



Masterarbeit

Polymere mikro- und nanoskalige Compounds mit verbesserten tribologischen Eigenschaften

verfasst von

Matthias Walluch



Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Clemens Holzer

Leoben, November 2013

Eidesstattliche Erklärung

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

Datum

Unterschrift

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mir während meiner Studienzeit und vor allem auch beim Verfassen dieser Diplomarbeit zur Seite standen und auf die ich mich immer verlassen konnte.

Dabei gilt natürlich ein ganz besonderer Dank meiner Familie, also meinen Eltern und meiner Schwester Martina, die mich immer sowohl moralisch und/oder finanziell unterstützten und denen somit ein großer Anteil am Gelingen meines Studiums und dieser Diplomarbeit gebührt.

Einen weiteren, ganz besonders wichtigen Beitrag dazu leistete natürlich meine Partnerin, Andrea Gamweger, die mir die gesamte Zeit meines Studiums geduldig zur Seite stand und immer ein offenes Ohr für meine Sorgen und Probleme hatte. Sie baute mich in Phasen, in denen die Dinge nicht nach Wunsch liefen wieder auf und verstand es auch, mich, wenn es nötig war, anzutreiben. Auch Wolfgang Kienzl, mit dem ich seit der ersten Uni-Woche sehr gut befreundet bin und mit dem ich mich gemeinsam durch das Studium „kämpfte“, möchte ich hier besonders erwähnen. Er stand mir während des gesamten Studiums sowohl privat als auch fachlich immer mit Rat und Tat zur Seite und auch das verdient ein spezielles Dankeschön im Vorspann zu dieser Arbeit.

Ein Dank gebührt natürlich auch all jenen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung, die dazu beitrugen, dass ich diese Arbeit schreiben konnte und die ihren Beitrag zum Lösen so mancher Probleme, die im Laufe eines solchen Projekts auftreten können, und zum Gelingen meiner Versuche leisteten. Im Einzelnen sind das Ramesh Kumar Selvasankar und Milan Kracalik, die das Projekt zu Beginn und bis zu ihrem jeweiligen Ausscheiden aus der Montanuniversität betreuten, sowie Andreas Witschnigg, der es danach von den beiden übernahm. Sie standen mir fachlich immer zur Seite und erleichterten mir so ein gutes Vorankommen in allen Phasen der Arbeit. Auch Alexander Eder war mir bei dem ein oder anderen technischen Problem mit dem Compounder oder den Dosierwaagen eine große Hilfe.

Für seine Unterstützung bei den tribologischen Untersuchungen und deren Auswertungen möchte ich auch Andreas Hausberger vom PCCL herzlich danken.

Kurzfassung

Heutzutage nimmt das Umweltbewusstsein immer mehr zu. Auch Motoren- und Getriebeentwickler suchen ständig nach neuen Wegen den CO₂-Ausstoß von Fahrzeugen zu reduzieren. In Getrieben kann dies durch eine Reduktion der Reibungsverluste, welche zwischen der Getriebekette und der für ihren präzisen Lauf verantwortlichen Kettenführung, welche aus Kunststoff gefertigt wird, erreicht werden. Dabei gibt es etliche Angriffspunkte, wie das Layout des Kettentriebs, die Geometrie der Kettenräder oder auch Veränderungen an der Kette, die zu einer Verbesserung der Gleiteigenschaften beitragen können. Eine weitere Möglichkeit um die Verluste zu verringern ist es die Reibung, welche zwischen der Kette und der Kunststoffschiene auftritt, durch eine Modifizierung der Reibpartner zu reduzieren.

Das Ziel dieser Arbeit ist es die Reibungsverluste, welche zwischen Stahl und Kunststoff auftreten, durch eine Modifizierung des Polymers mit unterschiedlichen Mikro- und Nanopartikeln zu erreichen. Dazu wurden zunächst die für den Einsatz als Kettenführung in Frage kommenden Polymere gesucht um mögliche Alternativen zum aktuell eingesetzten Werkstoff zu finden. Dabei fiel die Wahl auf drei Polymere, zwei Polyamide 66, wovon eines auch der aktuell eingesetzte Werkstoff ist, sowie ein Polyamid 46. Diese drei Polymere wurden als Matrixwerkstoff für Compounds mit jeweils 5 Gewichtsprozent unterschiedlicher Nanopartikel eingesetzt. Als Additive kamen unterschiedliche Schichtsilikate, Quarzsande mit sphärischen Partikeln sowie Polytetrafluorethylen (PTFE) zum Einsatz. Aus den 51 Proben (48 Compounds und die drei unmodifizierten reinen Polymere) wurden Platten gepresst, welche in weiterer Folge mit der Pin-on-Disc Methode auf einem Mikrotribometer auf deren tribologische Eigenschaften geprüft wurden. Neben dem Einfluss der unterschiedlichen Additive auf den Reibwert der einzelnen Compounds in einem geschmierten Reibsystem bei unterschiedlichen Anpresskräften und unterschiedlich Relativgeschwindigkeiten wurde auch der Verschleiß der einzelnen Proben ohne Ölschmierung analysiert.

Die Resultate zeigen zunächst, dass die Reib- und Verschleißwerte der ungefüllten Polyamid 66 Typen teilweise deutlich unter jenen des Polyamid 46 liegen. Desweiteren zeigt sich, dass sich die Werte der PA 66 Typen vor allem durch die Zugabe von einigen Schichtsilikaten noch weiter verbessern lassen, wogegen die Auswirkungen auf das PA 46 eher gering ausfallen. Den allgemein positivsten Einfluss sowohl auf den Verschleiß als auch auf den Reibkoeffizienten der Polymere hat ein Schichtsilikat. Dieser Filler führt bei allen durchgeführten Prüfungen an allen Materialien zu verbesserten tribologischen Eigenschaften. Der Einsatz von sphärischen Füllstoffen oder PTFE bringt hingegen zu meist keine deutliche Verbesserung mit sich.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen als Grundlage für weitere Versuche und eine weitere Optimierung der tribologischen Eigenschaften der Compounds dienen. Es soll unter anderem der Einfluss der Temperatur auf die Reibzahlen einiger der Compounds ermittelt werden. Desweiteren ist es angedacht den Füllgrad der Polymere zu variieren um einen optimalen Additivanteil zu ermitteln und eventuell auch gefüllte Polymerblends herzustellen.

Abstract

Nowadays, ecological awareness has become widespread and is still increasing. Likewise, engine and gear developers are looking for new ways to reduce CO₂ emissions from vehicles. In relation to gears this can be achieved by a reduction of friction losses which occur between the chain and the polymer chain guiding that is responsible for the steady running of the chain. There are several ways to improve the sliding properties, for example changing the layout of the chain drive systems, the geometry of the sprockets or the chain type. What is more, a modification of the polymer can reduce the friction that occurs between the chain and the chain guiding; consequently, the losses can be kept to a minimum.

The aim of this thesis is to examine how friction losses between steel and the polymer can be reduced through a modification of the polymer with different micro- and nanoparticles. In order to achieve the necessary modification it is essential to find polymers that are suitable for building chain guides and that may be used as possible alternatives to the currently used material. The three chosen polymers include two types of polyamide 66, one of which is the currently used material, as well as a type of polyamide 46. The three polymers were used as the matrix material for compounds with 5 % by weight of different nanoparticles. The used additives encompass different layered silicates, quartz sands with spherical particles and polytetrafluoroethylene (PTFE). The 51 samples (48 compounds and three unmodified polymers) were pressed to sheets which were subsequently tested for their tribological properties by employing the pin-on-disc microtribometer. In addition, experimental investigations were performed to determine the influence of different additives on the friction coefficient of the different compounds under different contact pressures and at different relative speeds in a lubricated friction system. Then the wear of each sample was analysed without oil lubrication.

The first results show that some of the friction and wear values of the unfilled polyamide 66 types were sufficiently lower than those of the polyamide 46. Furthermore, the results show that it is possible to improve the values of the friction and wear coefficients of the PA 66 types by adding layered silicates. The effect of layered silicates on PA 46, however, was only marginal. Generally, the most positive influence on wear and friction behaviour of the polymers was achieved by adding a layered silicate. All tests on this compounds show an improvement of the tribological properties compared to the unfilled polymer. The use of PTFE or spherical fillers in contrast does not lead to far better results compared to the matrix materials.

The results of this thesis shall serve as a basis for further testing and optimization of the tribological properties of these compounds. What is more, it is planned to conduct tests regarding the influence of temperature on the friction behavior of some of the compounds and to vary the degree of filling of the polymers in order to determine an ideal filler content. Also, filled polymer blends may be produced as a next step.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	THEORETISCHE GRUNDLAGEN	2
2.1	MATERIALIEN	2
2.1.1	<i>Polyamid</i>	3
2.1.2	<i>Additive</i>	4
2.2	COMPOUNDIEREN	7
2.3	TRIBOLOGIE.....	8
2.3.1	<i>Reibung</i>	9
2.3.2	<i>Verschleiß</i>	10
2.3.3	<i>Schmierstoffe</i>	12
2.3.4	<i>Tribologie von Kunststoffen</i>	13
2.3.5	<i>Tribologische Analyse</i>	15
2.3.6	<i>Pin-on-Disc Methode</i>	17
3	EXPERIMENTELLES	19
3.1	VERWENDETE MATERIALIEN	19
3.2	GERÄTEÜBERSICHT	20
3.3	COMPOUNDIEREN	21
3.4	PROBEKÖRPERHERSTELLUNG.....	22
3.5	TRIBOLOGISCHE MESSUNGEN	23
4	ERGEBNISSE.....	27
4.1	VERSCHEIßVERHALTEN.....	27
4.2	REIBVERHALTEN.....	33
4.3	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE.....	47
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	49
6	LITERATURVERZEICHNIS	52
7	TABELLENVERZEICHNIS	54
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	55
9	SYMBOLE	58
10	ANHANG	59
10.1	TABELLEN.....	59
10.2	DIAGRAMME.....	65

1 Einleitung

In Motoren werden Kettentriebe mit Führungsschienen aus Kunststoff eingesetzt, bei denen die tribologischen Eigenschaften der Kombination Kette - Kunststoff von zentraler Bedeutung sind. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Verbesserung des Reibkoeffizienten des Kette-Führungsschiene-Systems erzielt werden. Dazu wurden das aktuell eingesetzte Polyamid 66, sowie ein weiteres PA 66 und ein PA 46 Typ mit unterschiedlichen Additiven modifiziert. Als Füllstoffe dienten unterschiedliche Schichtsilikate sowie sphärische Quarzsande mit unterschiedlichen Partikelgrößen wie auch Polytetrafluorethylen. Diese wurden zu jeweils 5 Gewichtsprozent in die Polymere eingearbeitet.

Additive können unterschiedliche Auswirkungen auf die Polymere haben. Sie können zum Beispiel zu einem Absinken der Elastizität der Compounds beitragen, deren Wärmeleitfähigkeit erhöhen oder die Oberfläche der Bauteile. Die Tribologie eines Systems ist sehr komplex und wird von all diesen Faktoren beeinflusst. Daher wurde für das erste Screening bei der Suche nach einem idealen Additiv zur Verbesserung der tribologischen Eigenschaften der Polyamide eine relativ große Anzahl Compounds hergestellt.

Aus den sechzehn Compounds je Polyamidtyp sowie den jeweils ungefüllten Matrixmaterialien wurden scheibenförmige Probekörper gepresst, welche anschließend tribologisch mittels der Pin-on-Disc Methode analysiert wurden. Dabei wird ein Stahlstift, welcher aus demselben Material wie die Kette im Getriebe besteht, mit einer vorgegebenen Last auf die rotierende Kunststoffplatte gedrückt. Die Messungen der Reibkoeffizienten wurden bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und mit verschiedenen Anpressdrücken durchgeführt. Diese Messungen wurden mit einem Schmierfilm aus einem handelsüblichen Motoröl bei Raumtemperatur durchgeführt. Des Weiteren wurde, ebenfalls bei Raumtemperatur, eine Analyse des Verschleißverhaltens der einzelnen Proben in einem ungeschmierten System durchgeführt.

Die Gegenüberstellung der Reibkoeffizienten und der Verschleißfaktoren der einzelnen Polymere und deren Compounds soll auf der einen Seite den Einfluss der Matrixpolymere auf das tribologische Verhalten zeigen und auf der anderen Seite die Auswirkungen der einzelnen Additive auf die jeweiligen Polymere. Es sollen ebenso Trends, die durch das Beimengen von speziellen Zusatzstoffen zu den drei Polymeren entstehen, erkannt werden. So sollen die besten Kombinationen aus den eingesetzten Füllstoffen und Polymeren gefunden werden, die vor allem einen niedrigen Reibkoeffizienten, aber auch gute Verschleißwerte aufweisen.

Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit, bei der eine große Menge an Kombinationen von Polymeren und Additiven gemessen und gegenübergestellt wurden, sollen in weiterer Folge als Basis für weitere Analysen und Verbesserungen der tribologischen Eigenschaften dieser Compounds dienen. Dabei soll die Abhängigkeit der Reibkoeffizienten der Compounds von der Temperatur analysiert werden. Des Weiteren ist für die nach diesen Messungen am geeignetsten erscheinenden Additive eine Variation der Füllgrade geplant und in weiterer Folge eventuell auch eine Modifizierung der Matrixpolymere. So soll ein Werkstoff, der den Anforderungen, die an eine Führungsschiene für eine Getriebekette gestellt werden, ideal entsprechen kann, gefunden werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Materialien

Die Auswahl von geeigneten Materialien für ein Bauteil hängt von einigen Faktoren ab. Zuerst werden die Grundanforderungen, das sind die mechanischen, chemischen und thermischen Beanspruchungen des späteren Bauteils an den Werkstoff definiert. Im Anschluss gilt es, die theoretisch einsetzbaren Werkstoffe schrittweise nach Kriterien wie Verfügbarkeit, Preis, Verarbeitbarkeit oder speziellen zusätzlichen Anforderungen, wie in diesem Fall einem möglichst guten tribologischen Verhalten, zu sortieren und je nach Gewichtung der einzelnen Anforderungen den für die Anwendung am besten geeigneten Werkstoff auszuwählen. Wie so ein Werkstoffauswahlprozess abläuft, kann in einem sogenannten Problemlösungszyklus (siehe Abbildung 1) dargestellt werden.

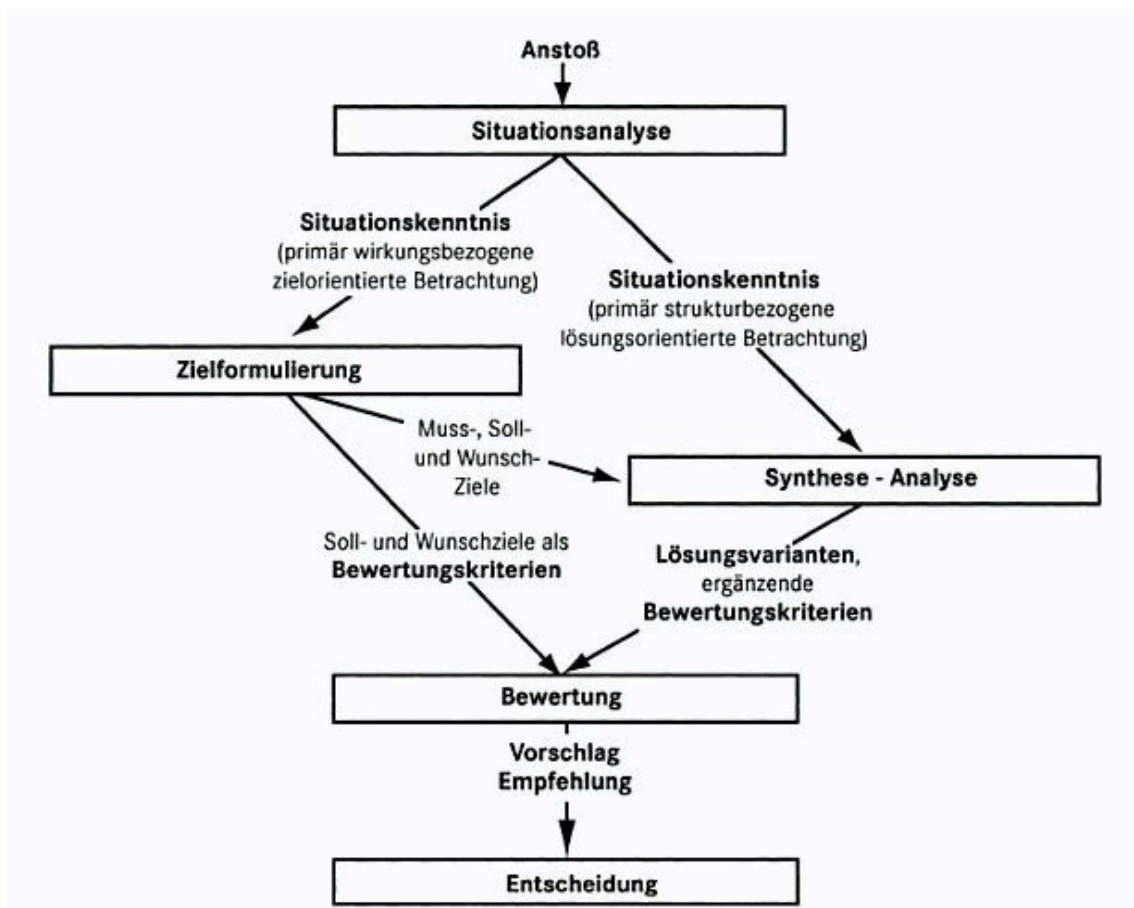


Abbildung 1: Problemlösungszyklus bei der Werkstoffauswahl [15].

