossen und in den grauen Bereich verschoben werden, sind bei der Einteilung der gelben Bauteile meist die Belastungen ausschlaggebend. Im Bereich des Getriebes, des Schlagwerks und der Werkzeugaufnahme, sind vor allem die mechanischen Belastungen sehr hoch. Im Lauf der Lebensdauer eines Gerätes, wird dieses auf sehr unterschiedliche Arten beansprucht. Dabei entstehen oft erhebliche Schlag- und Stoßbelastungen. Zusätzlich zu den statischen Lasten sind auch diese dynamischen, zyklischen oder auch unregelmäßigen Lasten zu berücksichtigen.

Werte für die Belastungen sind durch Schätzungen, Erfahrungen der Entwickler und in seltenen Fällen in Berechnungsberichten zu finden. Zeit- und kostenintensive Berechnungen sind nur bei kritisch belasteten Bauteilen

notwendig. Die erfahrungsgemäß unkritische Belastung eines Metallbauteils ist oft für das vergleichbare Bauteil aus Kunststoff überkritisch. Um trotz des Mangels an konkreten Zahlen eine Beurteilung des Potentials möglich zu machen, werden die Möglichkeiten von Stahl mit denen von Kunststoffen verglichen. Folgende Beispiele sollen das verdeutlichen:

Verschleißt ein Stahlteil an der Oberfläche durch den Kontakt mit einem zweiten unter hoher Flächenpressung, kann davon ausgegangen werden, dass die Belastung für Kunststoff zu groß ist. Ist ein Stahlbauteil in seiner Ausgangsposition belastet und ist diese Belastung im Sinne einer Vorspannung funktionsnotwendig, so ist dasselbe Bauteil aus Kunststoff aufgrund der Kriechfähigkeit nicht funktionstüchtig. Ist vor allem die Steifigkeit funktionsentscheidend, ist der Bauraum ausschlaggebend, der für eine konstruktive Versteifung eines substituierten Bauteils notwendig ist. Ist zu wenig Bauraum vorhanden, kann die benötigte Steifigkeit nicht erreicht werden.

Diese Beispiele zeigen, dass auch ohne Kenntnis genauer Belastungswerte, eine Beurteilung des Substitutionspotentials gemacht werden kann.

Neben den physikalischen Grenzen gibt es auch wirtschaftliche Gründe, die gegen eine Substitution sprechen. Dazu werden das Gewicht und der aktuelle Herstellprozess in die Beurteilung miteinbezogen. Die Substitution eines aus Blech gestanzten Bauteils mit einer Masse von wenigen Gramm bringt keine Vorteile. Durch diese Art der Betrachtung kann ein Großteil der gelben Bauteile in den roten Bereich verschoben werden (Tabelle 5). Für die restlichen gelben Bauteile entsteht ein Anforderungsprofil. Daraus ist abzuleiten, worauf bei einer Substitution zu achten ist und worin die Schwierigkeiten zu sehen sind.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die gelben und roten Bauteile. Der Bewertungsgrund beschreibt die wichtigsten Gründe, die für oder gegen eine Substitution sprechen. Die Tabelle wird um die Kategorien Volumen, Masse, Baugruppe und die Verwendung des entsprechenden Bauteils in unterschiedlichen Geräten ergänzt. Ist ein Teil in mehreren Geräten zu finden, erhöht das das Potential, da der Vorteil des Kunststoffbauteils mehrfach genutzt werden kann.



4. Potentialerhebung

Tabelle 5: Bewertete Bauteile (TE 60-3)

Sach Nr.	Bezeichnung	Bewertungsgrund	Werkstoff	Volumen [mm <sup>3</sup> ]	Masse [g]	Baugruppe	Verwendet in TE
393882	Kupplungs- zahnrad	Masse, HK	Stahl	13663	107	Getriebe	60
366236	Scheibe 37	Masse, HK	Stahl	3463	27	Getriebe	46/56/60/500
355004	Anschlag	Bauteil- integration	Bronze	2698	20	Getriebe	60
354979	Käfig	Bauteil- integration	Stahl	2410	18	Getriebe	60
354956	Führungsrohr	Masse, HK	Aluminium	18895	50	Getriebe	60
354952	Lagerbuchse	Masse, HK	Bronze	12376	92	Getriebe	60
366241	Lagerbuchse	Masse, HK	Bronze	5014	37	Getriebe	60/46/56
366253	Lagerbuchse	Masse, HK	Bronze	3047	23	Getriebe	60/46/56
356096	Lagerschild	Masse, HK	Aluminium	83031	232	Motor	60
356030	Kupplungs- nabe	Belastung	Stahl	2974	23	Getriebe	60
354930	Hebel	Belastung	Stahl	254	2	Getriebe	60
330089	Spannband	Masse	Stahl	5852	46	Seiten- griff	40/50/60/76/ 80/56/46
354971	Anschlag	Masse, HK	Stahl	958	8	Anschlag	60
202193	Zylinderstift	Masse, HK	Stahl	833	6	Getriebe	
366170	Lagerbuchse	Masse, HK	Stahl	252	2	Motor	40/46/50/56/ 60/70/80/500
366209	Zentrier- buchse	Masse, HK	Stahl	345	3	Motor	60/56/46
354992	Blechteil	Masse, HK	Stahl	265	2	Getriebe	60
355308	Blechteil	Masse, HK	Stahl	376	3	Motor	60
354992	Blechteil	Masse, HK	Stahl	265,1	2	Motor	60
354989	Zahnrad z=18	Belastung	Stahl	2535	20	Getriebe	60
354940	Zahnrad z=43	Belastung	Stahl	8344	66	Getriebe	60

Tabelle 5: Fortsetzung

356026	Exzenter	System-gebunden	Stahl	10936	86	Getriebe	60
330048	Ring	Belastung	Stahl	12052	95	Getriebe	50-2/500/60-2/56/70/80/76/700/905
330051	Scheibe	Belastung	Stahl	3504	27	Getriebe	50/56/60/70/80/500/IT/STD/800
345238	Klinke MIM	Belastung	Stahl MIM	1696	13	Getriebe	MH IT/TE56/60/70/50/500/80/76
354941	Zahnrad z=29	Belastung	Stahl	2917	23	Getriebe	60
359331	Getriebe-gehäuse	Wärmeleitung	Mag-nesium	137711	373	Getriebe	60
354976	Lagerbock	Belastung	Sinter-Eisen	2915	20	Getriebe	60
355003	Flansch Fertig	Wärmeleitung	Aluminium	66445	186	Getriebe	60
366176	Mitnehmer-ring	Belastung	Stahl	11405	90	Motor	60
366175	Hülse ATC	System-gebunden	Stahl	1042	8	Motor	60
355354	Rotorwelle	Belastung	Stahl	11715	92	Motor	60
209704	Ritzel ATC	Belastung	Stahl	3115	25	Motor	60
359335	Werkzeug-aufnahme	Belastung	Stahl	65376	513	Getriebe	60/56
393838	Kegelrad	Belastung	Stahl	13765	108	Getriebe	60
393837	Kegelritzel	Belastung	Stahl	8254	65	Getriebe	60

### 4.2.3 Betrachtung der gelben Bauteile

In den nächsten Absätzen werden die selektierten gelben Bauteile beschrieben. Es werden Hinweise zu den Vorteilen der Substitution und den dabei auftretenden Schwierigkeiten und Herausforderungen gegeben.

Das größte und mit einer Masse von 230 Gramm auch schwerste Bauteil im gelben Bereich, ist das Lagerschild. Es trennt die Systeme Getriebe und Motor und ist dabei mit Getriebe- und Motorgehäuse verschraubt. Im Lagerschild werden drei Bauteile gelagert: Exzenter, Ritzel der Magnetkupplung und Kegelritzel. Zusätzlich befindet sich die Aufnahme der Magnetkupplung im Lagerschild. Derzeit wird das Bauteil aus Aluminium im Druckguss hergestellt

und spanend nachbearbeitet. Bei Ersetzen des Aluminiums durch ein thermoplastisches Polymer, ist mit einer Halbierung des Gewichts zu rechnen. Das größte Potential ist deshalb in der hohen Bauteilmasse zu sehen. Gemeinsam mit Getriebegehäuse und Flansch, gehört das Lagerschild zu den großen Gussteilen der TE 60-3. Die Wärmeleitung spielt in diesen Teilen eine sehr große Rolle, da das gesamte Wärmeaufkommen aus Getriebe und Schlagwerk nach außen abgeleitet und über Kühlströme abgeführt werden muss. Das Lagerschild spielt unter den Gussteilen dabei die geringste Rolle. Der Motorbereich wird über das Lüfterrad gekühlt. Getriebe und Schlagwerk geben die Wärme über die beiden anderen Gussteile ab. Genau zwischen diesen eigenständig gekühlten Bereichen befindet sich das Lagerschild, was auf den geringeren Einfluss dieses Bauteils auf den Wärmehaushalt schließen lässt.

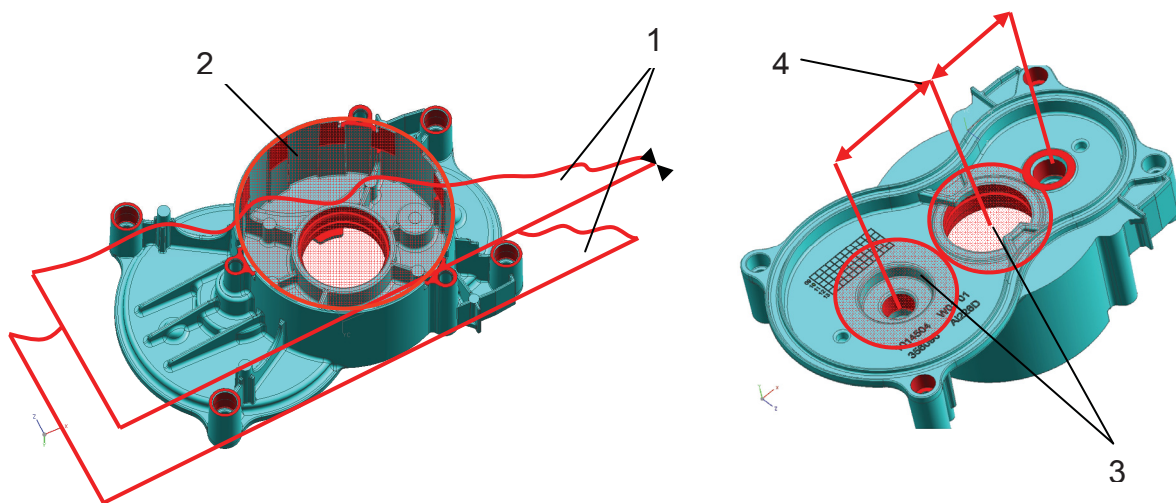


Abbildung 11: Lagerschild 356096 mit kritischen Bereichen [26]

Die mechanischen Belastungen sind im Bereich der Lagerstellen am höchsten (Abbildung 11, (3)). Die Lagerung des Kegelritzels, früher unter Verwendung einer zusätzlichen Buchse um das Aluminium weniger zu belasten, gilt als die kritischste der mechanisch beanspruchten Bereiche. Die Berechnung der Lagerlasten und der daraus resultierenden Spannungen zeigt laut Konstrukteur für den aktuellen Werkstoff unkritische Werte.

Großes Potential findet sich auch bei den Herstellkosten. Ein im Spritzguss hergestelltes Lagerschild ist kostengünstiger als das aufwendig spanend nachbearbeitete Aluminiumgussstück.

Die Ansprüche an Form-, Maß- und Lagetoleranzen sind sehr hoch. Die Ebenheit der Dichtungsflächen von Lagerschild zu Getriebegehäuse ist maßgeblich für die Funktionstüchtigkeit der dazwischenliegenden Dichtung (1). Der Kompressionsüberstand des Elastomerbauteils beträgt nur 0,05 mm. Ebenso kritisch sind die Längentoleranzen der Abstände der Lagerstellenmittelpunkte zueinander (4).

Die Lagerung der Magnetkupplung (2), gegenwärtig mit einer Toleranz für Konzentrität und Koaxialität von 0,06 mm belegt, zeigte bei vergrößerter Toleranz (0,08 mm) die Tendenz zum Verkippen. [8]

Aus den Anforderungen an die Toleranzen ergibt sich die Forderung nach spanenden Fertigungsschritten bei der Herstellung des Kunststoffteiles. Dadurch relativiert sich der Kostenvorteil.

Zusammenfassend hängt die Substitution des Aluminiums durch Kunststoff als Werkstoff des Lagerschilds von der Größe der Spannungen und Verformungen, der Erreichbarkeit der Toleranzen im Spritzgussverfahren und dem damit einher gehenden Kosteneinsparungspotentials ab. Die Rolle der Wärmeleitung ist durch eine Simulation oder Messung zu überprüfen und zu bewerten.

Die Lagerung der Werkzeugaufnahme erfolgt durch zwei Gleitlager aus Sinterbronze. Aus dem selben Werkstoff ist das Gleitlager des Kegelrades (Abbildung 12, Mitte).

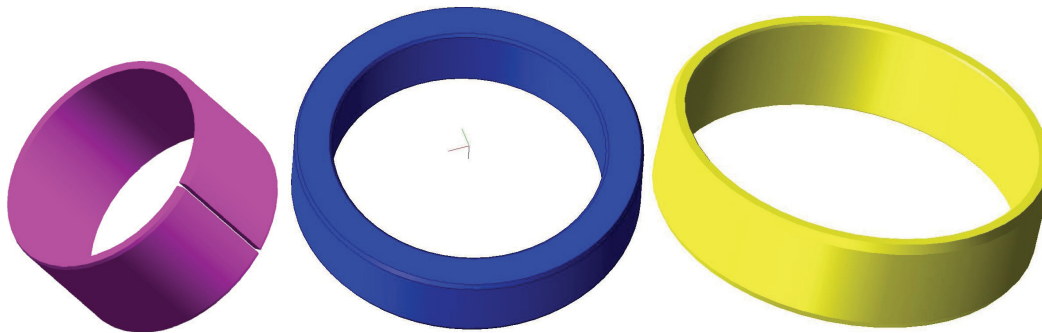


Abbildung 12: Lagerbuchsen v.l.n.r.: 366253, 354952, 366241 [26]

Die blau dargestellte Buchse führt und sichert den Bund des Kegelrades. Die entstehenden axialen Lasten sind zwar geringer als die radialen Belastungen, dennoch kommt es in der Praxis zu deutlichen Verschleißerscheinungen (Abbildung 13).

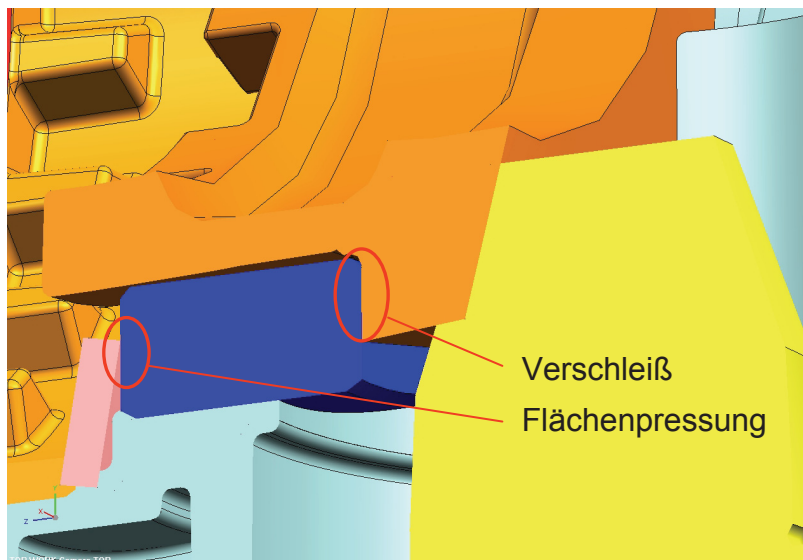


Abbildung 13: Einbausituation Lagerbuchse 354952 [26]

Die Axiale Sicherung erfolgt über ein Federelement (rosa), das mit der Kante die Buchse gegen axiales Verrutschen sichert. Dabei kommt es zu hohen Flächenpressungen.

Die Anforderungen an die Lagerbuchsen stellen mittlerweile ein mögliches Anwendungsgebiet für Kunststoffgleitlager dar. Kunststoffgleitlager finden verstärkt Anwendung im Maschinenbau. Es sind Dauergebrauchstemperaturen von bis zu 250°C erreichbar. Die Verschleißfestigkeit nimmt immer mehr zu und die verträglichen Gleitgeschwindigkeiten befinden sich jenseits von 1 m/s.

Die Entwicklung auf dem Sektor der Lagerwerkstoffe wird schnell vorangetrieben. Für Spezialanwendungen, wie es Lagerungen in Umgebungen hoher Temperaturen darstellen, werden auch Spezialkunststoffe benötigt. Im Preis liegen diese bei einem Vielfachen gängiger Werkstoffe. [9] Tabelle 6 zeigt die Eckdaten der Belastung der einzelnen Lager [10]. Für das Lager des Kegelrads sind Werte für die radiale, wie die axiale Last angegeben. Die Werte für die Flächenpressung und die Umfangsgeschwindigkeit, wurden in Abbildung 14 den Anwendungsgrenzen bei Raumtemperatur unterschiedlicher Lagerwerkstoffe gegenübergestellt. Die Werte für die Sinterlager sind im Anwendungsspektrum der TE-Geräte weitgehend temperaturunabhängig. Für den polymeren Lagerwerkstoff ist der Temperatureinfluss nicht zu vernachlässigen. [11], [12]

#### 4. Potentialerhebung

Tabelle 6: Lagerlasten Gleitlager TE 60 [10]

Sach Nr.	N (U/min)	d1 (mm)	d2 (mm)	b (mm)		F (N)	p (MPa)	v (m/s)	p*v (MPa*m/s)
366253	360	32	35	19,50	Radial	1539,16	2,47	0,60	1,49
366241	360	48,40	53	14,10	Radial	1666,31	2,44	0,91	2,23
354952	360	45	57,50	12,40	Radial	1332,30	2,39	0,85	2,03
					Axial	430	0,70	1,00	0,70

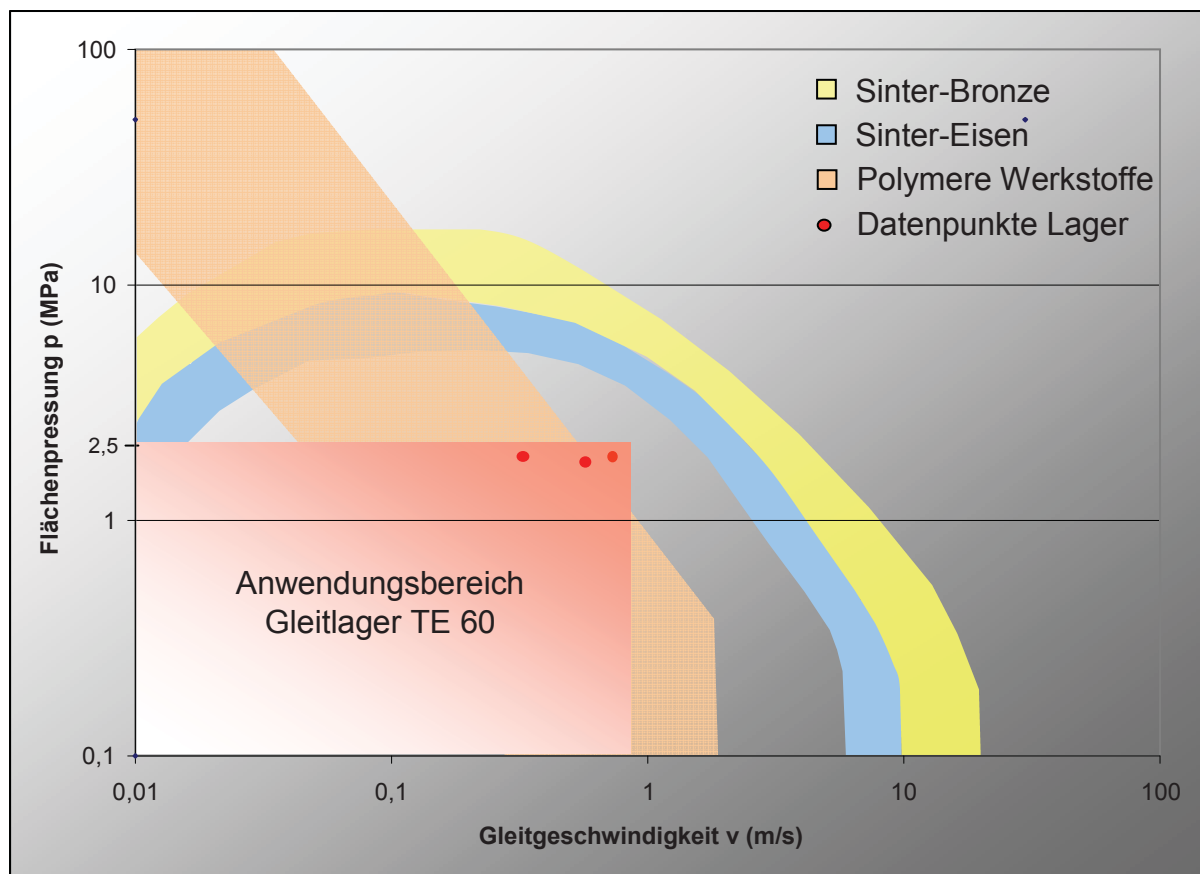
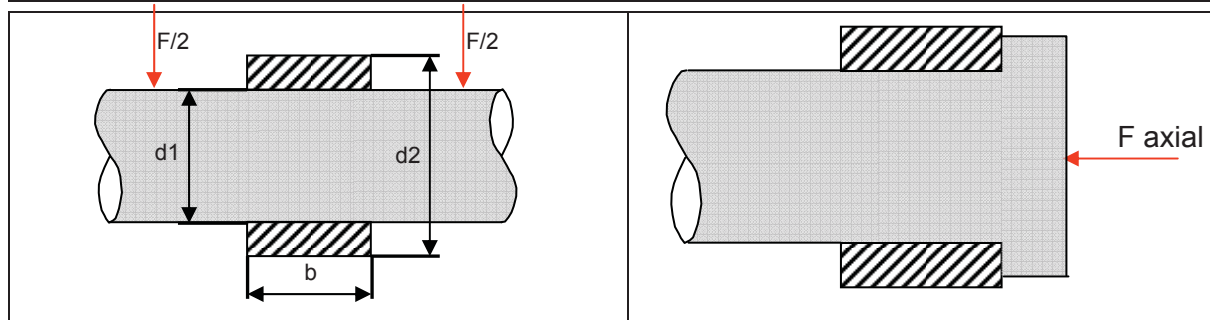


Abbildung 14: Leistungsgrenze Lagerwerkstoffe, vgl. [11] und [12]

Aus Abbildung 14 geht klar hervor, dass der Anwendungsbereich der Buchsen weit innerhalb der Grenzen der Sinterwerkstoffe liegt. Die dargestellten polymeren Werkstoffe werden bis an deren Leistungsgrenze belastet.

Als Referenz für polymere Gleitlager in diesem Gerät sei eine der beiden Lagerbuchsen des Lagerschilds erwähnt. Diese Buchse verfügt über einen Bund. Durch die Formgebung im Spritzgussprozess ist dieses Lager kostengünstiger, als die Sinterbuchse, trotz des relativ hohen Preises des verwendeten PEEK. Die zweite Buchse im Lagerschild, diese ist ohne Bund ausgeführt, ist wirtschaftlich unvorteilhaft und bringt aufgrund des geringen Volumens kaum Gewichtsvorteile.

Dieses Beispiel beschreibt den Zielkonflikt zwischen Kosten und Gewichtsersparnis. Vor allem die hochpreisigen Spezialpolymere können den Vorteil eines günstigen Herstellungsverfahrens durch die hohen Werkstoffkosten zunichte machen. Dieser Konflikt kann durch die Verwendung günstigerer Kunststoffe vermieden werden, was neben der prinzipiellen Eignung ein weiteres Ziel der Substitution sein muss.

Die Scheibe (Abbildung 15) dient als Anschlag für den Döpper (hellgrün) in seiner hintersten Position. Ein Dämpfelement (dunkelgrün) verringert die Stoßbelastungen. Das aus Stahl (16MnCr5) gefertigte Bauteil hat eine Masse von 27 g. Neben der Gewichtsreduktion besteht die Möglichkeit, die Herstellkosten aufgrund der nicht ganz einfachen Geometrie zu verringern.

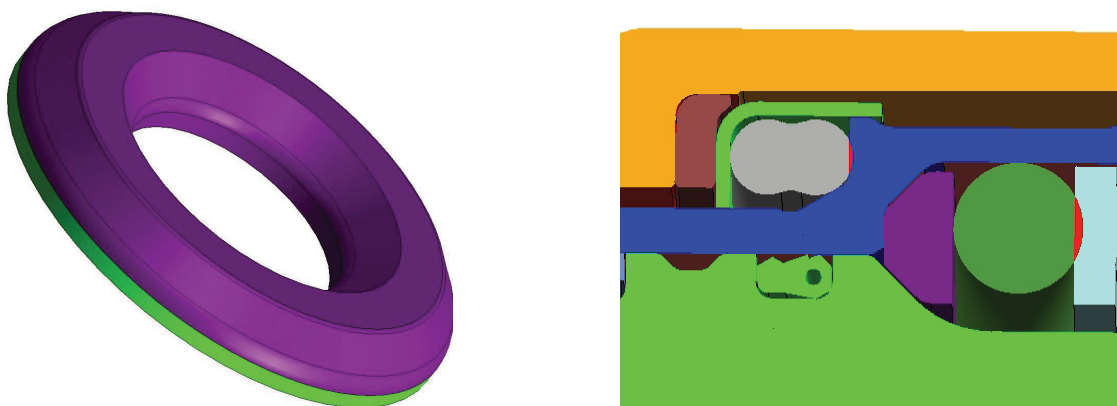


Abbildung 15: Scheibe 366236 (links), Einbausituation (rechts) [26]

Um die Riege der gelben Bauteile abzuschließen, fehlen neben dem Spannband noch der Anschlag und der Käfig (Abbildung 16). Gemeinsam mit dem Dämpfelement, bilden sie die Trennung zwischen der rotierenden Werkzeugaufnahme (blau) und dem feststehenden Flansch (orange) (Abbildung 15, rechts).



Abbildung 16: Käfig 354979 (links), Anschlag 355004 (rechts) [26]

Für den Anschlag gelten dieselben Überlegungen wie für die Lagerteile. Die Anforderung an den Käfig ist, den Austritt des Elastomers aus dem vorgesehenen Raum zu verhindern. Dies würde die Funktion der Bauteile und das Dämpfungsverhalten beeinträchtigen. Durch das Dämpfelement kommen die großen Stöße von Leerschlägen (Kap 3.3.3.2) stark vermindert an Käfig und Anschlag an. Die mechanischen Belastungen an diese beiden Bauteile sind daher nicht zu groß. Die Substitution der bisher verwendeten Werkstoffe würde zur Gewichtsreduktion und einer erheblichen Kostensenkung beitragen, wenn aus diesen beiden Elementen ein einzelnes gemacht wird. Die Gleitfläche muss dazu zwischen Anschlag und Flansch liegen, um das Dämpfelement nicht zu beschädigen.

Das Spannband (Abbildung 17) wird zur Befestigung des Seitengriffs, über das Gehäuse gestülpt und durch einen Anschlag (blau), der über eine Gewindestange mit dem Unterteil des Seitengriffs verbunden ist, gespannt. Der aktuelle Werkstoff für das Spannband stellt, abgesehen von der hohen Dichte, das Optimum dar. Der große E-Modul und die geringe Relaxation von Verbundwerkstoffen, macht diese als einzige polymere Werkstoffe für diese Anwendung interessant. Es gilt die Kostenfrage und die Möglichkeit der häufigen Montage und Demontage des Spannbands aus Verbundwerkstoff zu prüfen.

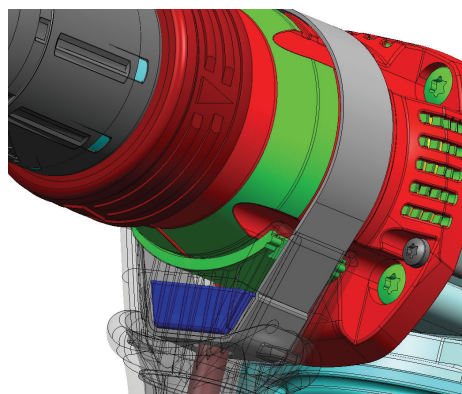


Abbildung 17: Spannband 330089, grau [26]



Werden die eben beschriebenen Bauteile unter dem Gesichtspunkt ihres Substitutionspotentials betrachtet, lässt sich folgende Reihung nach Potential bilden:

Die Scheibe (366236) scheint den Anforderungen auch als Kunststoffteil ohne große Änderungen gewachsen zu sein. Da dieses Element auch in anderen Geräten zu finden ist, ist das Potential noch höher einzuschätzen. Geeignete Werkstoffe sind im Bereich technischer Thermoplaste und Duromere zu suchen.

Die Lagerbauteile bringen ebenso hohes Substitutionspotential mit. Es gibt mittlerweile eine Reihe von Gleitlagerwerkstoffen aus Kunststoff, deren Eigenschaften laut Lagerkatalogen von Herstellern, den Anforderungen in Hilti TE-Geräten, genügen. Die Herausforderung ist die Auswahl eines Werkstoffes, der nicht den hochpreisigen Spezialkunststoffen angehört. Das Potential ist trotzdem hoch anzusehen, da derartige Lagerbuchsen in allen Geräten der TE Serie und darüber hinaus zu finden sind.

Ebenso sind der Anschlag (355004) und der Käfig (354979) zum jetzigen Untersuchungszeitpunkt als hochpotentiell einzuschätzen. Die Möglichkeit aus zwei Bauteilen eines zu machen, bringt ein weiteres Kosteneinsparungspotential.

Die Substituierung des Lagerschildes aus Aluminium ist nur mit ungleich höherem Aufwand zu bewerkstelligen. Hauptaugenmerk muss auf die Erreichung der Toleranzen im Urformprozess gelegt werden. Je höher die Zahl der nachbearbeiteten Flächen, umso geringer der Kostenvorteil. Der Einfluss auf den Wärmehaushalt ist nicht unerheblich und ein weiterer Faktor, der das Potential mindert. Hier gilt, wie für die zuvor beschriebenen Bauteile: Die Umstellung eines Lagerschildes auf Kunststoff, bietet die Basis für die Umstellung der Lagerschilde anderer Geräte.