„Bei der Lösungsfindung technischer Aufgabenstellungen wird unbewusst oder bewusst ein allgemeiner Problemfindungszyklus beschrieben, der zunächst in einer Klärungsphase die Situation analysiert. Eine Zielformulierung enthält die Forderungen und Wünsche an die Lösung, an denen die aus einer Lösungssuche hervorgegangenen Lösungsvarianten mit Hilfe von Bewertungskriterien beurteilt werden. Die beste Bewertung bzw. die besten Bewertungen werden zur Entscheidung vorgeschlagen. Die Entscheidung schließt den Prozess ab.“ [25]

Nach der Auswahl der Polymere können diese in einem weiteren Schritt durch Zugabe von geeigneten Additiven noch weiter modifiziert und so noch besser an das jeweilige Anforderungsprofil angepasst werden.

Bei der Auswahl der Additive sind zahlreiche Faktoren zu beachten. Dabei muss auf der einen Seite eine Verträglichkeit zwischen Matrixpolymer und Zusatzstoff gewährleistet sein. Das heißt eine gute Dispergierbarkeit der Partikel in der Schmelze, sowie ein gutes Haftungsvermögen der Teilchen sind von zentraler Bedeutung. Bei Additiven, die diesen Ansprüchen nicht oder zumindest nicht ausreichend entsprechen, gibt es die Möglichkeit, die Haftung zwischen den Polymerketten und Füllstoffpartikeln mit Hilfe von speziellen Beschichtungen der Zusatzstoffe zu verbessern. Des Weiteren ist, vor allem bei wasserempfindlichen Polymeren, wie das zum Beispiel bei Polyamid der Fall ist, darauf zu achten, dass über das eingesetzte Additiv nicht zu viel Feuchtigkeit in das Compound eingebracht wird, wodurch mechanischen Eigenschaften negativ beeinflusst werden können. Sollte ein Zusatzstoff besonders viel Feuchte aus der Umgebungsluft aufnehmen, kann es nötig sein, diesen vor der Verarbeitung zu trocknen, um einwandfreie Compounds herstellen zu können.

Die Eigenschaften der unterschiedlichen Additive selbst haben natürlich auch einen großen Einfluss auf das spätere Produkt. Von großer Bedeutung sind dabei unter anderem die Partikelgröße sowie deren Form, Härte und Dichte und selbstverständlich auch ihr chemischer Aufbau, der großen Einfluss auf die Verträglichkeit mit der Matrix und somit auf die Dispergierbarkeit hat. Des Weiteren muss auch auf die Hitzebeständigkeit von einigen Additiven geachtet werden, wenn diese in Polymere, die bei hohen Temperaturen verarbeitet werden müssen, eingearbeitet werden sollen. Das gilt vor allem für Farbpigmente oder organische Füllstoffe, die oft sehr empfindlich auf hohe Temperaturen reagieren.

2.1.1 Polyamid

Die Grundanforderungen an einen Werkstoff, der in einem Getriebe als Kettenführungsschiene eingesetzt werden soll, wie Hitzebeständigkeit in einem Bereich von 100 °C und auch darüber, die Beständigkeit gegen Chemikalien wie Schmieröl und relativ gute mechanische Eigenschaften, die aufgrund der dauernden Belastung durch die gespannte und laufende Kette notwendig sind, schränken die Auswahl an den in Frage kommenden Polymeren schon sehr ein. Durch die zusätzliche Forderung nach einem guten Verschleißverhalten und einem niedrigen Reibkoeffizienten sowie der für ein Produkt, das in großen Stückzahlen gefertigt werden soll, unbedingten Notwendigkeit eines moderaten Preises, bleiben nicht viele mögliche Polymere übrig, die in das Anforderungsprofil passen. Polyamide besitzen gute Festigkeitseigenschaften bei hoher Zähigkeit und Schlagzähigkeit, sie zeichnen sich sowohl durch gute Gleiteigenschaften als auch durch einen sehr guten Verschleißwiderstand aus. Deshalb sind sie als Konstruktionskunststoffe für viele technische Anwendungsfälle, insbesondere für Maschinenelemente, besonders geeignet [19]. Polyamide erfüllen somit sämtliche an den Werkstoff gestellte Anforderungen und sind im Vergleich zu Alternativen, die bei hohen Temperaturen ähnlich gute mechanische Eigenschaften vorweisen können, wesentlich preisgünstiger. Daher fällt die Wahl der Matrixpolymere eindeutig auf diese Polymerklasse.

Diese Erkenntnis deckt sich auch mit dem in der Literatur gegebenen Vorschlag, Ketten-Gleit- und Spannungsschienen aus PA 6 oder PA 66 zu fertigen. Als Alternative zu diesen beiden Polyamiden wird auch der Einsatz von PA 46 für solche und ähnliche Bauteile im Getriebereich genannt [3, 20].

Bei den Polyamiden gibt es viele verschiedene Typen mit sowohl aliphatischen als auch aromatischen Bestandteilen. Im Folgenden wird jedoch nur auf die aliphatischen Polyamide eingegangen. Um die chemisch verschiedenen Polyamid-Typen voneinander unterscheiden

zu können, gibt es folgende Nomenklaturregeln: Generell wird der Definition aller Polyamid-Sorten die Abkürzung PA vorangestellt. Ihr folgt eine Zahlenangabe über die Anzahl der Kohlenstoffatome des oder der jeweiligen Monomere. Bei zwei Zahlen steht die erste Ziffer für die C-Atomanzahl des Diamins und die zweite für die Anzahl der Kohlenstoffatome aus der Dicarbonsäure. Somit besteht beispielsweise PA 66 aus Hexamethylendiamin und Adipinsäure [7]. Bei Polyamiden mit nur einer Zahl, wie das zum Beispiel bei PA 6, welches aus ϵ -Caprolactam aufgebaut ist, der Fall ist, entspricht diese der Anzahl der C-Atome im Baustein. Die Strukturformeln für die beiden unterschiedlichen Aufbauvarianten sind in Abbildung 2 dargestellt.

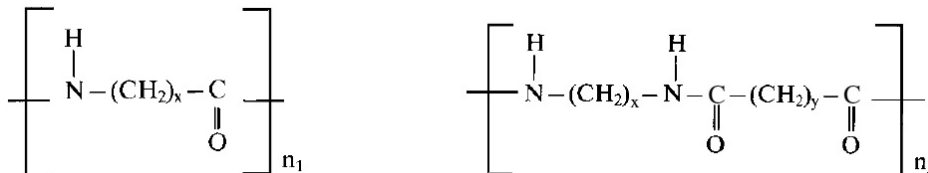


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau von Polyamiden: links mit einem und rechts mit zwei unterschiedlichen Ausgangsstoffen [19].

Die grundlegenden Eigenschaften, wie zum Beispiel hohe Steifigkeit, Festigkeit und Härte sowie gute Wärmeformbeständigkeit oder gute tribologische Eigenschaften, haben alle Polyamide prinzipiell gemein. Die unterschiedliche chemische Struktur beeinflusst aber zahlreiche Materialeigenschaften, wie Schmelztemperatur, Dichte oder Wasseraufnahme. Einige dieser Kenngrößen sind für einige PA-Sorten in Tabelle 1 aufgeführt.

In Gegenwart von Feuchtigkeit, wie sie in der Luft vorkommt, dringen Wassermoleküle in Polyamid ein und lagern sich, durch die Wasserstoffbrücken begünstigt, in den amorphen Bereichen ein. Mit einem Anstieg des Wassergehalts kommt es zu einer Verschiebung der Glasübergangstemperatur zu tieferen Temperaturen hin. Desweiteren nimmt die Zähigkeit bis zum luftfeuchten Zustand des Polyamids zu, die Festigkeit und Steifigkeit nehmen hingegen ab [3, 6].

Tabelle 1: Eigenschaftsübersicht unterschiedlicher Polyamide [7, 26].

	PA 6	PA 66	PA 610	PA 46
Schmelztemperatur (°C)	220-230	255-260	210-220	295
Dichte (g/cm ³)	1,12 – 1,15	1,13-1,16	1,06-1,09	1,18-1,21
Zug-E-Modul, trocken (MPa)	2600-3200	2700-3300	2000-2400	3300
Wasseraufnahme (Gewichtsprozent)	9-10	8-9	2,9-3,5	13

2.1.2 Additive

Es gibt zahlreiche, meist anorganische, Füll- und Zusatzstoffe, die zur Modifizierung von Polymeren zum Einsatz kommen. Primär unterscheidet man dabei zwischen aktiven und inaktiven Additiven. Die inaktiven, im Vergleich zum Polymer günstigen Zusätze, haben meist keinen großen Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften und werden hauptsächlich aus wirtschaftlichen Gründen, also um den Materialpreis zu senken, beigemischt. Der

Gewichtsanteil kann bei solchen Zusätzen bei 50 Gewichtsprozent und darüber liegen. Sie spielen im weiteren Verlauf dieser Arbeit keine Rolle.

Aktive Zusätze werden gezielt genützt, um die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des jeweils eingesetzten Grundwerkstoffs so zu beeinflussen, dass dieser den Anforderungen, die an das spätere Bauteil gestellt werden, besser gerecht werden kann.

Eine Verbesserung der mechanischen und/oder der tribologischen Eigenschaften kann durch unterschiedlichste Additive erzielt werden. Eine Möglichkeit ist der Einsatz von glasfaserverstärkten Polymeren, die, je nach Glasfasergehalt (technisch sind maximal 60 Gew.-% in thermoplastischen Kunststoffen realisierbar [6]), wesentlich bessere mechanische Eigenschaften besitzen und auch bezüglich Reibkoeffizient und Verschleiß bessere Ergebnisse erzielen als das entsprechende unmodifizierte Polymer [14, 31]. Der Nachteil ist jedoch, dass die Zugabe von Glasfasern beim Reibpartner zu erhöhtem Abrieb führt [26], was für die Anwendung bei Kettenführungen nicht erwünscht ist. Daher kommt der Einsatz von Glasfaserverstärkten Polyamiden als Alternative zu den unverstärkten Polymeren nicht in Frage.

Weitere Additive, die Polymeren zur Verbesserung ihrer tribologischen Eigenschaften beigemischt werden sind unter anderem Graphit, Molybdändisulfid (MoS_2), Wolframdisulfid (WS_2), PTFE, PE und auch Flüssigschmierstoffe. Die genannten Zusätze bewirken, dass eine direkte adhäsive Wechselwirkung zwischen den Reibpartnern möglichst gering gehalten wird. Die nicht thermoplastischen Festschmierstoffe sind meist schichtig aufgebaut und erhalten ihre tribologisch förderlichen Eigenschaften durch ein Abgleiten definierter Gitterebenen. Im Gegensatz dazu wirken metallische Zusätze wie zum Beispiel Bronze- oder Bleipulver stützend und erhöhen, so wie auch Glasfasern oder Keramikpulver, die Kriechrate und den Verschleiß. [31]

Zahlreiche Versuche wurden auch mit diversen Polymeren und Polymerblends, welche mit unterschiedlichen Füllstoffen und Nanopartikeln vermischt wurden, durchgeführt [4, 11, 27]. Dabei kamen unter anderem Titandioxid (TiO_2), Aluminiumpartikel, Graphit oder Kohlefasern zum Einsatz.

Die Betrachtung der Ergebnisse dieser und weiterer Studien zeigt, dass sich die tribologischen Eigenschaften von unterschiedlichen Polymeren mit Hilfe der verschiedensten Additive deutlich verbessern lassen. Dabei spielen sowohl der Füllstoffgehalt als auch die Partikelgröße und deren Form eine besondere Rolle. Bei Nanofüllstoffen werden durch die Zugabe von, geringen Mengen (im Bereich zwischen 1 und maximal 10 Gewichtsprozent) die besten Werte für den Reibkoeffizienten und den Verschleiß erzielt [2, 11, 12]. Dieses ist auf die geringe Partikelgröße und die damit verursachte große spezifische Oberfläche zurückzuführen. Eine Erhöhung des Füllstoffgehalts über die optimale Menge hinaus, bewirkt eine Verschlechterung der tribologischen Eigenschaften. Das lässt sich zum einen dadurch erklären, dass mit zunehmendem Füllgrad die Elastizität des Materials abnimmt, was zu einer Verschlechterung der Reib- und Verschleißigenschaften des Werkstoffs führen kann und zum Anderen, dass sich das Compound ab einem bestimmten Additivanteil nicht mehr oder nur mehr schlechter homogenisieren lässt und es so zu Füllstoffagglomeraten kommt [12]. Eine homogene Vermischung und eine gute Bindung zwischen Füllstoff und Matrix sind von großer Bedeutung, da sich sonst bei einer Reibbeanspruchung die Verstärkungsstoffe leichter aus der Polymermatrix lösen können. Das führt zu einem höheren Verschleiß, der eine Werkstoffschädigung nach sich zieht, was wiederum einen höheren Reibwert zur Folge hat [12]. Ähnliches gilt auch für größere Füllstoffpartikel und Stoffe mit geringerer spezifischer Oberfläche. Sie sind durch ihre wenigen Anknüpfungspunkte schlechter in der Polymermatrix verankert, lassen sich dadurch leichter aus ihr herauslösen und verursachen durch ihre Größe eine größere Schädigung an der Oberfläche des Bauteils.

Die spezifische Oberflächengröße eines Additivs hängt nicht nur von der Größe der einzelnen Partikel, sondern auch von deren Form, also vom Aspektverhältnis, wie das Verhältnis der größten zur kleinsten Partikelabmessung genannt wird, ab. Wie aus Tabelle 2 hervorgeht, sind Schichtsilikate, deren einzelnen Schichten oft nicht viel dicker als 1 nm sind, aufgrund ihrer besonders hohen spezifischen Oberflächen von besonderem Interesse.

Tabelle 2: Form und Längen-Dickenverhältnisse verschiedener Additive.

Additiv	Form	Aspektverhältnis
Silikat-, Glaskugeln	Kugel	1
CaCO ₃ , CaCO ₄	Würfel	~1
SiO ₂ , BaSO ₄	Quader	1,4 – 4
Graphit, Glimmer, Talkum	Blättchen	5-100
Schichtsilikate	Schichten	>100

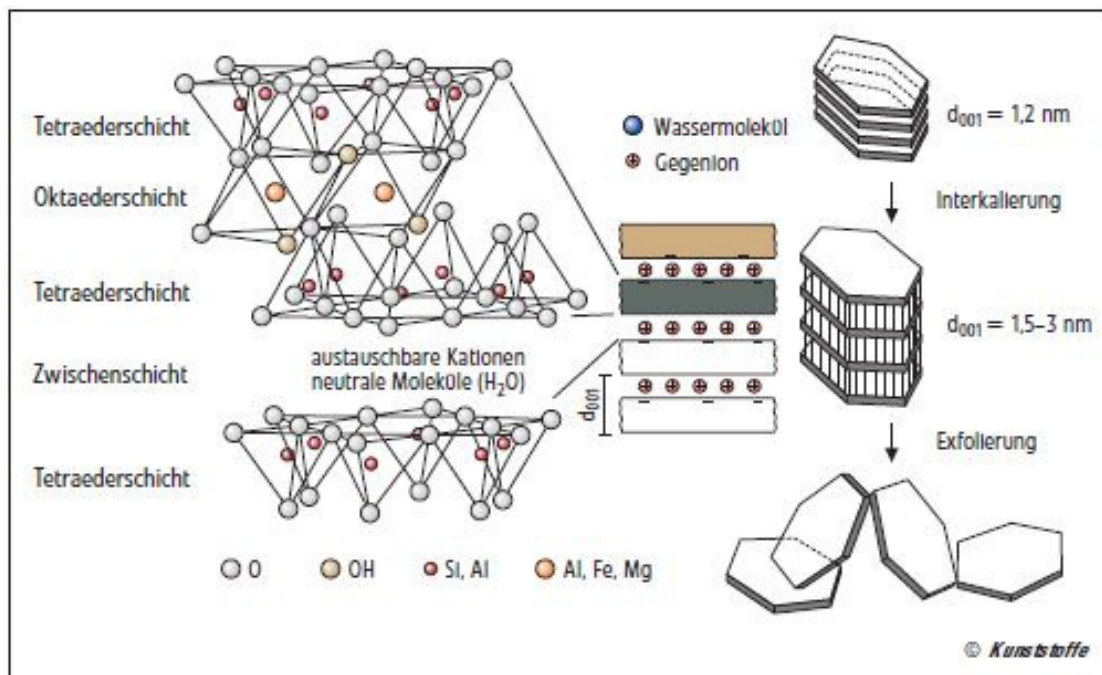


Abbildung 3: Aufbau der Schichtsilikate sowie Auswirkungen von Interkalierung und Exfolierung auf die Zwischenschichtabstände [24].

Um die große Oberfläche von Schichtsilikaten optimal nutzen zu können, ist eine vollständige Trennung und gleichmäßige Verteilung der einzelnen Schichten, notwendig. Der Aufbau von Schichtsilikaten und die Prozesse die bei deren Verarbeitung stattfinden sind in Abbildung 3 schematisch dargestellt:

Am Beginn des Verarbeitungsprozesses liegt das Schichtsilikat in Stapeln von mehreren Schichten (bzw. Plättchen) vor. Ein solches Plättchen ist wiederum aus zwei Tetraederschichten am Rand und einer oktaederförmigen Schicht in der Mitte aufgebaut. Diese Tetra- und Oktaederschichten bestehen aus Sauerstoff (O), Silizium (Si), Aluminium (Al), Eisen (FE), Magnesium (Mg) und Hydroxylgruppen (OH). Zwischen den

Tetraederrandschichten zweier Plättchen befinden sich austauschbare Kationen sowie neutrale Moleküle, wie Wasser. Beim Interkalierungsprozess tritt die Polymerschmelze bzw. die Polymerketten zwischen die Plättchen ein und weitet diese auf. Werden diese Plättchen vollständig voneinander getrennt spricht man Exfolierung [28]. Bei der Beschichtung von Schichtsilikaten werden die austauschbaren Kationen durch unterschiedliche Fettsäuren ersetzt, wodurch die Abstände zwischen den Plättchen vergrößert werden. So kann ein besseres Eindringen der Polymere zwischen die einzelnen Plättchen erreicht werden.