Das Spannband wird als letztes angeführt: Die derzeitige Lösung ist nur unter Einbußen der guten Flexibilität und Verformbarkeit gewichtsmäßig zu optimieren. Mögliche Werkstoffe sind unter den Verbundwerkstoffen zu finden.

#### **4.2.4 Betrachtung roter Bauteile**

In diesem Kapitel werden die roten Bauteile behandelt, die aus dem gelben Bereich verschoben wurden. Es wird die Empfehlung ausgesprochen, diese Teile nicht durch Kunststoffteile zu ersetzen. Dennoch scheint es im einen oder anderen Fall möglich zu sein, durch erhöhten Kostenaufwand oder umfassende Konstruktionsanpassungen eine Substitution durchzuführen.

Tabelle 7: Rote Bauteile mit Beschreibung (Abbildungen nach [26])

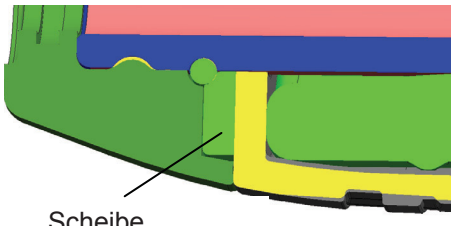
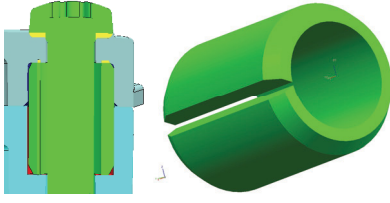
Scheibe	<p>Die Scheibe hält das gesamte vordere System der Werkzeugaufnahme zusammen. Statische Lasten werden als unkritisch betrachtet, die Dynamik in diesem Bereich führt jedoch in Kombination mit der Staubbeanspruchung zu Verschleißerscheinungen. Die Flächenpressung zum Sprengring ist sehr hoch und verantwortlich für den Verschleiß.</p>	
Zylinderstift	<p>Der Stift, in seiner Funktion als Kolbenbolzen zu bezeichnen, hat neben einer sehr geringen Masse auch kein Kostensenkungspotential. Die Rohlinge sind als Rundmaterial erhältlich, die spanende Bearbeitung ist gering. Weitere Informationen siehe 4.2.6.</p>	
Zentrierbuchse	<p>Die geringe Masse und die geringen Herstellkosten machen eine Substitution unnötig. Mechanische Lasten werden nicht als kritisch angesehen.</p>	

Tabelle 7: Fortsetzung

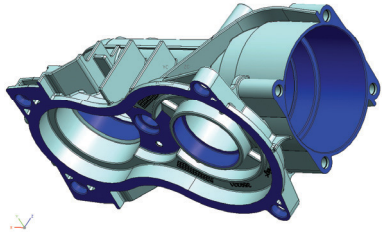

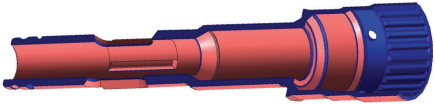
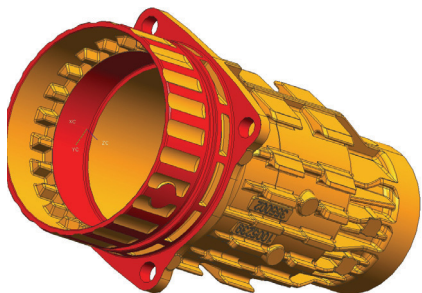
Getriebegehäuse	<p>Das Sintergehäuse ist mehrfach kritisch. Die erforderliche Wärmeleitung, große Anforderungen an Toleranzen und mechanisch große Beanspruchungen, vor allem in der Verschraubung zum Flansch, sind einige Ausschlussgründe. Die Toleranzen sind auch in Kunststoffbauweise zu erreichen, jedoch nur durch spanende Bearbeitung, was den möglichen Kostenvorteil verringert. Blaue Flächen stellen bearbeitete Flächen dar.</p>	
Lagerbock	<p>Der Lagerbock gilt als mechanisch stark beansprucht und konnte nur durch Überdimensionierung dauerhaft gemacht werden. Die Grenzen sind in den Spannungen im Ausleger für die Verschraubung zu finden.</p>	
Werkzeugaufnahme	<p>Diese gehört zu den hoch belasteten Bauteilen. Bereits das Stahlbauteil wird kritisch beansprucht.</p>	
Flansch	<p>Ähnlich dem Getriebegehäuse sind die Ausschlussgründe in der Wärmeleitung und den mechanischen Beanspruchungen zu finden. Kritisch ist die Verschraubung mit dem Getriebegehäuse. Rote Flächen stellen bearbeitete Flächen dar.</p>	

Tabelle 7: Fortsetzung

Klinke	<p>Die Klinke (2 Stk. je Gerät) sichert das Einsatzwerkzeug axial vor dem Herausfallen. Mit zunehmender Betriebsdauer verschleißt die Werkzeugaufnahme an den Zapfen der Drehmitnahme. Dadurch übernimmt diese Aufgabe die Klinke. Höchste Beanspruchungen treten durch Leerschläge auf. Verschleißerscheinungen sind der Regelfall. Kritisch ist die Flächenpressung und die Schlagbelastung</p>	 
Ring	<p>Die Klinke stützt sich gegen den Ring (rot, rotationssymmetrisch). Die Belastungen der Klinken sind so groß, dass auch der Ring an den Kontaktstellen verschleißt. Kritisch ist die Flächenpressung.</p>	
Zahnrad z=43	<p>Überträgt das Drehmoment vom Ritzel auf den Exzenter. Nach DIN 3990 Methode B: Sicherheitsfaktor für Zahnfußspannung: 1,61; Sicherheitsfaktor für Flankenpressung: 0,83. Da der Drehantrieb und der Schlagwerksantrieb über diese Getriebestufe laufen, sind die Belastungsspitzen zu groß für ein Kunststoffzahnrad. [10]</p>	s. Abbildung 18

Tabelle 7: Fortsetzung

Exzenter	Der Exzenter ist am Zapfen höchst belastet. Auch hier ist der Einsatz von Kunststoffen schwierig. Durch die kostenoptimierte Verbindungsart von Zahnrädern und Exzenter wird von der Substitution abgeraten.	s. Abbildung 18
Zahnrad z=18	Ist das erste Rad der Getriebestufe 2, Die Verbindung mit dem Exzenter ist ebenfalls in dieser Konstruktionsausführung nicht mit Kunststoffen zu ermöglichen. Die Fertigungskosten sind als gering anzusehen, da die Räder gestapelt bearbeitet werden können.	s. Abbildung 18
Zahnrad z=29	Ausschlussgründe sind dieselben wie Zahnrad z=18	s. Abbildung 18
Kegelritzel	Nach DIN 3991 Methode C: Sicherheitsfaktor für Zahnfußspannung: 0,58; Sicherheitsfaktor für Flankenpressung: 0,67; Die Belastungen sind für Kunststoff zu hoch; [10]	s. Abbildung 18
Kegelrad	Die Sicherheiten sind dieselben wie beim Kegelritzel. Ein Hybridbauteil mit Stahlverzahnung ist eine Möglichkeit, Kunststoff in das Teil einzubringen.	s. Abbildung 18

Tabelle 7: Fortsetzung

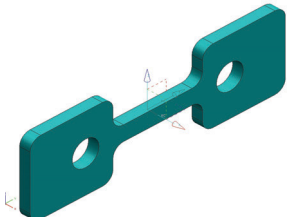
Anschlag	Der Anschlag ist aufgrund der geringen Masse und Herstellkosten von einer Substitutionsabsicht auszuschließen.	
Blechteile	Ausschlussgründe wie Anschlag	
Rotorwelle	Die Ansprüche an die Rotorwelle sind am besten mit Stahl zu bewältigen. Eine Substitution ist auszuschließen.	
Ritzel ATC	Nach DIN 3990 Methode B: Sicherheit für Zahnfußspannung: 1,86; Sicherheit für Flankenpressung: 0,66; Auch hier ist eine Substitution des Werkstoffes durch Kunststoff auszuschließen	
Hülse ATC	Die Hülse ist in ihren System-eigenschaften von den Eigenschaften des Ritzels abhängig. Ein Ritzel aus Stahl bedingt eine Hülse aus Stahl.	
Mitnehmer-ring	Der Mitnehmerring, ein Bauteil der Magnetkupplung, überträgt das Drehmoment durch Reibschluss. Die Verformungen müssen minimal sein Die erste Wahl für den Werkstoff ist daher Stahl.	

Tabelle 7: Fortsetzung

Lagerbuchse	Diese bundlose Buchse ist sehr kostengünstig. Die Verwendung von PEEK als Lagerwerkstoff hat sich in der Vergangenheit als wirtschaftlich unvorteilhaft herausgestellt. Die zweite Lagerbuchse im Lagerschild ist mit einem Bund versehen. Hier rechnet sich die Verwendung von PEEK.
-------------	---

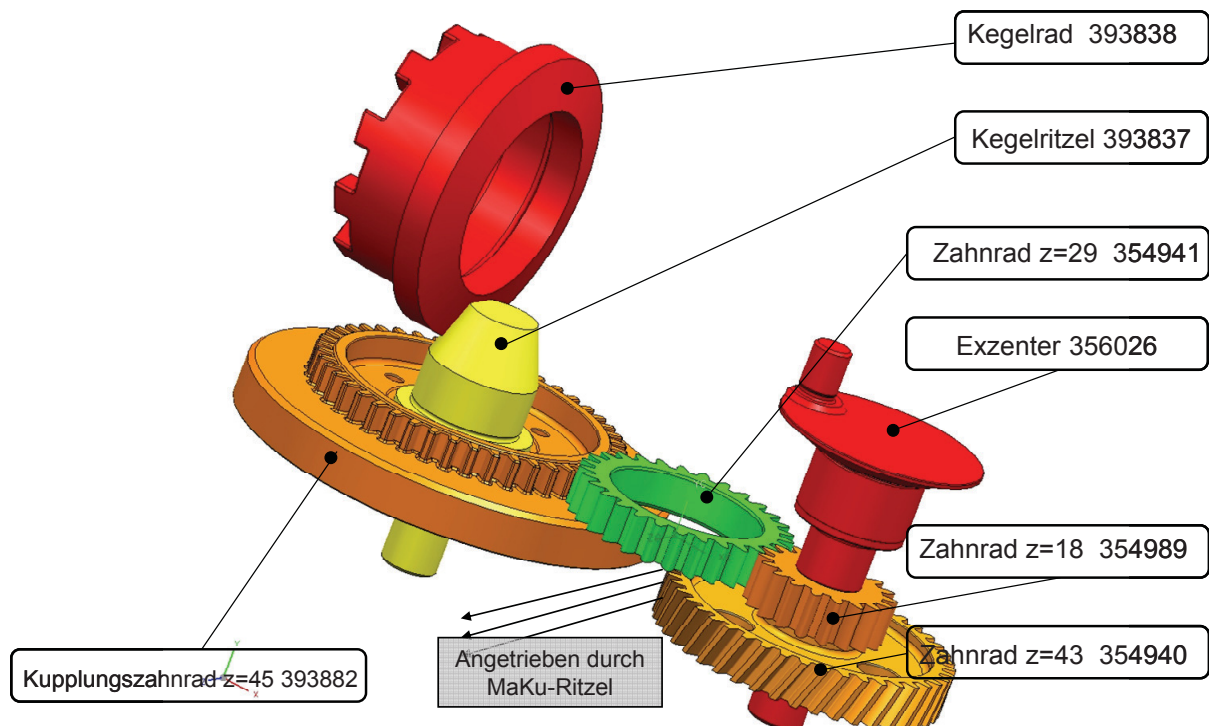


Abbildung 18: Getriebe [26]

#### 4.2.5 Schlussfolgerungen

Die Potentialerhebung der Bauteile der TE 60-3 hat gezeigt, dass es einige Bauteile gibt, die über großes Potential verfügen, durch Kunststoffteile ersetzt zu werden und dabei Gewichts- und Kosteneinsparung einbringen. Weitere Vorteile sind in der Zusammenführung mehrerer Bauteile zu einem Ganzen zu finden, was zur Erleichterung der Montage und zur Verringerung der Komplexität der Systeme beiträgt.

Für die weiteren Erhebungen wurden die untersuchten Bauteile einer statistischen Überlegung unterzogen.

Abbildung 19 zeigt Diagramme, die das Verhältnis der Motorbauteile zu den Getriebebauteilen darstellt. Die Zuordnung der Bauteile zu den jeweiligen Bereichen erfolgt nach Vorgabe durch die Stückliste (CID).

Unter den 36 untersuchten Bauteilen sind 25 Getriebeteile zu finden (a). Das entspricht einem Anteil von rund 70%. 25% stammen aus dem Motorbereich, 6% aus anderen Bereichen. Im Zuge der Bewertung wurden Bauteile in den roten Bereich verschoben. Rund 90% der Motorbauteile konnten aufgrund der Anforderungen von einer Substitution ausgeschlossen werden. Ein Bauteil (10%) bleibt im gelben Bereich (e). Aus dem Getriebe konnten knapp 40% im gelben Bereich belassen werden (d).

Die Zusammensetzung des gelben Bereiches besteht aus neun Getriebebauteilen, einem Bauteil aus dem Motorbereich und einem weiteren aus einem anderen Bereich (b). Die beiden nicht zum Getriebe gehörigen Bauteile sind das Spannband und das Lagerschild.

Die Zusammensetzung des gelben Bereichs lässt folgende Vereinfachung für die Bewertung anderer Geräte zu: Werden bei der Bewertung nur Getriebebauteile unter Einbeziehung von Spannband und Lagerschild betrachtet, schließt das bei der TE 60-3 100% der gelben Bauteile ein. Rote Bauteile, die aufgrund von einer geringeren Belastung in kleineren Geräten ebenfalls in den gelben Bereich zu verschieben sind, finden sich ebenso hauptsächlich im Getriebe.

Aufgrund der Erfahrungen der Potentialerhebung am Beispiel der TE 60-3, werden sich weitere Erhebungen nur mehr auf das Getriebe beziehen. Das Spannband und das Lagerschild werden zusätzlich miteinbezogen.

Die Verteilung der Ausschlussgründe (c) zeigt eine Mehrheit an Bauteilen, die den mechanischen Anforderungen als Kunststoffteil nicht gewachsen sind. Viele dieser Teile sind in der Ausführung als Stahlteil bereits grenzwertig belastet und mit sehr geringen Sicherheiten behaftet. Ist für diese Bauteile der Bauraum begrenzt, kann mit derzeitigem Wissensstand, eine Anwendung von Kunststoffen ausgeschlossen werden. Ein weiteres häufiges Ausschlusskriterium mit 29 % ist eine geringe Masse (unter 10 g) einhergehend mit geringen Herstellkosten.



#### 4. Potentialerhebung

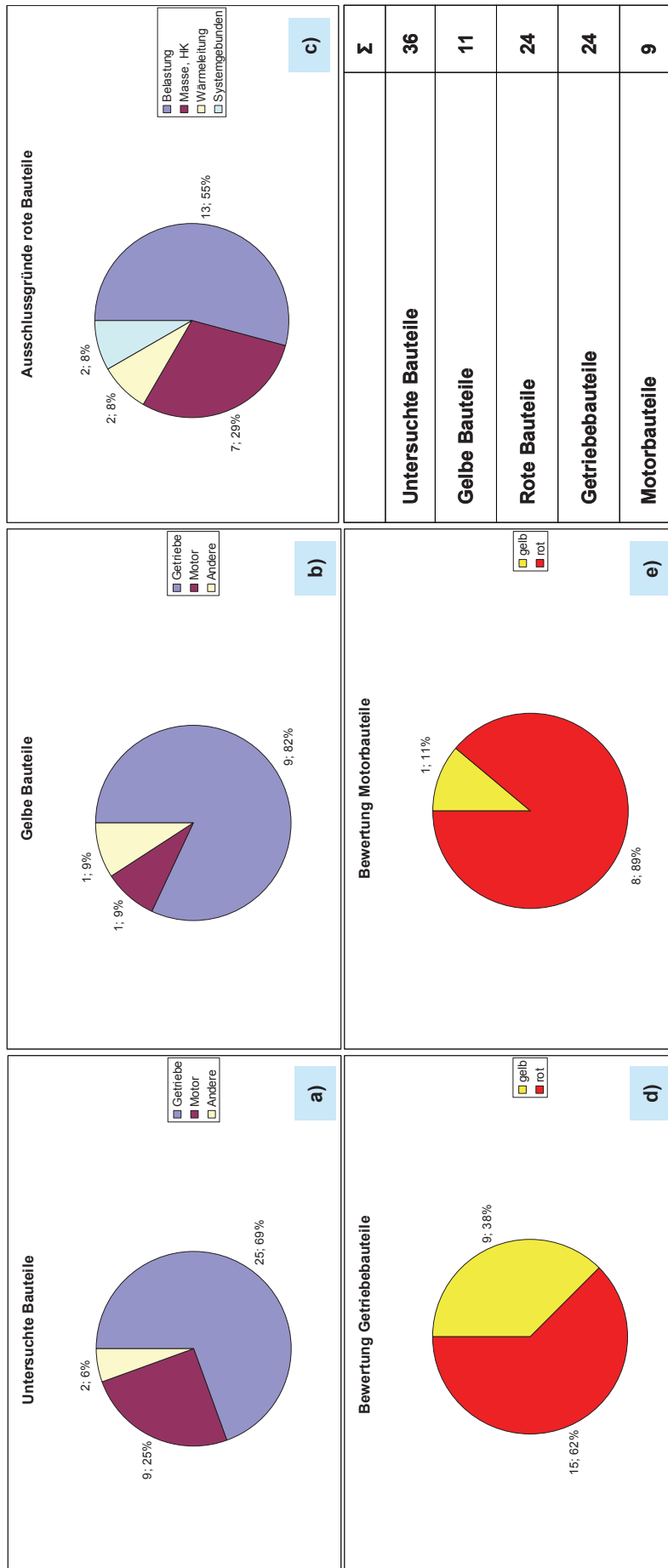


Abbildung 19: Statistische Bewertung TE 60

### 4.2.6 Ergänzung

Der Zylinderstift 202193 wurde von einer möglichen Substituierung ausgeschlossen. Gründe dafür sind das geringe Gewicht und die kostengünstige Herstellung aus Stangenmaterial.

Der Stift ist das Verbindungsglied zwischen Erregerkolben und Pleuelstange. Diese beiden Elemente werden aus PA66-CF20 hergestellt. Der Punkt an dem die Luftfeder den größten Druck aufweist, stellt die kritische Belastung für den Kurbelantrieb dar. In Abbildung 20 sind die Belastungsfälle für den maximalen Luftfederdruck und die Belastung des Bolzens bei der Rückwärtsbewegung durch die Beschleunigung des Kolbens und des Bolzens skizziert.

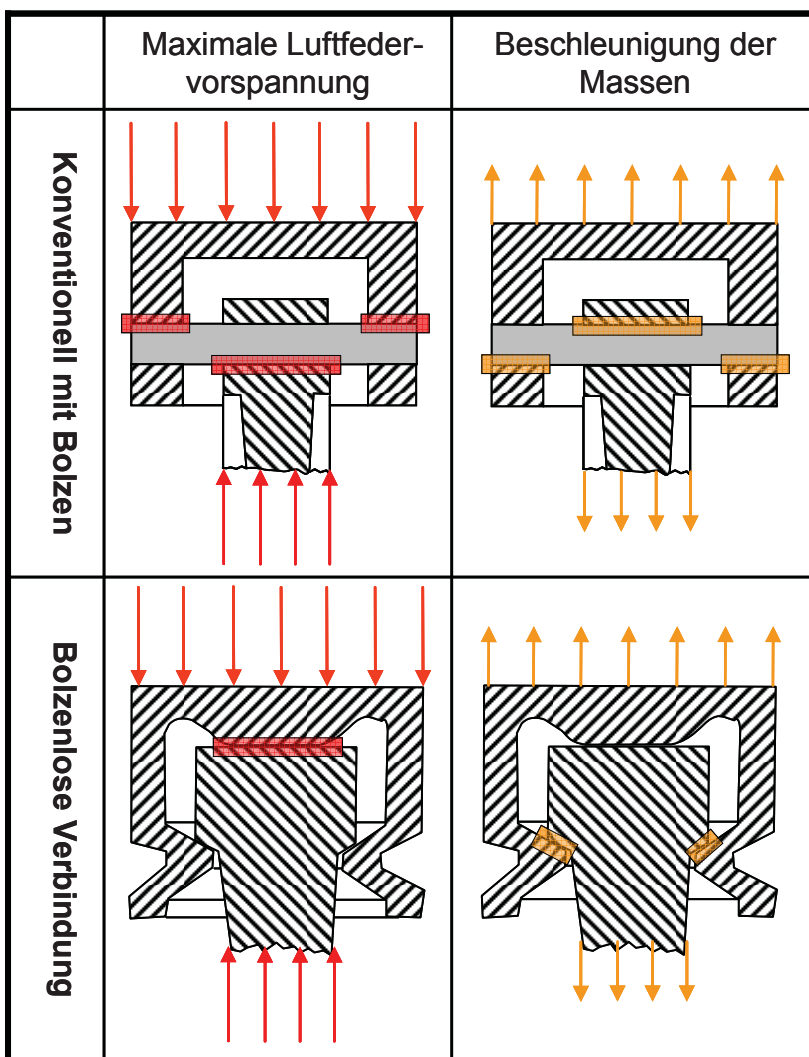


Abbildung 20: Wirkflächenpaare mit und ohne Kolbenbolzen (Zylinderstift)

Eine Substitution des Stahlbolzens macht, wie oben beschrieben, wenig Sinn. Das Weglassen des Bauteils bringt jedoch viele Vorteile. In Abbildung 20 sind

einige der Vorteile ersichtlich. Die hohe Druckbelastung kann durch direkte Lagerung des Pleuels im Zylinder auf direktem Wege abgeleitet werden. Form und Größe der Wirkflächen können dabei frei gewählt werden. Der andere Belastungsfall, vereinfacht als Zug zu beschreiben, kann über wesentlich kleinere Wirkflächen übertragen werden. Dieser Umstand lässt die Möglichkeit einfacher Montageszenarien zu. Die einfachste Möglichkeit ist das Einschieben des Pleuels in den Befestigungsraum des Zylinders und eine Arretierung durch eine Drehung um 90 Grad. Hier können die Konstruktionsfreiheiten, die Kunststoffe bieten, voll genutzt werden. Trotzdem ist auf eine kunststoffgerechte Konstruktion zu achten. Der Fertigungsaufwand soll ebenso durch geschicktes Konstruieren minimiert werden.

Neben der Reduktion der bewegten Masse des Kurbelantriebs, können die davon abhängigen Belastungen (im zweiten Belastungsfall) minimiert werden. Der Wirkungsgrad des gesamten Schlagwerkes wird dadurch erhöht. Die vereinfachte Montage bringt, wie das Wegfallen eines ganzen Bauteils, Kosteneinsparungen.

### **4.3 Potentialerhebung der gesamten TE Flotte**

Die in Kapitel 4.2 gemachten Erfahrungen werden für die Potentialerhebung der restlichen Geräte, laut Tabelle 2, genutzt. Die Herausforderung ist die Darstellung der Potentiale in einer Form, die eine Vergleichbarkeit der Geräte zulässt.

Die Motivation zur Durchführung der Erhebung, ist eine Zentralisierung und Vereinheitlichung der unterschiedlichen Substitutionsbestrebungen. Aufbauend auf einem Dokument, sollen sämtliche Erfahrungen, Informationen und Daten, die in den verschiedenen Entwicklungsteams generiert werden, gesammelt und zugänglich gemacht werden. Die Vorgangsweise wird in Absatz 4.3.1 beschrieben.

#### **4.3.1 Vorgangsweise**

Die Vorgangsweise wird sehr detailliert beschrieben. Diese Beschreibung soll neben der dokumentativen Funktion, auch als Anleitung für die Durchführung weiterer Erhebungen verwendet werden. Durch die Vielzahl der untersuchten Geräte, konnte die Vorgehensweise optimiert werden. Oft durchgeführte Befehle und Funktionen wurden zum Teil in Makros abgebildet. Der entsprechende Quelltext wird in dieser Arbeit angeführt, um diesen einfach zugänglich zu machen.

##### 4.3.1.1 Farbige Einteilung

An dieser Stelle kann auf die in Abschnitt 4.2 erarbeitete Vorgangsweise zurückgegriffen werden. Zu Beginn wird die Stückliste des gesamten Geräts aus dem CID in eine Excel-Datei exportiert. Trotz der Festlegung des Substitutionsbereiches auf Getriebe, Schlagwerk und Werkzeugaufnahme, wird der Vollständigkeit halber, die gesamte Liste exportiert. Die unnötigen Bereiche der Stückliste können mittels der bereits bekannten „AutoFilter“-Funktion ausgeblendet werden. Um diese Funktion verwenden zu können, muss sie erst aktiviert werden. Dazu wird die oberste Zeile der exportierten Liste (Eigenschaftszeile) markiert und im Pulldown-Menü Daten→Filter die Funktion „AutoFilter“ durch klicken auf die entsprechende Eintragung aktiviert. Die Wiederholung des Vorgangs deaktiviert die Funktion.

Eine Spalte muss eingeführt werden, in der jede relevante Zeile der Stückliste zum Beispiel durch ein „x“ markiert wird. Im Auswahlmenü des „AutoFilters“ dieser Spalte, kann auf den Eintrag „nichtleere“ geklickt werden. Durch diesen Befehl werden nur mehr Zeilen angezeigt, die in dieser Spalte eine Eintragung haben. Die uninteressanten Bereiche der Stückliste werden gefiltert, können aber jederzeit wieder durch Anklicken des Eintrags „alle“ im Pulldown Menü des „Autofilters“ dieser Spalte angezeigt werden. Auf diese Art kann auch sehr einfach zwischen Einträgen der Spalte „Sachart“ gewechselt werden. In einer neuen Spalte werden die Werkstoffe in Metalle, polymere Materialien und Schmierstoffe eingeteilt. Dazu werden alle „Teile“ laut Spalte „Sachart“ ausgeblendet. Werden nur die Teile eingebledet, wird diesen in einer neuen Spalte das Attribut „Einzelteil“ zugeteilt. Jede Stückliste enthält mehr Einträge als Einzelteile, darum werden die zu betrachtenden Einzelteile in diesem Schritt markiert. Die Werkstoffe, die meist eine Zeile unter dem zugehörigen Teil in der Liste zu finden sind, werden jetzt nach oben verschoben. Dadurch entsteht eine erste Übersicht über die Bauteile und deren Werkstoffe. In einer neuen Spalte werden jetzt in gewohnter Manier Teile markiert, die offensichtlich von einer Werkstoffsubstitution auszuschließen sind. Dazu gehören Normteile wie Schrauben, Nieten oder Federn, aber auch Bauteile wie Döpfer oder Flugkolben, deren Funktion nur mit dem aktuellen Werkstoff gewährleistet werden kann.

Sind die beschriebenen Zuordnungen durchgeführt, können mit „AutoFilter“ beliebige Gruppen angezeigt oder gefiltert werden.

Die Gruppe der polymeren Bauteile wird angezeigt und grün hinterlegt. Die restlichen Einzelteile, die nicht von einer Substitution ausgeschlossen werden, werden gelb gekennzeichnet. Die Vorgangsweise deckt sich mit der in Abschnitt 4.1 beschriebenen.

Die gelben Bauteile sind nun identifiziert und können einer weiteren Betrachtung zugeführt werden. Zur einheitlichen Erfassung der Informationen dient ein Informationsblatt. In diesem Blatt werden die Sachnummer, die Bezeichnung des Bauteils, der Autor, das Datum und die Informationsquellen eingetragen. Um die Einteilung in gelb und rot, wie sie in Abschnitt 4.1 beschrieben wird, machen zu können, werden Kriterien erfasst. Die Kriterien

können mit „+“, „-“ oder „KO“ beurteilt werden. Die Kriterien sind immer auf die Substitution zu beziehen. Ist ein Vorteil beim Gewicht zu erwarten, ist das Kriterium „Gewicht“ mit „+“ zu beurteilen. Sprechen aktuell geringe Herstellkosten gegen eine Substitution ist das Kriterium „Herstellkosten“ mit „-“ zu beurteilen. Sind Kriterien vorhanden, die eine Substitution des Werkstoffs ausschließen, ist im Informationsblatt ein entsprechendes Häkchen bei „KO“ zu setzen. Jedes KO-Kriterium führt unweigerlich zur Verschiebung des Bauteils in den roten Bereich. Zu jedem Kriterium können und sollen Anmerkungen gemacht werden. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit Soll- und Istwerte einzutragen. Tabelle 8 listet die Kriterien. Je nach Bauteil kommt den einzelnen Punkten unterschiedliche Bedeutung zu. Die Beurteilung ist aber immer hinsichtlich der Substitution zu sehen. Ist die Masse eines Bauteils sehr klein, kann das als Ausschlusskriterium gesehen werden. Bringt die Substitution andere Vorteile, kann das Häkchen trotzdem bei „-“ gesetzt werden.

Das Informationsblatt wird für alle bislang gelben Bauteile angelegt und ausgefüllt. Alle Informationen, die darüber hinaus wichtige Inhalte bezüglich des Substitutionspotentials enthalten, werden durch einen Hyperlink mit dem Blatt verbunden (siehe Abschnitt 4.3.1.2).

Nach der Beurteilung können jene Bauteile, die einem KO-Kriterium unterliegen, rot markiert werden. Die an die Ampeldarstellung angelehnte Farbeinteilung ist nun vollständig. Wird eine weitere Spalte mit der Farbbezeichnung angelegt, können die Farben einzeln durch „AutoFilter“ ausgewählt und angezeigt werden.

Die Stückliste ist durch die zusätzlichen Eintragungen zu einer Übersichtsliste für Substitutionsbestrebungen geworden. Weitere Informationen wie Masse, Dichte und andere, können die entstandene Liste beliebig erweitern.

Tabelle 8: Substitutionskriterien

		+	-	KO
<b>Allgemeine Kriterien</b>	Masse			
	Kosten			
<b>Mechanische Kriterien</b>	Spannungen/Verformung			
	Flächenpressung			
	Schläge/Impact			
	Schlagendes Betriebsverhalten			
<b>Physikalische Kriterien</b>	Wärmeausdehnung			
	Wärmeleitung			
	Elektr. Leitfähigkeit			
	Magnetisierbarkeit			
<b>Beeinflussung der Systemeigenschaften</b>	Dämpfungsverhalten			
	Spannungsrelaxation			
	Triboverhalten			
	Steifigkeit			
<b>Sonstige Kriterien</b>	Temperatur			
	Weglassen des Bauteils/Montagevorteile			
	Systemgebunden			
	Raum für Konstr. Änd.			
	Referenz/Erfahrung			
	Funktionsintegration angrenzender Bauteile			

#### 4.3.1.2 Verlinkungen

Verlinkungen sollen die Handhabung der gesammelten Daten erleichtern. Hyperlinks bieten eine sehr einfache Möglichkeit, Dateien miteinander und Informationen innerhalb einer Datei zu verbinden. Die Einfachheit der Erstellung von Hyperlinks birgt jedoch auch Nachteile, auf die im Folgenden hingewiesen wird. Beim Umbenennen und Verschieben der Dateien und Ordner werden die Bezüge der Hyperlinks je nach Einstellung angepasst oder auch nicht. Dadurch können alle gesetzten Hyperlinks unwirksam werden und es ist sehr aufwendig, sie wieder einzeln anzupassen. Um dieser Gefahr entgegenzuwirken, muss eine einheitliche Ordnerhierarchie eingehalten werden. Abbildung 21 zeigt diese Hierarchie. Alle wichtigen Dateien und Ordner werden im Ordner „Substitution“ hinterlegt. In diesem Ordner befindet sich eine Excel-Datei, in der die Potentiale aller Bauteile zusammengefasst und dargestellt werden. Ein Ordner beinhaltet „weiterführende Informationen“ beliebiger Art. In einem weiteren Ordner werden, wie dargestellt, in Geräte

gegliedert, die Informationsblätter hinterlegt. Die Informationsblätter werden nach ihrer Sachnummer benannt. Dadurch wird Doppelbenennungen vorgebeugt.

Die hohe Anzahl vorhandener Informationsblätter macht es sehr mühsam, das entsprechende Blatt zu finden. Die Excel-Datei „Potentiale“ wird daher als interaktive Plattform genutzt, von der auf alle relevanten Daten mittels Hyperlink zugegriffen werden kann.

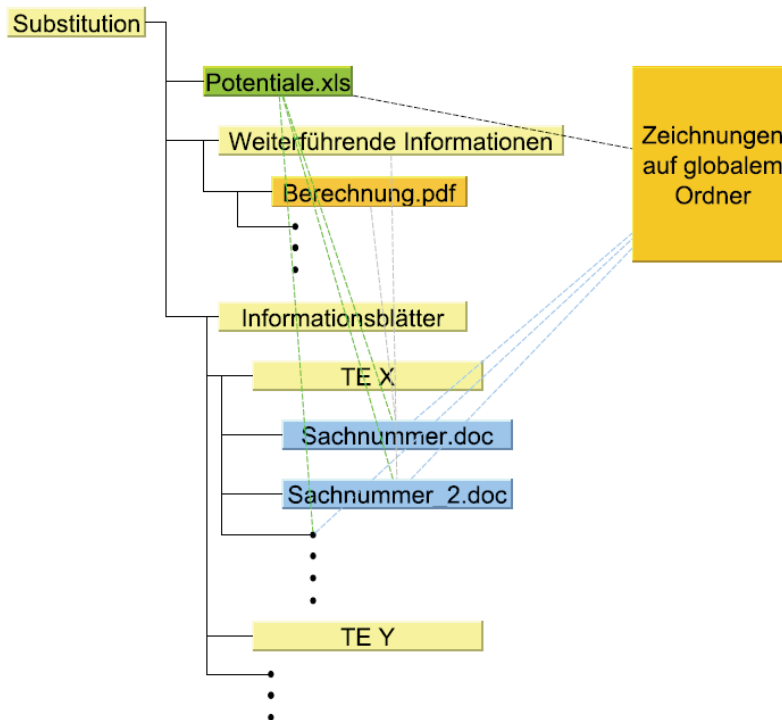


Abbildung 21: Ordnerhierarchie mit Verlinkungen

Die gestrichelten Linien in Abbildung 21 stellen Verbindungen durch Hyperlinks dar. Die Excel-Datei Potentiale.xls bildet die Basis eines Bauteils. Informationen zum Bauteil sind an drei weiteren Stellen zu finden. Im Informationsblatt befinden sich kompakt die wichtigsten Informationen. Detaillierte Berechnungen und Untersuchungen sind unter „Weiterführende Informationen“ zu finden. Ein weiterer Anhaltspunkt ist die Zeichnung des aktuellen Teils. Hier finden sich sämtliche Abmessungen und Toleranzen. Baugruppenzeichnungen vermitteln ein Gefühl für die Einbausituation und geben Aufschluss über den vorhandenen Bauraum.

Der detaillierte Aufbau von Potentiale.xls ist in Abschnitt 4.3.2 beschrieben. Um den Aufbau des verlinkten Netzwerks zu beschreiben, sei vorweggenommen, dass die Exceldatei die Basis bildet.

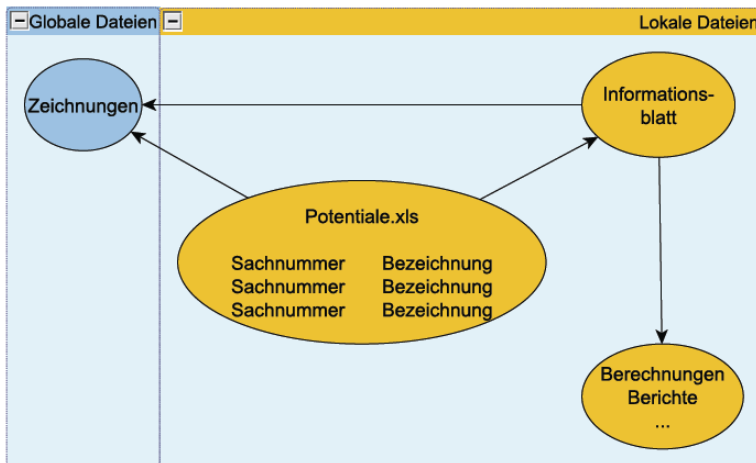


Abbildung 22: Verlinkung

Die Excel-Datei wird direkt mit den Informationsblättern und den Zeichnungen verlinkt (Abbildung 22). Um auch hier wieder einheitlich vorzugehen, wird die Sachnummer mit der Zeichnung verlinkt und die Bauteilbezeichnung mit dem Informationsblatt.

Die Informationsblätter werden ebenfalls mit den Zeichnungen verlinkt. Werden weitere Informationen benötigt, kann vom Informationsblatt auf verlinkte Berechnungen und Berichte zugegriffen werden.

Die Zeichnungen sind alle in einem Ordner hinterlegt, auf den über das Netzwerk zugegriffen wird. Diese müssen daher nicht lokal gespeichert werden. Dadurch wird die Datenmenge stark verringert. Das lokale Abspeichern der Informationsblätter im Ordner „Substitution“ kann nicht umgangen werden. Hyperlinks zu lokalen Dateien werden händisch gesetzt. Die Verbindung mit den Zeichnungen wird durch Makros automatisiert.

Die Makros werden in „Visual Basic for Application“ (VBA) programmiert. Ein Makro beinhaltet einen VBA-basierenden Programmcode, der auf Microsoft-Anwendungen bezogene Befehle ausführt. Abbildung 23 bildet den Code ab.



## 4. Potentialerhebung

```
Sub hyperlink()  
  
Dim name As String  
Dim link_adr As String  
Dim buchstabe As String  
Dim fNummerFeld(9) As String  
Dim fBuchstabeFeld(26) As String  
Dim i As Long  
Dim j As Long          'Variablen Deklaration  
  
fNummerFeld(1) = "99999999"  
fNummerFeld(2) = "00044999"  
fNummerFeld(3) = "00069999"  
fNummerFeld(4) = "00075999"  
fNummerFeld(5) = "00075999"  
fNummerFeld(6) = "00201999"  
fNummerFeld(7) = "00207999"  
fNummerFeld(8) = "00239999"  
fNummerFeld(9) = "00289999"          'Zuweisen der Ordnerbezeichnungen  
  
name = Selection.Text          'Weist "Name" die markierte Zahl zu  
  
j = 10  
i = 1  
Do          ' Ordner werden nach der aktuellsten Eintragung abgesucht  
  
    If j = 19 Then  
  
        GoTo ende          'Sicherheitseinrichtung  
        'springt im Programm zu ende:  
  
        Exit Do  
    End If  
  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "a" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "a"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "b" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "b"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "c" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "c"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "d" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "d"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "e" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "e"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "f" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "f"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "g" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "g"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "h" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "h"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "i" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "i"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "j" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "j"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "k" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "k"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "l" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "l"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "m" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "m"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "n" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "n"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "o" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "o"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "p" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "p"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "q" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "q"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "r" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "r"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "s" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "s"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "t" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "t"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "u" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "u"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "v" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "v"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "w" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "w"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "x" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "x"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "y" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "y"  
    If Dir("\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & "z" & "_11.gp4") <> "" Then buchstabe = "z"  
  
        j = j + 1  
        i = i + 1  
  
    Loop Until buchstabe <> ""          ' Schleife wird durchgeführt bis der Variablen "Buchstabe" ein Buchstabe zugewiesen wird  
  
    i = i - 1  
  
    link_adr = "\\Duc6.kaufering.hilti.com\cidview\cidview\" & fNummerFeld(i) & "\" & "zez_" & name & "_" & buchstabe & "_11.gp4"  
    'Weist "link-adr" den Pfad zu  
    SetZLink:          'Setzt den Hyperlink durch zuweisen von "link_adr"  
        ActiveDocument.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection.Range, Address:= _  
            link_adr, TextToDisplay:=name  
    endSetZLink:  
    GoTo endsub  
  
    ende:  
    MsgBox "Nix gefunden!"          'gibt die Fehlermeldung aus, wenn kein Eintrag gefunden wurde  
    endsub:  
  
End Sub
```

Abbildung 23: Quelltext für Makro „Hyperlink()“ in Microsoft Word

Das Makro sucht nach Dateinamen in den angegebenen Ordnern, die mit einer markierten Zahl übereinstimmen. Diese Zahl entspricht der Sachnummer eines Bauteils. Jede Zeichnung wird bei einer Änderung mit einem fortlaufenden Buchstaben als Index versehen. Die Dateien werden nach dem höchsten Index (in alphabetischer Reihenfolge) durchsucht und der Dateiname mit dem höchsten Index, gemeinsam mit dem Pfad als Hyperlink, der markierten Zahl zugeordnet. Um das Makro ausführen zu können, wird es im VBA-Editor erstellt. Dieser findet sich unter *Extras* → *Makro* → *Visual Basic*

*Editor.* Im Projektfenster wird im Ordner „Module“ ein neues Modul angelegt. Im Eingabefenster wird der Quelltext erstellt. Unter *Debuggen* → *Kompilieren von Normal* wird kompiliert.

Wird in Word eine Zahl markiert und unter Extras → Makro → Ausführen das Makro ausgeführt, wird die markierte Zahl unterstrichen und blau. Das entspricht der Formatierung für einen mit einem Hyperlink versehenen Text. Alternativ erscheint die Fehlermeldung „Nichts gefunden“ was darauf hinweist, dass entweder die markierte Sachnummer nicht, oder keine Zeichnung zur Nummer existiert. Es ist darauf zu achten, dass ausschließlich die Zahlen (keine Leerzeichen) markiert werden.

Wird auf den Link geklickt, öffnet sich eine lokale Kopie der Zeichnung, wie es in gleicher Weise beim Aufrufen einer Zeichnung aus dem CID geschieht.

Die Vorgehensweise in Excel unterscheidet sich nur dadurch, dass nur das Feld, in der die gesuchte Sachnummer steht, zu markieren ist.

### 4.3.2 Potentialtabelle

Die große Anzahl an gesammelten Informationen zu den Substitutionspotentialen der Bauteile, stellt hohe Ansprüche an die Darstellung. Die Einteilung in die Farben der Ampel ist ein erster Schritt zur Vereinfachung der Darstellung. Zusätzlich bietet sich eine tabellarische Darstellung an, die eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Geräte ermöglicht. Um die Forderung nach Benutzerfreundlichkeit und leichter Zugänglichkeit zu erfüllen, wird das MS-Office Programm Excel genutzt.

Die Datei „Potentiale.xls“ wurde bereits in Abschnitt 4.3.1.2 eingeführt. Kernstück und Basis dieser Datei stellt die Übersichtsliste mit Potentialen dar. Die Darstellung erfolgt in einer Matrix, in der die Spalten die Geräte abbilden und die Zeilen die Bauteile. Da die Geräte in ihrem funktionellen Aufbau einander oft ähneln, werden vergleichbare Bauteile unterschiedlicher Geräte in der gleichen Zeile abgebildet. In Kombinationen mit der farblichen Einteilung ergibt sich ein erster Eindruck vom Ist-Zustand der Anwendung polymerer Werkstoffe für Bauteile. Ist in einer Zeile ein grünes, also polymeres Bauteil zu finden, liegt der Verdacht nahe, vergleichbare Bauteile in anderen Geräten, die aktuell noch aus Stahl oder aus anderen Metallen sind, substituieren zu können. Farblich ist das daran zu erkennen, dass sich grüne und gelbe Bauteile in derselben Zeile befinden.

Je mehr Geräte ein vergleichbares, substituierbares Bauteil enthalten, desto größer ist der Vorteil. Der Entwicklungsaufwand für ein Bauteil sinkt erheblich, wenn ein Vergleichbares eines anderen Gerätes bereits Verwendung findet. Die Anordnung und Färbung der Bauteile ermöglicht das optische Erkennen dieses Zusammenhangs.

Für eine verbesserte Übersichtlichkeit werden die Bauteile in Bereiche zusammengefasst, die dem Anwender das schnellere Auffinden eines Bauteils ermöglichen. Der erste Bereich umfasst Bauteile die dem „Drehantrieb“

angehören. Davon werden Teile des „Schlagwerkantriebs“ unterschieden. Das „Schlagwerk“ bildet mit den zugehörigen Bauteilen eine weitere Kategorie. Die hoch belasteten Bauteile des Schlagwerks werden dem gleichnamigen Bereich zugeordnet. „Gussteile“ werden aufgrund ähnlicher Anforderungen zusammengefasst. Alle Bauteile die zu keiner der bereits erwähnten Kategorien zuzuordnen sind, werden der „Peripherie“ zugeordnet.

Abbildung 24 bildet die beschriebene Tabelle ab. Sie ist direkt der Excel-Datei „Potential.xls entnommen“. Die Tabelle ermöglicht einen ersten Überblick über die Potentiale. Wie im Abschnitt 4.3.1.2 bereits erläutert wurde, wird für einen umfassenden Informationsgewinn, die Tabelle mit Verlinkungen versehen. Jede der Sachnummern ist mit der Zeichnung verbunden. Jede Bezeichnung der gelben und roten Bauteile ist mit dem entsprechenden Informationsblatt verbunden. Somit sind Informationen zum Bauteil direkt zugänglich. Für einen Überblick der Anordnung der Bauteile im betrachteten Gerät, werden in „Potentiale.xls“ die exportierten Stücklisten hinterlegt. Über das angedeutete Bild des Gerätes am oberen Ende der Tabelle, wird die verlinkte Stückliste aufgerufen. Die Liste enthält, wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, ebenso die Einteilung nach den Ampelfarben.

#### 4. Potentialerhebung

Bereich		TE 60 03		TE 30 C 01		TE 40 01		TE 50 02		TE 70 02 + TE 80	
Gerät		SachNr.	Bezeichnung	SachNr.	Bezeichnung	SachNr.	Bezeichnung	SachNr.	Bezeichnung	SachNr.	Bezeichnung
Drehantrieb	356039	Muffe	344475	Kupplungsmuffe	208539	Kupplungsmuffe	208539	Kupplungsmuffe	237994	Muffe	
	354941	Zahnrad z=29							202087	Zahnrad Z39	
	354952	Lagerbuchse	344768	Lagerbuchse 30X38,5X8,5	316019	Lagerbuchse	316019	Lagerbuchse	366841	Lagerbuchse	
	356030	Kupplungsnahe	344467	Kupplungsring	209385	Kupplungsringinnen	209385	Kupplungsringinnen	366884	Kupplungsnahe	
	354930	Hebel	344468	Kupplungsring	209388	Kupplungsring aussen	209388	Kupplungsring aussen	366887	Hebel	
			344471	Ring							
	393882	Kupplungszahnrad	344782	Zahnrad Z=41 *SINT*	208549	Zahnrad Z=51	208549	Zahnrad Z=51	202095	Zahnrad Z57	
			344476	Kupplungsring	208581	Kupplungsring	208581	Kupplungsring	366869	Kupplungsscheibe	
									237996	Kupplungsring	
	393838	Kegehrad	344751	Kegehrad Z=38	389868	Kegehrad Z=37	389868	Kegehrad Z=37	366896	Kegehrad	
393837	Kegehrzahn	344750	Kegehrzahn Z=9	208582	Kegehrzahn Z=7	208582	Kegehrzahn Z=7	396874	Kegehrzahn		
								330467	Nabe		
Schlagwerk	366228	Pleuel	344759	Pleuel	208554	Pleuel	208554	Pleuel	26009	Pleuel	
	202193	Zylinderstift 7X23	76406	Zylinderstift 7X20	202193	Zylinderstift 7X23	202193	Zylinderstift 7X23	26010	Kolbenbolzen	
	354989	Zahnrad z=18							202086	Zahnrad Z23	
	354940	Zahnrad z=43	344783	Zahnrad Z=32 *SINT*	208547	Zahnrad Z=47	208547	Zahnrad Z=47	366832	Zahnrad z=46	
			344760	Kupplungsmuffe	208548	Kupplungsmuffe	208548	Kupplungsmuffe			
	356028	Exzenter	344764	Exzenter	208545	Exzenter	208545	Exzenter	368863	Exzenter	
			044022	Ölring							
Schlagwerk	345232	Dämpfelement							345232	Dämpfelement	
	359347	Zenterring	347159	Kappe	208994	Kappe	208552	Kappe	345209	Dämpfelement	
									366876	Zenterring	
	356042	Ring							366627	Ring	
	366236	Scheibe 37.6X18.5X5	344800	Anschlag	208543	Anschlag Bremse	208543	Anschlag Bremse	366631	Scheibe	
					208586	Ring Bremse	208586	Ring Bremse			
	356004	Anschlag	344804	Ring	208535	Ring	208535	Ring	366851	Anschlag	
			203378	Anschlag							
			344703	Abstützung	208536	Abstützung	208536	Abstützung	366837	Scheibe	
	354979	Käfig	344774	Stützscheibe	316117	Stützscheibe	316117	Stützscheibe	345233	Käfig	
	354956	Führungsrohr	344462	Führungsrohr	208962	Führungsrohr	208964	Führungsrohr	366856	Führungsrohr	
					208961	Führungsrohr	208963	Führungsrohr			
	366225	Erregerkolben	347276	Erregerkolben	76174	Erregerkolben	76174	Erregerkolben	345151	Erregerkolben	
		344777	Ring								
366241	Lagerbuchse							206090	Lagerbuchse		
366253	Lagerbuchse							330137	Lagerbuchse		
Werkzeugaufnahme	354984	Federführung					208846	Federführung	330100	Federführung	
	366138	Dämpfelement					366138	Dämpfelement	330114	Dämpfelement	
	354987	Kappe	347279	Kappe TE16 T	272920	Kappe	366264	Kappe	330047	Kappe	
	330050	Abdeckkappe	348215	Grundkörper			330050	Abdeckkappe	330050	Abdeckkappe	
			287339	Staubabweiser	272923	Staubschutzkappe					
	330048	Ring	344796	Ring innen	344796	Ring innen	330048	Ring	330048	Ring	
			347283	Verriegelung	272921	Verriegelung vorne					
	330051	Scheibe	347983	Scheibe 20	391291	Scheibe 17,3	330051	Scheibe	330051	Scheibe	
	345238	Klinke MIM	223433	Kugel 8 G20			345238	Klinke MIM	345238	Klinke MIM	
					71473	Kugel 4 G40	71473	Kugel 4 G40	330046	Klinke	
			17972	Kugel 7 G20	17972	Kugel 7 G20	17972	Kugel 7 G20			
	399335	Werkzeugaufnahme	347278	Werkzeugaufnahme	272919	Werkzeugaufnahme	272919	Werkzeugaufnahme	366843	Werkzeugaufnahme/Rohrteil	
			344795	Ring aussen	390873	Kappe hinten	390873	Kappe hinten			
					390876	Stützring	390876	Stützring			
			347284	Verschleißblech	391321	Verschleißblech 19,5	391321	Verschleißblech 19,5			
			347997	Stützscheibe							
						330166	Kappe				
Gussteile	399331	Getriebegehäuse Rohrtail	344766	Getriebegehäuse Fertig	208527	Getriebegehäuse Fertig	208527	Getriebegehäuse Fertig	366821	Getriebegehäuse Fertig	
	395003	Flansch Fertig							366867	Flansch Fertig	
	356095	Lagerschild ATC Alu Fertig	344692	Lagerschild Fertig	208568	Lagerschild Fertig	208568	Lagerschild Fertig			
Peripherie	356038	Schaltheise	344762	Schaltheisen	208593	Schaltheisen	208593	Schaltheisen			
	356036	Drehknopf	344761	Biechteil	209382	Biechteil	209382	Biechteil			
	356035	Exzenter	344770	Schaltschalter	208555	Schaltschalter	208555	Schaltschalter	366875	Exzenter	
			347819	Bügel							
	355005	Griffstück							366866	Griffstück	
	359329	Verschleusstopfen									
354992	Biechteil										
354976	Lagerbuchse										

Abbildung 24a: Übersichtstabelle Substitutionspotentiale

## 4. Potentialerhebung

TE 300 01		TE 500 01		TE 706 01		TE 1000 01		TE 2 M 02		TE 6 A 03	
SachNr.	Bezeichnung	SachNr.	Bezeichnung	SachNr.	Bezeichnung	SachNr.	Bezeichnung	SachNr.	Bezeichnung	SachNr.	Bezeichnung
344476	Kupplungsring	208614	Muffe	345205	Muffe			327530	Schalthülse M		
203291	Lagerbuchse										
344469	Kupplungsring							327587	Kupplungsring	327587	Kupplungsring
								327506	Kupplungsring		
								327509	Ring		
344476	Kupplungsring			345223	Anschlag			327528	Zahnrad Z=31	329612	Zahnrad Z=31
								327555	Boizen		
								327507	Zahnradblock M	368787	Kegetrad Z=33
								327533	Zahnrad Z=18	329742	Kegetrad Z=7
								327531	Vorgelegewelle		
								327551	Buchse M		
344759	Pleuel	366228	Pleuel	330395	Pleuel	330633	Pleuel			329673	Pleuel
76406	Zylinderstift 7X20	202193	Zylinderstift 7X23	26010	Kolbenbolzen	330598	Kolbenbolzen			329746	Zylinderstift 6x20
344783	Zahnrad Z=32 "SINT"	208605	Zahnrad Z=47	345168	Zahnrad Z=46	330796	Zahnrad Z=53			329611	Zahnrad Z=26
						330982	Zahnrad Z=26				
						330668	Zahnrad Z=41			362678	Kupplungsmuffe
344760	Kupplungsmuffe									418998	Exzenter
344764	Exzenter	208616	Exzenter	345135	Exzenter	330665	Exzenter e=23,5				
344822	Stützring							327705	Taumlager M		
347159	Kappe	345232	Dämpfelement	330114	Dämpfelement						
		208607	Kappe	345232	Dämpfelement						
		366355	Zentriertring								
		208595	Anschlag	345228	Anschlag						
344800	Anschlag	366236	Scheibe 37,6X18,5X5	345211	Scheibe	330764	Dämpfring			393826	Scheibe TE 6-A / TE 2-A (2)
344804	Ring									418728	Stützring
203378	Anschlag	208608	Anschlag Alu			330939	Anschlag 2105				
344703	Abstützung										
344774	Stützscheibe			345235	Scheibe					75682	Scheibe 30x30,1x1,5
				345233	Käfig	330842	Käfig				
344462	Führungsrohr	208958	Führungsrohr	345214	Führungsrohr	330833	Führungsrohr 1000 Fertig	327501	Führungsrohr M	393817	Führungsrohr TE 6-A / TE 4-A
347276	Erregerkolben	366225	Erregerkolben	345151	Erregerkolben	330596	Erregerkolben	327566	Erregerzylinder	393822	Erregerzylinder TE 6-A / TE 2-A (2)
344777	Ring							327670	Bolzen		
								327675	Scheibe 11,1x19x0,9		
				345225	Federführung	330856	Führungsring				
				345209	Dämpfelement						
347279	Kappe TE16 T	366264	Kappe	330047	Kappe	330804	Kappe	341160	Kappe	341190	Kappe
348215	Grundkörper	330050	Abdeckkappe	330050	Abdeckkappe	330961	Schutzkappe	341164	Ring aussen	341164	Ring aussen
287339	Staubabweiser					330960	Staubschutzkappe	341158	Staubschutzkappe	341158	Staubschutzkappe
344796	Ring innen	330044	Ring	330044	Ring			250674	Ring	326674	Ring
347283	Verriegelung					362242	Scheibe 34,3x5x3	341162	Verriegelung	341162	Verriegelung
347983	Scheibe 20	330051	Scheibe	330051	Scheibe	330962	Haltering				
223433	Kugel B G20	345238	Klinee MIM	345238	Klinee MIM						
13972	Kugel F G20										
347278	Werkzeugaufnahme	208956	Werkzeugaufnahme Y	345210	Werkzeugaufnahme Fertig	330602	Werkzeugaufnahme	341156	Werkzeugaufnahme	341156	Werkzeugaufnahme
344795	Ring aussen										
347264	Verschussblech							341161	Verschussblech	341161	Verschussblech
347997	Stützscheibe					70125	Welle				
						330940	Dichtungsträger				
						330941	Scheibe 21,5x33,6x1,5				
						330964	Hülse				
344766	Getriebegehäuse Fertig	208612	Getriebegehäuse Fertig	345129	Getriebegehäuse Fertig			327540	Getriebegehäuse innen	401289	Getriebegehäuse Fertig
				345218	Flansch Fertig	330762	Flansch S	327541	Getriebegehäuse aussen		
344692	Lagerschild Fertig	208568	Lagerschild Fertig	345131	Lagerdeckel Fertig	330834	Lagerdeckel Fertig				
344762	Schaltblech										
344761	Blechteil			234229	Verschlusschraube			327537	Zylinderstift		
344770	Schaltstange Schalter	208604	Exzenter	345440	Exzenter			327543	Schaltblech		
								327538	Schaltblech		
347819	Bügel							327592	Raste		
								327522	Hülse Fertig	329666	Schaltstange
										329674	Schalter
										356415	Einsatz
				345237	Zwischenstück	330807	Federabstützung				
				73454	Verschusschraube	330660	Gelenkarm hinten				
						330662	Deckel			365531	Gehäuseschale Rohrt
				345161	Lüfter						
				345162	Lüfterdeckel						

Abbildung 24b: Übersichtstabelle Substitutionspotentiale

### 4.3.3 Systematik der Bewertung

Die Bewertung von Bauteilen nach Substitutionspotential wurde für diese Arbeit vielfach wiederholt. Dabei hat sich die in Abbildung 25 in Form eines „Flow-Charts“ dargestellte Vorgangsweise bewährt. Es werden, den Pfeilen folgend, Entscheidungsfragen abgearbeitet. Kann eine Frage mit „ja“ beantwortet werden, wird dem grünen Pfeil gefolgt. Kann die Frage nur mit „nein“ beantwortet werden, muss dem roten Pfeil gefolgt werden.

In der Abarbeitungsstruktur wird zu Beginn nach Vorteilen gesucht. Diese sind, wie bereits in der Einleitung beschrieben, in Form von Gewichts- und Kostensenkung wirtschaftlich sinnvoll. Erweitert werden Vorteile an dieser Stelle um „sonstige Vorteile“, die ebenfalls als Verkaufsargument verwendet werden können und somit wieder zu wirtschaftlichen Vorteilen führen.

Sind Vorteile vorhanden, wird im nächsten Schritt die Eignung von polymeren Werkstoffen überprüft. Um die Anforderungen erfüllen zu können, werden Konstruktionsänderungen und Hybridbauweise in Betracht gezogen.

Diese Systematik verbindet wirtschaftliche Gesichtspunkte mit technischen Anforderungen.