2.2 Compoundieren

Um eine hohe Qualität des zu fertigenden Compounds zu erhalten, ist es notwendig, eine homogene Schmelze ohne Lufteinschlüsse, wie sie zum Beispiel durch das Verdampfen von Wasser aus eventuell feuchtem Granulat oder Additiven entstehen kann, zu gewährleisten. Bei vielen Polymeren, allen voran bei Polyamiden, aber auch bei einigen Füllstoffen kann es notwendig sein, sie vor der Verarbeitung zu trocknen. Die nötigen Temperaturen sowie die Trockenzeiten sind in den jeweiligen Materialdatenblättern zu finden.



Abbildung 4: Unterschiedliche Schneckenelemente. Von links: Fördererlement, Knetblock und Mischteil [9].

Bei der Herstellung von Compounds werden häufig, so wie auch in dieser Arbeit, gleichläufige Doppelschneckenextruder mit modifizierbaren Schnecken eingesetzt. So kann auch die Schneckenkonfiguration, also der Aufbau der Doppelschnecke aus Förder-, Scher-, Misch-, Knet- oder Stauerelementen der jeweiligen Polymer-Füllstoffmischung angepasst werden. Dies ist neben einer geeigneten Prozessführung von großer Bedeutung um qualitativ hochwertige Produkte zu erzeugen. Zur Veranschaulichung der Unterschiede dieser Schneckenelemente sind in Abbildung 4 je ein Förder-, ein Knet- und ein Mischelement abgebildet. Das Polymer muss, bevor ein Additiv zugefügt wird, zur Gänze aufgeschmolzen werden. Dieses darf jedoch durch zu große Scherung nicht überhitzen, was zu einem Materialabbau und dem Verlust der mechanischen Eigenschaften führen würde. Dazu sind ein passendes Temperaturprofil über die Extruderlänge, sowie eine geeignete Kombination aus Massedurchsatz und Schneckengeschwindigkeit zu wählen. Um verdampfende Feuchtigkeitsreste und Luft aus der Schmelze entweichen lassen zu können, ist der Einsatz einer atmosphärischen und einer Vakuumentgasung hierbei nötig.

Beim Compoundierprozess werden sowohl das jeweilige Kunststoffgranulat als auch der Füllstoff oder gegebenenfalls auch mehrere Additive im gewünschten Verhältnis gravimetrisch mit Hilfe von Dosierwaagen in den Extruder dosiert. Das Granulat fällt über den Trichter der Polymerdosierung in den Compounder, wo es zunächst verdichtet und dann aufgeschmolzen wird. Danach wird der Füllstoff (gegebenen Falls auch mehrere Füllstoffe)

über die Seitendosierung der Polymerschmelze beigemischt und durch eine geeignete Kombination aus Scher- und Mischelementen zu einer homogenen Schmelze verarbeitet. Eventuell in der Schmelze vorkommende Gase, wie zum Beispiel Wasserdampf, der durch Restfeuchte einer der Komponenten auftreten kann, entweichen über eine atmosphärische und eine Vakuumentgasung. Eine schematische Abbildung eines Compounders ist in Abbildung 5 gezeigt. Nach dem Mischen verlässt die Schmelze den Extruder durch eine oder mehrere Runddüsen. Der Kunststoffstrang wird dann zum Abkühlen durch ein Wasserbad gezogen und schlussendlich mit einem Granulierer mittels eines rotierenden Messers zu zylinderförmigem Granulat geschnitten. Alternativ zum beschriebenen Kaltabschlag gibt es auch noch Heißabschlagsysteme, wie zum Beispiel die Unterwassergranulierung, welche linsenförmiges Granulat erzeugt.

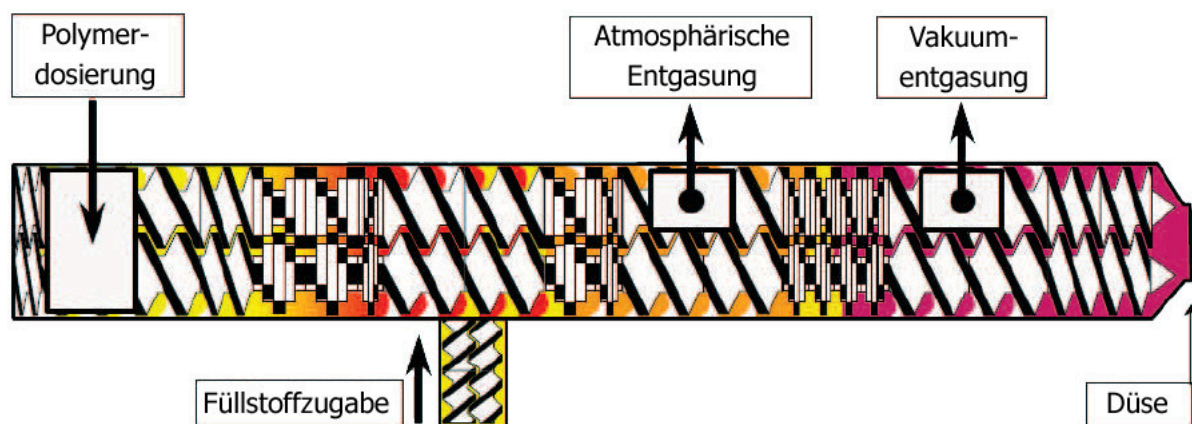


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Compounders nach [22].

2.3 Tribologie

Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Sie umfasst das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß, einschließlich Schmierung, und schließt entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen ein. Unter tribologischer Beanspruchung ist dabei die Gesamtheit der auf die Elemente des Verschleißsystems von außen einwirkenden Beanspruchungsgrößen zu verstehen [13].

Alle tribologischen Kennzahlen und Messwerte sind nicht als Werkstoff bezogene Eigenschaften oder Kennzahlen anzusehen, da diese von vielen unterschiedlichen Faktoren abhängen (siehe Abbildung 6). Man muss diese vielmehr als systembezogene Kenngrößen verstehen. Diese variieren also bei der Veränderung des Beanspruchungskollektivs, also bei Änderungen von Faktoren wie Flächenpressung, Beanspruchungsgeschwindigkeiten oder Temperatur, sowie bei Veränderungen an der Struktur des Tribosystems, welches die Materialien des Grund- und Gegenkörpers, Oberflächenbeschaffenheiten und das Umgebungsmedium sowie einen eventuell anwesenden Zwischenstoff umfassen. Weiters ist zu bedenken, dass sich das Tribosystem im Verlauf der Beanspruchung auch verändern kann. Es kann zu Veränderungen der Oberflächen durch Verschleiß kommen und die dabei aus den Reibpartnern gelösten Partikel können das Umgebungsmedium verunreinigen, was sich wiederum einen bedeuten Einfluss auf die Tribologie des Systems haben kann. Ein solches Tribosystem ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt. Da sich die gemessenen Werte bei jeder Veränderung im Tribosystem ändern, ist beim Vergleich der Verschleiß- oder Reibkoeffizienten darauf zu achten, dass diese unter exakt denselben Bedingungen ermittelt werden.

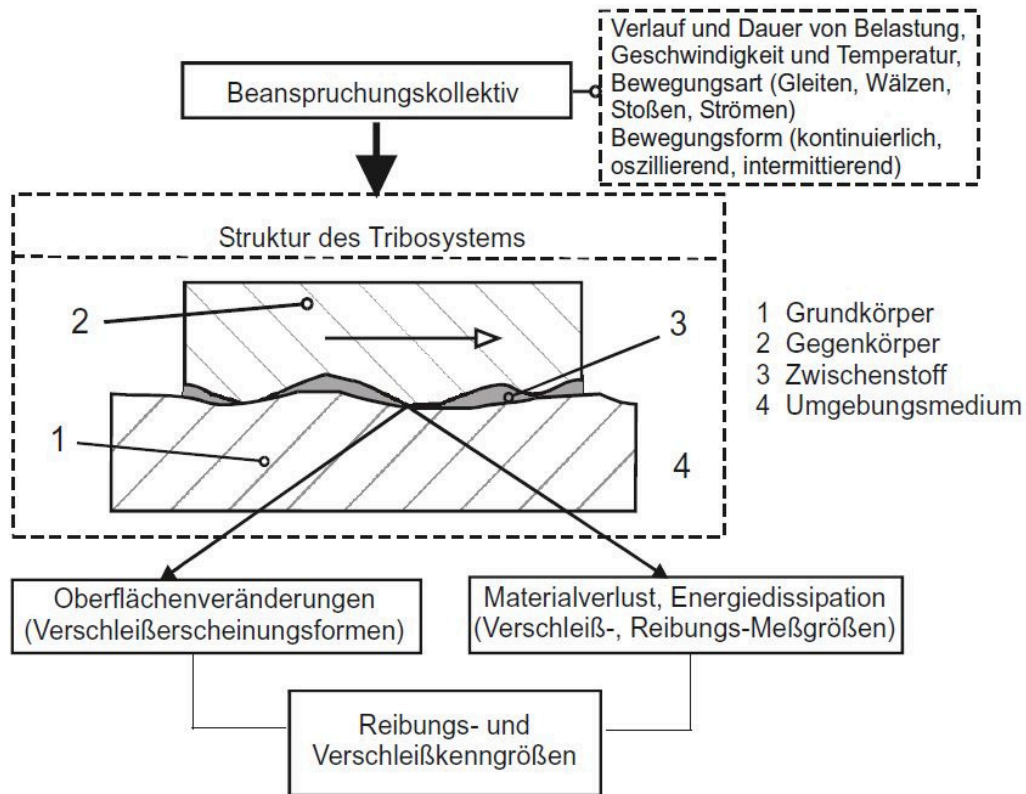


Abbildung 6: Schema eines Tribosystems [13].

2.3.1 Reibung

Unter Reibung versteht man eine Wechselwirkung zweier sich berührender Körper, die einer Relativbewegung entgegen wirkt. Sie tritt als Reibkraft beziehungsweise als Reibenergie auf. Man unterscheidet je nach Bewegungsart zwischen Gleitreibung, Rollreibung, Wälzreibung, Bohrreibung und Mischreibung. Des Weiteren kann auch eine Unterteilung in Festkörperreibung, Flüssigreibung sowie Gasreibung gemacht werden [13]. Im Falle der Kettenführung kann von einer Gleitreibungsbeanspruchung ausgegangen werden.

Der Gleitreibwert f , der auch Reibzahl, Reibungskoeffizient oder COF (coefficient of friction) genannt wird, ist als Verhältnis der Reibkraft F_f , das ist jene Kraft, die der Relativbewegung der Reibpartner entgegen wirkt, zur Normalkraft F_n definiert.

$$f = \frac{F_f}{F_n} \quad (1)$$

Aus der Beziehung in Formel 1 zeigt sich, dass in die Berechnung des Reibkoeffizienten ausschließlich die wirkenden Kräfte, aber nicht die Größe der sich relativ zueinander bewegenden Kontaktflächen einbezogen werden müssen.

Ein wichtiger Aspekt, der bei der Betrachtung von Systemen, die unter einer Reibungsbeanspruchung stehen, nicht außer Acht gelassen werden darf, ist die daraus resultierende Temperaturerhöhung an den Oberflächen. Dieser Temperaturanstieg ΔT ist neben dem Reibkoeffizienten (f) auch von der Relativgeschwindigkeit der Oberflächen (v)

sowie der Normalkraft F_n , mit der diese aneinander gepresst werden, abhängig. Eine Abschätzung kann mit Hilfe der Beziehung 2 [17, 18] erfolgen.

$$\Delta T = f * F_n * v * R \quad (2)$$

R bezeichnet hier einen thermischen Widerstandsparameter (siehe Formel 3), der wiederum von der Querschnittsfläche (A) der Wärmetransportwege (n), deren Länge (l) sowie der spezifischen Wärmeleitfähigkeit (λ) abhängt.

$$R = \frac{1}{A} * \left(\sum_{i=1-n} \frac{\lambda_i}{l_i} \right)^{-1} \quad (3)$$

Die Reibungswärme kann zur Erweichung des Materials, anschließendem Kriechen und sogar zum Aufschmelzen der Oberfläche führen. Dieser Mechanismus ist insbesondere bei Polymerwerkstoffen zu beobachten. Die mechanischen Eigenschaften der Polymere, insbesondere der Thermoplaste, können sich also mit zunehmender Temperatur stark verändern [14].

2.3.2 Verschleiß

Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust an der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers.

Zur Beschreibung des Verschleißverhaltens von Reibsystemen unterscheidet man zwischen den in Tabelle 3 gezeigten und hier nach dem Arbeitsblatt für Tribologie [13] definierten vier Hauptverschleißmechanismen:,,

- Adhäsiver Verschleiß:
Ausbildung von Grenzflächen-Haftverbindungen (z.B. „Kaltverschweißungen“, „Fressen“); Verschleiß tritt durch nachfolgende Trennung der Haftverbindung außerhalb der ursprünglichen Grenzflächen auf, und zwar im angrenzenden Material des Kontaktpartners mit der geringeren Festigkeit (Materialübertrag).
- Abrasiver Verschleiß
Materialabtrag durch furchende und ritzende Beanspruchung (Mikrospanen, -furchen, -brechen)
- Oberflächenzerrüttung:
Ermüdung (Festigkeitsabnahme) und Rissbildung in Oberflächenbereichen durch tribologische Wechselbeanspruchungen, die zu Materialtrennungen und -abtragungen führen (z.B. „Grübchen“)
- Tribochemische Reaktionen:
Durch tribologische Beanspruchung aktivierte bzw. geförderte chemische Reaktionen zwischen Grundkörper, Gegenkörper und angrenzenden Medien (Schmierstoff, Umgebungsmedium), die zur Entstehung von Reaktionsschichten bzw. -partikeln führen. Diese weisen häufig vom Grundmaterial verschiedene Abtragungsraten auf.“

Der Verschleiß eines Systems oder eines Teils des Systems ist als Reaktion der Wechselwirkungen der Reibpartner sowie des Umgebungsmediums zu verstehen. Dieser wird außerdem auch von den Temperaturverhältnissen, die sich durch die Reibung auch ändern, beeinflusst. Da sich das System während des Verschleißprozesses verändert, kann es auch zu Änderungen der Oberflächenqualitäten, einer Stoffübertragung von dem weicheren auf den härteren Gegenkörper oder auch zu Verunreinigung des Umgebungsmediums kommen. Dadurch bedingt ist auch mit einer Veränderung des Reibverhaltens und somit auch der

Verschleißmechanismen zu rechnen. Diese vielen unterschiedlichen und veränderlichen Einflussfaktoren führen dazu, dass die einzelnen Verschleißmechanismen nicht gesondert, sondern gekoppelt auftreten und sich aufgrund ihrer Komplexität und der dynamischen Veränderungen während des Verschleißvorganges nur schwer voneinander trennen lassen.

Tabelle 3: Übersicht über die allgemeinen Verschleißmechanismen nach [31].

Verschleißmechanismus		Kennzeichen	Merkmale
Adhäsiver Verschleiß			Fressen, Löcher, Kuppen, Schuppen, Materialübertragung
Abrasierer Verschleiß			tiefgreifendes Ritzen, Kratzer, Riefen, Mulden, Wellen
Oberflächenzerrüttung			Risse, Grübchen
Triboschemische Reaktionen	Reaktionsschichtverschleiß		flaches Ritzen, Schichtbildung an Berührstellen
	Ablativer Verschleiß		Tribosublimation, chemische Prozesse

Um den Verschleiß messbar und vergleichbar zu machen, ist es notwendig einen Verschleißkoeffizienten (k) zu definieren. Dieser ist die auf Belastung normierte Verschleißrate und wird in der Einheit Kubikmillimeter pro Meter und N angegeben. Die Berechnung erfolgt nach der Formel 4:

$$k = \frac{dW_v}{ds * F} \quad (4)$$

Dabei ist W_v das Verschleißvolumen, welches durch eine Belastung mit der Kraft (F) über eine definierte Strecke (s) abgerieben wird.

2.3.3 Schmierstoffe

Schmierstoffe in Form von chemisch unterschiedlichen Schmierölen oder Schmierfetten werden eingesetzt, um die tribologischen Eigenschaften eines Systems zu verbessern. Durch ihre Anwesenheit sollen sowohl der Verschleiß als auch die Reibungszahl reduziert werden. Für diese Arbeit ist nur die Schmierung mit flüssigem Schmierstoff, genauer gesagt Mineralöl, von Interesse, auf die Feststoffschmierung wird hier nicht weiter eingegangen.