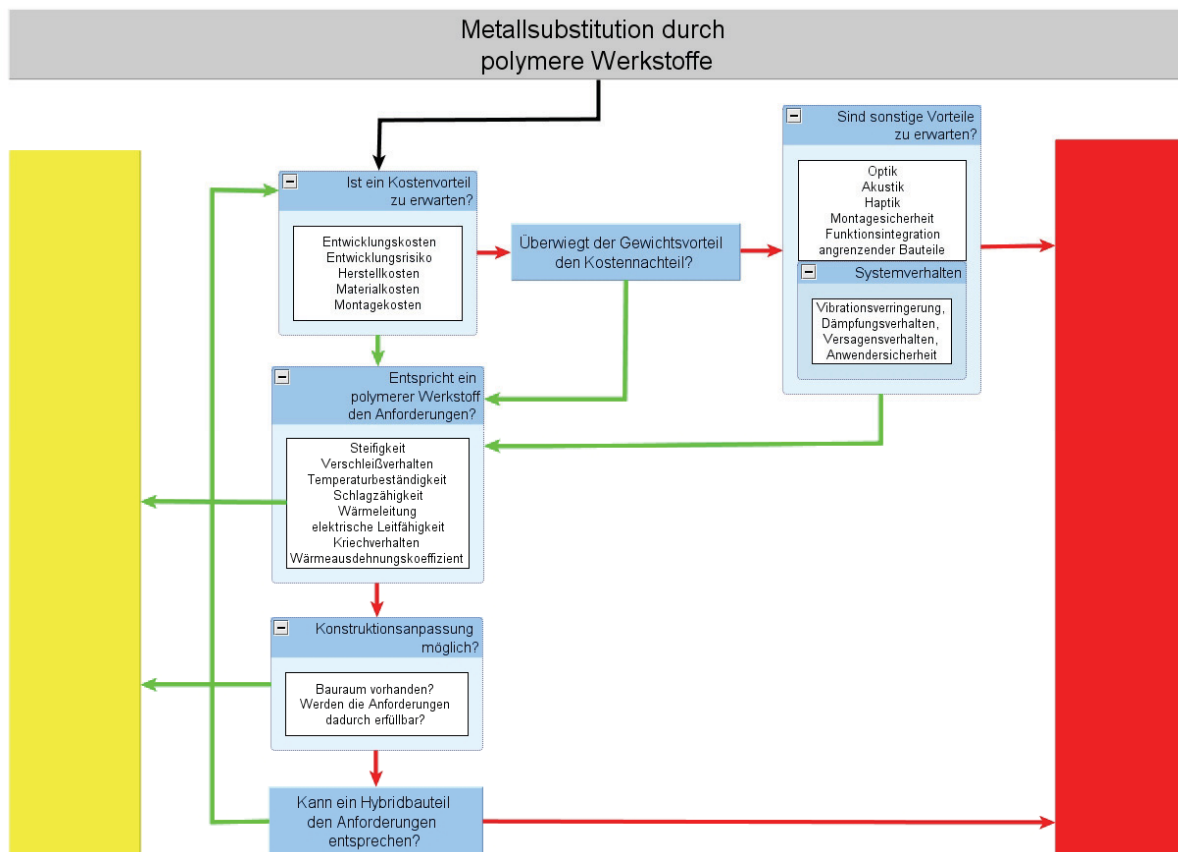


Abbildung 25: „Flow-Chart“ für die Bauteilbewertung nach Substitutionspotential

Nach der Abarbeitung der Fragen folgt die Einteilung in das Farbschema. Gelb steht, wie bereits erläutert, für Bauteile mit Substitutionspotential. Rot schließt das betrachtete Teil von einer Substitution aus.

#### 4.3.4 Geräteübergreifende Potentiale

Dieser Abschnitt beschreibt gelbe Bauteile, die in mehreren Geräten zu finden sind. Die unterschiedlichen Baugrößen bedingen ebenso unterschiedliche Dimensionen der Bauteile. Funktionen und Anforderungen bleiben jedoch oft vergleichbar.

Bereits in der ersten Zeile des Bereichs „Drehantrieb“ in Abbildung 24a+b befindet sich ein Bauteil, das aufgrund seiner Stellung in der Potentialtabelle als besonders substitutionsrelevant einzustufen ist. Die Muffe, in anderen Geräten als Kupplungsmuffe oder Kupplungsring bezeichnet, ist je nach Gerät, in den grünen oder den gelben Bereich eingeteilt. Da alle Bauteile in derselben Zeile zu finden sind, kann von vergleichbaren Anforderungen ausgegangen werden.

Die Muffen sind in einigen Geräten bereits aus Kunststoff. Während die Bauteile in den Meißelhämmern verschieden zu den Kombihämmern belastet werden, ist die Muffe der TE 60-3 ATC mit den Kupplungsmuffen der TE 30 bis TE 80 vergleichbar. Die prinzipielle Möglichkeit einer Substitution der Muffen durch Kunststoffmuffen wird durch das Vorbild der TE 60 vorweggenommen. Ebenso findet sich die Anleitung für eine erfolgreiche Substitution in Form des Beispiels der TE 60. Die hohen Belastungen an den eingreifenden Zähnen, wurden durch Änderungen der Getriebeanordnung und Konstruktionsanpassungen der Muffe auf ein, für hochgefüllte Polyamide, verträgliches Maß verringert. Gleichartige Anpassungen sind auch für den Einsatz von Kunststoffen in anderen Muffen nötig.

Das Beispiel der Kunststoffmuffe unterstreicht einmal mehr die Notwendigkeit, auf sämtliche Belastungen und Systemeigenschaften eines Bauteils einzugehen, um eine erfolgreiche Werkstoffsubstitution durchführen zu können.

Gleitlagerbuchsen finden sich ebenso in mehreren Geräten. Für alle gelten die folgenden Herausforderungen: Das Produkt aus Gleitgeschwindigkeit und Flächenpressung darf einen zulässigen Wert nicht überschreiten. Zu beachten ist dabei die jeweilige Umgebungstemperatur. Generell kann die Aussage getroffen werden, dass es Gleitlagerwerkstoffe aus Kunststoff gibt, die in TE-Geräten von Hilti eingesetzt werden können. Dabei sind die oft sehr hohen Werkstoffkosten zu beachten. Zusätzlich wirkt sich ein polymeres Gleitlager nachteilig auf die geforderte Wärmeableitung aus. Dieser Einfluss ist zu überprüfen, wenn polymere Werkstoffe eingesetzt werden sollen.

Zahnräder sind ebenso in allen Geräten zu finden. Für die TE-30 und TE-40 wird in Projekten der Einsatz von Kohlefaserverstärkten Polyamiden geprüft. Die Belastungen der Zahnräder sind für eine Substitution ausschlaggebend. Je nach Bereich, werden alle Zähne gleichmäßig oder durch die Funktion des

Schlagwerks, einzelne Zähne wiederholt sehr stark belastet. Daraus ergibt sich die Einteilung in den gelben und roten Bereich. Weitere Belastungsspitzen ergeben sich durch das Durchrutschen der Rutschkupplung. Ist ein Zahnrad von diesen Belastungen betroffen, wird es von Substitutionsbestrebungen ausgeschlossen.

Das Bauteil, das die Abschaltung des Schlagwerksantriebs ermöglicht, ebenso als Kupplungsmuffe bezeichnet, ist durch hohe Flächenpressungen belastet. Beim Schaltvorgang kommt zu den Pressungen eine Schlagbelastung hinzu. Daraus ergeben sich entsprechende Anforderungen an den Werkstoff und Konstruktionsoptimierungen.

Der Exzenter wird in der Umgebung des Zapfens, auf dem das Pleuel läuft, mit hohen Kräften belastet. Dieses Bauteil ist nur in Hybridbauweise denkbar. Die Erfahrung der Konstrukteure zeigt, dass bereits die verwendeten Stahlwerkstoffe kritisch belastet werden.

Der Zylinderstift, in bestimmten Geräten auch als Kolbenbolzen benannt, kann bei Konstruktionsanpassung von Kolben und Pleuel komplett weggelassen werden. Eine Substitution des Werkstoffs bietet keine Vorteile. Wird der Bolzen weggelassen, fallen die entsprechenden Bauteilkosten und Montagekosten weg. Wird das Pleuel direkt im Kolben verankert, besteht das Gelenk aus einer Kunststoff-Kunststoffpaarung. Dabei ergibt sich eine neue Anforderung an den Werkstoff: Die tribologischen Eigenschaften müssen optimiert werden.

Diverse Scheiben, Ringe und Anschläge sind in allen Geräten zu finden. Sie werden hauptsächlich schlagartig auf Flächenpressung beansprucht. Polymere Werkstoffe mit hohen Schlagzähigkeiten müssen für den Nachweis einer Eignung getestet werden. Das Niveau der Belastungen lässt sich in zwei Bereiche teilen: Bauteile die direkt den Leerschlag in das Gehäuse ableiten sind höchst belastet, Bauteile die den rückfedernden Döpper nach erfolgtem Leerschlag abfangen werden geringer belastet. Bei Substitutionsbestrebungen sind Letztgenannte zu bevorzugen.

Die Federführung ist in einigen Geräten bereits aus Kunststoff, in anderen nicht. Daher ist auch diesem Bauteil großes Potential zuzurechnen.

Das Lagerschild wurde bereits in Abschnitt 4.2.3 genauer beleuchtet. Durch das große Volumen und die kostenintensive Herstellung sind die erwarteten Vorteile durch die Verwendung eines polymeren Werkstoffs sehr groß. Entsprechend groß ist auch die Herausforderung dieser Entwicklung.

Gelbe Bauteile sind in allen Geräten zu finden. Die Beschreibung jedes einzelnen sprengt den Rahmen dieser Arbeit. Informationen zu jedem der gelben und roten Bauteile sind dem entsprechenden Informationsblatt (beim Autor erhältlich) zu entnehmen.



## 5 Potentialumsetzung

In der Arbeit wurde bisher die Substitutionserhebung beschrieben. Die Vorgehensweise, die dabei erarbeitet wurde, ist Vorbild und Leitfaden für alle weiteren Substitutionsbestrebungen für Hilti-Geräte. Ebenso dient das erarbeitete Potentialschaubild als Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Bauteils für die Potentialumsetzung. Es wird anhand eines ausgesuchten Teils der Nachweis bezüglich des Vorteils einer Substitution und der prinzipiellen Eignung erbracht. Entsprechend den Ampelfarben, wird das Bauteil bei erfolgreicher Beweisführung und einer anschließenden Substitution vom gelben in den grünen Bereich verschoben. Sollten sich polymere Werkstoffe als ungeeignet erweisen, wird das Teil im gelben Bereich belassen, wenn davon ausgegangen werden kann, dass sich durch weitere Werkstoffentwicklungen zukünftig Anwendungen ergeben, oder in den roten Bereich verschoben, wenn Werkstoffentwicklungen in absehbarer Zukunft nicht zum Ziel führen können.

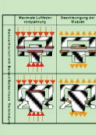
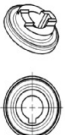



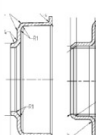

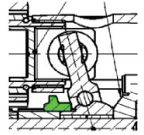
### 5.1 Bauteilauswahl

Die Auswahl eines geeigneten Bauteils für die Umsetzung eines erkannten Substitutionspotentials stützt sich auf die Potentialtabelle (Abbildung 24).

Bevorzugt werden Bauteile, die in möglichst vielen Geräten vorkommen. Wird beispielhaft für ein Gerät der Nachweis erbracht, dass die Metallsubstitution erfolgreich durchgeführt werden kann, ist der Entwicklungsaufwand für die weiteren Geräte viel geringer. Tabelle 9 zeigt eine Auswahl an Bauteilen, die nach diesem Kriterium und weiteren bewertet wurden. Es werden Punkte für erwartete Ersparnisse bei Gewicht und Kosten vergeben. Zusätzlich werden die Umsetzungswahrscheinlichkeit und die Innovativität beurteilt. Die Auswahl berücksichtigt nur Bauteile, die in absehbarer Zeit und mit begrenztem Entwicklungsaufwand evaluiert werden können. Von den acht betrachteten Bauteilen, erweist sich der Zylinderstift, der auch als Kolbenbolzen bezeichnet wird, als das geeignetste Bauteil. Entwicklungsaufwändigere Bauteile, wie das Lagerschild, das bei der Substitution des aktuellen Werkstoffs noch größere Vorteile bei Kosten und Gewicht erwarten lässt, wurden in die Auswahl nicht miteinbezogen.

Die Substitution des Stahlwerkstoffs des Zylinderstifts durch einen polymeren Werkstoff bringt keinen entscheidenden Vorteil. Deshalb wird eine Lösung angestrebt, die das Weglassen des Stifts ermöglicht. Die Funktionalität des Kurbeltriebs muss bei der alternativen Lösung gewährleistet sein.

Tabelle 9: Bauteilauswahl

	Zylinderstift	Schaltmuffe	Anschlag	Käfig	Lagerbuchse	Federführung	Scheibe TE 2M	Schalthülse TE 2M
								
Gewichtseinsparung	+	++	++		++(+)	+		+
Kosteneinsparung	++	+++	++		+	+		++
Vorkommen	+++	++	++	+++	++	+		
Umsetzungswahrscheinlichkeit	++			+	+	+++	++	+
Innovativ	+++	+	+		++		++	+
+ SUMME	11	8	7	4	8	6	4	5
Reihenfolge	1	2	4	8	2	5	7	6

Zusätzlich zu der Gewichtseinsparung durch das Weglassen des Zylinderstiftes und den dadurch wegfallenden Kosten für denselben, wird eine Erleichterung der Montage angestrebt. Diese resultiert ebenso in Kostenreduktion. Die eingesparte Masse wird im Betrieb mit hoher Frequenz bewegt. Dadurch entstehen Vibrationen, die verringert werden können. Am Beispiel des Bolzens kann gezeigt werden, welche Vorteile sich durch die Gestaltungsfreiheit der Kunststoffe generieren lassen. Die Systemeigenschaften können durch geschickten Einsatz positiv beeinflusst werden. Diese Umstände machen dieses Bauteil zu einem geeigneten Untersuchungsobjekt.

## 5.2 Funktion des Kurbeltriebs

Um die angekündigte Veränderung im Verbund der Bauteile des Kurbeltriebs durchführen zu können, wird ein umfassendes Verständnis für die Funktion vorausgesetzt. Dieser Abschnitt erläutert die Funktionen von Pleuel, Kolben und Bolzen.

Die Rotation des Exzenters wird vom Pleuel in eine Translation, des im Führungsrohr geführten Kolbens, umgewandelt. Dabei ist das Pleuel mit je einem Gelenk mit Exzenter und Kolbenbolzen verbunden. Die Verbindung zum Kolben wird über den Kolbenbolzen hergestellt. Zu übertragende Belastungen entstehen durch den Druck in der Luftfeder, Massenkräfte und Reibung.

Abbildung 26 zeigt den Bereich, innerhalb dessen die Konstruktion verändert werden kann, ohne die Funktion zu beeinträchtigen.

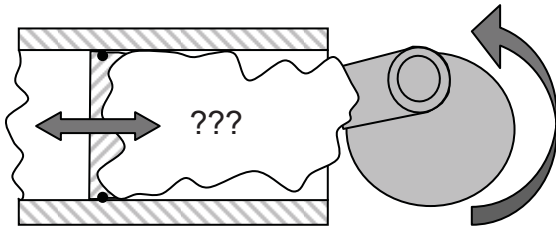


Abbildung 26: *Kreativitätsfreiraum*

Die Rotation des Exzenters ist durch die Motordrehzahl und die Untersetzung des Getriebes vorgegeben. Ebenso ist der Weg des Kolbens, bezogen auf die Stellung des Exzenters, einzuhalten. Der Weg und dessen zeitliche Ableitungen sind exakt auf die Funktion des Schlagwerks abgestimmt. Kleine Veränderungen der Kolbengeschwindigkeit verändern das Timing zwischen den am Schlagprozess beteiligten Bauteilen, was zu Leistungseinbrüchen führen kann. Im schlimmsten Fall geht die gesamte Funktionalität des Schlagwerks verloren und es wird kein Schlag mehr erzeugt. Die Funktion des Schlagwerks steht somit in direktem Zusammenhang mit der Kinematik des Kurbeltriebes.

### 5.2.1 Funktion des Kolbens

Die Bauart des Kolbens, in Einheit mit dem gesamten Kurbeltrieb, entspricht der eines Tauchkolbens. Der Erregerkolben wird, definiert durch die Kinematik des Kurbeltriebes, im Führungsrohr geführt, bewegt. Die Bewegung ist oszillierend. Bei der Bewegung nach vorne (Richtung Werkzeugaufnahme) wird der Luftpolster zwischen Erregerkolben und Flugkolben komprimiert. Dadurch baut sich ein Druck vor dem Kolben auf. Dieser Druck wird ins Pleuel abgeleitet. Der Kraftfluss ist dabei entscheidend für die Höhe der mechanischen Belastung. Die Dichtheit zwischen Führungsrohr und Erregerkolben wird durch das Einsetzen eines O-Rings in eine Nut gewährleistet. Der Außendurchmesser des O-Rings ist größer als der des Führungsrohres. Die dadurch entstehende Verformung des Dichtelements gewährleistet die Dichtheit. Zwischen O-Ring und Rohr entsteht eine Pressung, die durch die oszillierende Bewegung des Kolbens zur Reib- und Verschleißbeanspruchung führt. Zusätzliche Reibung entsteht durch das Verkippen des Kolbens. Je nach Lage des Pleuels, wirkt eine Kraftkomponente in radiale Richtung. Je stärker der Kolben verkippt, desto größer wird beim Wirken der radialen Kraftkomponente der Verschleißeffekt an den Berührflächen. Die Länge des Kolbens wirkt sich auf die Verkippenneigung aus und sie ist daher möglichst groß anzusetzen. Beschränkt

ist die Länge durch den Abstand zwischen Kolben und Exzenter im hinteren Totpunkt. Abbildung 27 zeigt diese Dimensionsbegrenzung im rechten Bild. Links ist eine Variante der Verkippung zu sehen. Je nach Momentenbilanz um den Lagerpunkt in Form des O-Rings, kann die Verkippung wie dargestellt, oder ähnlich aussehen.

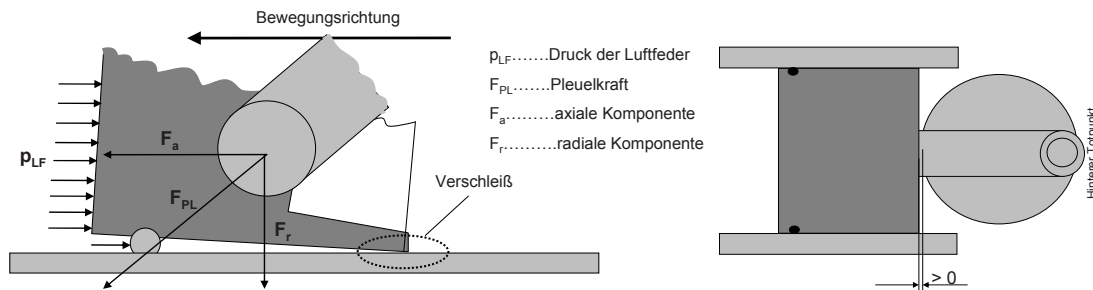


Abbildung 27: links: Verkappen, rechts: Begrenzung der Kolbenlänge

### 5.2.2 Funktion des Pleuels

Das Pleuel stellt die Verbindung zwischen Kolben und Exzenter her. Die Funktion wird durch die Stabilität des Bauteils gegen Knicken und Abmessungen, die innerhalb der Kollisionsgrenzen liegen, gewährleistet. Die beiden Pleuelaugen müssen jeweils ein Gelenk bilden. Dabei soll die Reibung so gering wie möglich sein.

Eine weitere Anforderung an das Pleuel ergibt sich aus sicherheitsrelevanten Umständen bei Bruch desselben. Sollte ein Werkstoffversagen eintreten, darf das Führungsrohr nicht durchschlagen werden. Splitter könnten dadurch das Gerät durch das Gehäuse verlassen. Der Anwender würde dabei einer Verletzungsgefahr ausgesetzt. Durch die langjährige Erfahrung mit Pleueln aus Kunststoff, ist bei Hilti bekannt, das sich das Verhalten im Schadensfall, gegenüber den früher verwendeten Aluminiumbauteilen, stark verbessert hat.

### 5.2.3 Funktion des Bolzens

Der Kolbenbolzen erfüllt vergleichbare Anforderungen wie das entsprechende Bauteil in einem Verbrennungsmotor. Er stellt eine gelenkige Verbindung zwischen Kolben und Pleuel her. Dabei werden wechselnde Belastungen durch Drücke und Massenkraften übertragen. Die Drehbewegung des Pleuels gegen den Kolben führt, durch die geringe Relativbewegung, zu ungünstigen Schmierverhältnissen. [13]

### 5.3 Stand der Technik

In gängigen Standardwerken über Verbrennungsmotoren wird ausschließlich von Bolzenverbindungen zwischen Kolben und Pleuelstange gesprochen. [13], [14], [15]

Das Konzept einer Direktverankerung der Pleuelstange im Kolben ist auch nicht in Standardwerken zum Kurbeltrieb zu finden. [16]

Bolzenlose Verbindungen finden sich in der Pumpentechnik. Eine Ausführung ist der Taumelkolben, der jedoch zwischen Pleuelstange und Kolben keine gelenkige, sondern starre Verbindung aufweist. Die Patentsituation zu Kolben und Kurbeltrieb ist zwar sehr vielfältig, Patente zu bolzenlosen Verbindungen beziehen sich jedoch ausschließlich auf Taumelkolben.

Patent- und Literaturrecherchen ergaben keine angemeldeten oder veröffentlichten Lösungen, in denen die gelenkige Verbindung zwischen Kolben und Pleuel ohne ein Verbindungselement ausgeführt wird.

### 5.4 Belastungen

Dieser Abschnitt beschreibt die Belastungen, denen Pleuel und Kolben ausgesetzt sind. Als wichtigste Faktoren sind die mechanischen Belastungen durch Druck, Massenkräfte und Reibung, die erhöhte Temperatur und der Verschleiß zu nennen.

#### 5.4.1 Mechanisch

Die Kräfte die von Pleuel und Kolben zu übertragen sind, resultieren zum einen aus den Massenkräften, die durch die Bewegung des Kurbeltriebs entstehen, zum anderen entstehen wesentlich größere Lasten durch den in der Luftfeder aufgebauten Druck (siehe dazu Absatz 3.3.3.1). Um an die Belastungen zu kommen, wird auf die Kinematik des Kurbeltriebs eingegangen. Abbildung 44 zeigt den Kurbeltrieb. Für die Berechnungen des Weges wird der Abstand zwischen Kolbenboden und Mittelpunkt des Exzenters herangezogen. Die Funktion des Schlagwerks ist stark vom Timing der Bewegung seiner Komponenten abhängig. Die wichtigste Rolle spielt dabei der Kurbeltrieb. Der Weg  $s$  und dessen zeitliche Ableitungen sind daher auch bei Änderungen der Konstruktion sehr genau einzuhalten.

Der Kolbenweg lässt sich anhand der geometrischen Verhältnisse laut Abbildung 28 wie folgt beschreiben [13]:

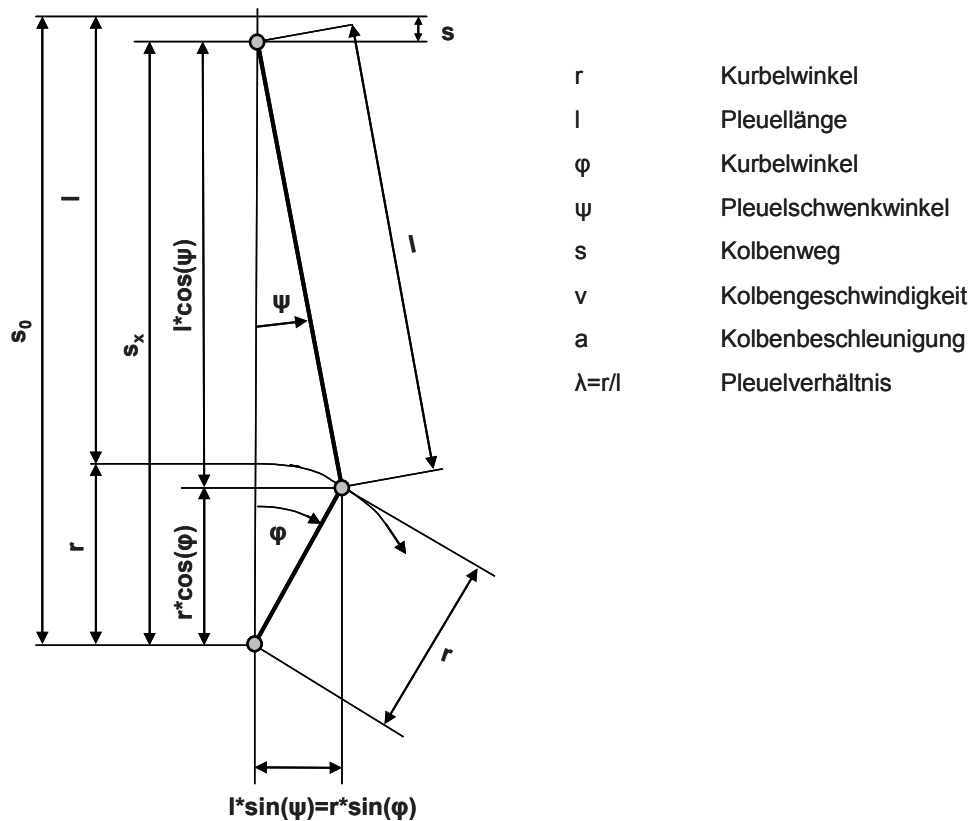


Abbildung 28: Geometrische Verhältnisse am Kurbeltrieb [13]

$$s_0 = l + r \quad (1)$$

$$s_x = r \cdot \cos(\varphi) + l \cdot \cos(\psi) \quad (2)$$

$$s = s_0 - s_x \quad (3)$$

$$s = l + r - (r \cdot \cos(\varphi) + l \cdot \cos(\psi)) \quad (4)$$

Der Pleuelschwenkwinkel in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel stellt sich wie folgt dar:

$$\psi = \arctan \left[ \frac{\lambda \cdot \sin(\varphi)}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2(\varphi)}} \right] \quad (5)$$

$$s = r \cdot \left[ 1 - \cos(\varphi) + \frac{1}{\lambda} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2(\varphi)} \right) \right] \quad (6)$$

Der Wurzel Ausdruck in der Kolbenweggleichung ist umständlich zu handhaben. Eine Fourier-Reihenentwicklung für

$$\sqrt{1+x} = 1 + \frac{1}{2}x - \frac{1}{8}x^2 + \frac{1}{16}x^3 - \dots \quad (7)$$

$$\text{mit } x = -\lambda^2 \cdot \sin^2(\varphi) \quad (8)$$

und Abbruch nach gewünschter Genauigkeit führt zur vereinfachten Gleichung für den Kolbenweg s:

$$s = r \cdot \left( 1 - \cos(\varphi) + \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot \sin^2(\varphi) \right) \quad (9)$$

Wird der Kolbenweg s nach der Zeit differenziert, erhält man die Gleichung für die Kolbengeschwindigkeit v.

$$v = r \cdot \omega \cdot \left( \sin(\varphi) + \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot \sin(2\varphi) \right) \quad (10)$$

Die zweite Ableitung liefert die Gleichung für die Kolbenbeschleunigung a, die für die Berechnung der Massenkräfte herangezogen wird.

$$a = r \cdot \omega^2 \cdot (\cos(\varphi) + \lambda \cdot \cos(2\varphi)) \quad (11)$$

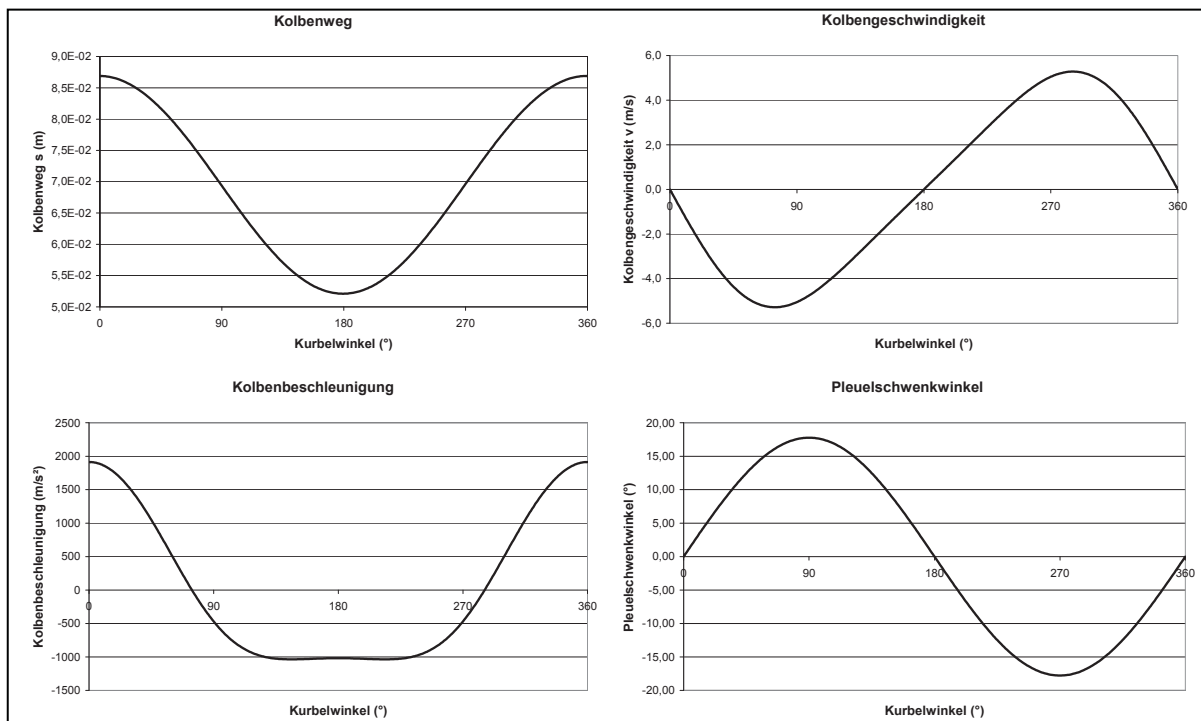


Abbildung 29: Kinematik des Kurbeltriebs

Abbildung 29 zeigt Kolbenweg, Kolbengeschwindigkeit, Kolbenbeschleunigung und Pleuelschwenkwinkel bei einer Frequenz von 46,2 Hz unter Vollast. Zum Pleuelweg laut Gleichung 9 wurde  $s_0$  dazugezählt, um einen absoluten Bezug zur Mitte der Kurbel (Exzentermitte) herzustellen. In diesem Abschnitt wurde bereits erwähnt, dass dieser Abstand wichtig für die Funktion des Schlagwerks ist.

Um relevante Werte für die mechanischen Lasten zu bekommen, wird zwischen zwei Betriebszuständen unterschieden. Der erste Fall, in dem das Schlagwerk zwar angetrieben wird, die Komponenten sich aber nicht im Arbeitspunkt befinden, wird in weiterer Folge Leerlauf genannt. In diesem Zustand wird kein Druck in der Luftfeder aufgebaut, die Belastungen sind also nur auf Massenträgheitskräfte und Reibung zurückzuführen. Der zweite Fall beschreibt das Schlagwerk im Arbeitspunkt. In diesem Zustand sind die Druckbelastungen ausschlaggebend für die Belastungen der Bauteile des Kurbeltriebs (Abbildung 30).