Das Öl bildet eine Schmierschicht zwischen den beiden, sich relativ zu einander bewegenden Oberflächen und trennt diese im Idealfall vollständig voneinander. In diesem Fall spricht man von reiner Flüssigkeitsreibung. Dies tritt jedoch nur dann auf, wenn die Schmierfilmdicke zwischen den Reibpartnern größer ist, als die Summe der Rauheitstiefen der Oberflächen der Reibpartner. Die Schmierfilmdicke ist von der wirkenden Normalkraft, der relativen Geschwindigkeit und der Viskosität des Schmieröls, welche sich wiederum mit der Temperatur ändert, abhängig. Ist die Schmierfilmdicke nicht größer als die gesamte Rauheitstiefe, kann nicht die gesamte Belastung vom Schmierfilm aufgenommen werden. In diesem Fall muss die restliche Belastung von Spitzen der Rauheitshügel aufgenommen werden. Man spricht hier von Mischreibung. Findet die Reibung ohne oder nur mit einem minimalen Schmierfilm statt, handelt es sich um ein System mit Festkörperreibung [5, 16]. Einen Überblick über die Reibverhältnisse in ölgeschmierten Tribosystemen in Abhängigkeit von dem Verhältnis der Schmierfilmdicke zur Rauheit der Reibpartner gibt die Stribeck-Kurve, die in Abbildung 7 zu sehen ist. Hier werden die Bereiche in der die jeweiligen Reibungsarten auftreten gezeigt und deren Auswirkungen auf die Reibungszahl f deutlich gemacht. Man unterscheidet zwischen fünf verschiedenen Reibungsarten: Der Festkörperreibung, der Grenzreibung, der Mischreibung, der Elastohydrodynamik und der Hydrodynamik. „Die Grenzreibung ist als Sonderfall der Festkörperreibung anzusehen, bei der die tribologisch beanspruchten Oberflächen mit einer Adsorptionsschicht aus Schmierstoffmolekülen bedeckt sind. Die Belastung wird von den kontaktierenden Rauheitshügeln der Kontaktpartner aufgenommen, während bei der Relativbewegung die Scherung überwiegend in den adsorbierten Schmierstoffmolekülen erfolgt.“ [5]

Festkörperreibung → Grenzreibung → Mischreibung → EHD → Hydrodynamik

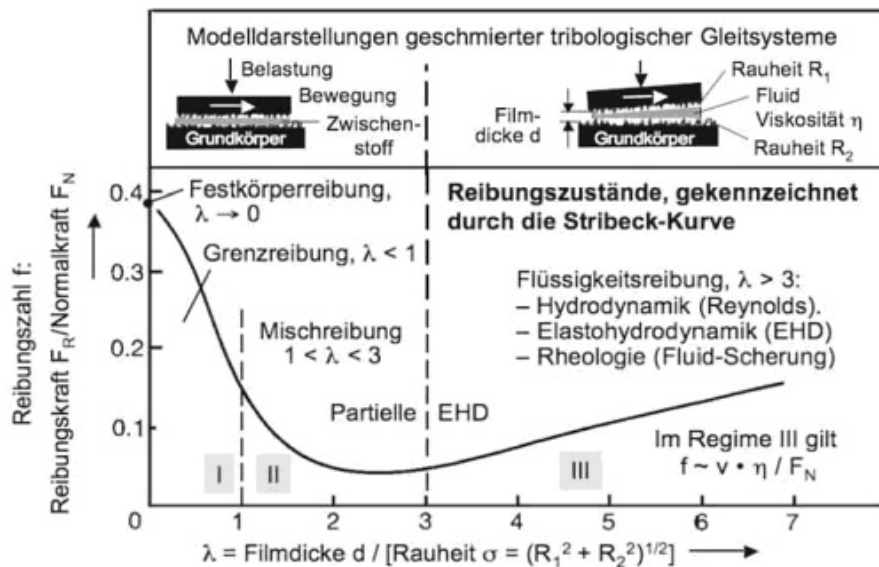


Abbildung 7: Die Stribeck-Kurve zeigt die Reibungs- und Schmierzustände in einem Tribosystem [5].

Bei der Betrachtung des Kurvenverlaufs des Reibkoeffizienten erkennt man, dass bei einem Verhältnis (λ) von der Filmdicke zur Rauheit von etwas mehr als zwei der Reibkoeffizient ein Minimum aufweist. Bei weiterer Zunahme des Filmdicke Rauheits Verhältnisses steigt der Reibkoeffizient wieder zu stetig an. Dieser Anstieg ist auf den größer werdenden Einfluss der Flüssigkeitsreibung zurückzuführen. Ab einem Verhältnis von drei tritt reine Flüssigkeitsreibung auf und die Reibungszahl steigt danach auch noch weiter an. Das liegt daran, dass der Schmierfilm ab einer gewissen Dicke sich nicht mehr flach, sondern keilförmig ausbildet und dadurch mit zunehmender Filmdicke ein immer größerer Widerstand gegen die Relativbewegung auftritt. Im Bereich der Flüssigkeitsreibung unterscheidet man zwischen dem Bereich der Elastohydrodynamik (EHD) und der Hydrodynamik. Die Reibungsverhältnisse, die im Laufe der Versuche zu dieser Arbeit auftreten, sind im Bereich der Mischreibung anzusiedeln.

2.3.4 Tribologie von Kunststoffen

Da die Ansprüche, die neben gutem tribologischen Verhalten, an einen Werkstoff sehr unterschiedlich sein können kommen einige unterschiedliche Polymere mit unterschiedlichen chemischen Strukturen zum Einsatz. Einige der häufig im Maschinenbau eingesetzten teilkristallinen Thermoplaste sind Polyamide (PA) mit unterschiedlichem Kettenaufbau, Polyoxymethylen (POM), Polyethylen (PE), Polybutylenterephthalat (PBT), Polyimid (PI) und Polytetrafluorethylen (PTFE) [17].

Das Einsatzgebiet der unterschiedlichen Polymere ist von deren speziellen Eigenschaften abhängig. Polyimid zum Beispiel zeichnet sich im Vergleich zu den anderen genannten Polymeren durch eine besonders gute thermische Belastbarkeit aus, PTFE hingegen hat einen besonders niedrigen Reibkoeffizienten und hat zudem gute Dichtungseigenschaften. Wird eine Beständigkeit gegen aggressive Medien gefordert kommen unter anderem Polyamide, Polyethylen oder PVC zum Einsatz. Diese unterschiedlichen Eigenschaften sind auf deren chemischen Aufbau zurückzuführen. Die chemischen Unterschiede dieser und weiterer tribologisch interessanter Polymere sind in Abbildung 8 gezeigt.

Der Kettenaufbau bestimmt unter anderem die Flexibilität eines Kunststoffes, welche maßgeblichen Einfluss auf die tribologischen Eigenschaften des Materials hat. Des Weiteren ist die Empfindlichkeit gegen äußere Einflüsse, wie zum Beispiel der Veränderungen der Umgebungstemperatur von der chemischen Struktur der Polymere abhängig. Lineare und kristalline Polymere reagieren bis zum Erreichen der Glasübergangstemperatur empfindlicher auf äußere Einflüsse als spröde, amorphe Kunststoffe.

In der Regel zeigen Polymerwerkstoffe mit schwachen internen Wechselwirkungen und solche mit kleinen symmetrischen Seitengruppen, wie bei den, auf der linken Seite in Abbildung 8 gezeigten Polymeren, niedrige Reibung, aber höheren Verschleiß als diejenigen mit großen sekundären Bindungskräften und sperrigen Substituenten, wie zum Beispiel bei PMMA. Auch die Polarität der Seitengruppen ist von Bedeutung, da sie unter anderem die adhäsiven Wechselwirkungen mit dem Gegenstoff bestimmen [31].

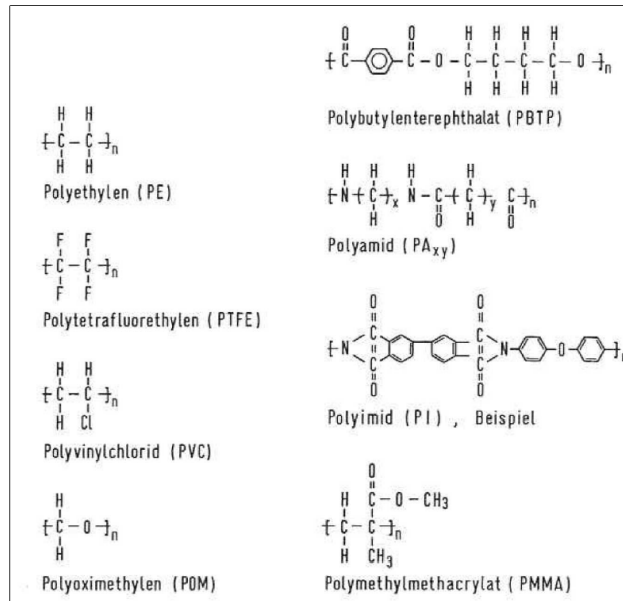


Abbildung 8: Chemische Struktur tribologisch relevanter Thermoplaste [31].

Weiters haben bei teilkristallinen Thermoplasten der Kristallisationsgrad sowie die Größe der Kristallite Einfluss auf die tribologischen Eigenschaften. Auch wachstumsbedingt gestörte sphärolithische Strukturen führen zu geringeren Reibwerten beim Abgleiten eines Aluminiumoxidstiftes als am Sphärolithen selbst. In Abbildung 9 ist der Verlauf des Reibwerts über drei Sphärolithe und deren Grenzen zu sehen. Dabei ist ein deutlicher Abfall des Reibkoeffizienten an den Grenzen und ein neuerlicher Anstieg beim Übergleiten des nächsten Sphärolithen zu erkennen. Dieses Phänomen ist auch bei einem neuerlichen Übergleiten (zweites Übergleiten in der Darstellung) des betrachteten Abschnitts zu erkennen. Des Weiteren fällt auch auf, dass die Reibzahl bei der zweiten Messung etwas niedriger ist, als jene bei der ersten.

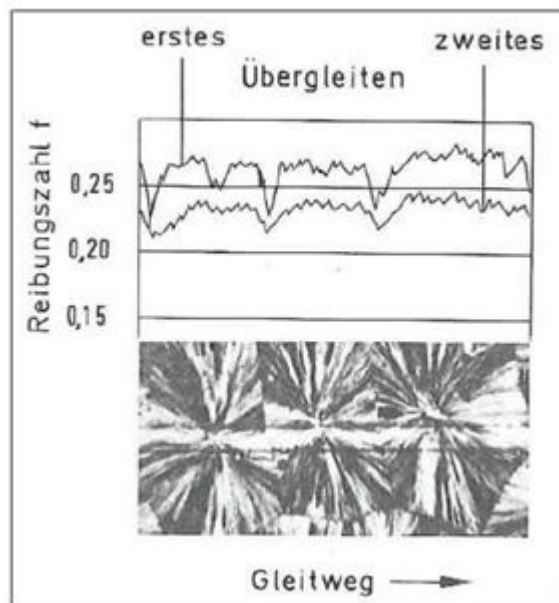


Abbildung 9: Beeinflussung des Reibungsverhaltens eines Polymer/Metall-Systems durch die Mikrostruktur des Polymeren [31].

Bedeutend ist auch der Einfluss von Anisotropie durch Verstreckung auf den mechanischen Verlustfaktor und damit auf Reibung und Verschleiß [10].

Die Härte nimmt mit Verstreckung des Materials zu und die wahre Kontaktfläche dadurch nachweislich ab [1]. Die Beobachtung, dass orientierte Polymerbereiche wie zum Beispiel sogenannte Spritzhäute von Bauteilen besondere tribologische Eigenschaften besitzen, wurde experimentell bestätigt. In tribometrischen Untersuchungen an Polymer-Dünnschnitten mit Hilfe eines Gleiters ergibt sich nach [1], dass aufgrund des in orientierten Bereichen höheren Elastizitätsmoduls der Reibungskoeffizient sinkt. Ein höheres Elastizitätsmodul hat zur Folge, dass die wahre Kontaktfläche und das Deformationsvolumen abnehmen.

2.3.5 Tribologische Analyse

Zunächst ist nochmals darauf hinzuweisen, dass es sich bei Reibung und Verschleiß um keine Stoffkennwerte handelt. Es sind vielmehr Systemeigenschaften, die von zahlreichen Einflüssen abhängig sind. Unter einem Tribosystem versteht man die Reibpartner und das Umgebungsmedium, in dem die Relativbewegung stattfindet. Die Eigenschaften sämtlicher im System befindlichen Komponenten, wie zum Beispiel Oberflächenstruktur, Härte oder Größe der Reibflächen, haben enormen Einfluss auf die gemessenen Werte. Siehe dazu auch Abbildung 6.

Um relevante Ergebnisse für die spätere Anwendung zu erzielen, ist also darauf zu achten, dass die Prüfbedingungen möglichst den Einsatzbedingungen entsprechen. Das fängt bei der Werkstoffpaarung, die im Versuch unbedingt dieselbe wie im späteren Bauteil sein muss, an. Weitere wichtige Größen bei der Messung von tribologischen Eigenschaften von Polymeren sind unter anderem die Oberflächenrauigkeit, das Umgebungsmedium oder die Beanspruchungsgeschwindigkeit. In Abbildung 10 ist der große Einfluss der Relativgeschwindigkeit der Reibpartner auf den Reibungskoeffizienten von Polyethylen, Polypropylen und Polyamid zu sehen. Die Kurven zeigen, dass bei allen drei Polymeren für langsame Beanspruchungen mit einem Anstieg der Reibungszahlen zu rechnen ist. Nach dem Erreichen eines Maximalwertes kommt es mit zunehmender Geschwindigkeit wieder zu einem relativ raschen Absinken der Reibung. Die Geschwindigkeit bei der eine maximale Reibung auftritt sowie die Steilheit des Anstiegs bzw. Abfalls der Reibkoeffizienten sind von Polymer zu Polymer unterschiedlich.

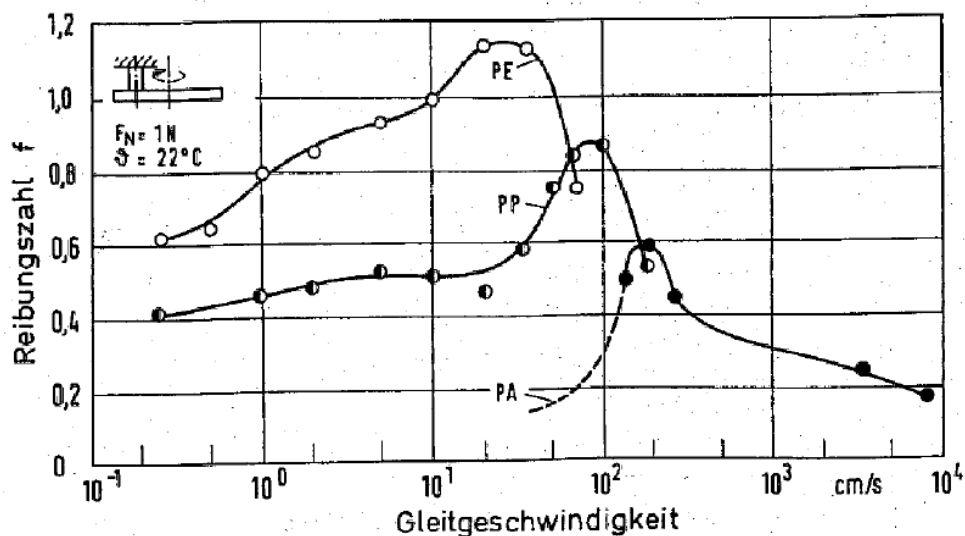


Abbildung 10: Geschwindigkeitseinfluss auf die Reibungszahl [31].

In Abbildung 11 ist der gravierende Einfluss der Systemtemperatur auf die tribologischen Kennwerte der verschiedenen Polymere deutlich zu erkennen. Beim Vergleich der Abhängigkeit der Reibkoeffizient von der Temperatur zeigt sich, dass sich die verglichenen Polymere äußerst unterschiedlich verhalten. Während PTFE und POM bei tiefen Temperaturen hohe Reibwerte aufweisen, welche mit Zunahme der Temperatur abnehmen und schließlich ab etwas unter Raumtemperatur eine konstante Reibungszahl aufweisen, sinken jene von PA 66 und PCTFE (Polychlorotrifluorethylen) immer weiter. PP weist mit einer Zunahme der Temperatur einen immer weiter steigenden Reibkoeffizienten auf, wogegen jener von PE im Bereich von -40 °C ein Maximum und knapp unter null Grad ein Minimum hat, bevor er dann wieder massiv ansteigt.

Bei der Temperaturabhängigkeit des Verschleißkoeffizienten zeigen die Kunststoffe ein sehr ähnliches Verhalten. Der Verschleiß sinkt, abhängig vom Polymer, mehr oder weniger stark bis er ein Minimum erreicht. Wird diese Temperatur jedoch überschritten kommt es zu einem sehr raschen Anstieg des Verschleißfaktors. Die Ausnahme stellt dabei POM dar: Bei diesem Polymer steigt der Verschleiß zunächst rasch an. Im Bereich von etwa 40 °C bis 100 °C ist nur ein langsamer Anstieg messbar und bei höheren Temperaturen kommt es, so wie es auch bei den anderen Polymeren zu beobachten ist, zu einem sehr raschen Anstieg des Verschleißfaktors.

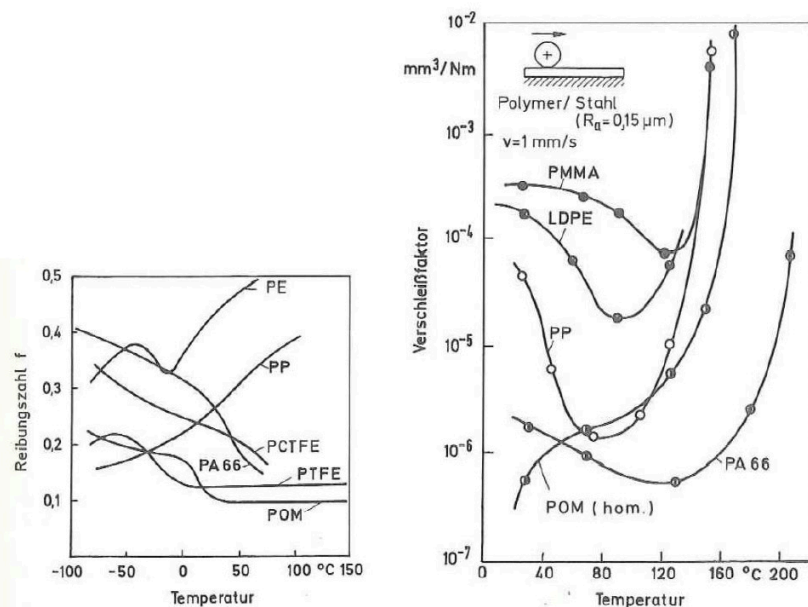


Abbildung 11: Temperatureinfluss auf Reibungszahl und Verschleißfaktor [31].