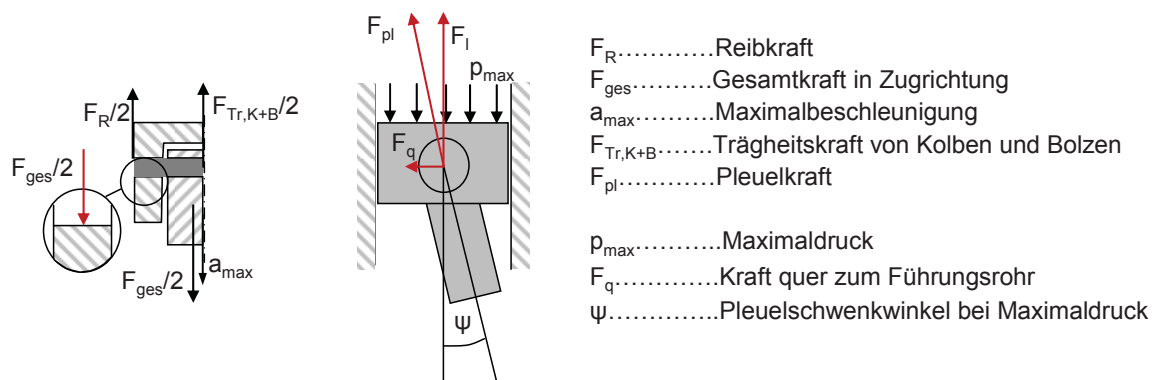


Abbildung 30: Belastungsfälle; links: Zug, rechts: Druck

Für die Belastungen des ersten Belastungsfalles werden die Massenkräfte ermittelt. Dazu werden folgende Werte benötigt:

Tabelle 10: Werte für die Berechnung der Belastung im Leerlauf

Masse Erregerkolben (g)	Masse Kolbenbolzen (g)	Maximalbeschleunigung (m/s <sup>2</sup> )	resultierende Kraft (N)	Reibkraft (N)
12,3	5,4	1913,8	24,9	10,0

Die Belastung aufgrund der Massenträgheit ist in dem Punkt am größten, in dem die Beschleunigung einen maximalen Wert aufweist. Dieses Maximum tritt auf, wenn sich die Vorwärtsbewegung des Kolbens umkehrt. Dies ist bei der maximalen und minimalen Entfernung des Kolbens vom Kurbelmittelpunkt der Fall. Es wird auch vom vorderen und hinteren Totpunkt gesprochen. Der Wert für die Beschleunigung ist im vorderen Totpunkt mit über 1900 m/s<sup>2</sup> am



größten. Die Multiplikation mit den addierten Massen von Erregerkolben und Kolbenbolzen ergibt die maximale Kraft, mit der der Kolben auf „Zug“ beansprucht wird. Zusätzlich wirkt die Reibkraft der Bewegung des Kolbens entgegen. Exakte Messungen dieser Kraft haben sich als schwierig herausgestellt, da Einflussfaktoren wie Temperatur und Schmiermitteleinsatz die Reibkraft beeinflussen. Die Werte bewegen sich aber immer zwischen 5 und 10 N. Werden Trägheits- und Reibkraft addiert, ergibt sich eine Gesamtkraft von etwa 35 N.

Wesentlich größer sind die zu übertragenden Kräfte, die durch die Kompression des Luftpolsters zwischen Erregerkolben und Flugkolben entstehen.

Ein von Hilti entwickeltes Simulationstool, ist in der Lage, Druck und Temperaturverlauf im elektropneumatischen Schlagwerk zu berechnen. Der Verlauf den Abbildung 31 zeigt, wurde simuliert, und ist Ausgangsbasis für die Berechnung der Maximalbelastung auf Druck.

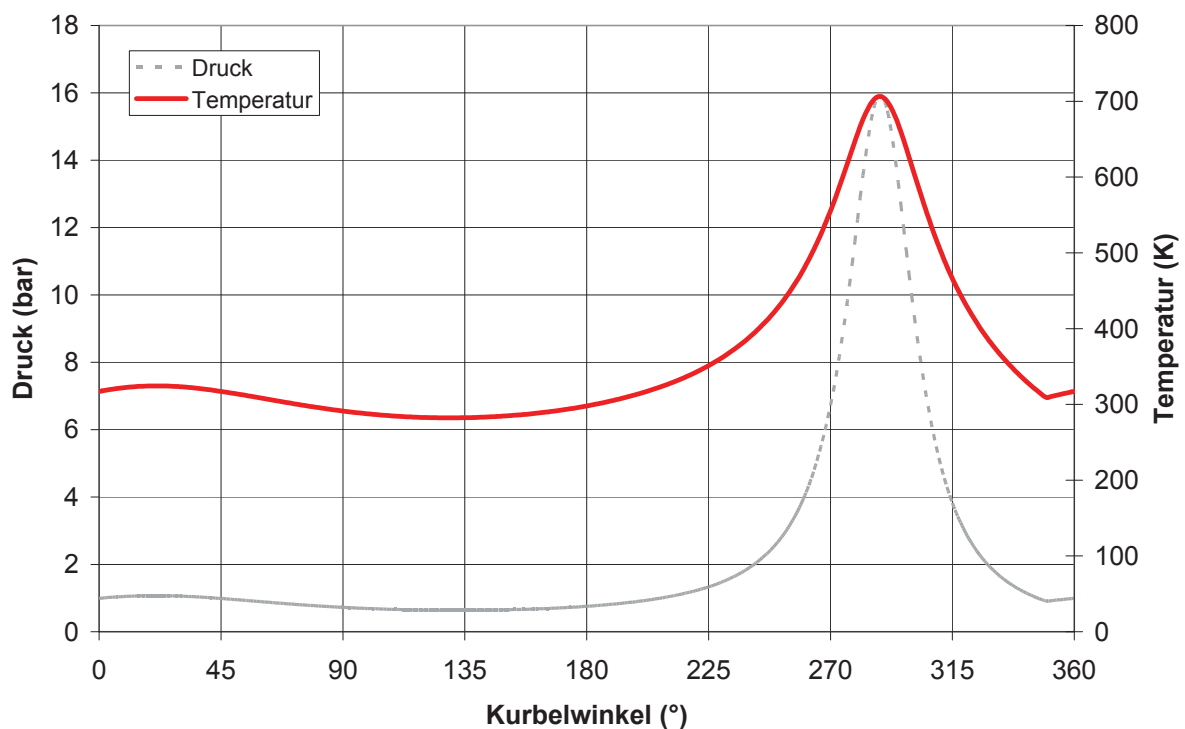


Abbildung 31: Druck- und Temperaturverlauf [26]

Der Maximaldruck tritt bei einem Kurbelwinkel von etwa  $280^\circ$  auf. Unter Beachtung des zugehörigen Pleuelschwenkwinkels, des Führungsrohrdurchmessers und den Winkelfunktionen, ergibt sich folgender Zusammenhang für die Pleuelkraft:

$$F_{PL} = p_{\max} \cdot D_F^2 \cdot \frac{\pi}{4 \cdot \cos(\psi)} \quad (12)$$

Mit  $p_{\max}$ , dem maximalen Druck von 15,9 bar,  $D_F$ , dem Durchmesser des Führungsrohres von 32 mm und dem Pleuelschwenkwinkel  $\psi$ , von  $16,9^\circ$  ergibt sich die maximale Druckkraft in Pleuellängsrichtung von 1340 N. Unter Abzug der Reibkraft und der Trägheitskräfte ergibt sich eine resultierende Druckkraft von knapp 1350 N.

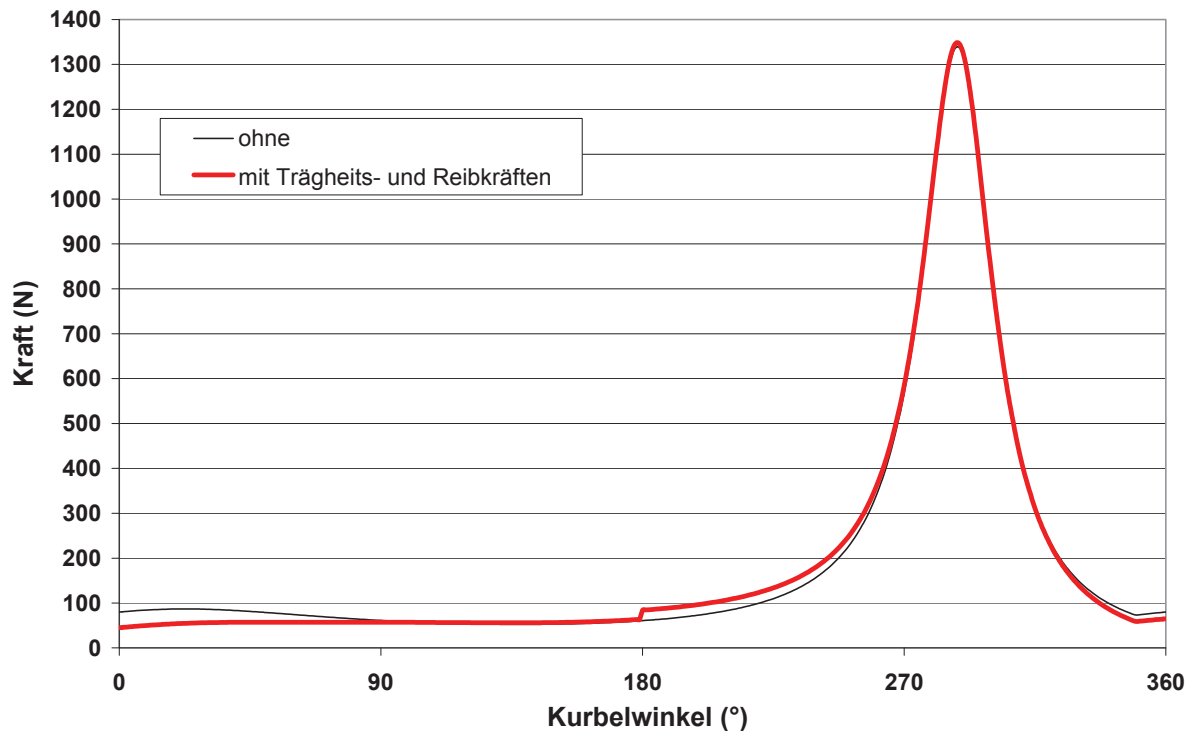


Abbildung 32: Druckkraft in Pleuellängsrichtung

Das Diagramm in Abbildung 32 zeigt den Verlauf der Druckkraft in Pleuellängsrichtung. Werden Trägheits- und Reibkräfte berücksichtigt, verschiebt sich das Niveau um maximal 35 N. Die Maximalwerte unterscheiden sich um etwa 9 N. 1 N ist aufgrund der Massenträgheit von der Druckbelastung abzuziehen, 10 N für die Reibung zu addieren.

#### 5.4.2 Tribologisch

Im Unterschied zur konventionellen Konstruktion, müssen die tribologischen Belastungen sehr genau betrachtet werden. Grund dafür ist die Reibpaarung von Polyamid gegen Polyamid.

Ausschlaggebend für die Verschleißbeanspruchung ist das Produkt aus Gleitgeschwindigkeit  $v$  und Flächenpressung  $p$ . Die Flächenpressung ist aus der Kolbenkraft und der projizierten Fläche zu errechnen. Die Gleitgeschwindigkeit erfolgt aus der Ableitung des Pleuelschwenkwinkels  $F_{Pl}$  und der Multiplikation mit dem Radius  $r$  der gelenkigen Verbindung.

$$p \cdot v = \frac{F_{Pl}}{l \cdot 2r} \cdot \frac{d\psi}{dt} \cdot r \quad (13)$$

Aus Gleichung 13 geht hervor, dass  $p \cdot v$  unabhängig vom Radius ist. Einfluss kann lediglich durch Variation der Kontaktlänge  $l$  genommen werden. Die maximale Länge der Kontaktfläche ist aus geometrischen Gründen etwas geringer als der Durchmesser des Führungsrohres. Abbildung 33 stellt den Verlauf über dem Kurbelwinkel für eine Gelenklänge  $l$  von 25 mm dar.

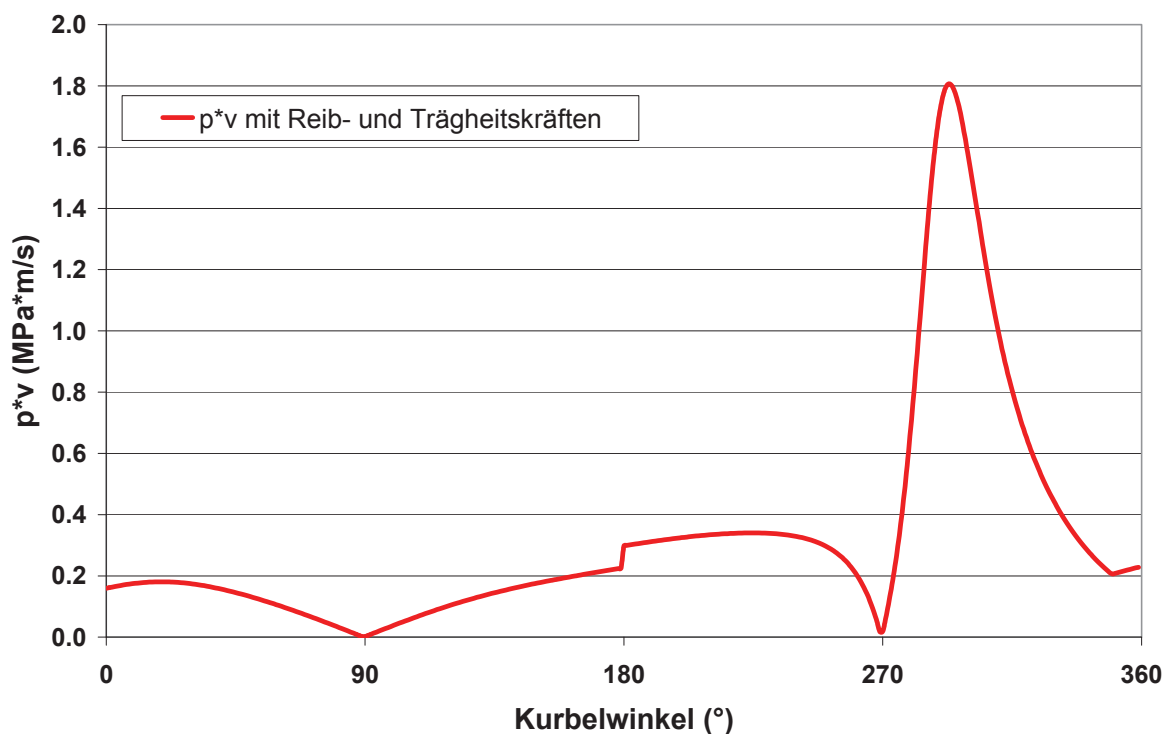


Abbildung 33: Verlauf von  $p \cdot v$

Bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ist der Umkehrpunkt des Pleuelschwenkwinkels. In diesem Punkt ist die Gleitgeschwindigkeit null. Das ausgeprägte Maximum begründet sich auf dem Druckverlauf.

Abbildung 34 zeigt die Relation von Flächenpressung zu Gleitgeschwindigkeit. Aus den Erkenntnissen über die Verschleißbeanspruchung geht die Forderung nach einem gleit- und verschleißoptimierten Werkstoff hervor. Weiters

resultiert daraus die Forderung nach einer möglichst langen Verbindungsfläche, die bei der Konstruktion berücksichtigt wird.

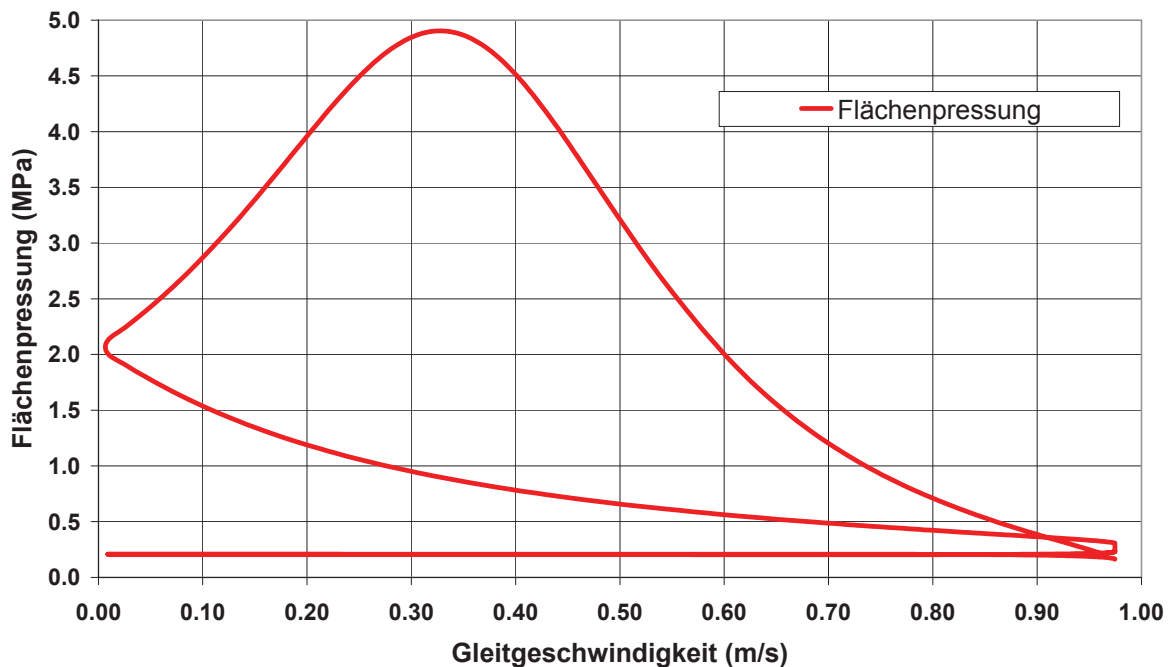


Abbildung 34: Flächenpressung über Gleitgeschwindigkeit

### 5.4.3 Thermisch

Die thermische Belastung entsteht durch Kompression der Luft und Reibungsverluste. Maximal ist die Belastung an der Vorderseite des Kolbenbodens. Der Mittelwert des Temperaturverlaufs aus Abbildung 31 ist 91°C. Aufgrund der hohen Frequenz sind die Maxima von über 400°C nur im Mittelwert zu berücksichtigen. Unter Berücksichtigung der Reibungswärme wird von einer Temperaturbelastung des Kolbens von 120°C und ca. 100°C des Pleuels ausgegangen.

### 5.4.4 Umgebungsmedien

Schlagwerk und Getriebe werden mit einem Öl auf Basis von Polyglykolen mit Zusätzen aus isopropyliertem Triarylphosphat und Triphenylthiophosphat geschmiert.

## 5.5 Werkstoffauswahl

Die Auswahl eines geeigneten Werkstoffes begründet sich auf den in Kapitel 5.4 beschriebenen Anforderungen.

Die hohe Temperaturbeanspruchung von bis zu 120°C schließt bereits einen Großteil an Werkstoffen aus. Zusätzlich zur Temperaturbeanspruchung sind auch die mechanischen Lasten für Kunststoffe relativ hoch. Daher beschränkt sich die Auswahl auf technische Kunststoffe und Hochleistungspolymere.

Die Verwendung von Kunststoff für das Pleuel und den Kolben gibt einen ersten Anhaltspunkt für die Auswahl. Die bolzenlose Verbindung zwischen Kolben und Pleuel hat keine Erhöhung der mechanischen Lasten zufolge. Die Randbedingungen werden auch sonst nicht verändert. Der Unterschied besteht lediglich in der erhöhten Anforderung an das Reibungs- und Verschleißverhalten der neuen Werkstoffpaarung.

Kunststoffe können durch Beimengung zusätzlicher Komponenten auf die Anforderungen maßgeschneidert werden. Die Komponenten werden Additive und Füllstoffe genannt. Der Umstieg vom aktuellen Werkstoff auf ein Hochleistungspolymer hat einen starken Anstieg der Werkstoffkosten zur Folge. Diese nehmen den größten Teil der gesamten Bauteilkosten ein. Daher wird die Modifikation des bisher eingesetzten PA 6.6 + CF20 angestrebt.

### 5.5.1 Ultramid A3WC4

Ultramid A3WC4 von BASF wird seit 1989 für das Pleuel und den Erregerkolben verwendet. Es handelt sich dabei um ein PA6.6 mit 20% Kohlenstofffasern. PA 6.6 ist nach PA 6 das kostengünstigste Polyamid. PA6.6 zeichnet sich durch große Härte, Steifheit, Abriebfestigkeit und hoher Temperaturbeständigkeit aus. [17],[20]

Dennoch ist die Festigkeit ohne Füllstoffe nicht ausreichend. Kurzfasern aus Kohlenstoff erhöhen die Festigkeit ebenso wie die Schlagzähigkeit. Beide Eigenschaften sind notwendig, um den hohen und schnell wechselnden Belastungen standzuhalten. Im Gegensatz zu den oft als Verstärkungsfüllstoff eingesetzten Glasfasern, wirken Kohlenstofffasern weniger abrasiv auf den Gleitpartner.

A3WC4 wird für alle Erregerkolben und Pleuel eingesetzt. In manchen Geräten sind die Temperaturbelastungen höher als in anderen. Es wurde in bestimmten Fällen ein Anschmelzen des Kolbens mit einhergehenden überproportionalem Verschleiß beobachtet. Um auch diese extremen Belastungsszenarien überstehen zu können, werden betroffene Kolben strahlenvernetzt.

## 5.5.2 Werkstoffmodifikationen

Dieser Abschnitt behandelt die Möglichkeiten der Modifikation des bevorzugten PA 6.6. Wesentliche Auswirkungen auf die Verschleiß-eigenschaften haben Funktions-, Füll- und Verstärkungsfüllstoffe sowie das Strahlenvernetzen.

### 5.5.2.1 Strahlenvernetzen

Beim Strahlenvernetzen werden die fertigen Formteile einer  $\gamma$ - oder  $\beta$ -Strahlung ausgesetzt. Diese Strahlung bewirkt eine Wechselwirkung zwischen den beschleunigten Elektronen und den Makromolekülen des Kunststoffes. Das Elektron wird beim Eindringen in das Material abgebremst, wodurch es zu einer radikalischen Wasserstoffabstraktion kommt. Die entstehenden Radikale führen zu chemischen Reaktionen, wie sie auch bei der radikalischen Polymerisation auftreten. Vergleichbar sind auch die Abbruchreaktionen.

Der Zusammenhalt der Makromoleküle in Polymeren beruht auf Nebenvalenzkräfte. Die Bindungsenergien sind mit 8 bis etwa 20 kJ/mol vergleichsweise gering. Durch die Strahlenvernetzung entstehen zusätzlich kovalente Bindungen, deren Bindungsenergie um ein Vielfaches höher ist. Die in Polymeren oft zu findende C-C Bindung hat eine Bindungsenergie von etwa 350 kJ/mol.

Der Vernetzungsgrad und die Festigkeit stehen in einem direkten Zusammenhang. Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Härte steigen aufgrund der Vernetzungsstellen. Besonders bei erhöhter Temperatur verbessern sich eben genannte Eigenschaften. Zusätzlich zur Wärmeformbeständigkeit werden auch Alterungs- und Chemikalienbeständigkeit der Kunststoffe erhöht. [18]

Aus [19] geht auch eine signifikante Verbesserung der Verschleiß-eigenschaften von strahlenvernetztem PA6.6 hervor. Das Belastbarkeitsspektrum erweitert sich um höhere Rauigkeit der Reibpartner, Umgebungstemperatur, Gleitgeschwindigkeit und Flächenpressung.

### 5.5.2.2 Zusatzstoffe

Die Compoundierung mit Kohlenstofffasern führt zur Erhöhung der Festigkeiten und Steifigkeiten bei besseren Verschleiß-eigenschaften gegenüber Glasfasern. Eine weitere Verbesserung der Verschleiß-eigenschaften wird durch den Zusatz von Polytetrafluorethylen (PTFE) erzielt. PTFE zeichnet sich durch sehr geringe Reibwerte aus.

Der Zusatz von Nukleierungsmitteln beschleunigt den Kristallisationsprozess. Härte, Wärmeformbeständigkeit und E-Modul nehmen zu. Gleichzeitig verringern sich Schlagzähigkeit, Reißdehnung und Wasseraufnahme. Eingesetzt wird unter anderem MoS<sub>2</sub>, das ebenfalls als Festschmierstoff genutzt wird. [17]

Wie stark der Einfluss von Füllstoffen auf den Verschleißfaktor ist, zeigt der Vergleich der Reibpartnerschaft zwischen zwei ungefüllten PA6.6 Bauteilen, und zwei mit 20% PTFE gefüllten Reibpartnern, ebenfalls aus PA6.6. Der Verschleiß der ungefüllten Partner ist um das knapp 40-fache größer. [20]

### 5.5.3 Werkstoffvorschlag

Als Grundwerkstoff ist PA6.6 sehr gut geeignet. Aus der langjährigen Erfahrung für genau diese Anwendung hat sich der Einsatz von 20% C-Faser bewährt. Die hinzukommende Verschleißbeanspruchung verlangt nach zusätzlichen Maßnahmen.

Strahlenvernetzen ist eine sehr gute Möglichkeit, nach abgeschlossener Formgebung auf die Werkstoffeigenschaften Einfluss zu nehmen. Der Zusatz von 15 bis 30% PTFE ist ebenfalls in jedem Fall zu empfehlen. Die Nukleierung bringt zusätzlich Vorteile.

Der ideale Werkstoff für den Einsatz in Pleuel und Kolben ist daher nukleiertes PA6.6, mit C-Faser und PTFE verstärkt und gefüllt, das anschließend strahlenvernetzt wird.

Über die geeignetste Rezeptur kann keine Aussage gemacht werden, da das Verschleißverhalten von vielen Faktoren abhängt. Ebenso sind Wechselwirkungen der unterschiedlichen Einflussfaktoren nur durch Versuche zu klären. Synergien und negative Beeinflussungen können nicht auf theoretischer Ebene abgehandelt werden.

Die Problematik der Verschleißoptimierung dieser speziellen Anwendung muss an anderer Stelle untersucht werden.

## 5.6 Konstruktionskonzepte

Dieser Abschnitt behandelt unterschiedliche Konstruktionsvarianten, die eine Alternative zur Verbindung von Kolben und Pleuel mittels Bolzen darstellen. Das Ziel ist die Verringerung der Bauteilanzahl. Verbindungsvarianten mit alternativen Maschinenelementen werden daher nicht betrachtet.

### 5.6.1 Montagespritzguss

Der Montagespritzguss ist zwar nicht den Konstruktionskonzepten zuzuordnen, fällt die Wahl jedoch auf dieses Fertigungskonzept, hat das einen großen Einfluss auf die Konstruktionsmöglichkeiten.

Unter Montagespritzguss wird das Fertigen eines werkzeugfallenden Bauteilverbundes verstanden, dessen Einzelteile gelenkig verbunden sind. Diese Methode wird im Cockpit-Bereich von Automobilen und in der

Spielzeugindustrie verwendet. Materialien mit unterschiedlichem Schwindungsverhalten werden bevorzugt kombiniert. [21]

Der Montagespritzguss ist für die Anwendung interessant, ist aber aus wirtschaftlichen Gründen nicht rentabel. Die Werkzeuge sind sehr kompliziert und daher entsprechend teuer. Die Stückzahlen der Pleuel und Kolben sind dafür zu gering.

### 5.6.2 Einteilig

Um den sprichwörtlichen Trichter auf der Suche nach Konzepten möglichst weit aufzumachen, wird auch das Konzept betrachtet, den Kolben und das Pleuel aus einem Stück zu fertigen. Derartige Lösungen sind vor allem in Kolbenverdichtern zu finden. Das Pleuel und der Kolben sind dabei starr miteinander verbunden. Die Lauffläche des Kolbens ist nicht zylindrisch, sondern Teil einer Kugeloberfläche (Abbildung 35, rechts). Die Anforderungen an die Dichtfläche sind wesentlich höher als bei der konventionellen Gelenkverbindung. Alternativ kann die Kippbewegung des Kolbens vollständig durch Dichtelemente ausgeglichen werden (Abbildung 35, links).

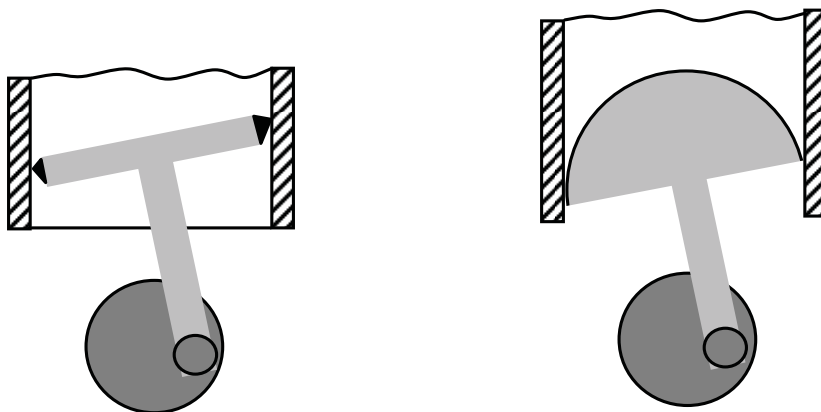


Abbildung 35: Taumelkolben

Die linke Variante erschwert die Beherrschbarkeit des Schlagwerks. Durch das Verkippen des Kolbens ist der Eintrag einer definierten Luftmenge schwieriger. Die dargestellte Lage zeigt in etwa den Kurbelwinkel, bei maximaler Vorspannung der Luftfeder. Der Flugkolben nähert sich dem Erregerkolben zu diesem Zeitpunkt auf etwa 3 mm. Das Luftvolumen wird entsprechend verringert, der Druck dadurch aufgebaut. Durch das Verkippen des Kolbens ist diese Annäherung nicht mehr möglich. Der benötigte Druckaufbau fehlt.

Die rechte Konstruktionsvariante ermöglicht bei Geometrieangepassung des Flugkolbens eine definierte und ebenso starke Kompression, wie bei der konventionellen Bauweise. Die Anforderungen an die Dichtung werden



aufgrund der größeren Dichtfläche und den zusätzlichen Relativbewegungen größer.