Es ist empfehlenswert, den Maßstab des Versuchsaufbaus den jeweilig benötigten Informationen anzupassen. Will man also beispielsweise für eine Vorauswahl Werkstoffe oder Schmiermittel untereinander vergleichen, ist es zweckmäßig, zunächst Versuche auf einem kleinen Labortribometer durchzuführen. Dazu eignet sich zum Beispiel die Pin-on-Disc Methode (siehe 2.3.6). Hier werden die sehr komplexen tribologischen Zusammenhänge weitest möglich vereinfacht. So können einzelne tribologische Systeme gegenübergestellt und auch einzelne Parameter variiert werden. Um jedoch genaueren Aufschluss über das tribologische Verhalten eines Tribosystems im Einsatz zu erhalten, sollten die Versuche nicht an einem Probekörper, sondern an Originalbauteilen und unter realitätsnahen Beanspruchungsverhältnissen durchgeführt werden. Um einen der jeweiligen Zielsetzung entsprechenden Versuchsaufbau zu gewährleisten, wird von Uetz et al. [30] eine Unterteilung in sechs unterschiedliche Kategorien vorgeschlagen. Diese Kategorien sind in Tabelle 4 dargestellt. Die ersten drei Kategorien umfassen Versuche unter Betriebs- oder

betriebsähnlichen Bedingungen. Versuche der Kategorie IV bis VI werden hingegen an Modellsystemen durchgeführt. Bei Kategorie I bis II (IV) werden Originalbauteile und bei Kategorie (IV), V und VI Modellproben geprüft. Bezüglich des Beanspruchungskollektivs werden Abstufungen von kompletten Maschinen bzw. Anlagen bis hin zu geometrisch einfachen Proben getroffen [31].

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Prüfkategorien, die in Tabelle 4 aufgeführt sind, ist im Arbeitsblatt für Tribologie [13] nachzulesen.

Das Ziel dieser Arbeit ist ein Vergleich beziehungsweise eine Gegenüberstellung der tribologischen Eigenschaften von verschiedenen Polymeren und Compounds. Für Aufgabenstellungen wie diese ist eine Testanordnung nach der Kategorie VI mit einem Modellsystem und einfachen Probekörpern zweckmäßig. Daher wurden die Versuche für diese Arbeit mit dem Pin-on-Disc Aufbau, welche in diese Kategorie fällt, auf einem Mikrotribometer durchgeführt.

Tabelle 4: Überblick über die sechs Kategorien der Verschleißprüfung [31].

Kategorie	Art des Versuchs Beanspruchungskollektiv	Systemstruktur
I	Betriebsversuch (Feldversuch) - Betriebsbeanspruchung - verschärfte Beanspruchung	Komplette Maschine/ komplette Anlage
II	Prüfstandversuch mit kompletter Maschine oder Anlage - betriebsnahe Beanspruchung - verschärfte Beanspruchung	
III	Prüfstandversuch mit Aggregat oder Baugruppe - betriebsnahe Beanspruchung - verschärfte Beanspruchung	
IV	Versuche mit unverändertem Bauteil oder verkleinertem Aggregat	Herausgelöste Bauteile/ verkleinertes Aggregat
V	Beanspruchungsähnlicher Versuch mit Probekörpern	
VI	Modellversuch mit einfachen Probekörpern	

2.3.6 Pin-on-Disc Methode

Eine häufig zum Einsatz kommende Methode zur tribologischen Analyse einer Werkstoffpaarung im Labormaßstab ist die sogenannte Pin-on-Disc Prüfung. Diese ist in Abbildung 12 schematisch dargestellt. Ein grundlegender Vorteil dieser Prüfmethode ist die simple Geometrie der Probekörper, die relativ einfach hergestellt werden können und somit im Vergleich zu anderen Prüfmethoden relativ preisgünstig sind. Das bringt den Nachteil mit

sich, dass sich die Analysesituation und die im realen Bauteil vorherrschenden Bedingungen relativ stark voneinander unterscheiden. Deshalb ist diese Methode zwar für einen Materialvergleich und somit eine Vorselektion sehr gut geeignet, vor dem Einsatz eines Werkstoffes oder besser einer Werkstoffpaarung in einem realen Bauteil sollten jedoch noch weitere Prüfungen in realitätsnäheren Konfigurationen durchgeführt werden. Als Unterstützung für eine schrittweise Annäherung an reale Bedingungen können die 6 Kategorien der Verschleißprüfung in Tabelle 4 herangezogen werden.

Bei der Pin-on-Disc Methode wird ein Stift aus jenem Werkstoff, aus dem einer von den beiden in der Anwendung eingesetzten Reibpartner, mit einer einstellbaren Kraft auf den scheibenförmigen Gegenkörper, welcher aus dem Material des zweiten auf Reibung beanspruchten Körpers hergestellt sein sollte, gedrückt. Die Scheibe kann nun für eine beliebige Zeit mit der gewünschten Geschwindigkeit rotiert werden. Dabei werden von einem angeschlossenen Computer die benötigten Daten wie Temperatur, Normal- oder Tangentialkraft während des gesamten Prüfvorgangs kontinuierlich aufgezeichnet und gespeichert. Eine Auswertungssoftware kann aus gemessenen Daten den Reibkoeffizienten errechnen und diesen sowie die anderen während des Versuchs aufgenommenen Daten, wie zum Beispiel auftretende Kräfte oder auch die eventuell mitgemessene Temperatur, als Verlauf über die Zeit ausgeben und darstellen. Die Software ermöglicht es des Weiteren, sich Mittel- oder, wenn gewünscht, auch Spitzenwerte der dargestellten Daten ausgeben zu lassen oder auch eventuelle Schwankungen mit Hilfe einer Filterung etwas zu glätten.

Der Pin-on-Disc Versuchsaufbau ist sehr flexibel einsetzbar, da er es ermöglicht, Messungen im trockenen, also ungeschmierten Zustand, aber auch in entsprechenden Prüfbehältern unter Medieneinfluss wie zum Beispiel Schmieröl, durchzuführen. Weiters ist es möglich das System zu temperieren und somit auch den nicht unerheblichen Einfluss der Temperatur auf die Tribologie des Systems zu berücksichtigen.

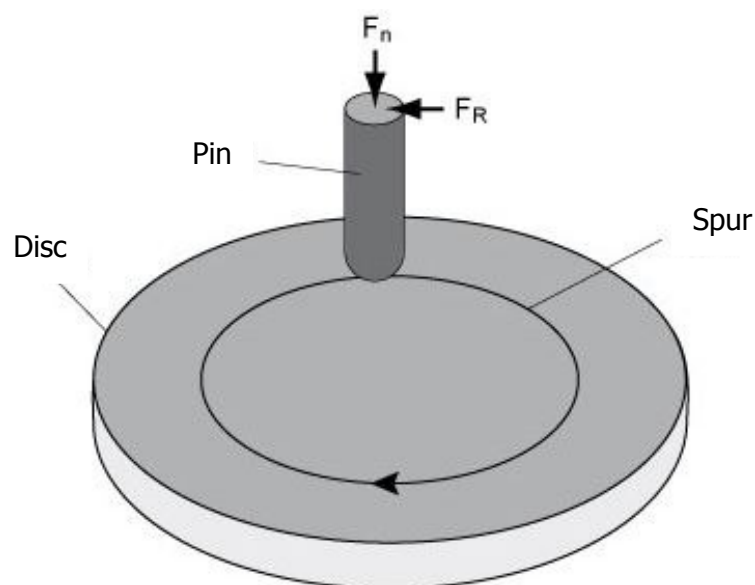


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Pin-on-Disc Verfahrens [8].

3 Experimentelles

3.1 Verwendete Materialien

Aufgrund der Tatsache, dass Polyamide wegen ihrer guten tribologischen Eigenschaften, ihrer relativ hohen möglichen Einsatztemperatur und des im Vergleich zu anderen Hochtemperaturthermoplasten günstigen Preises am besten in das Anforderungsprofil einer Kettenführung passen, wurden auch für diese Arbeit drei unterschiedliche Polyamide als Matrixpolymere gewählt. Zusätzlich zu Ultramid A4H, einem Polyamid 66, welches aktuell für die Kettenführung verwendet wird und dessen Reibkoeffizient verbessert werden soll, wurde noch ein weiteres PA 66 sowie ein PA 46 als alternative polymere Grundwerkstoffe gewählt. In Tabelle 5 sind die drei verwendeten Polymere mit einigen ihrer Eigenschaften, die den entsprechenden Produktdatenblättern [29, 32, 33] entnommen sind, aufgelistet.

Tabelle 5: Übersicht über die verwendeten Polymere.

Bezeichnung	Hersteller	Typ	Schmelztemperatur (°C)	Zug-E-Modul, trocken (MPa)	Zug-E-Modul bei Luftfeuchtigkeit (MPa)
Ultramid A4H	BASF	PA 66	260	3100	1200
Zytel E41HSB	Du Pont	PA 66	263	3100	1200
Stanyl TW341	DSM	PA 46	295	3300	1000

Diese Polymere wurden mit jeweils fünf Massenprozent der dreizehn unterschiedlichen Additive zu Compounds verarbeitet. In Tabelle 6 sind die insgesamt 16 Additive, die sich in Schichtsilikate, mineralische Zusätze mit sphärischen Partikeln und Polymere unterteilen lassen, aufgelistet. Bei den Schichtsilikaten sind die amerikanischen Cloisite Typen, die auf Natriumbasis hergestellt werden, und die europäischen Nanofil Typen, die auf Kalzium basieren, zu unterscheiden. Diese unterscheiden sich untereinander wiederum in ihrer Beschichtung, die zu einem besseren Eindringen des Polymers zwischen die Schichten führen soll. Die Beschichtungen aus unterschiedlichen Fettsäuren ersetzen die austauschbaren Kationen zwischen den einzelnen Schichten der Schichtsilikate (siehe Abschnitt 2.1.2). Cloisite Na⁺ und Nanofil 116 werden vom Hersteller unbeschichtet ausgeliefert. Diese wurden sowohl wie vom Hersteller geliefert als auch nachträglich mit Fettsäuren beschichtet verarbeitet. Diese nachträglichen Beschichtungen wurden vom Lehrstuhl für Chemie der Kunststoffe an der Montanuniversität Leoben aufgetragen. Garamite 1958 besteht im Unterschied zu den restlichen Schichtsilikaten aus plättchen- und nadelförmigen Partikeln. Zusätzlich wurde vor dem Compoundieren vorgetrocknetes Cloisite Na⁺ verarbeitet, um einen möglichen Einfluss von Feuchtigkeit des Füllstoffes auf die Qualität des Compounds und dessen tribologische Eigenschaften zu prüfen und gegebenenfalls sichtbar zu machen.

Bei den sphärischen Additiven sind große Unterschiede in der Partikelgröße zu erkennen. M800 und M8000 unterscheiden sich geringfügig in der Zusammensetzung. Beide bestehen zu 99,0 % aus SiO₂; der größte Unterschied besteht im Anteil von Al₂O₃, der bei M800 bei 0,80 % und bei M8000 bei 0,75 % beträgt. Perlit besteht aus synthetischen Hohlkugeln.

Weiters wurden in einem ersten Versuch mit Schmieröl H9 gefüllte Harzkapseln vom Fraunhofer Institut als Additiv eingesetzt. Diese sind jedoch für eine Verarbeitung in

Verbindung mit Polyamiden nicht geeignet, da sie den hohen nötigen Verarbeitungstemperaturen nicht standhalten können. Sie führen zu einem porösen, nahezu aufgeschäumten Granulat, was auf einen thermischen Abbau des Additivs schließen lässt. Aus diesem Grund wurden die Harzkapseln aus dem Versuchsplan gestrichen.

Bei der Betrachtung der Partikelgrößen ist bei den Schichtsilikaten, die als Nanofüllstoff gelten, zu beachten, dass die Werte hier für die Teilchen vor der in Abschnitt 2.1.2 besprochenen Exfolierung angegeben sind. Daher sind deren Abmessungen ursprünglich nicht im Nanobereich, sondern im μm -Bereich anzusiedeln.

Tabelle 6: Verwendete Additive mit der jeweiligen Partikelgröße.

Typ	Füllstoff	Hersteller	Partikelgröße (μm)	
			90% kleiner als	50% kleiner als
Schichtsilikate	Cloisite10A	Rockwood	13	6
	Cloisite 30B	Rockwood	13	6
	Cloisite 93A	Rockwood	13	6
	Cloisite Na ⁺	Rockwood	13	6
	Cloisite Na ⁺ , beschichtet	Rockwood	13	6
	Cloisite Na ⁺ , getrocknet	Rockwood	13	6
	Garamite 1958	Rockwood	$\varnothing < 32$	
	Nanofil 116	Rockwood	$\varnothing: < 20$	
	Nanofil 116, beschichtet	Rockwood	Durchschnittliche Größe: < 20	
	Nanofil SE 3010	Rockwood	$\varnothing 6$	
Sphärische Additive	AF100	Sibelco	D50: 125	
	M800	Sibelco	D50: 1,8	
	M8000	Sibelco	D50: 1,8	
	Perlit	Europperl	Keine Angaben vom Hersteller verfügbar	
	S10	Sibelco	$\varnothing 3,7$	
Polymer	PTFE (TF9207 Z)	Dyneon	-	

3.2 Geräteübersicht

Für die Erstellung dieser Arbeit wurden zur Herstellung der Compounds sowie der Probekörper Geräte des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung der Montanuniversität Leoben eingesetzt. Die Nachbearbeitung der Oberflächen der Probekörper erfolgte ebenfalls auf der Montanuniversität Leoben am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie. Die Analyse der Compounds hinsichtlich Reibung, Verschleiß und Dichte erfolgte auf Geräten des Polymer Competence Center Leoben (PCCL).

Eine vollständige Auflistung der verwendeten Geräte findet sich in Tabelle 7.

Tabelle 7: Geräteübersicht.

Gerät	Eigentümer
Compounder: ZSK 25 P8.2E, Coperion GmbH (Werner & Pfleiderer), Stuttgart, D.	Lehrstuhl Kunststoffverarbeitung
Plattenpresse: Plattenpresse 200, Dr. Collin, Ebersberg, D.	Lehrstuhl Kunststoffverarbeitung
Schleif/Poliermaschine Tegrapol 31, Struers GmbH, Willich, D.	Lehrstuhl Nichteisenmetallurgie
Mikrotribologisches Testsystem: Präzisionstribometer CETR-UMT-2, Bruker, Campbell (CA), USA.	PCCL
Analysewaage mit Dichtebestimmungsset XS 205 DualRange Analysewaage, Mettler Toledo, Greifensee, SUI	PCCL

3.3 Compoundieren

Vor dem Start des Compoundierprozesses war es notwendig die Doppelschnecke, die in einem Baukastensystem aus verschiedenen Elementen zusammengestellt werden kann, in eine für die Materialien geeignete Konfiguration zu bringen. Um ein homogenes Polyamid-Füllstoffgemisch zu erzielen, wurde die Konfiguration aus Tabelle 8 gewählt:

Tabelle 8: Schneckenkonfiguration des ZSK zur Herstellung der PA-Compounds.

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Element	SE_16_16	SE_36_36	SE_36_36	SE_36_36	SE_24_24	SE_24_24	SE_24_24	SE_24_24	KBW_45_5_36	KBW_45_5_36	SE_24_12 Li	SE_36_36	SE_36_36	SE_36_36	SE_36_36	SE_36_36	SE_36_36
#	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Element	KBW_45_5_24	KBW_45_5_24	KBW_45_5_24	KBW_45_5_24	SE_24_12 Li	SE_36_36	SE_36_36	SE_24_12 Li	SE_24_12 Li	SE_36_36	SE_36_36	SE_36_36	SE_36_36	SE_24_24	SE_24_24	SE_16_16	SE_16_16

Zur eindeutigen Bezeichnung der einzelnen Schneckenelemente werden Abkürzungen wie in Tabelle 8 verwendet. Die Bezeichnung SE_16_16 weist auf ein Förderelement mit Erdmengerprofil (SE) und einer Steigung (erste Zahl) von 16 mm auf einer Länge (zweite Zahl) von 16 mm hin. Ist an einer solchen Bezeichnung, wie bei Element 11, 25 und 26, ein „Li“ angehängt bedeutet das, dass es sich hier um ein gegenläufiges Staulement handelt.

KBW_45_5_24 bezeichnet einen Knetblock ohne Schulter mit einer Steigung von 45° und fünf Knetscheiben auf einer Länge von 24 mm.

Der Compounder wurde anschließend auf ein für die jeweiligen Polyamide passendes Temperaturprofil (Tabelle 9) geheizt. Die Polyamide wurden nach den Angaben aus den Datenblättern der Hersteller bei 80 °C bei den beiden PA 66 Typen und 100 °C bei dem PA 46 vorgetrocknet und mit den Parametern aus Tabelle 10 verarbeitet

Tabelle 9: Temperaturprofil (in °C) der einzelnen Zonen im Compounder.

		Einzug	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 5	Zone 5	Zone 6	Düse
Ultramid	PA 66	nicht beheizt	255	260	265	265	265	265	265
Zytel	PA 66		250	255	260	260	260	260	260
Stanyl	PA 46		270	275	280	280	280	280	280

Tabelle 10: Verarbeitungsparameter für sämtliche Mischungen.

Polymer (%)	Additiv (%)	Schneckendrehzahl (min ⁻¹)	Massedurchsatz (kg/h)
95	5	100	7

3.4 Probekörperherstellung

Als Probekörper für die tribologische Analyse der einzelnen Mischungen dienten gepresste Scheiben mit einem Durchmesser von acht Zentimetern und einer Dicke von etwa zwei Millimetern. Vor dem Pressen der Proben zu je vier Scheiben pro Pressvorgang musste das Granulat wieder mit denselben Temperaturen wie vor dem Extrudieren getrocknet werden, um eine hohe Probekörperqualität zu gewährleisten. Das Pressen wurde auf der Plattenpresse Collin 200 mit den Parametern aus Tabelle 11 durchgeführt.

Tabelle 11: Einstellungen zum Pressen der Probeplatten an der Plattenpresse Collin 200.

		Programmschritt				
		1	2	3	4	5
PA 66	Temperatur (°C)	280	290	290	290	40
	Zeit (min.)	15	10	20	0	10
	Druck (bar)	1	80	100	100	130
PA 46	Temperatur (°C)	305	310	320	320	40
	Zeit (min.)	10	7	7	0	10
	Druck (bar)	1	50	100	100	130

Die ersten Vorversuche zur tribologischen Analyse dieser Scheiben haben ergeben, dass diese teilweise nicht plan genug waren, um damit aussagekräftige Ergebnisse erreichen zu können. Daher mussten die Scheiben vor der Analyse noch geschliffen werden, um mögliche Unebenheiten, die sich bei den gepressten Platten auch durch verschiedene Veränderungen bei den Verarbeitungsparametern nicht vermeiden ließen, zu beseitigen. Die Tegrapol 31 Schleif- und Poliermaschine ermöglicht es, die Scheiben mittels einer rotierenden Probenhalterung mit einer einstellbaren Druckkraft auf die ebenfalls rotierende Schleifpapierscheibe zu pressen. Zudem ist es möglich, während des Schleifens das Schleifpapier kontinuierlich mit Wasser feucht zu halten. Das Schleifen der Probekörper erfolgte in zwei Schritten: Zuerst wurden die Unebenheiten mit einem groben Schleifpapier beseitigt und danach wurde die Oberfläche noch mit einem feinen Schleifpapier nachbearbeitet. Die Bearbeitungszeiten und die notwendige Anpresskraft der einzelnen Scheiben auf das Schleifpapier unterschieden sich je nach Polymer-Füllstoffkombination und dem Grad der Unebenheit. Die Abbildung 13 zeigt die Schleifmaschine während des Schleifvorgangs.

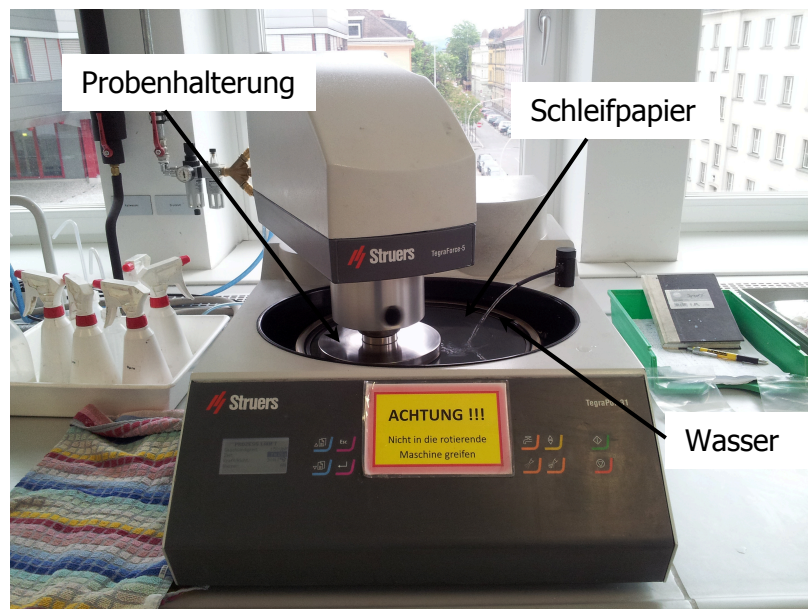


Abbildung 13: Schleif-/Poliermaschine Tegrapol 31 während des Schleifvorgangs.

Durch den Mittelpunkt der geschliffenen Scheiben wurde zum Abschluss der Probekörperfertigung mit einem Handakkubohrer ein Loch mit einem Durchmesser von acht Millimetern gebohrt. Dieses ist nötig, um die Scheiben später in der Halterung des Tribometers zentral fixieren zu können.

3.5 Tribologische Messungen

Die Messung des Verschleißkoeffizienten der Compounds und der drei ungefüllten Polyamide mit dem Tribometer CETR-UMT-2 wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Zur Messung der Beanspruchungen wurde die für die Kraftmessdose 2D Friction/Load Sensor DFM-2, die für Belastungen von maximal 20 N geeignet ist, eingesetzt. Zur Ermittlung des Verschleiß und des Reibkoeffizienten wurden die im vorherigen Kapitel beschriebenen Polymerscheiben

auf die Probekörperhalterung gesteckt und mit kleinen Schrauben so fixiert, dass sie sich in der Halterung nicht mehr drehen konnten. Der Probenbehälter mit der darin fixierten Polymerscheibe wurde dann an der drehbar gelagerten Grundplatte des Tribometers festgeschraubt. Als Gegenkörper diente ein polierter Stift aus demselben Stahl, der auch zur Herstellung der Getriebeketten zum Einsatz kommt. Dieser Stift (Abbildung 14) wurde ebenfalls in der dafür vorgesehenen Halterung montiert. Der Abrieb wurde über eine Distanz von 1,98 km bei 7 N und 13 N gemessen. Zur Errechnung des Verschleißkoeffizienten der einzelnen Proben nach der Formel 4 musste die Dichte der einzelnen Compounds und der reinen Polyamide mit einem Dichtemessungsset der Analysewaage ermittelt und die Probekörper vor und nach der tribologischen Beanspruchung gewogen werden.

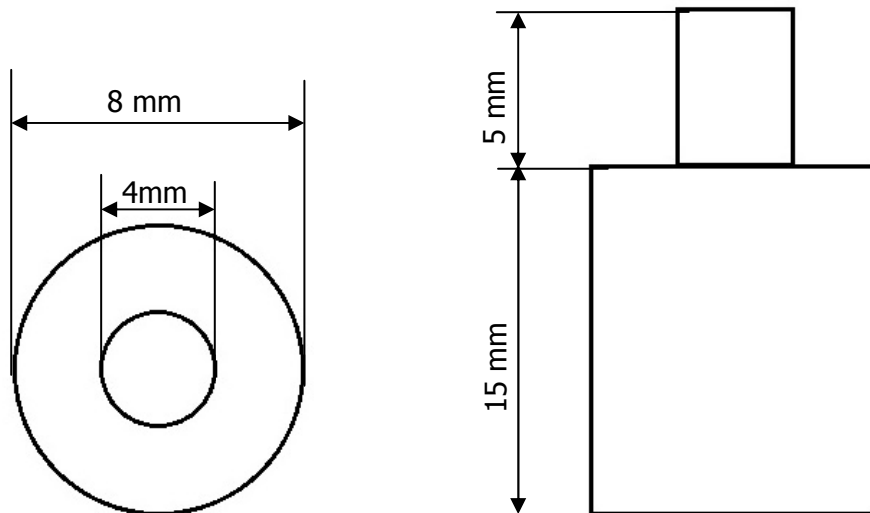


Abbildung 14: Skizze des eingesetzten Metallpins.

Da die Reibkoeffizienten der Proben mit einem Schmieröl als Umgebungsmedium zu ermitteln waren musste der Versuchsaufbau dafür leicht geändert werden. Vor der Montage der Probenhalterung im Mikrotribometer musste noch ein Auslaufschutz für das Öl auf die Halterung aufgesteckt werden. Erst dann wurde sie auf der Grundplatte des Tribometers fixiert. Vor dem Start der Messungen wurde die Polymerscheibe dann noch mit dem Motoröl Castrol 5W30 bedeckt. Abbildung 15 zeigt das Tribometer CETR-UMT-2 während und nach einer Messung des Reibkoeffizienten.

Die Messungen des COF wurden mit achtzehn unterschiedlichen Einstellungen in direkt aufeinanderfolgenden Einzelschritten durchgeführt. Dabei wurden die Anpresskraft, die Rotationsgeschwindigkeit der Probepplatten, sowie die Messposition, an der der Metallstift auf die Polyamidscheibe gepresst wird, variiert. Eine Aufstellung sämtlicher Einstellungen der einzelnen Messschritte ist Tabelle 12 zu entnehmen. Dabei ist zu erwähnen, dass die Messpositionen bei einigen Proben leicht geändert, also nach innen oder außen verlegt, werden mussten, um sicherzustellen, dass es zu keinen verfälschten Messwerten durch Fehlerstellen (wie zum Beispiel Partikeleinschlüssen oder anderen Oberflächenfehlern) kommt.



Abbildung 15: Das Tribometer CETR-UMT-2 während (li.) und nach (re.) einer Messung.

Die Auswahl der Prüfparameter wurde aus mehreren Gründen so wie in Tabelle 12 angegeben gewählt: Zunächst sind die möglichen Prüfgeschwindigkeiten nach oben hin begrenzt, da bei einer größeren Anzahl an Umdrehungen pro Minute die Gefahr besteht, dass Öl über den Rand des Prüfbehälters tritt und dann weiter in die Maschine fließt. Das hätte eine Beschädigung des sehr empfindlichen Messsystems zur Folge und ist daher keine Option. Mit der maximalen Rotationsgeschwindigkeit von 250 Umdrehungen pro Minute konnte eine Einstellung gefunden werden, bei der keine Gefahr für das Tribometer durch überschwappendes Öl besteht und trotzdem eine relativ große Variationsbreite an niedrigeren Geschwindigkeiten für weitere Messungen verfügbar bleibt.

Die Dauer der Messungen bei 10 Umdrehungen pro Minute ist aufgrund der länger dauernden Einschwingphase der Messwerte, die sich bei Messungen mit so niedrigen Beanspruchungsgeschwindigkeiten ergibt, höher als bei den anderen Messungen gewählt, um die Güte der Messwerte zu gewährleisten.

Die Normalkräfte von 5, 10 und 15 Newton ergeben sich aus dem Spektrum der eingesetzten Kraftmessdose, welches so in voller Breite ausgenutzt werden kann. Die maximal angegebenen 20 N sind in der Realität nicht erreichbar, da es bei den Messungen durch die Unebenheiten der Probekörper immer zu gewissen Schwankungen der auftretenden Kräfte kommt, was bei Messungen bei 20 N oder knapp darunter zwangsläufig zu einem Überschreiten der Maximallast und somit zu einer Schädigung der Kraftmessdose führen würde. Die Messungen bei 13 N über ein umfassendes Geschwindigkeitsprofil haben den Grund, dass bei der Geometrie des Metallstiftes (siehe Abbildung 14) auf diese Art eine Flächenpressung von rund 1 N/mm^2 erreicht wird, was etwa mit den im späteren Bauteil vorherrschenden Beanspruchungen vergleichbar ist.

Des Weiteren ist noch zu erwähnen, dass sämtliche für diese Arbeit gemessenen Werte, sowohl für den Verschleißfaktor, als auch für den Reibkoeffizienten mit je einem Messdurchlauf pro Compound bzw. reinem Polymer ermittelt wurden.

Tabelle 12: Prüfprogramm zur Ermittlung des COF bei unterschiedlichen Lasten und Beanspruchungsgeschwindigkeiten.

Programmschritt	Umdrehungen/Minute	Kraft (N)	Position (mm)	Messdauer (s)
1	10	5	16	180
2	10	10	16	180
3	10	15	16	180
4	100	5	20	60
5	100	10	20	60
6	100	15	20	60
7	250	5	24	60
8	250	10	24	60
9	250	15	24	60
10	10	13	28	60
11	40	13	28	60
12	70	13	28	60
13	100	13	28	60
14	130	13	28	60
15	160	13	28	60
16	190	13	28	60
17	220	13	28	60
18	250	13	28	60

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel wird eine Auswahl der gemessenen Daten tabellarisch und grafisch wiedergegeben und diskutiert. Es werden sowohl die Reib- und Verschleißigenschaften der einzelnen Polymere als auch der Einfluss der Additive auf die einzelnen Polymere betrachtet. Schließlich folgt noch der Vergleich der Auswirkungen einzelner Füllstoffe in den unterschiedlichen Matrixmaterialien.

Die Tabellen mit den Werten jener Messungen, die in diesem Kapitel nicht angeführt sind, sowie einige weitere Diagramme finden sich im jeweiligen Anhang. Welche Tabellen und Abbildungen wo zu finden sind, wird im Fließtext der entsprechenden Kapitel nochmals explizit erwähnt.

4.1 Verschleißverhalten

Die Analyse des Verschleiß erfolgte nur im ungeschmierten Zustand, da der Masseverlust, welcher mit Schmierfilm als noch niedriger angenommen werden muss, schon ungeschmiert äußerst gering war und so eine Auswertung erschwert wurde. Zudem ergibt sich das Problem von Resten des Schmieröls, die nach den tribologischen Messungen an den Proben haftenbleiben und nicht vollständig entfernt werden können. Das bringt unweigerlich ein großes Fehlerpotential mit sich, da sich die Masseverluste bei den durchgeführten Messungen ohne Schmieröl nur im Milligrammbereich bewegten. Messungen mit denselben Einstellungen unter Schmieröleinfluss hätten also unweigerlich zu falschen und somit unbrauchbaren Ergebnissen geführt. Um aussagekräftige Werte der Verschleißkoeffizienten mit Schmierfilm zu erzielen, hätte die Distanz, die der Stahlstift über die Kunststoffscheiben zurücklegt, und somit auch die Beanspruchungsdauer wesentlich erhöht werden müssen. Dies war jedoch aufgrund der großen Anzahl von 51 zu analysierenden Proben (3 reine Polymere sowie 48 Compounds) nicht realisierbar und hätte den Rahmen dieser Arbeit gesprengt. Daher beschränkt sich die Analyse der Verschleißfaktoren hier auf trockene Messungen.

In Tabelle 13 sind die gemessenen Dichtewerte sowie der Materialverlust während der Reibbeanspruchung sowie der daraus errechnete Verschleißkoeffizient von Ultramid und auf dessen Basis erzeugten Compounds bei einer Last von 7 N bzw. 13 N angegeben. Die entsprechenden Werte der beiden übrigen Polyamide und deren Mischungen sind in Tabelle 14 und Tabelle 15 in Anhang 10.1 zu finden.

Die Dichte der einzelnen Mischungen wurde aus Teilen der Probekörper ermittelt. Dazu wurden nach der Messung des Masseverlusts durch Reibung Stücke aus den Polymerscheiben geschnitten und mit Hilfe der Dichtemessungsvorrichtung der Analysewaage die jeweiligen Dichtewerte bestimmt. Diese Messungen wurden mit jeweils drei unterschiedlichen Stücken der Polymerscheibe durchgeführt und aus den so ermittelten Dichtewerten wurde in weiterer Folge das arithmetische Mittel errechnet.

Tabelle 13: Ergebnisse der Dichtemessungen und der Verschleißanalyse von PA 66 Ultramid H4A und seinen Compounds.