### **5.6.3 Einteilig mit biegeweichem Bereich**

Durch Einbringung eines biegeweichen Bereichs in den einteiligen Pleuel-Kolben-Verband, kann das Verkippen vermieden werden. Das Gelenk ist dabei ins Bauteil integriert. Je geringer die Biegesteifigkeit an der besagten Stelle, desto geringer wird die Kraft zwischen Führungsrohr und Erregerkolben. Eine zweite Werkstoffkomponente an der Stelle oder ein biegeweicher Querschnitt ermöglichen eine solche Anwendung. Die hohen Kräfte die über das Pleuel übertragen werden, bedingen einen möglichst großen Querschnitt, um die Spannungen gering zu halten. Trotzdem kann ein Querschnitt mit niedrigem Flächenträgheitsmoment biegeweich sein. Ein niedriges Flächenträgheitsmoment ist nachteilig für die Knickstabilität. Dadurch entsteht ein Zielkonflikt bei der Dimensionierung des Pleuelsteges. Ebenso negativ wirkt sich die zusätzliche Kraftkomponente, normal auf die Innenfläche des Führungsrohrs, auf den Verschleiß aus.

### **5.6.4 Schnapphaken**

Die Konstruktionsfreiheit von Kunststoffen bietet die Möglichkeit, eine durch Schnapphaken gesicherte Verbindung zwischen Pleuel und Kolben herzustellen. Schnapphaken können am Pleuel oder am Kolben angebracht werden. Abbildung 36 zeigt zwei mögliche Varianten. Links und in der Mitte ist die kolbenseitige Variante abgebildet. Das Pleuel wird von unten in den Kolben geschoben, die beiden „Schnappflügel“ weichen zurück, bis das Pleuel in der Bohrung sitzt. Rechts ist skizziert, wie ein Pleuel aufgebaut sein kann. Die linke Variante ist aufgrund der besseren Kraffteinleitung zu bevorzugen. Nachteilig wirkt sich die geringe Bruchdehnung des fasergefüllten Polyamids aus. Durch die geringe Höhe der beweglichen Flügel, sind die Dehnungen bei der Montage sehr groß.

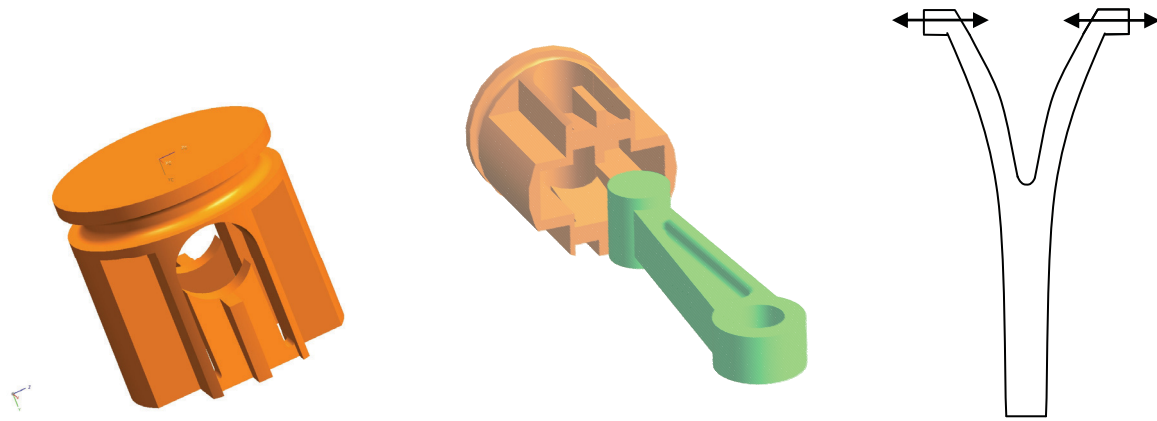


Abbildung 36: *Schnappverbindung*

### 5.6.5 Einfädeln

Eine Möglichkeit, die Verbindung zwischen Pleuel und Pleuellager herzustellen, ist das Einfädeln. Dabei werden drei Richtungen unterschieden. Wird das Pleuel von unten eingesetzt, fehlen Flächen die benötigt werden, die Massenkräfte in Zugrichtung aufzunehmen. Besser ist die, auf das Gelenk bezogene, radiale Richtung. Abbildung 37 links, zeigt eine mögliche Pleuellagerform. Auch bei dieser Variante geht ein großer Teil der benötigten Funktionsfläche des Gelenks verloren. Zu bevorzugen ist die axiale Einsteckrichtung (Abbildung 37, rechts). Die hohen Druckbelastungen werden dabei über die größtmögliche Fläche ins Pleuel eingeleitet. Die Flächenpressung verringert sich dadurch.

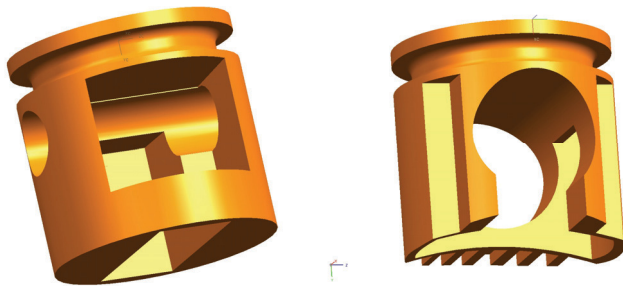


Abbildung 37: *Pleuellagermodelle für unterschiedliche Montagerichtungen*

### 5.6.6 Auswahl des Konstruktionsprinzips

Die Anforderungen an Kompression und Abdichtung des Luftpolsters schließen die starren Verbindungen als Konstruktionsprinzip aus. Schnapphaken sind nur bedingt einsetzbar, da die Bruchdehnung des Konstruktionswerkstoffes zu gering ist. Zur Verringerung der Verschleißbeanspruchung soll die Kontaktfläche zwischen Pleuel und Pleuellager möglichst groß sein. Das axiale

Einschieben gewährleistet die maximale Kontaktfläche. Abbildung 38 zeigt die betrachteten Konstruktionskonzepte und die Auswahl des axialen Einfädels.

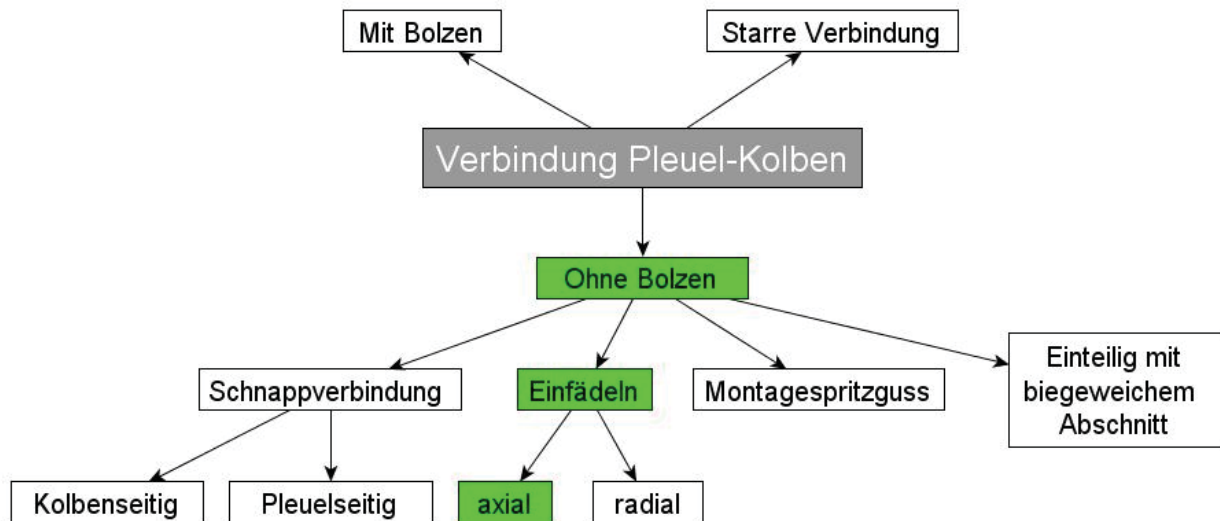


Abbildung 38: Auswahl des Konstruktionskonzeptes

## 5.7 Prototypen

Um einen Funktionsnachweis der Neukonstruktion erbringen zu können, werden Prototypen benötigt. Die Werkstoffauswahl unterliegt hier einer Einschränkung. Prototypen werden spanabhebend hergestellt. Für die Fertigung eines Hilfswerkzeuges um bereits ein Spritzgussteil herzustellen, ist der Entwicklungsstand noch zu unsicher. Daher werden Halbzeuge benötigt, um die Bauteile aus dem Vollen zu fräsen. Kunststoffe liegen in der Regel nur in Form von Granulat beim Lieferanten vor. Die Verfügbarkeit von Halbzeugen ist somit das wichtigste Kriterium der Werkstoffauswahl für die Prototypen. Zur Verfügung stehen extrudierte Platten des Ultramid A3WC4. Da die mechanischen Eigenschaften ausreichend sind, wird dieses Material für den Funktionsnachweis ausgewählt.

Die Faserrichtung in den Platten entspricht der Extrusionsrichtung. Die Prototypen werden so aus dem Vollen gefräst, dass die Faserrichtung im eingebauten Zustand der Führungsrohrachse entspricht. Die Richtung entspricht dem Kraftverlauf und stellt die maximale mechanische Festigkeit bei Beanspruchung sicher.

Das erstellte Modell von Pleuel und Kolben ist auf Funktion und mechanische Bearbeitung abgestimmt, nimmt daher keine Rücksicht auf Wandstärken und

## Entformungsschrägen.

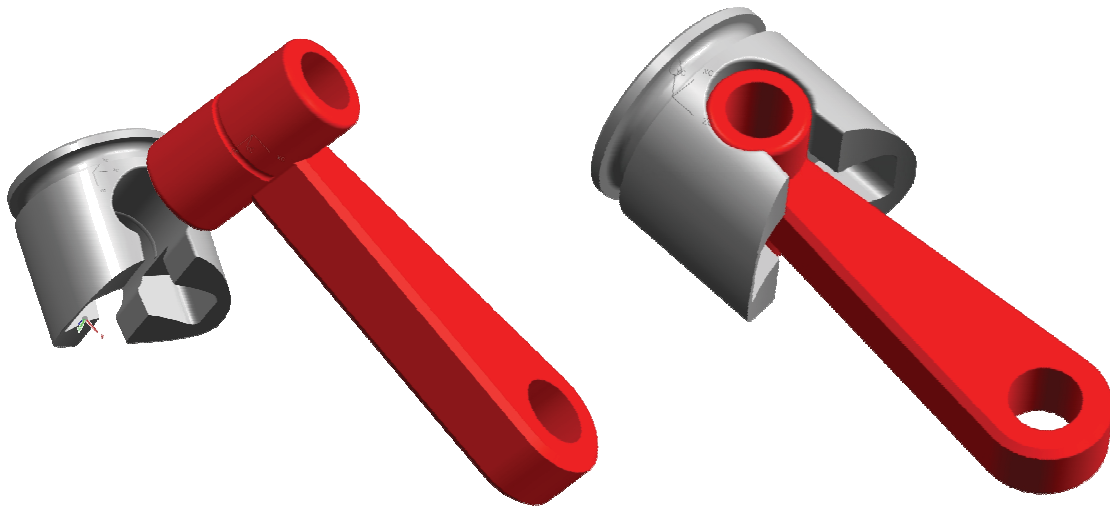


Abbildung 39: Prototypen

Die in Abbildung 39 dargestellten Prototypen zeichnen sich durch folgende Punkte aus: Der Pleuelsteg wurde möglichst biegesteif bei gleichzeitig geringem Querschnitt in Kolbennähe gestaltet. Die Knickstabilität ist dadurch gewährleistet. Trotzdem bleibt dem Kolben genügend Fläche, um den Zug übertragen zu können. Der Kolben ist am Umfang nicht geschlossen. Einseitig gewährleistet das die Montage, die beidseitige Ausführung verringert das Bauteilvolumen und wird durch die geringe Zugbelastung möglich. Der zylindrische Teil des Pleuels, der die Funktion des ursprünglichen Kolbenbolzens erfüllt, verfügt über einen größeren Durchmesser als die konventionelle Bolzenbohrung, da dieser größer als die Breite des Pleuelsteges sein muss, um Flächen zur Zugübertragung im Kolben schaffen zu können. Um die Geometrie der Nut für den Pleuelring aufrecht zu erhalten, wird die Bohrung um 2,5 mm in Richtung Pleuel verschoben. Gleichzeitig wird die Pleuellänge um denselben Faktor verkürzt, um die Gesamtlänge des Bauteilverbandes anzupassen. Die Veränderung des Kurbelverhältnisses wirkt sich nur unmerklich auf die Erregerkolbengeschwindigkeit aus. Die Sicherung gegen die axiale Beweglichkeit wird durch eine formschlüssige Verbindung in der Mitte der Bohrung gewährleistet. Pleuelseitig wird dazu eine Nut angebracht, die Bohrung verfügt hingegen über eine kleine Lippe.

## 5.8 Simulation

Die Auslegung von Pleuel und Bolzen birgt einige Schwierigkeiten. Die Belastungen sind wechselnd und hochfrequent. Das Material ist durch die Kurzfaserverstärkung anisotrop. Die Geometrien der Bauteile, vor allem des Pleuels, sind kaum durch simple Modelle zu beschreiben. Durch die

Erfahrungen mit den konventionellen Bauteilen können aber Vergleichsberechnungen durchgeführt werden. Dadurch werden keine Absolutwerte für die Spannungen benötigt.

Simuliert wird das Pleuel, da der Kolben einen größeren Querschnitt zur Übertragung der Druckbelastung hat. Die erwarteten Spannungen und Verformungen unter Druckbelastung sind daher geringer. Die Zugbelastung ist so gering, dass der Kolben auch unter dieser Beanspruchung nicht simuliert werden muss.

Die Hauptbeanspruchung stellt sich während der maximalen Luftfeder Vorspannung ein (s. Abschnitt 5.4.1). Die Lasten sind bei der konventionellen, wie bei der neuen Konstruktion, dieselben.

Es wird eine Simulation des konventionellen Pleuels durchgeführt. Mit den selben Lastannahmen und Zwangsbedingungen.

### 5.8.1 Material

Um eine Vergleichbarkeit mit dem konventionellen Pleuel herstellen zu können, werden die Simulationen mit den Kennwerten des A3WC4 durchgeführt. Die Kurzfaserverstärkung führt zu starken Anisotropien, die nur durch die Kopplung mit einer CFD Simulation berücksichtigt werden können. Die vereinfachende Annahme isotroper Werkstoffeigenschaften ist zulässig, da die Faserorientierungen im gespritzten Teil bei der konventionellen, wie der neuen Pleuelkonstruktion einander ähneln und ohnehin nur ein relativer Vergleich zwischen den beiden Varianten hergestellt wird. Werkstoffkennwerte sind nur in Faserrichtung verfügbar. Diese werden als Grundlage für das Simulationsmodell herangezogen.

Unter der anzunehmenden Temperaturbelastung kommen die Temperaturabhängigkeiten von Thermoplasten stark zu tragen. Diese werden durch die Verwendung des Sekantenmoduls für 100°C, abgestimmt auf die maximalen Spannungsniveaus, berücksichtigt. Dazu wird das von BASF zur Verfügung gestellte Spannungs-Dehnungs-Diagramm für verschiedene Temperaturen verwendet. Der Sekantenmodul liegt je nach Dehnung zwischen 1900 und 5500 MPa. Beim Spannungsniveau von 80 MPa beträgt der Sekantenmodul etwa 4000 MPa.

NX Nastran verfügt in der für Hilti lizenzierten Version nicht über die Möglichkeit, das viskoelastische Materialverhalten von Kunststoffen zu berücksichtigen. Durch die Anpassung des E-Moduls an das entsprechende Spannungsniveau, erfolgt trotzdem eine gute Näherung.

Die Querkontraktionszahl ist ebenso unbekannt. Durch die Belastungsart und die Geometrie des Pleuels spielt sie eine untergeordnete Rolle.

Vergleichsberechnungen zeigen, dass die Variation der Querkontraktionszahl zwischen 0,3 und 0,42, den Wert der Maximalspannung um weniger als ein halbes Prozent verändert. Die Maximalspannung steigt bei der Simulation des konventionellen Pleuels von 53,71 MPa, auf 54,01 MPa an. Die Summe der

Vereinfachungen und Annahmen lassen die Festlegung der Poissonzahl auf 0,4 zu.

### 5.8.2 Vernetzung

Die Vernetzung des Modells zählt zu den wichtigsten Einflussfaktoren auf die Qualität der Simulationsergebnisse.

Aufgrund der dreidimensionalen Struktur der zu untersuchenden Bauteile werden „Solid“ Elemente für die Vernetzung herangezogen. „Solid“ Elemente werden dann verwendet, wenn „Plate“ und „Beam“ Elemente für die Modellbeschreibung nicht ausreichen. Zur Auswahl stehen Tetraeder und Hexaeder. Einfache und regelmäßige Strukturen lassen sich mit Hexaedern vernetzen, die einen geringeren Rechenaufwand mit sich bringen. Die unregelmäßigen Strukturen wie Kanten und kleine Radien am Pleuel, lassen sich wesentlich einfacher durch Tetraederelemente modellieren.

NX Nastran bietet ein automatisches Vernetzungswerkzeug. Unter Berücksichtigung der Angabe der durchschnittlichen Elementgröße wird der ausgewählte Volumenkörper möglichst gleichmäßig vernetzt. Werden zuvor Kanten oder Flächen mit einer bestimmten Anzahl an Knoten manuell versehen, werden auch diese berücksichtigt. Dadurch können kritische Bereiche engmaschiger vernetzt und die Vernetzungsautomatik trotzdem genutzt werden.

NX Nastran unterscheidet zwei Typen von Tetraedern: CTETRA4 und CTETRA10. Der erstgenannte Typ entspricht einer vierseitigen Pyramide, an dessen Eckpunkten je ein Knoten sitzt. CTETRA10 ist um Zwischenknoten erweitert, die im Schnittpunkt mit der Streckensymmetrale jeder Kante angeordnet sind. Der lineare Ansatz der CTETRA4 Elemente liefert Ergebnisse, die ein zu steifes Materialverhalten repräsentieren. CTETRA10 Elemente liefern wesentlich bessere Ergebnisse. Abbildung 40 zeigt den Vergleich der beiden Elementtypen.

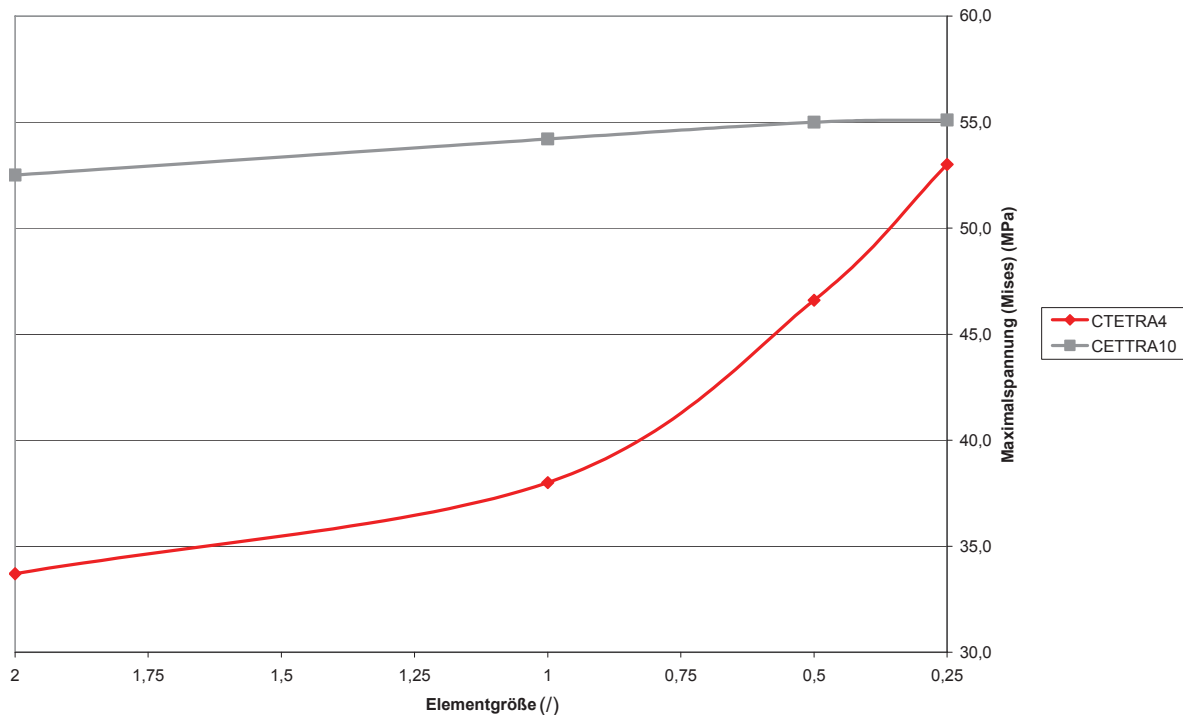


Abbildung 40: Elementvergleich bei unterschiedlichen Vernetzungsdichten

In den Berechnungsversuchen wurden die Zwangsbedingungen und Belastungen nicht verändert. Variiert wurden die Angabe für die Elementgröße der automatischen Vernetzungsfunktion und der Elementtyp. Im Diagramm ist die Vergrößerung der Maximalspannung mit der Verfeinerung des Netzes zu erkennen. CTETRA4 Elemente zeigen die angekündigte Versteifung gegenüber den Elementen mit Zwischenknoten. Das Spannungsniveau ändert sich bei der Verwendung von CTETRA10 Elementen ab einer Elementgröße von eins nur sehr gering. Der Elementtyp mit linearem Ansatz zeigt auch bei der bereits sehr zeitaufwändigen Berechnung mit Elementgröße 0,25 zu geringe Spannungswerte.

Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen aus den Versuchen, wird für weitere Simulationen der Elementtyp CTETRA10 verwendet. Als Basis für die automatische Vernetzung wird der Wert für die Elementgröße mit „1“ festgelegt. Die Verfeinerung des Netzes wirkt sich ab diesem Wert sehr stark auf die Berechnungsdauer aus. Von 1 auf 0,5 erhöht sich die Dauer um das Zwanzigfache. Bereiche mit hohen Gradienten werden manuell verfeinert.

### 5.8.3 Symmetrien und Zwangsbedingungen

NX Nastran bietet zur Definition von Zwangsbedingungen 6 Freiheitsgrade, die auf einen von drei möglichen Zuständen gesetzt werden können. Es besteht die Möglichkeit den Freiheitsgrad zu sperren, ihn freizugeben oder auch eine

Verschiebung beziehungsweise Rotation, vorzugeben. Die englische Bezeichnung für Freiheitsgrade, „Degrees of Freedom“, hat die Abkürzung DOF zur Folge. Die Zuordnung der DOF 1 bis DOF 6 für das kartesische und das zylindrische Koordinatensystem ist Tabelle 11 zu entnehmen.

Tabelle 11: Freiheitsgrade

	Kartesisch	Zylindrisch
<b>DOF 1</b>	Translation in x-Richtung	Translation Radial (r)
<b>DOF 2</b>	Translation in y-Richtung	Translation Tangential (t)
<b>DOF 3</b>	Translation in z-Richtung	Translation Axial (z)
<b>DOF 4</b>	Rotation um x	Rotation um r
<b>DOF 5</b>	Rotation um y	Rotation um t
<b>DOF 6</b>	Rotation um z	Rotation um z

Freiheitsgrade werden den Knotenpunkten zugeordnet. Zwangsbedingungen für Solid Elemente, die für die Simulation in dieser Arbeit verwendet werden, können nur durch die Variation der DOF eins bis drei manipuliert werden. Die Rotation des Solid-Elements wird über die Translation der Knotenpunkte ermöglicht. Ist eine der Rotationsfreiheitsgrade gesperrt, wird eine Warnung ausgegeben. Bei der Berechnung werden die Angaben ignoriert. Die Definition der Zwangsbedingungen beschränkt sich daher in weiterer Folge auf die drei Freiheitsgrade der Translation.

Unter Ausnutzung der Symmetrien des Pleuels, kann der Rechenaufwand bei der Lösung der Strukturanalyse erheblich gesenkt werden. Unter Annahme reiner Druckbelastung des Pleuels und gleichzeitiger Vernachlässigung der Reibung ergeben sich zwei Symmetrien, durch deren Anwendung das Modell auf ein Viertel reduziert werden kann. Abbildung 41 zeigt das Modell mit Blick auf die beiden Symmetrieflächen.

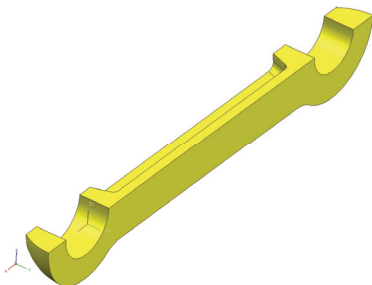


Abbildung 41: Modell des Pleuels unter Ausnutzung der Symmetrien [26]



Zwei Zwangsbedingungen sind für die Einhaltung der Symmetrie nötig. Dazu wird der Freiheitsgrad der Knotenpunkte der beiden Symmetriefflächen in Richtung der Flächennormalen gesperrt. Die Knotenpunkte der Kanten, die Begrenzungselement beider Symmetriefflächen sind, werden in Richtung beider Flächennormalen gesperrt. Werden einem Knotenpunkt durch Angehörigkeit zu mehreren Objekten verschiedene Zwangsbedingungen zugeordnet, werden diese addiert. Dadurch wird die Translation der gemeinsamen Kanten in zwei Richtungen gesperrt.

Die dritte Zwangsbedingung bezieht sich auf die Bohrung des Pleuels, in dem der Exzenterzapfen läuft. Die Druckbelastung führt dazu, dass nur eine Seite der Bohrung belastet wird. Den Knoten dieser Halbschale wird die Zwangsbedingung zugewiesen. Dazu wird ein lokales, zylindrisches Koordinatensystem eingeführt, dessen z-Achse der Symmetrieachse der Bohrung entspricht (Abbildung 42). Die Angaben zu den Freiheitsgraden werden auf dieses Koordinatensystem bezogen.

Die Translationen in radialer und tangentialer Richtung werden gesperrt. In radialer Richtung wird die Translation durch den Zapfen begrenzt. In tangentialer Richtung entspricht sie einer Rotation um die z-Achse. Die Kinematik des Kurbeltriebs unterbindet eine nicht definierte Bewegung um diese Achse. Um diese Zwangsbedingung möglichst einfach bei sehr realitätsnahen Bedingungen einzuführen, wird auch die tangentialer Richtung unterdrückt. Die Bewegung und z-Richtung ist frei, mit Ausnahme der Knoten, die ebenso auf der Symmetrieffläche liegen. Vergleichsrechnungen mit variierten Freiheitsgraden zeigten Abweichungen der Maximalspannungen im Bereich von ein bis zwei Prozent. Kleine Variationen der Vernetzungsdichte führen zu wesentlich größeren Unterschieden.

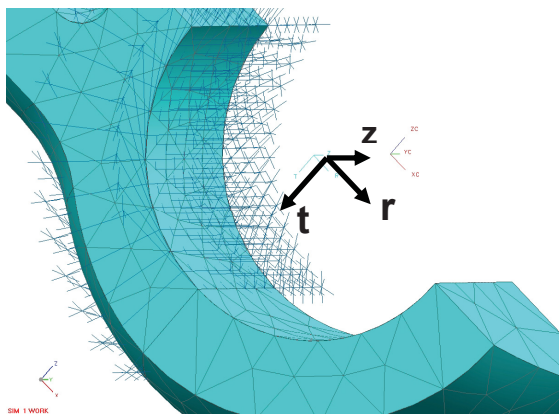


Abbildung 42: Lokales zylindrisches Koordinatensystem

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Zwangsbedingungen werden sowohl für das alte Pleuel, als auch für die Neukonstruktion verwendet.

### 5.8.4 Belastung

Aufgrund der reinen Vergleichsrechnung zwischen altem und neuem Pleuel, wird für die Simulationen eine statische Last angenommen. Die Last entspricht der Kraft, die bei maximaler Vorspannung der Luftfeder zwischen Erregerkolben und Flugkolben wirkt. In der Modellvorstellung des Pleuels werden nur Kräfte in Pleuellängsrichtung übertragen. Wird von der Reibung abgesehen, entspricht die Annahme den realen Bedingungen.

Die errechnete Kraft beträgt 1290 N. Ähnlich der Lagerbelastung am anderen Pleuelauge, wird die Kraft nur über eine Hälfte der Zylinderfläche eingebracht. Die Last entspricht einer Flächenpressung. NX Nastran bietet zur Definition einer solchen Last, die Verwendung der vordefinierten Belastungsart „Lager“. Die angegebene Last wird am Umfang, laut Abbildung 43 links, aufgeteilt. Das Beispiel zeigt die Verteilung auf 180° des Umfangs. (Handbuch NX Nastran).  $\theta$  ist die Umfangsrichtung, Z die Richtung der Symmetrieachse der Zylinderfläche. Wie die Größe der Kraft, werden auch der Winkel für die Verteilung am Umfang und die Belastungsrichtung angegeben. Die Eingaben für diesen Fall sind: 400 N für die Last, 180° für die Verteilung am Umfang, als Richtung wird die Pleuellängsachse angegeben. Die resultierende Verteilung ist der Abbildung 43 rechts schematisch zu entnehmen.

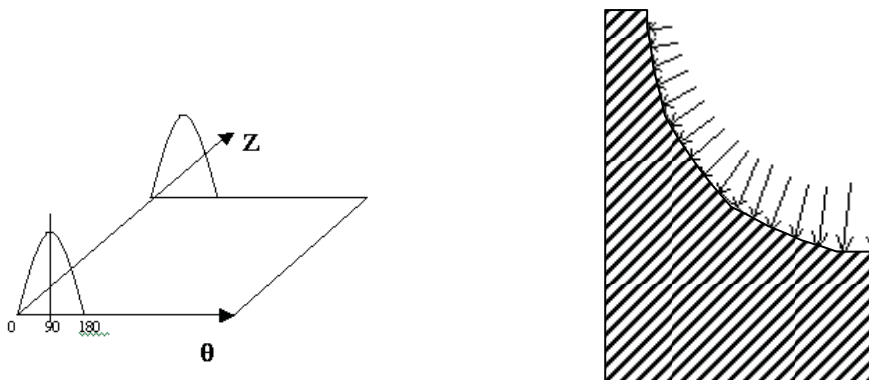


Abbildung 43: Verteilung der Last am Umfang [22]

Auch bei den Belastungen sind bestimmte Regeln für die Symmetrie gültig. Knoten auf Symmetrieebenen werden nur mit der halben Last beaufschlagt, Knoten die auf beiden Ebenen liegen, nur mit einem Viertel. Abbildung 44 zeigt links die unrichtige Belastungsart, bei der auf die Symmetrien keine Rücksicht genommen wird. Rechts wurde die Symmetrie berücksichtigt. Das Spannungsniveau steigt durch die richtige Beanspruchung von 54 MPa auf 57 MPa. Die kritischen Bereiche weisen trotzdem das selbe Spannungsniveau auf. Daher wird in weiterer Folge auf die Einhaltung der exakten Symmetriebedingung verzichtet, die Belastung also nur über die Funktion „Lager“ eingeleitet.