Additiv	Normalkraft					
	7 N			13 N		
	ρ (g/cm ³)	Δm (g)	k (mm ³ /Nm)	ρ (g/cm ³)	Δm (g)	k (mm ³ /Nm)
Ungefüllt	1,141	0,00144	9,109*10 ⁻⁵	1,141	0,00060	1,976*10 ⁻⁵
Cloisite10A	1,157	0,00026	1,622*10 ⁻⁵	1,157	0,00015	5,039*10 ⁻⁶
Cloisite 30B	1,161	0,00039	1,306*10 ⁻⁵	1,161	0,00033	1,105*10 ⁻⁵
Cloisite 93A	1,159	0,00059	2,428*10 ⁻⁵	1,159	0,00032	1,073*10 ⁻⁵
Cloisite Na ⁺	1,178	0,00147	9,007*10 ⁻⁵	1,178	0,00087	2,871*10 ⁻⁵
Cloisite Na ⁺ , beschichtet	1,166	0,00028	1,733*10 ⁻⁵	1,166	0,00033	1,100*10 ⁻⁵
Cloisite Na ⁺ , getrocknet	1,178	0,00030	1,531*10 ⁻⁵	1,178	0,00015	4,948*10 ⁻⁶
Garamite 1958	1,081	0,00043	2,871*10 ⁻⁵	1,081	0,00046	1,654*10 ⁻⁵
Nanofil 116	1,173	0,00016	9,846*10 ⁻⁶	1,173	0,00023	7,621*10 ⁻⁶
Nanofil 116, beschichtet	1,171	0,00017	1,048*10 ⁻⁵	1,171	0,00048	1,594*10 ⁻⁵
Nanofil SE 3010	1,148	0,00033	2,075*10 ⁻⁵	1,148	0,00024	8,126*10 ⁻⁶
AF100	1,150	0,00220	1,381*10 ⁻⁴	1,150	0,00169	5,712*10 ⁻⁵
M800	1,155	0,00190	1,187*10 ⁻⁴	1,155	0,00126	4,239*10 ⁻⁵
M8000	1,160	0,00239	1,487*10 ⁻⁴	1,160	0,00084	2,814*10 ⁻⁵
Perlit	1,165	0,00181	1,121*10 ⁻⁴	1,165	0,00064	2,135*10 ⁻⁵
S10	1,160	0,00223	1,387*10 ⁻⁴	1,160	0,00114	3,820*10 ⁻⁵
PTFE	1,120	0,00092	5,929*10 ⁻⁵	1,120	0,00024	8,329*10 ⁻⁶

Bei genauerer Betrachtung der gemessenen Masseverluste fällt auf, dass die Verluste bei den meisten Proben bei 7 N um einen Faktor zwischen 1,2 für zum Beispiel Cloisite 30B bis 2,4 für das ungefüllte Polymer höher sind als jene, die bei 13 N gemessen wurden. Besonders groß ist der Unterschied bei PTFE mit einem Faktor von rund 3,8. Nur bei vier Compounds ist der Masseverlust bei geringerer Last niedriger als bei der entsprechenden Probe mit 13 N. Die Differenzen bewegen sich bei diesen Proben im Bereich von einem Faktor 1,1 bei Garamite 1958 bis 1,4 bei Nanofil 116. Das beschichtete Nanofill 116 erreicht bei 7 N sogar einen um den Faktor 2,8 niedrigeren Wert als bei 13 N. Durchschnittlich liegen die gemessenen Masseverluste um einen Faktor 2 auseinander. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei den Compounds der beiden anderen Polymere. Diese Tendenzen waren eigentlich nicht zu erwarten und lassen sich auch nicht logisch erklären. Eigentlich sollten die Masseverluste

bei Messungen mit zwei relativ geringen Pressungen relativ knapp bei einander liegen und jene bei der höheren Belastung auch etwas größer sein. Ein entscheidender Faktor dabei scheint der äußerst geringe auftretende Masseverlust zu sein. Da schon geringe Schwankungen, durch unterschiedliche Oberflächenqualitäten oder andere mögliche Fehlereinflüsse große Auswirkungen auf die Resultate haben können. Aufgrund dieser Unsicherheiten bei den gemessenen Werten wird auf eine Interpretation der Auswirkungen von einzelnen Additiven auf das Verschleißverhalten verzichtet, stattdessen werden in weiterer Folge nur die ungefüllten Polymere sowie die drei Füllstoffgruppen Schichtsilikate, sphärische Füllstoffe und PTFE gegenübergestellt.

Der Vergleich der ermittelten Verschleißraten der reinen Polyamide, der in Abbildung 16 dargestellt ist, zeigt zunächst, dass die beiden Polyamid 66 Typen unter beiden Belastungszuständen ein besseres Verschleißverhalten an den Tag legen, als das PA 46. Vor allem das Ultramid, welches auch momentan zur Fertigung der Kettenführung zum Einsatz kommt, weist die mit Abstand besten Werte auf.

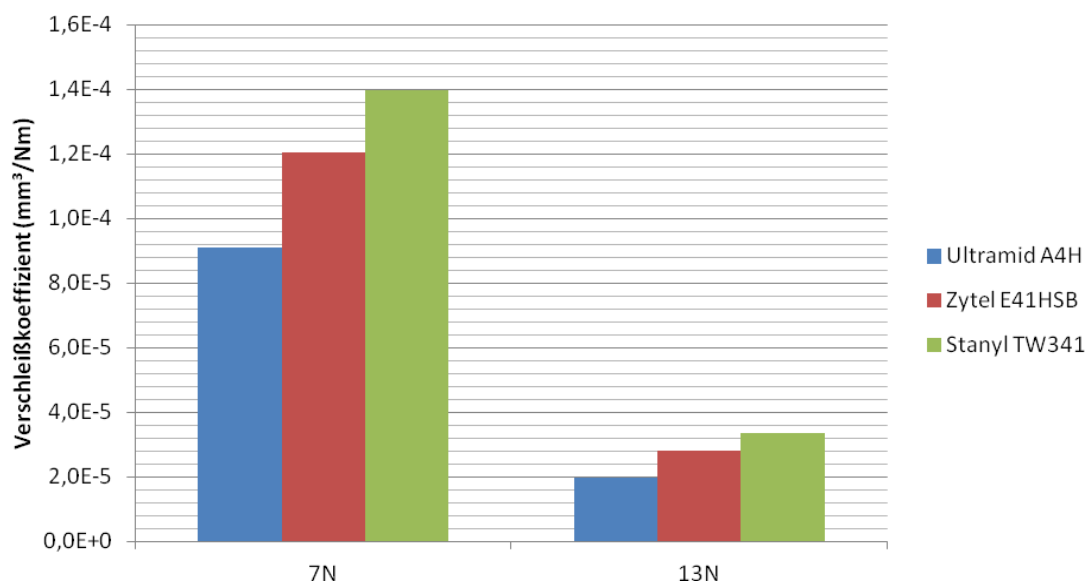


Abbildung 16: Gegenüberstellung des Verschleißkoeffizienten der ungefüllten Polyamide unter einer Last von 7 N bzw. 13 N.

Was bei der Betrachtung und dem Vergleich der Verschleißkoeffizienten bei den beiden unterschiedlichen Normalkräften sofort auffällt und im ersten Moment etwas irritierend wirken kann, ist die Tatsache, dass die Verschleißkoeffizienten mit einer Zunahme der Flächenpressung deutlich abnehmen. Das lässt sich jedoch durch die Definition des Verschleißfaktors k (siehe dazu auch Formel 4) und den typischen Verlauf des Volumenverlustes von Polymeren unter Reibbeanspruchung erklären. Der Verschleißkoeffizient ist der Verlust an Volumen während der Beanspruchung pro zurückgelegter Reibstrecke und pro wirkender Anpresskraft, seine Einheit ist also mm^3/Nm . Ein typischer Verlauf des Verschleißes über die Prüfzeit ist in Abbildung 17 gezeigt. Der anfänglich hohe Verschleiß kommt von kleinen Unebenheiten an der Oberfläche des Prüfkörpers, welche bei den ersten Umdrehungen der Scheibe durch den Stift abgetragen werden. Danach entsteht eine Art Bahn, auf der der Stahlstift über die Scheibe reibt und der Verschleiß über einen längeren Zeitraum konstant und relativ gering bleibt. Diese Kurven sollten bei einer Änderung der Anpresskraft in der Größenordnung, wie sie in dieser Arbeit zur Anwendung kam, keine signifikanten Unterschiede zeigen. Tatsächlich sind die

gemessenen Masseverluste, wie in Tabelle 13 gezeigt und bereits besprochen wurde bei der größeren Kraft sogar meist niedriger. Die Werte für den Volumenverlust pro zurückgelegtem Meter sind sehr ähnlich und werden, um den Verschleißfaktor zu ermitteln, durch die jeweilige Kraft dividiert. Daher ist bei größeren Lasten ein kleinerer Verlustfaktor zu erwarten, was sich auch in Abbildung 16 bestätigt.

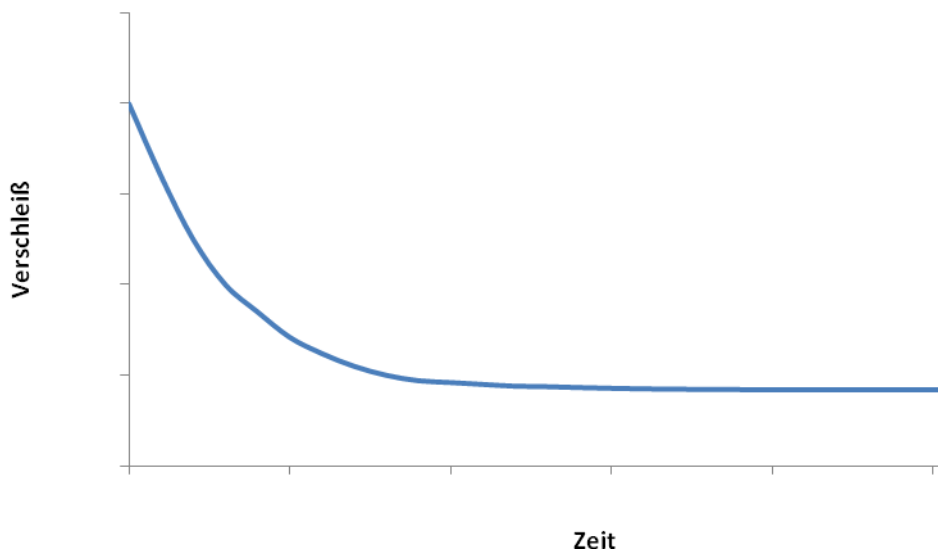


Abbildung 17: Schematischer Verlauf des Verschleiß in Abhängigkeit von der Prüfzeit.

Eine graphische Gegenüberstellung der Messergebnisse des Verschleißverhaltens von PA 66 Ultramid A4H und seiner Compounds ist in Abbildung 18 und Abbildung 19 für beide Belastungsfälle gezeigt. Für PA 66 Zytel E41HSB (Abbildung 20) und Stanly TW341 (Abbildung 21) sind hier jeweils nur die Verschleißraten bei 13 N gezeigt. Diese Kraft entspricht bei der Geometrie des Stahlpins (Abbildung 14) einer Flächenpressung von rund 1 N/mm². Die entsprechenden Abbildungen für 7 N (Abbildung 40 sowie Abbildung 41) sind im Anhang 10.2 zu finden.

Die Verschleißmessungen an den Compounds zeigen von Polymer zu Polymer unterschiedliche Auswirkungen der einzelnen Additive beziehungsweise der einzelnen Füllstoffgruppen. Bei Ultramid (Abbildung 18 und Abbildung 19) führt die Zugabe der eingesetzten Schichtsilikate zu einem Absinken der Verschleißkoeffizienten. Diese Tendenzen lassen sich bei beiden Beanspruchungen beobachten, wobei die Unterschiede bei 7 N wesentlich deutlicher, ausfallen. Zum Vergleich sind die Verschleißkoeffizienten der mit Schichtsilikaten gefüllten Ultramidproben bei 7 N zwischen etwa 65 % und etwa 85 % niedriger als jene des ungefüllten Polymers. Die bei 13 N gemessenen Koeffizienten hingegen bewegen sich in einem Bereich von 16 % und 75 %.

Die einzige Ausnahme stellt dabei das Compound von Ultramid mit 5% Cloisite Na⁺ dar, dessen Verschleiß bei einer Anpresskraft von 7 N etwa dem des ungefüllten Polymers entspricht und bei 13 N sogar etwas über diesem liegt.

Durch die Zugabe aller eingesetzten sphärischen Additive zu Ultramid steigt der Verschleiß bei beiden Belastungszuständen zumindest leicht an. Der Anstieg bei diesen Compounds liegt bei 7 N zwischen 18 % und 35 %. Bei 13 N liegen die Unterschiede wesentlich weiter auseinander und zwar zwischen lediglich 7 % bis hin zu mehr als dem doppelten Reibkoeffizienten des ungefüllten Polymers.

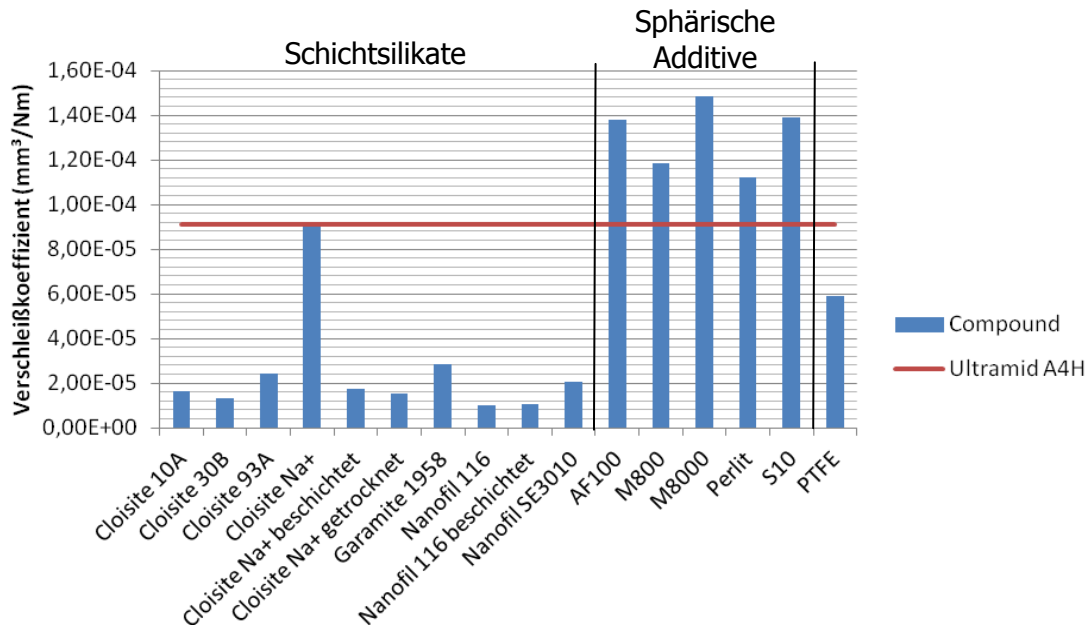


Abbildung 18: Einfluss der einzelnen Additive auf den Verschleißkoeffizienten von Ultramid A4H unter einer Last von 7 N.

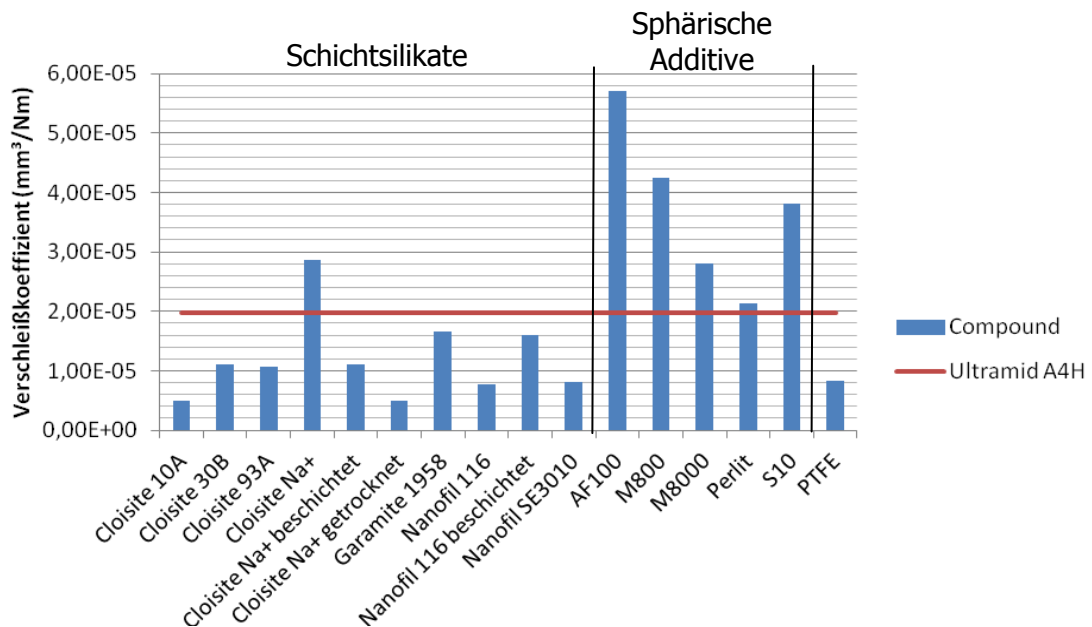


Abbildung 19: Einfluss der einzelnen Additive auf den Verschleißkoeffizienten von Ultramid A4H unter einer Last von 13 N.

Die Einflüsse der unterschiedlichen Füllstoffgruppen auf Zytel, das zweite PA 66, lassen keine so klaren Schlüsse wie jene von Ultramid zu. Tendenziell haben aber auch hier eher die Schichtsilikate einen niedrigeren Verschleiß zur Folge, wogegen die sphärischen Additive, abgesehen von AF 100, eher keinen Einfluss auf haben. Bei AF100, dem Additiv mit den größten Partikeln, kommt es zu einem deutlichen Anstieg des Verschleißkoeffizienten auf etwa den dreifachen des reinen Polymeres. Einen besonders großen Verschleiß weist das Compound mit Cloisite 93A auf. Dieses Additiv dürfte nicht besonders gut in der Matrix haften, da sich auch bei der Messung mit 7 N, die im Anhang zu finden ist, ein deutlicher Anstieg der Verschleißrate zeigt.