## 5. Potentialumsetzung

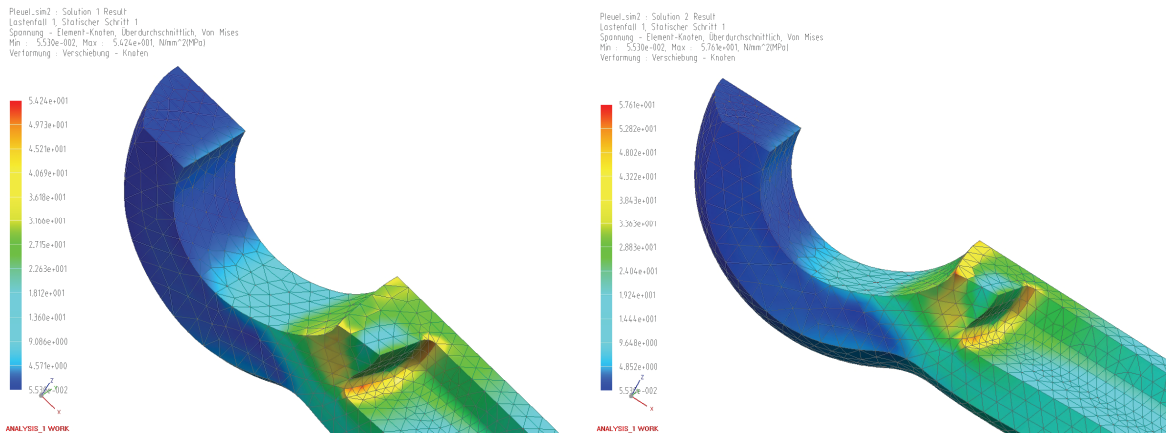


Abbildung 44: Vergleich der Belastungsarten (Spannungen nach von Mises in MPa)

### 5.8.5 Vergleich der beiden Pleuel

Die Neukonstruktion des Pleuels wird mit der bewährten Alt konstruktion verglichen. Dazu werden Zwangsbedingungen und Belastungen, laut Beschreibung in den beiden vorangegangenen Kapiteln, gesetzt.

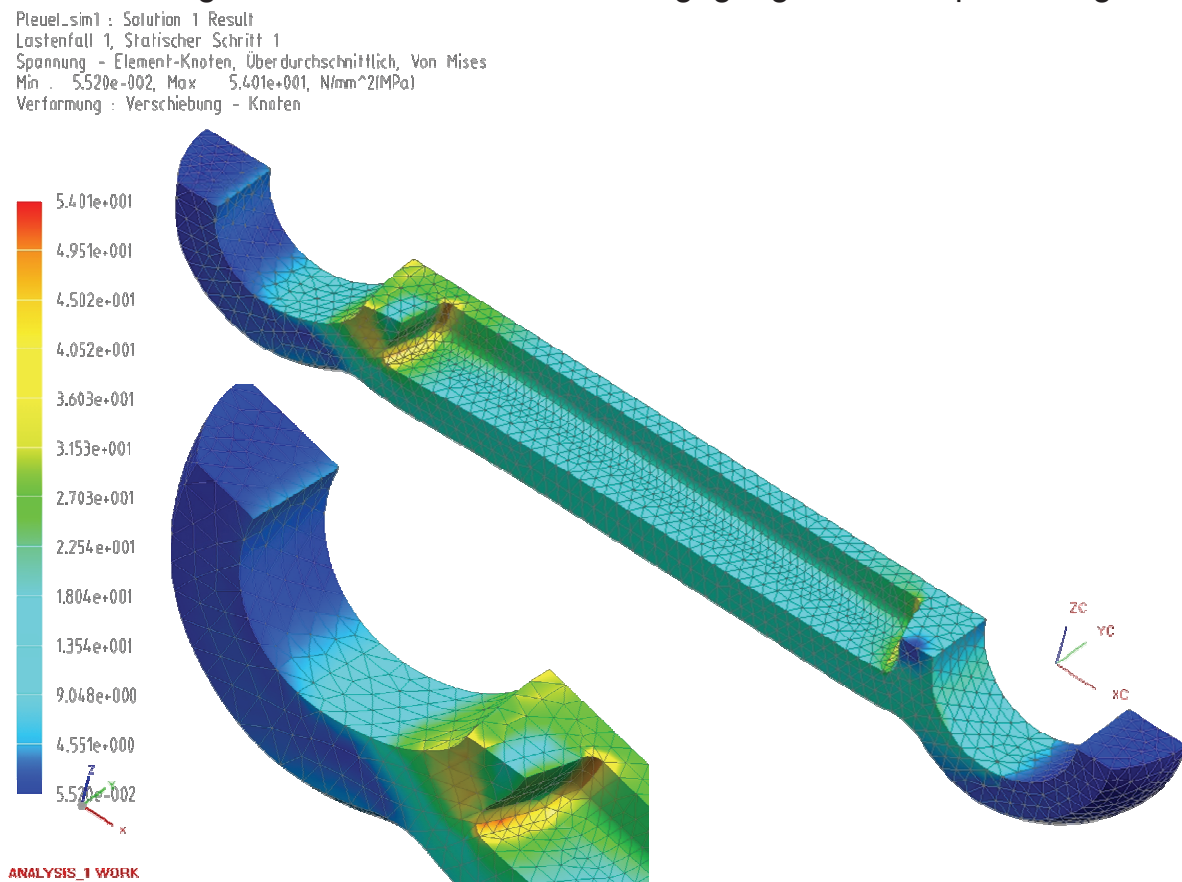


Abbildung 45: Spannungen (von Mises in MPa) in der Alt konstruktion

Folgende Schlussfolgerungen sind aus der Simulation und deren graphischer Darstellung laut Abbildung 45 ersichtlich: Die Bereiche maximaler Belastungen sind die Innenradien in der Nähe beider Pleuelaugen. Der Wert für die maximalen Spannungen beträgt etwa 55 MPa. Der zugehörige Wert der Dehnung entspricht 0,82 Prozent. Werden diese Werte in das Spannungs-Dehnungsdiagramm für die Temperatur von 100°C eingetragen, bestätigt sich die Annahme der 6250 MPa als Elastizitätsmodul für die näherungsweise Annahme linearen Materialverhaltens. Der Pleuelsteg zeigt ein konstantes Spannungsniveau von abgelesenen 19 MPa. Die äußeren Bereiche der Pleuelaugen weisen nahezu keine Spannungen auf. Dieses Ergebnis entspricht aufgrund der Art der Belastung den Erwartungen. Spannungen als auch Dehnungen liegen deutlich unter den zulässigen Werten. Abminderungsfaktoren, um die dynamische Belastung zu berücksichtigen, sind nicht verfügbar. Die etwa 20-jährige Erfahrung mit dieser und vergleichbaren Konstruktionen lassen jedoch den Schluss zu, dass die Dauerfestigkeit gegeben ist.

Ausgehend von den erlangten Vergleichswerten, kann nun die Neukonstruktion beurteilt werden. Abbildung 46 zeigt drei Ansichten der Neukonstruktion mit der farblichen Abstufung nach Höhe der Vergleichsspannungen nach Von Mises.

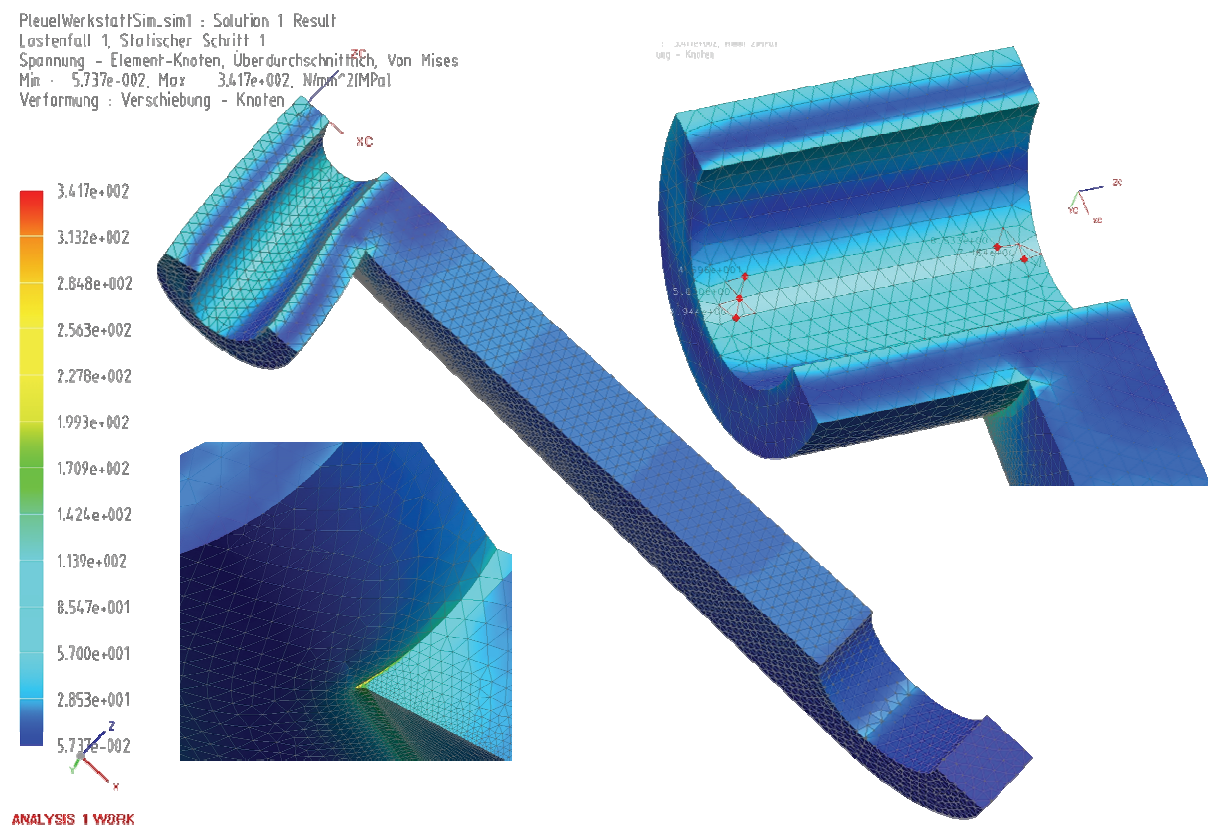


Abbildung 46: Spannungen (von Mises in MPa) der Neukonstruktion

Der erste Eindruck bei der Betrachtung der Neukonstruktion wird dominiert von einer farblichen Eintönigkeit. Blaue und türkise Bereiche dominieren die Färbung. Diese Farben repräsentieren den unteren Spannungsbereich. Der Verdacht drängt sich auf, dass die errechneten Maximalwerte auf einen kleinen Bereich beschränkt sind. Spannungen von über 300 MPa sind bei der verhältnismäßig geringen Belastung auf die Ausführung des Überganges zwischen Pleuelsteg und Zylindersegment zurückzuführen. Da es sich bei der untersuchten Konstruktion um das für Versuche spanabhebend erzeugte Modell für Prototypen handelt, sind die Übergänge fertigungsgerecht gestaltet. Die Forderung nach einer möglichst großen Auflagefläche zwischen Pleuel und Kolben führt ebenso zu kleinen Radien. Der errechnete Wert liegt jenseits der zulässigen Spannung. Der angenommene E-Modul von 3500 MPa repräsentiert das Material bei etwa 80 MPa Spannungsniveau. Der E-Modul nimmt bei höheren Belastungen auf unter 2000 MPa ab. Die örtlichen Spannungsspitzen sind daher geringer, als die Simulation zum Ergebnis hat. Aufgrund der Verteilung der Spannungen wird bei Konstruktionsoptimierungen vor allem auf die Verrundungen Wert gelegt.

Im zylindrischen Teil des Pleuels sind Spannungen bis etwa 80 MPa abzulesen. Bereiche des Pleuelstegs und des Pleuelauges weisen wesentlich geringere Spannungen auf.

Die Belastung des zylindrischen Teils führt zu einer Abplattung des Gebildes. Davon wird der Kolben beeinflusst. Die entstehende Belastung wirkt aus Sicht des Führungsrohres in radialer Richtung. Dabei wird der Kolben geweitet, was sich wiederum schlecht auf die Reibbelastung zwischen Kolben und Rohr auswirkt. Eine Versteifung im zylindrischen Bereich soll die Verformung verringern.

Die untersuchte Konstruktion ist wesentlich schlechter hinsichtlich der Lebensdauer und der Sicherheit gegen Versagen als die Alt konstruktion einzuschätzen.

Eines der vielen Argumente, die generell für die Anwendung von Kunststoffen sprechen, ist die Konstruktionsfreiheit, die die einfache und reproduzierbare Formgebung im Spritzgussprozess ermöglicht. Bei aller Freiheit müssen jedoch die Materialeigenschaften und der Prozess in der Konstruktion berücksichtigt werden. Das folgende auf Spannung und Dehnung untersuchte Modell wurde unter Berücksichtigung der nötigen Konstruktionsrichtlinien optimiert. Abbildung 47 zeigt die farbliche Darstellung der Spannungsverteilung nach Von Mises. Die Verbindung zwischen dem zylindrischen Element und dem Pleuelsteg wurde besser verrundet. Eine Wand versteift den zylindrischen Teil und die Konstruktion wurde möglichst spritzgussgerecht ausgeführt.

Die Simulation ergibt eine Verringerung der maximalen Spannungen von einer dreistelligen auf eine zweistellige Zahl. Die etwa 80 MPa im Bereich der Verrundungen sind zwar größer als die 55 MPa an vergleichbarer Stelle der alten Konstruktion, treten aber nur sehr punktuell auf und werden durch das viskoelastische Verhalten des Materials relativiert. Das Materialverhalten

## 5. Potentialumsetzung

wurde wie in den Simulationen zuvor elastisch, mit angepasstem E-Modul, betrachtet. Zudem beträgt der Wert der maximalen Spannung etwa zwei Drittel der maximalen Zugspannung laut Zugversuch. Da die maximale Druckfestigkeit, die eher der vorliegenden Belastung entspricht, höher ist als die bekannte Zugfestigkeit, ist die Sicherheit gegen Versagen bei statischer Beanspruchung größer als 1,5. Die Erfahrungen aus dem Versuch haben gezeigt, dass auch die wesentlich höheren Spannungen in den Prototypen nicht zum Versagen geführt haben, obwohl diese, realitätsgetreu, dynamisch belastet wurden.

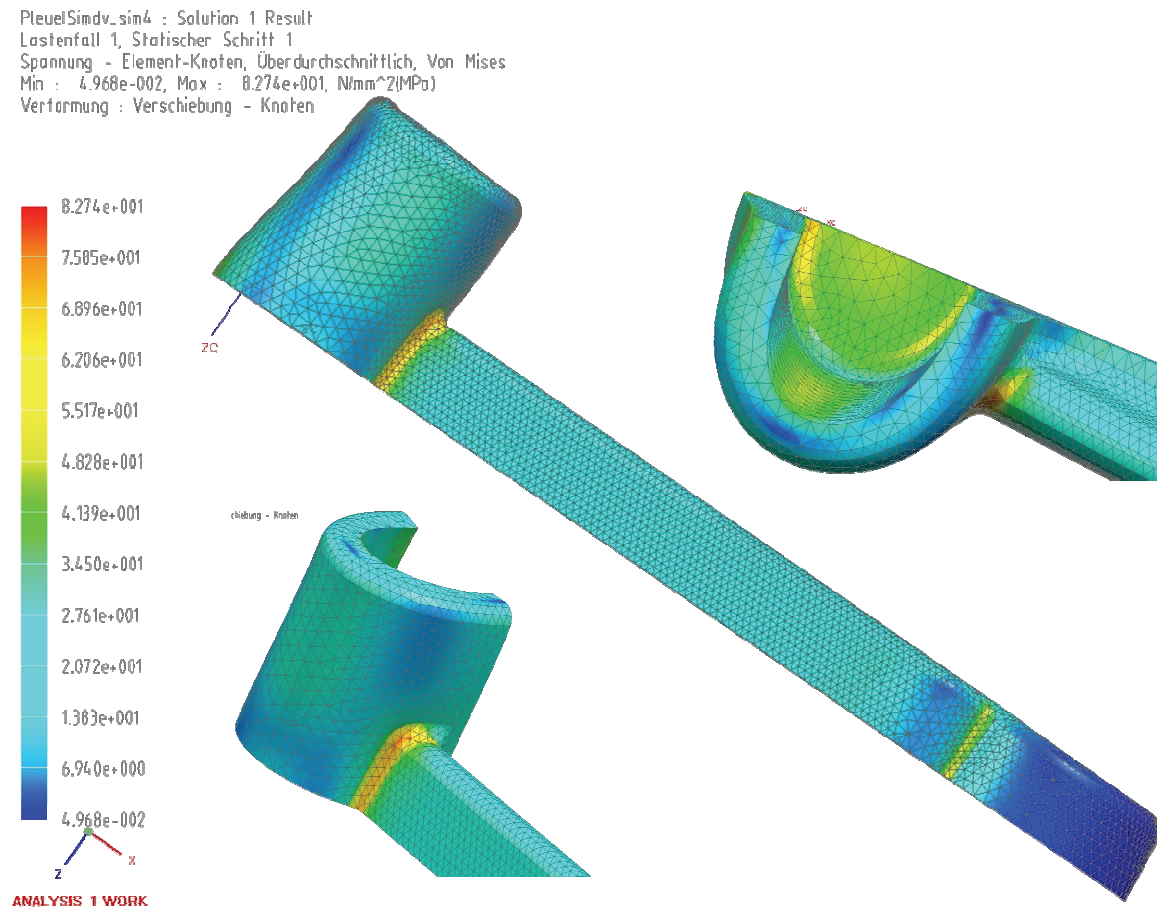


Abbildung 47: Spannungen (von Mises in MPa) der optimierten Neukonstruktion

Die Spannungen im Steg liegen im Bereich von 15 bis 25 MPa. Die Spannungen im zylindrischen Teil sind durch die versteifende Wand um ungefähr die Hälfte geringer. Dadurch sind auch die Verformung und die daraus folgende Verschleißbelastung des Kolbens geringer.

Im Vergleich zur Alt konstruktion sind die Spannungen um etwa 20 MPa höher. Gegenüber der ersten Neukonstruktion sind die Niveaus in den kritischen

Bereichen um die Hälfte geringer. An den Verrundungen sind die Unterschiede noch größer.

Jede Simulation birgt das Risiko, Ergebnisse zu errechnen, die in keiner Weise mit den realen Werten zusammenhängen. Gründe hierfür sind meist systematische Fehler, die durch falsche Annahmen, Randbedingungen oder falsche Werkstoffparameter entstehen. Um sicherzustellen, dass die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen zulässig sind und ein realitätsnahes Simulationsergebnis vorliegt, werden die simulierten Spannungswerte im Pleuelsteg den „von Hand berechneten“ Werten gegenübergestellt.

Die Belastung im Steg ist eine Druckbelastung, deren Spannungsniveau durch den Quotienten aus Kraft und Fläche errechnet werden kann. Die maximale Druckkraft beträgt 1290 N. Die Querschnittsfläche des Pleuelstegs bewegt sich zwischen 58 und 70 mm<sup>2</sup>. Die errechnete Spannung beträgt kolbenseitig 22 MPa und exzenterseitig ungefähr 18 MPa. Dies entspricht in etwa den aus Abbildung 47 abzulesenden Spannungen. Ebenso sind die errechneten Werte für die anderen simulierten Pleuelvarianten mit den Simulationsergebnissen vergleichbar.

Diese Überprüfung zeigt, dass die Simulation die Realität gut abbildet und kapitale Fehler auszuschließen sind.

### 5.9 Versuche und Tests

Die durchgeführten Simulationen dienen dem Vergleich des konventionellen Pleuels mit der Neukonstruktion. Ebenso können die Ergebnisse zur Optimierung der Geometrie beitragen. Aussagen über die tatsächliche Tragfähigkeit und Lebensdauer sind aufgrund der Vereinfachungen und Annahmen nicht möglich.

Wesentlich bessere Aussagen ermöglichen Versuchsanordnungen, in denen die Bauteile in ein Gerät eingebaut werden und unter realitätsnahen Anwendungsbedingungen getestet werden.

Um den Erregerkolben und das Pleuel zu testen, bietet sich eine Versuchsanordnung an, bei der gezielt das Schlagwerk beansprucht wird (siehe 3.6.2).

#### 5.9.1 Vergleichsmessung

Bevor der Einbau der Funktionsprototypen in ein TE 706 Gerät erfolgt, wird eine Vergleichsmessung der Einzelschlagenergie mit den Serienteilen durchgeführt. Dazu wird, ausgehend vom gemessenen Spannungsverlauf, in einem definierten Einsatzwerkzeug auf die Schlagenergie eines Einzelschlages umgerechnet. Die Einzelschlagenergie und die erreichte Schlagfrequenz sind die wichtigsten Qualitätsmerkmale des Schlagwerks.

Abbildung 48 zeigt den Mittelwert von Spannungsverläufen für 20 erfasste Schläge. Daraus errechnet die Auswertesoftware eine durchschnittliche Einzelschlagenergie von 10,6 Joule bei einer Standardabweichung von 0,2 Joule. Die Schlagfrequenz beläuft sich auf 46,0 Herz bei einer Standardabweichung von 0,3 Herz. Die elektrische Antriebsleistung beträgt 1290 Watt.

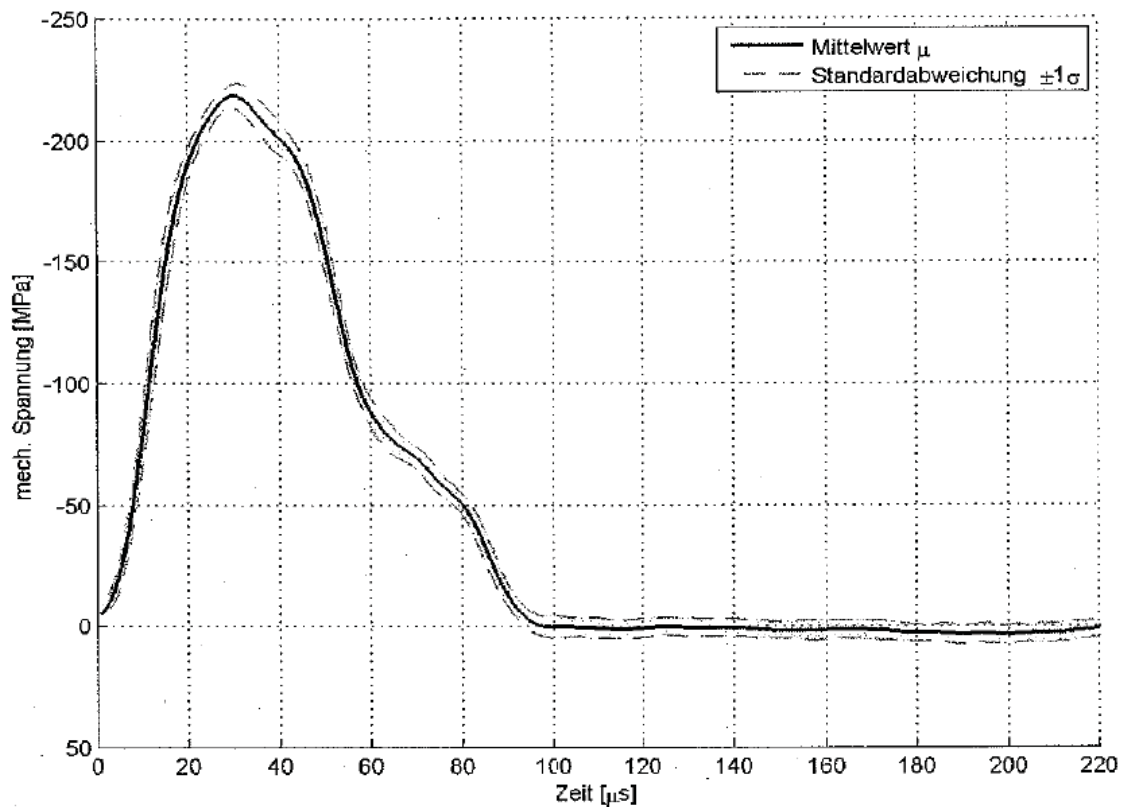


Abbildung 48: Spannungsverlauf der Vergleichsmessung [26]

### 5.9.2 Versuchsergebnisse

Nach fünf Stunden im Kugelsumpfbetrieb liegt kein mechanisches Versagen vor. Trotz der hohen simulierten Spannungen (Abschnitt 5.8.5), reichen die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes aus, einen fünfständigen Kugelsumpftest zu überstehen. Eine optische Untersuchung der Bauteile ergab keine Risse in den kritischen Bereichen.

Nach fünf Stunden stellen sich erste Verschleißerscheinungen an Kolben und Pleuel ein. Diese sind an der Stelle der Kontaktfläche zu finden, die die maximale Druckbelastung überträgt. An der Mantelfläche des Kolbens sind trotz der offenen, biegeweichen Konstruktion, keine Verschleißspuren festzustellen.

Die Oberfläche des Kolbens hat der Belastung stellenweise nachgegeben. Das Pleuel zeigt Grübchenbildung.



Der Verschleiß war zu erwarten und ist auf folgende Bedingungen zurückzuführen: Die Faserorientierung liegt normal auf die Verschleißoberflächen. Grund dafür ist die spanabhebende Fertigung der Prototypen. Der verwendete Werkstoff (PA 6.6 + CF20) ist nicht verschleiß-optimiert und wurde aufgrund der Verfügbarkeit des Halbzeuges eingesetzt. Das vorrangige Ziel war der Nachweis der Funktion der Neukonstruktion. Die Messung der Einzelschlagenergie nach dem Test erbringt den nötigen empirischen Beweis. Der Spannungsverlauf in Abbildung 49 ist abermals Grundlage für die Berechnung der Einzelschlagenergie. Diese beläuft sich auf 10,7 Joule bei einer Standardabweichung von 0,3 Joule, die Schlagfrequenz ist 46,3 Herz (Standardabweichung 0,2 Herz). Die aufgenommene elektrische Leistung entspricht 1240 Watt.

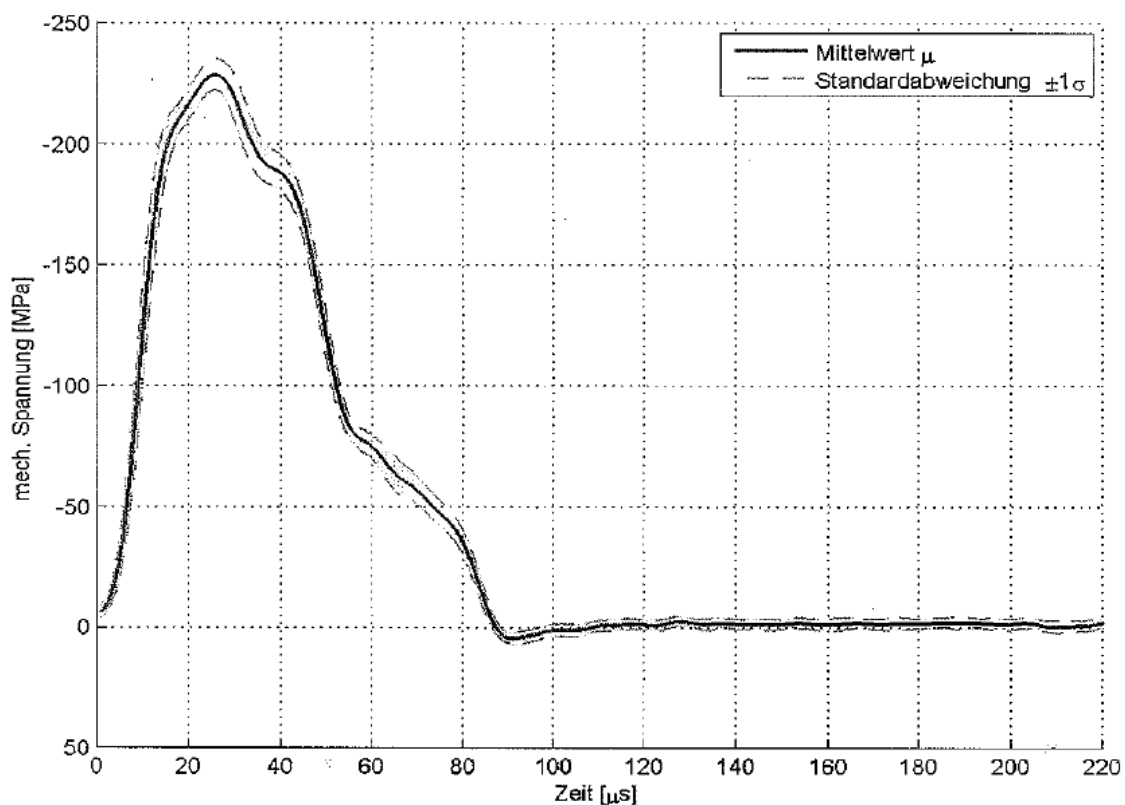


Abbildung 49: Spannungsverlauf nach dem Test [26]

Im Vergleich mit der Vergleichsmessung bleiben sowohl Schlagenergie, als auch die Schlagfrequenz vollständig erhalten. Ein Nachweis der Funktion ist somit erbracht.

### 5.9.3 Verschleißerscheinungen

Der fünfstündige Kugelsumpftest hat an den Kontaktflächen von Kolben und Pleuel Verschleißerscheinungen hervorgerufen. Abbildung 50 zeigt diese Erscheinungen. Die Kontaktflächen zeigen Verformungen, die auf eine hohe Kontakttemperatur schließen lassen. Der Kolben zeigt diese Verformungen im unteren Bild sehr deutlich. Das stark erwärmte und dabei an Festigkeit verlierende Material wird aus den hoch beanspruchten Bereichen verdrängt und schlägt abseits der Kontaktfläche Falten.

Die eigentliche Verschleißerscheinung, bei der die Oberfläche abgetragen wird, ist auf einen kleinen Bereich beschränkt. An den Kontaktflächen von Kolben und Pleuel bilden sich Grübchen. Die Reibzahl verschlechtert sich durch die steigende Rauigkeit, was sich zunehmend negativ auf den weiteren Verschleiß auswirkt. Der hohe Reibwiderstand war nach dem Kugelsumpftest beim Ausbau der Bauteile zu spüren. Die Schwergängigkeit des Gelenks erinnerte an ein Verschweißen der Oberflächen miteinander. Durch mehrmaliges Schwenken des Gelenks, verringerte sich der Widerstand zunehmend, wodurch die guten Werte bei der Messung der Einzelschlagenergie erklärt werden können.

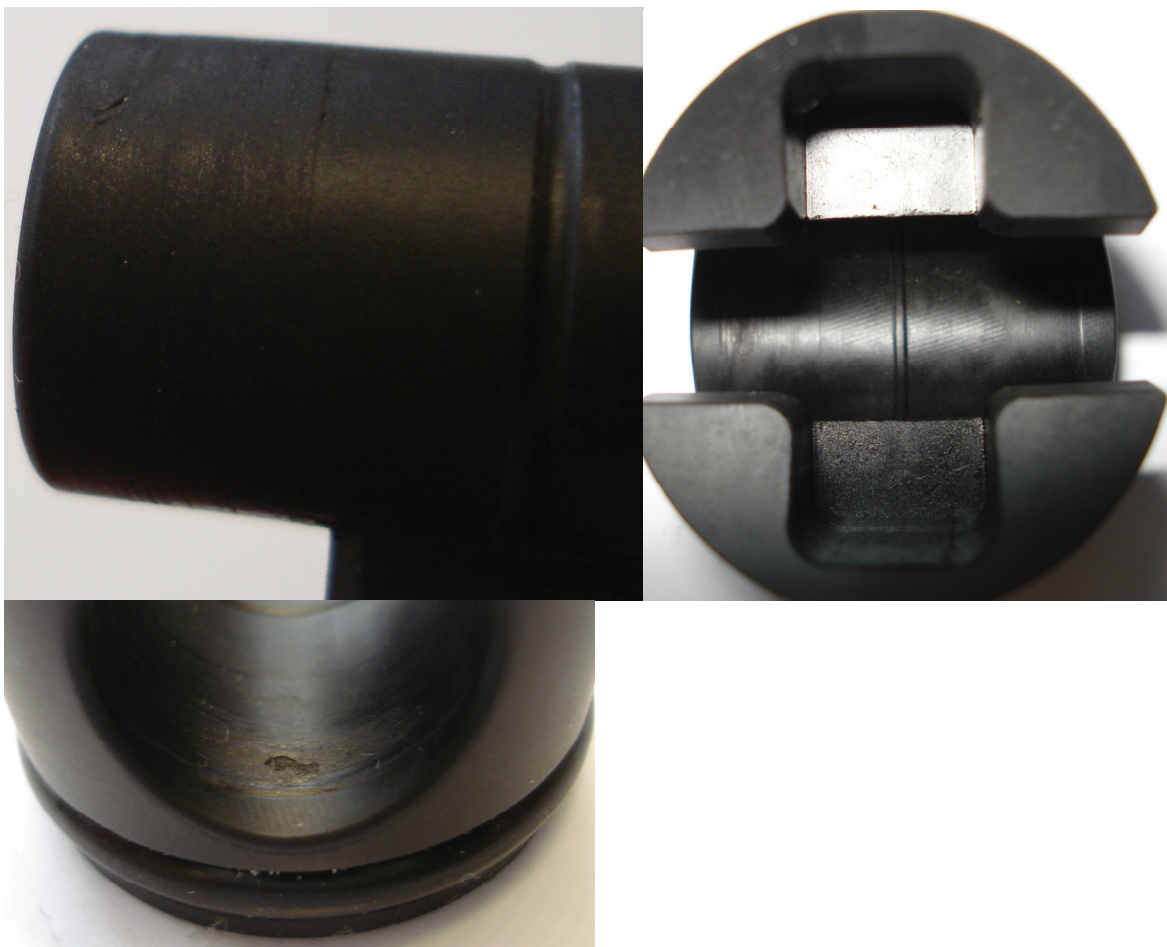


Abbildung 50: Verschleißerscheinungen

Trotz Erreichens von fünf Betriebsstunden im Kugelsumpf und Aufrechterhaltung der Einzelschlagenergie über diese Dauer, kann davon ausgegangen werden, dass die angestrebte Lebensdauer von 255 Stunden mit der untersuchten Materialkombination nicht erreicht werden kann.

## 5.10 Verarbeitungsverfahren

Soll der Vorteil der geringeren Herstellkosten von komplizierten Kunststoffbauteilen gegenüber entsprechenden Bauteilen aus Stahl oder anderen Metallen voll ausgeschöpft werden, muss die vollständige Formgebung in einem Schritt geschehen. Das gängigste Herstellungsverfahren dafür ist das Spritzgießen.

Die Beherrschbarkeit des Prozesses und die Qualität der produzierten Formteile sind stark von der Qualität der Konstruktion abhängig. Zu beachten sind: Leichte Entformbarkeit durch Entformungsschrägen; möglichst gleiche Wandstärken und Vermeidung von Materialanhäufungen, um Schwindungsgradienten die zu Verzug führen, zu vermeiden;

Bei der Optimierung der Konstruktionen von Pleuel und Kolben wurde genau auf diese Aspekte geachtet. Dabei mussten Kompromisse zugunsten der Funktion und dem Spannungsniveau gemacht werden.

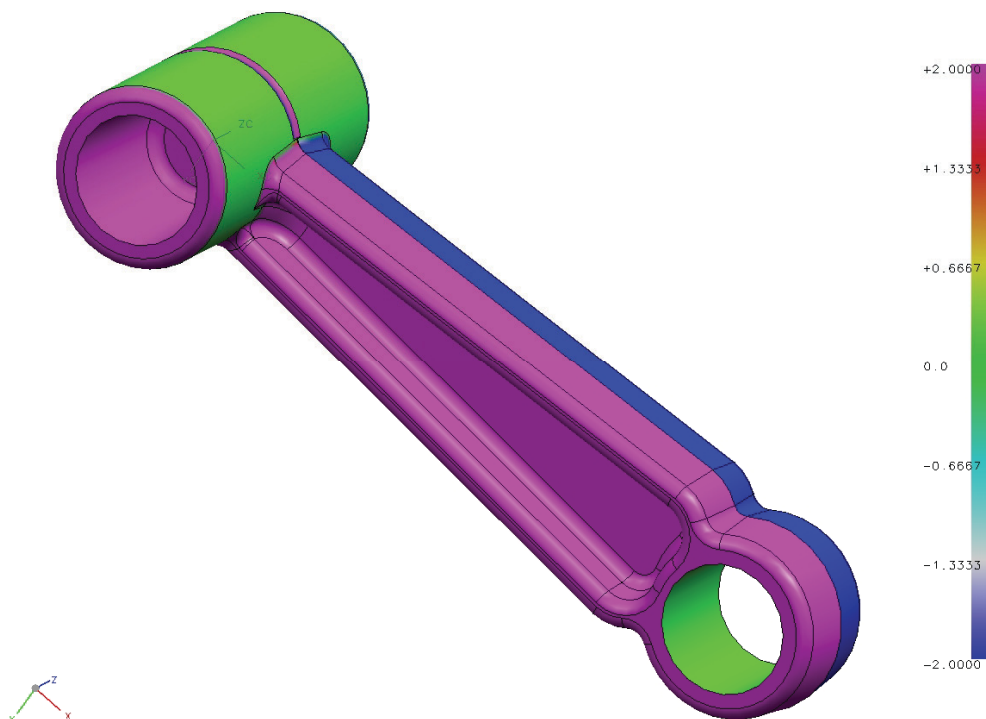


Abbildung 51: Entformbarkeit des Pleuels

Abbildung 51 zeigt das Modell des Pleuels. Die Optimierung zugunsten der Spannungen sind in Abschnitt 5.8.5 beschrieben. Die farbige Darstellung der Flächen in Abbildung 51 beschreibt die Neigung der Flächen zum Vektor in Entformungsrichtung. Magenta steht für die positive Neigung im Sinne der Entformbarkeit. Blau werden Flächen dargestellt die eine negative Neigung aufweisen. Die Grenzfläche entspricht der Trennebene. Abgesehen von den grünen Flächen, ist das Modell vollständig entformbar. Diese Flächen verfügen über keine Entformungsschräge beziehungsweise Konizität. Es handelt sich dabei um die Funktionsflächen, die die Gelenke mit Exzenter und Kolben bilden. Das Pleuelauge, das über den Zapfen des Exzenters geschoben wird, hat eine Tiefe von 10 mm. Die geringe Abmessung ermöglicht das Entformen, ohne zu große Entformungskräfte hervorzurufen. Sämtliche Kunststoffpleuel kommen ohne empfohlene Konizitäten von mindestens  $0,5^\circ$  aus. [23]

Die Abmessung der zweiten zylindrischen Funktionsfläche ist in ihrer Tiefe etwa dreimal so groß. Im Unterschied zum Pleuelauge, schrumpft dieser Bereich aber nicht auf den Kern auf, sondern zeigt die Tendenz sich von der Werkzeugwand abzuheben. An dieser Stelle kommt die Schwindung der Entformbarkeit entgegen. Kritisch ist die Hinterschneidung in Form der Nut, die der Axialsicherung des Kolbens dient. Trotz der geringen Tiefe von nur 0,225 mm sollte die Entformbarkeit von erfahrenen Werkzeugkonstruktoren überprüft werden. Gegebenenfalls müssen Schieber eingesetzt werden.

Materialanhäufungen sind hinsichtlich der Forderung nach einem günstigen und daher einfachen Spritzgusswerkzeug und der Notwendigkeit von Radien, um sehr hohe Spannungen zu vermeiden, nicht gänzlich zu vermeiden. Der Steg wurde speziell für diese Anforderungen angepasst. In der Nähe des Pleuelauges, wurde die Breite verringert, um die vorhandene Materialanhäufung zu verringern. Gleichzeitig bleibt aber die Knickstabilität des Steges nahezu gleich und das Spannungsniveau durch die Kerbwirkung ebenfalls unter den Werten anderer Bereiche (Abbildung 47).

Die Materialansammlung durch die zusätzlich eingezogene Wand zur Verbesserung des Krafflusses, ruft eine Einfallstelle im Bereich der Nut hervor. In Abbildung 52 ist dieses Verhalten stark übertrieben eingezeichnet. Diese Einfallstelle kommt der Entformbarkeit zugute. Eventuell muss das Gegenstück zur Nut, die Nase im Kolben, vergrößert werden.

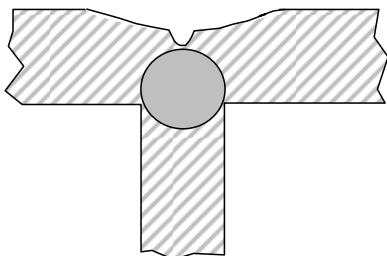


Abbildung 52: Einfallstelle im Bereich der Nut

Diese Einfallstelle ist ein Beispiel dafür, wie aus einem primär negativen Effekt, ein Nutzen gezogen werden kann.

Dieselben Konstruktionskriterien wie für das Pleuel, wurden für den Erregerkolben angewandt. Abbildung 53 zeigt links die Entformbarkeit in Richtung der Symmetrieachse der Bohrung. Die Trennebene des Werkzeugs ist dabei wieder am Farbwechsel von magenta auf blau zu erkennen. Rechts bezieht sich die farbliche Darstellung der Entformungsschrägen auf die Auszugsrichtung des Kerns, in Richtung der gedachten Symmetrielinie des Führungsrohres.

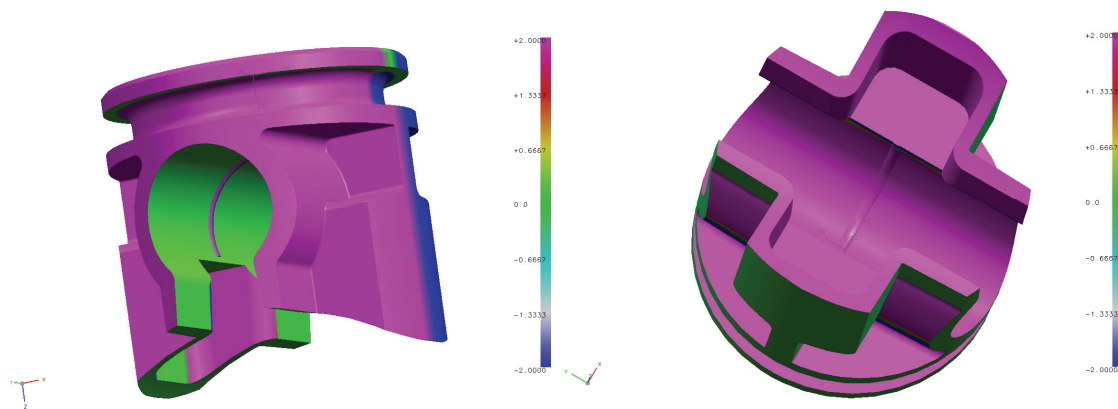


Abbildung 53: Entformbarkeit des Erregerkolbens

Die offene Bauweise des Kolbens erleichtert das Entformen. Dadurch kann auch hier die Bohrung ohne Konizität gefertigt werden.

Kritisch ist die große Wandstärke des Kolbenbodens. Die Dicke von 6 mm und mehr, kann zu Lunkern und ungewollten Einfallstellen führen. Eine optimierte Prozessführung ist für die Minimierung dieser Probleme notwendig. Abhilfe schafft auch der Einsatz von Treibmitteln, wobei die Verminderte mechanische Belastbarkeit durch die Porenbildung zu beachten ist. Bei Wandstärken ab vier Millimetern, können Treibmittel zu einer Dichteabnahme von bis zu 60% führen. Diese wirkt sich vermindern auf das Gewicht aus. [24]

Der Anspritzpunkt für den Kolben ist Zentral im Kolbenboden zu setzen. Dieser weist die größte Wandstärke auf. Erregerkolben bei Hilti werden in der Praxis auf diese Art angespritzt.

Etwas schwieriger gestaltet sich das Setzen des Anspritzpunktes des Pleuels. Eine Simulation des Füllvorganges mittels CFD-Software (Computational Fluid Dynamics) ist zu empfehlen. Hauptaugenmerk ist auf die Lage der Bindenähte zu legen. Diese sollen sich weder in Bereichen hoher Spannungen, noch an verschleißbelasteten Oberflächen befinden. Ebenso sollte der Anspritzpunkt selbst, nicht an den beschriebenen Bereichen gesetzt werden. Grund dafür sind die niedrigen Festigkeiten von Bindenähten und der Einfluss der Faserorientierung auf das Verschleißverhalten. Die gelenkbildenden Oberflächen, die großen Verschleißbelastungen ausgesetzt sind, profitieren

von der Faserrichtung, wenn diese parallel zur Oberfläche ausgebildet ist. Im Bereich von Bindenähten und Anspritzpunkten ist das nicht möglich.

Die Pleuelaugen des aktuell verbauten Pleuels werden überspritzt und das überschüssige Material über einen Überflussskanal in eine separate Kammer geleitet. Dadurch werden Bindenähte vermieden. Das Problem der geringeren Festigkeiten wird damit gelöst, der Verschleiß der Neukonstruktion würde aber durch die resultierende Faserorientierung negativ beeinflusst.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge der Durchführung dieser Arbeit konnten mehrere Ziele erreicht werden. Das Hauptaugenmerk lag auf der Auswahl von metallischen Bauteilen in handgeführten Elektrowerkzeugen der Firma Hilti, die sich dazu eignen, durch Kunststoffbauteile ersetzt zu werden. Es gelang, sämtliche Substitutionspotentiale in zwölf Geräten, die Bohr-, Kombi- und Meisselhämmer umfassen, aufzuzeigen. Die Kriterien für die Beurteilung der Potentiale konnten dokumentiert und in einer einheitlichen Form zugänglich gemacht werden. Neben der prinzipiellen Eignung von alternativen Werkstoffen, wurde vor allem auf Gewichts- und Kostenvorteile geachtet.

Neben der Substitutionserhebung konnte eine Vorgehensweise für dieselbe erarbeitet werden. Aufbauend auf der beispielhaften Erhebung anhand der Hilti-Geräte, konnte eine einheitliche Vorgehensweise und deren Beschreibung erstellt werden. Diese nimmt Rücksicht auf die Eigenheiten und vor allem die Unterschiede von polymeren Werkstoffen und Metallen. Die Besonderheit der erarbeiteten Systematik zur Potentialerhebung ist in der Zentralisierung aller Substitutionsbestrebungen eines Produktbereiches und der effektiven, einheitlichen und integrierten Methodik der Bewertung und Dokumentation zu sehen.

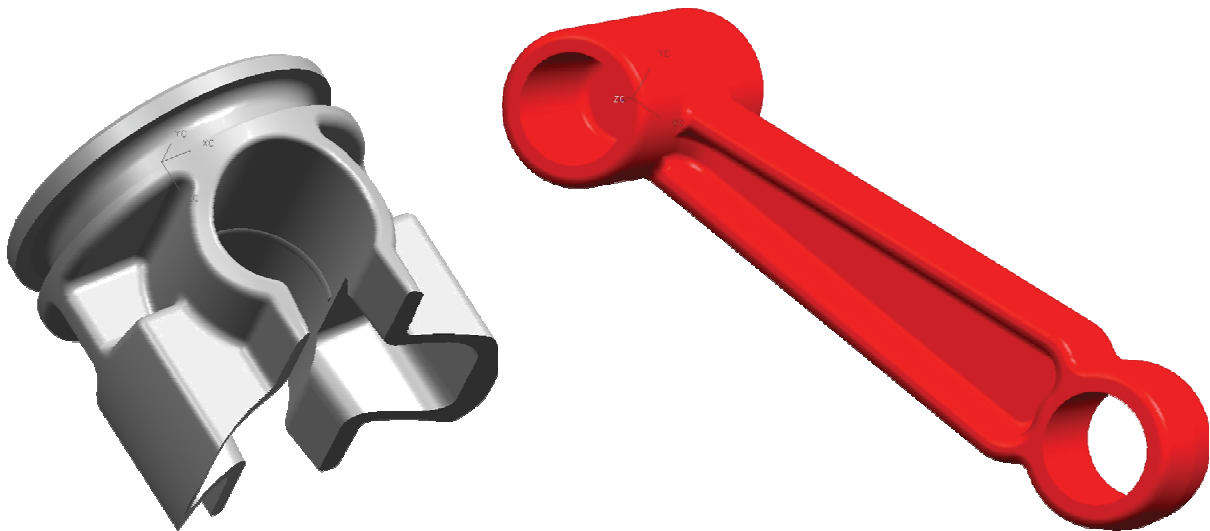
Die erarbeitete Vorgehensweise und die darauf aufbauende Potentialdarstellung kann in deren Form und Aufbau für sämtliche Produktbereiche von Hilti übernommen werden. Auch in anderen Unternehmen kann die Vorgehensweise zur Verbesserung und Zentralisierung der Substitutionsbestrebungen eingesetzt werden.

Im Allgemeinen wird auf Veränderungen, aber speziell auf vermehrten Einsatz von Kunststoffen, oft mit Ablehnung und Unverständnis reagiert. Die einheitliche Potentialdarstellung und die Dokumentation der Informationen in der erarbeiteten Form, fördern die Kommunizierbarkeit und Argumentation der angestrebten Veränderungen in Form der Substitution.

Während bei der flächendeckenden Detektion von Substitutionspotentialen eher oberflächlich auf die Anforderungen an den Werkstoff und die Höhe der Belastungen eingegangen wird, wurde am Beispiel der gelenkigen Pleuel-Kolbenverbindung sehr genau auf die Eigenheiten von Kunststoffen und deren Auslegung geachtet. Hier wurde vor allem auf die Schwierigkeit der Materialbeschreibung zu Zwecken der Simulation hingewiesen. Beispielhaft konnten die Vorzüge von Kunststoffen bei Formgebung und Eigenschaftsbeeinflussung genutzt werden, um durch die Materialsubstitution und eine konstruktive Anpassung, Gewicht und Kosten einzusparen. Der Funktionsnachweis der Neukonstruktion, die auch als Erfindung gemeldet wurde, konnte erbracht werden. Der Grundstein zur Auswahl eines geeigneten Kunststoffes, der sehr hohen Verschleißbeanspruchungen ausgesetzt ist, wurde gelegt. Die Beeinflussungsmöglichkeiten der Verschleißeigenschaften vor, während und nach dem Herstellungsprozess wurden aufgezeigt.

Um die alternative Gelenkverbindung in die Serienreihe überführen zu können, werden zusätzliche tribologische Untersuchungen benötigt, die auf den bestmöglichen Werkstoff schließen lassen. Um genaueres Wissen über den Herstellungsprozess zu erlangen, der Einfluss auf Festigkeiten und Verschleiß hat, wird die Simulation des Füllvorganges und eine darauf aufbauende Optimierung des Spritzgießwerkzeugs benötigt.

Abhängig vom eingesetzten Werkstoff und dessen Füllstoffe und Additive, kann beim Verband Kolben-Kolbenbolzen-Pleuel eine Kosteneinsparung zwischen 20 und 25% erreicht werden. Die Gewichtseinsparung des Verbands beläuft sich bei der Endversion der Modelle laut Abbildung 54 auf knapp 30%.



*Abbildung 54: Endversion der Modelle von Kolben und Pleuel*



## 7 Literaturverzeichnis

- [1] *Schad, H.*: Handbuch Physik des Hammerbohrens, Hilti Bericht, 2004
- [2] *Bosch*: Bosch, Power Tools, Learning Campus,  
<http://www.powertool-portal.com/content.aspx>, 1/2010
- [3] *Wiedner, A.*:Diplomarbeit: Kybernetische Systemanalyse und Entwicklung von Konzepten für das Abstellen von Erregerzylinderschlagwerken, Karlsruhe, 2008
- [4] *Bonnet, M.*:Kunststoffe in der Ingenieursanwendung, Vieweg und Teubner, Wiesbaden, 2009
- [5] *Götzfried S.*., Staubverschleppungstests in der TE 76, Hilti Bericht HTV 02-030, 2002, Kaufering
- [6] *Röthemeier, F.*: Kautschuk Technologie, Werkstoffe-Verarbeitung-Produkte, 2.Auflage, Hanser Wien München, 2006
- [7] *Klette, G.*: Unigraphics NX5 – kurz und bündig S.1, 2.Auflage,Vieweg und Sohn Wiesbaden, 2008
- [8] Schamberger M.: Zeichnung 356095 E 151042, Kaufering, 2009
- [9] *Achnitz, R.*: 25 Jahre Kunststoff- Gleitlager, Konstruktion 7/8 2009,

S.11-13, Springer VDI Verlag

[10] *Ludwig, M.*: Hilti Berechnungsbericht TPNK 2007-028, Kaufering, 2007

[11] *IGUS*: Igus GmbH Köln, Katalog, Polymere Gleitlager, 2008

[12] *GKN Sintermetals*: Bearings Technology, Broschüre, 5.Auflage, 2004,

<http://www.gknsintermetals.com/ger/images/bearings.pdf>, 08/2009

[13] *Basshuysen, van*: Handbuch Verbrennungsmotor, 3.Auflage, Vieweg

und Sohn Wiesbaden, 2005

[14] *Köhler, E.*: Verbrennungsmotoren, 4.Auflage, Vieweg und Sohn,

Wiesbaden 2006

[15] *Zima, S.*: Motorkolben: Bauarten, Betrieb, Schäden, 1.Auflage, Vieweg und

Sohn Wiesbaden, 2005

[16] *Zima, S.*: Kurbeltriebe, 2.Auflage, Vieweg und Sohn, Wiesbaden, 1999

[17] *Domininghaus, H.*: Kunststoffe, 7.Auflage, Springer Berlin-Heidelberg

2004/2008

[18] *Metten, M.*: Veränderung der Verbundfestigkeit von Hart/Weich-Verbunden

und die mechanischen Eigenschaften von thermoplastischen Elastomeren

durch eine Elektronenbestrahlung, Dissertation, TU Darmstadt, 2002

- [19] *Ehrenstein, G.W.*: Strahlenvernetzte Kunststoffe, Verarbeitung, Eigenschaften, Anwendung, Springer VDI Düsseldorf, 2006
- [20] *Bottenbruch, L.*: Polyamide, Kunststoff-Handbuch Band 3/4, Technische Thermoplaste, Hanser Wien, 1998
- [21] *Götz, W.*: Plastverarbeiter, Zeitschrift, Nr.7 2008, S.18-21, Hüthig Verlag, Heidelberg
- [22] *NX Nastran Hilfe*: Direkthilfe in UG NX5, Sucheingabe „Bearing“
- [23] *Brinkmann, T.*: Kunststoffbauteile Werkstoffgerecht konstruieren, Hanser Wien, 1995
- [24] *Jaroschek, C.*: Spritzgießen für Praktiker, Hanser München, 2003
- [25] *Heim, R.*: FEM mit Nastran, Carl Hanser Verlag Wien München, 2005
- [26] *Hilti Entwicklungsgesellschaft*: interne Dokumentation

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Modellartige Darstellung des Hammerbohrens	4
Abbildung 2:	Elektropneumatisches Schlagwerk	4
Abbildung 3:	Einteilung der Hammerwerkzeuge nach Einzelschlagenergie und Schlagfrequenz	6
Abbildung 4:	Funktionsweise des Getriebes	6
Abbildung 5:	Elektropneumatisches Schlagwerk (EP-Schlagwerk)	8
Abbildung 6:	Erregerkolbenschlagwerk	10
Abbildung 7:	Erregerzylinderschlagwerk	10
Abbildung 8:	Einteilung der Werkzeugaufnahmen, vgl [2]	11
Abbildung 9:	Werkstoffverteilung in TE-Geräten [26]	14
Abbildung 10:	Systematische Vorgangsweise der Potentialerhebung	20
Abbildung 11:	Lagerschild 356096 mit kritischen Bereichen [26]	28
Abbildung 12:	Lagerbuchsen v.l.n.r.: 366253, 354952, 366241 [26]	29
Abbildung 13:	Einbausituation Lagerbuchse 354952 [26]	30
Abbildung 14:	Leistungsgrenze Lagerwerkstoffe	31
Abbildung 15:	Scheibe 366236 (links), Einbausituation (rechts)	32
Abbildung 16:	Käfig 354979 (links), Anschlag 355004 (rechts) [26]	33
Abbildung 17:	Spannband 330089, grau [26]	33
Abbildung 18:	Getriebe [26]	40
Abbildung 19:	Statistische Bewertung TE 60	42
Abbildung 20:	Wirkflächenpaare mit und ohne Kolbenbolzen (Zylinderstift)	43
Abbildung 21:	Ordnerhierarchie mit Verlinkungen	48
Abbildung 22:	Verlinkung	49
Abbildung 23:	Quelltext für Makro „Hyperlink()“ in Microsoft Word	50
Abbildung 24:	Übersichtstabelle Substitutionspotentiale	53
Abbildung 25:	„Flow-Chart“ für die Bauteilbewertung nach Substitutionspotential	55
Abbildung 26:	Kreativitätsfreiraum	60

---

Abbildung 27:	links: Verkippen, rechts: Begrenzung der Kolbenlänge	61
Abbildung 28:	Geometrische Verhältnisse am Kurbeltrieb [13]	63
Abbildung 29:	Kinematik des Kurbeltriebs	64
Abbildung 30:	Belastungsfälle; links: Zug, rechts: Druck	65
Abbildung 31:	Druck- und Temperaturverlauf [26]	66
Abbildung 32:	Druckkraft in Pleuellängsrichtung	67
Abbildung 33:	Verlauf von $p \cdot v$	68
Abbildung 34:	Flächenpressung über Gleitgeschwindigkeit	69
Abbildung 35:	Taumelkolben	73
Abbildung 36:	Schnappverbindung	75
Abbildung 37:	Kolbenmodelle für unterschiedliche Montagerichtungen	75
Abbildung 38:	Auswahl des Konstruktionskonzeptes	76
Abbildung 39:	Prototypen	77
Abbildung 40:	Elementvergleich bei unterschiedlichen Vernetzungsdichten	80
Abbildung 41:	Modell des Pleuels unter Ausnutzung der Symmetrien	81
Abbildung 42:	Lokales zylindrisches Koordinatensystem	82
Abbildung 43:	Verteilung der Last am Umfang [22]	83
Abbildung 44:	Vergleich der Belastungsarten	84
Abbildung 45:	Spannungen (von Mises in MPa) in der Altkonstruktion	84
Abbildung 46:	Spannungen (von Mises in MPa) der Neukonstruktion	85
Abbildung 47:	Spannungen (von Mises in MPa) der optimierten Neukonstruktion	87
Abbildung 48:	Spannungsverlauf der Vergleichsmessung [26]	89
Abbildung 49:	Spannungsverlauf nach dem Test [26]	90
Abbildung 50:	Verschleißerscheinungen	91
Abbildung 51:	Entformbarkeit des Pleuels	92
Abbildung 52:	Einfallstelle im Bereich der Nut	93
Abbildung 53:	Entformbarkeit des Erregekolbens	94
Abbildung 54:	Endversion der Modelle von Kolben und Pleuel	97

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Chemikalienaufkommen in Hilti Bauhämmern	12
Tabelle 2:	Geräteportfolio	19
Tabelle 3:	Grau gekennzeichnete Bauteile, Auszug, TE 60-3 ATC	23
Tabelle 4:	Gelb gekennzeichnete Bauteile, Auszug, TE 60-3 ATC	24
Tabelle 5:	Bewertete Bauteile (TE 60-3)	26
Tabelle 6:	Lagerlasten Gleitlager TE 60	31
Tabelle 7:	Rote Bauteile mit Beschreibung [26]	35
Tabelle 8:	Substitutionskriterien	47
Tabelle 9:	Bauteilauswahl	59
Tabelle 10:	Werte für die Berechnung der Belastung im Leerlauf	65
Tabelle 11:	Freiheitsgrade	81