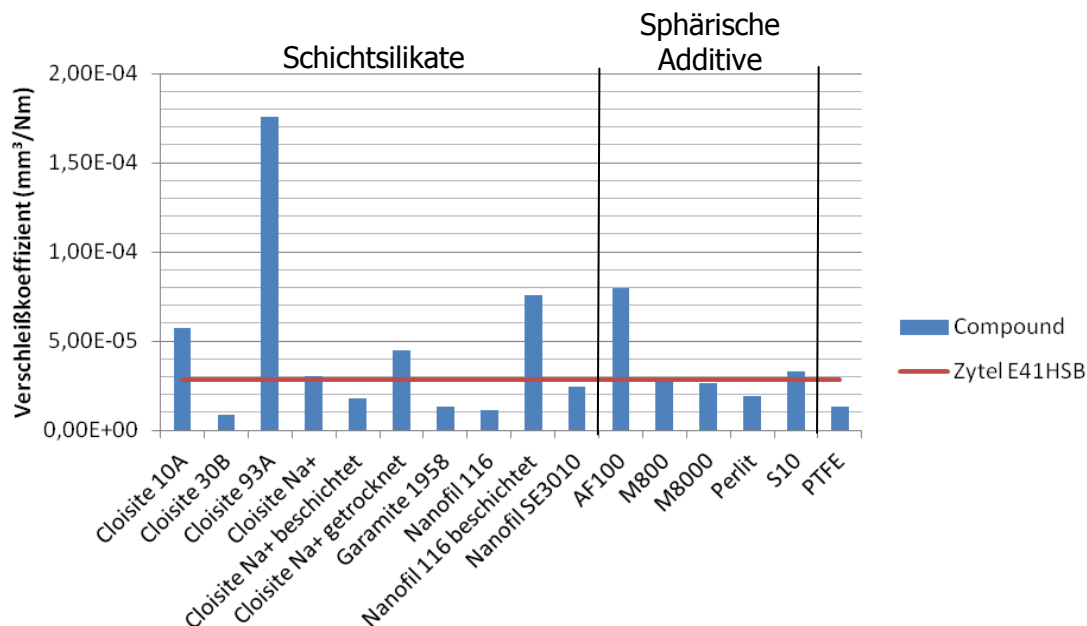


Abbildung 20: Einfluss der einzelnen Additive auf den Verschleißkoeffizienten von Zytel E41HSB unter einer Last von 13 N.

Bei Stanyl, dem Polyamid 46, zeigen sich in Abbildung 21 mit der Ausnahme von drei Schichtsilikaten, die jedoch zu deutlichen Verringerungen (auf etwa die Hälfte und für SE3010 sogar noch mehr) des Abriebs führen, keine Verbesserung des Verschleißverhaltens durch die Zugabe der Additive. Auffällig ist der große Anstieg der Verschleißrate durch die beiden nachträglich beschichteten Schichtsilikate Cloisite Na⁺ und Nanofil 116, die nicht mit dem Matrixpolymer verträglich zu sein scheinen. Auch die sphärischen Zusätze bringen mit der Ausnahme von M8000, das keinen Einfluss auf das Verschleißverhalten zeigt, einen stärkeren Abrieb mit sich.

PTFE führt des Weiteren bei allen Polymeren zu einem Absinken des Verschleißkoeffizienten. Bei den beiden Polyamid 66 Typen sinkt dieser auf etwa die Hälfte des Wertes des reinen Polymeres, bei Stanyl hingegen nur geringfügig.

Der Trend, dass Schichtsilikate den Verschleiß der Polymerproben eher senken als die sphärischen Additive kann auf mehrere Faktoren zurückgeführt werden. Zum einen haben die schichtig aufgebauten Partikel eine größere spezifische Oberfläche und können so besser in die Matrix eingebunden werden und zum anderen sind die Partikel der sphärischen Zusätze größer. Das bedeutet einen größeren Masse- bzw. Volumenverlust pro gelöstem Füllstoffpartikel und somit einen größeren Einfluss auf den Verschleißkoeffizienten [23].

Durch das Herauslösen von Partikeln wird die Oberfläche geschädigt, was diese wiederum anfälliger für weiteren Verschleiß macht.

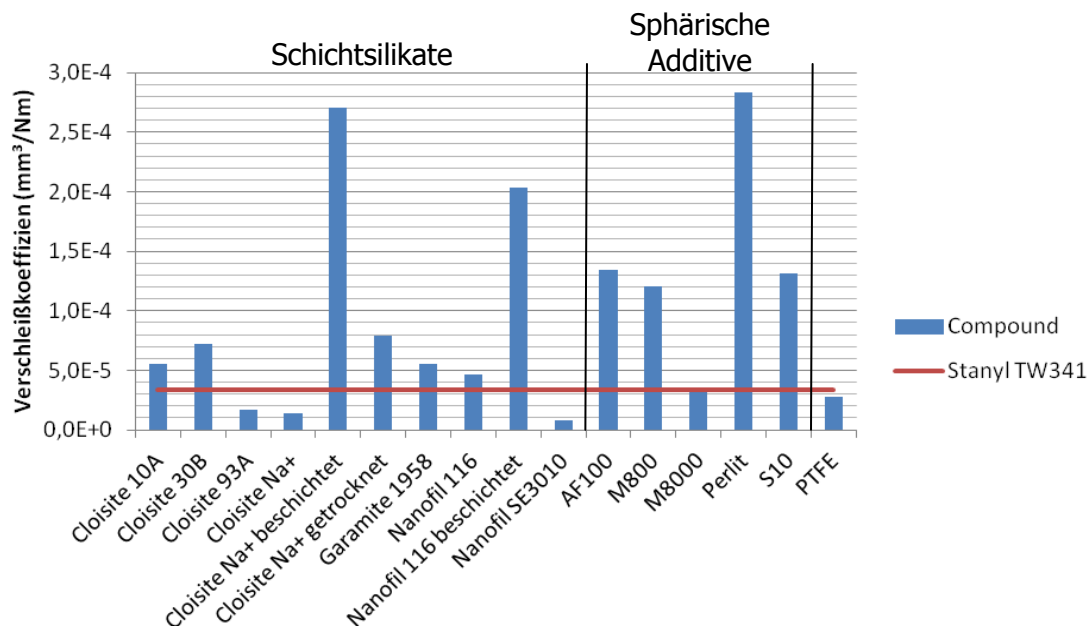


Abbildung 21: Einfluss der einzelnen Additive auf den Verschleißkoeffizienten von Stanyl TW341 unter einer Last von 13 N.

Vergleicht man Auswirkungen auf die Verschleißwerte, die die Füllstoffe im jeweiligen Polymer bei beiden Prüfkräften haben, erkennt man, dass die Tendenz für nahezu alle Füllstoffe in einer Matrix sowohl für 7 N als auch für 13 N in die gleiche Richtung gehen. Jedoch unterscheiden sich die Einflüsse einzelner Additive, wie zum Beispiel von Cloisite Na⁺, das bei PA 46 Stanyl zu einer starken Reduktion des Verschleißes führt, bei den beiden PA 66 jedoch im besten Fall im Vergleich zum ungefüllten Polymer zu einem unveränderten Verschleißfaktor führt.

Diese Unterschiede sind nicht völlig unerwartet, da die Additive in unterschiedlichen Matrixpolymeren nicht unbedingt gleich gut angebunden werden können. Auch von Uetz et al. [31] wird bestätigt, dass ein und dasselbe Additiv nicht bei allen Polymere zwangsläufig die gleichen Auswirkungen auf das tribologische Verhalten haben muss.

4.2 Reibverhalten

Nach der Betrachtung des Verschleißverhaltens der Compounds in Kapitel 4.1 widmet sich dieser Abschnitt den Reibkoeffizienten. Diese wurden mit einem Schmierfilm aus dem Motoröl Castrol 5W30 und mit den in Tabelle 12 angeführten 18 Schritten für unterschiedliche Belastungen sowie unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten ermittelt. Von der Messung der Reibwerte im trockenen Zustand, also ohne Ölschmierung, wurde abgesehen, da es in der geplanten Anwendung des Materials als Kettenführungsschiene zu keiner Reibbeanspruchung ohne Schmierfilm kommt.

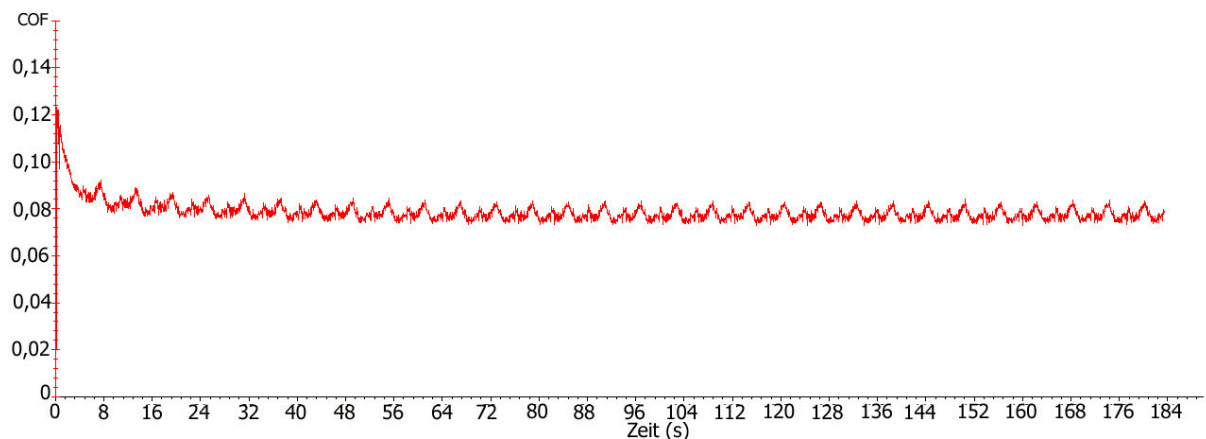


Abbildung 22: Reibkoeffizient (COF) von Ultramid A4H Ultramid mit 5 Gewichtsprozent M8000 bei einer Last von 10 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 10 Umdrehungen/Minute.

Die Werte für den Reibkoeffizienten werden automatisch von der Auswertungssoftware nach Formel 1 für jeden Messpunkt errechnet und in einem Diagramm über die Zeit aufgetragen. Abbildung 22 zeigt am Beispiel von PA 66 Ultramid A4H mit 5 Gewichtsprozent von M8000 bei 10 N und 10 Umdrehungen pro Minute die Kurve des Reibkoeffizienten, die von der Software für einen Schritt im Prüfprogramm, also eine Kombination aus Normalkraft und Geschwindigkeit, ausgegeben wird. Die Schwankungen im Verlauf dieser Kurve entstehen dadurch, dass die Prüfkörper, trotz des Schleifens und Polierens, nicht ganz eben sind. Durch die Rotation des Probekörpers kommt es zu einem sich nach jeder Umdrehung periodisch wiederholenden Muster. Die Schwankungsbreite variiert von Probe zu Probe und ändert sich auch bei den unterschiedlichen Einstellungen von Geschwindigkeit und Normalkraft.

Die Software ermöglicht es, den für die Messung relevanten Bereich, also jenen Bereich nach der Einschwingphase, der konstant bleibt, manuell auszuwählen und gibt dann den Mittelwert des Reibkoeffizienten über diesen Zeitbereich aus. Eine vollautomatische Auswertung ist mit der verwendeten Software jedoch nicht möglich. Durch diese Mittelung der Messwerte werden die Schwankungen, die durch die Unebenheiten, die im Übrigen (zwar in geringerem Maße) auch bei Reibungsmessungen zwischen Metallstiften und Metallscheiben auftreten, ausgeglichen. Die Einschwingphase (sie dauert im Beispiel der Messung, die in Abbildung 22 gezeigt wird, etwa die ersten 80 Sekunden) ist für die Ermittlung des Gleitreibungskoeffizienten nicht von Bedeutung und darf daher nicht in die Auswertung einfließen. Die erhöhten Werte des COF in den ersten Sekunden rühren daher, dass in der Anlaufphase der Rotation noch keine vollständige Gleitreibung herrscht und zudem kleinste Unebenheiten der Oberfläche der Polymerscheibe, welche mit den ersten Umdrehungen verschwinden, zu einem größeren Reibwiderstand und somit auch zu einer höheren Tangentialkraft führen.

Ein Messkurvenverlauf mit relativ geringen Schwankungen, wie jener, der in Abbildung 22, kann zwar bei den meisten Messungen erreicht werden, jedoch gibt es vereinzelt auch Proben, deren Oberflächen etwas unebener sind, was eine größere Schwankungsbreite der ermittelten Reibwerte nach sich zieht. Die in Abbildung 22 gezeigte hat eine Schwankungsbreite zwischen dem Minimum und dem Maximum des Reibungskoeffizienten von etwa 0,015. Ein Beispiel für eine unruhig verlaufende COF-Messkurve mit einer Schwankungsbreite von 0,035 ist in Abbildung 23 anhand des Compounds von Ultramid mit 5 Gew.-% Na⁺ bei der Messung bei 10 N und 10 Umdrehungen pro Minute gezeigt. Ein

4. Ergebnisse

erneutes Schleifen und Polieren solcher Proben zeigte meist keine großen Auswirkungen auf die Ergebnisse.

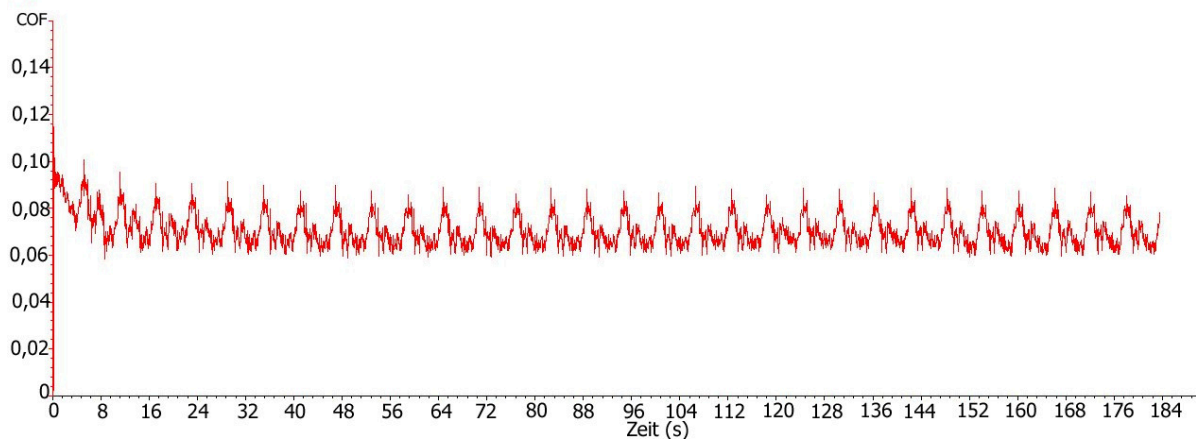


Abbildung 23: Ungefilterter Verlauf des Reibkoeffizient (COF) von Ultramid A4H mit 5% ungetrocknetem Na⁺ bei einer Last von 5 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 10 Umdrehungen/Minute.

Für Messungen mit einem solchen oder einem ähnlichen Verlauf gibt es von der Software die Möglichkeit, die Extremwerte zu filtern und somit die nicht erwünschten Spitzen außen vorzulassen. Abbildung 24 zeigt den gefilterten Verlauf (mit einer neuen Schwankungsbreite von 0,02) derselben Messung, die auch in Abbildung 23 gezeigt wird. Die Filterung bewirkt, dass die Spitzenwerte, die den Mittelwert der Messung etwas erhöhen, abgeflacht werden und so ein genauerer Wert errechnet werden kann. Die Differenzen zwischen gefilterten und ungefilterten Messungen für den Mittelwert des Reibungskoeffizienten bewegen sich in der Größenordnung von 0,002 und können je nach Kurvenverlauf etwas größer oder aber auch kleiner sein.

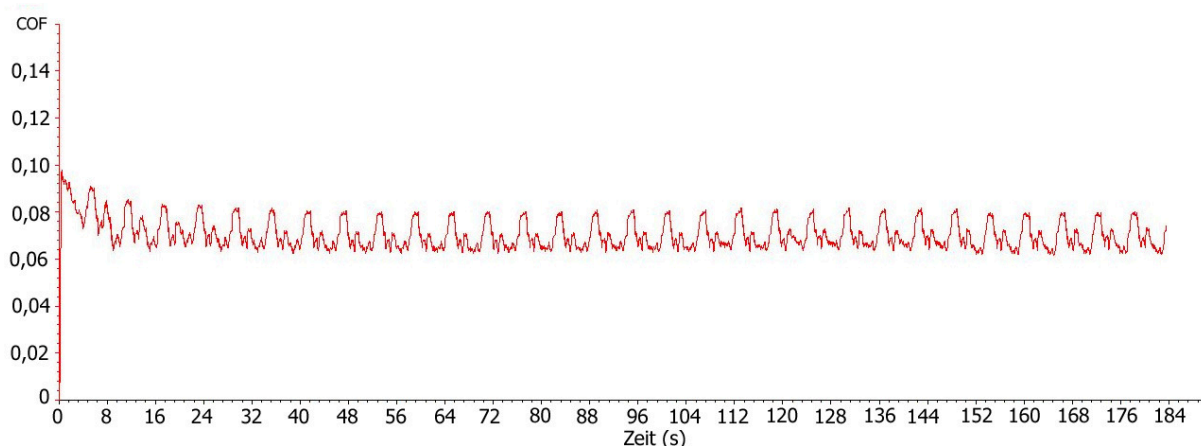


Abbildung 24: Gefilterter Verlauf des COF von Ultramid A4H mit 5% ungetrocknetem Na⁺ bei 5 N und 10 Umdrehungen/Minute.

Da der Koeffizient als Mittelwert aus allen Messpunkten des relevanten Messbereiches errechnet wird und Schwankungen sich periodisch wiederholen, ist bei der Wahl des

Zeitraums, der zur Auswertung herangezogen werden soll, darauf zu achten, vollständige Perioden auszuwählen, da es sonst zu einer einfach vermeidbaren, zusätzlichen Verfälschung des Mittelwertes kommen kann.

Die Gegenüberstellung sämtlicher Messungen des Reibkoeffizienten an den ungefüllten Matrixpolymeren in Abbildung 25 zeigt, dass alle drei Materialien sowohl bei der Variation von Rotationsgeschwindigkeit als auch bei einer Veränderung der Pressung ein ähnliches Verhalten an den Tag legen. In diesem Überblick ist erkennbar, dass der Reibwert sämtlicher Polymere bei einem Anstieg der Rotationsgeschwindigkeit deutlich abnimmt. Es wird auch auf den ersten Blick klar, dass Ultramid A4H bei sämtlichen 18 Parameterkombinationen den niedrigsten COF aufweist.

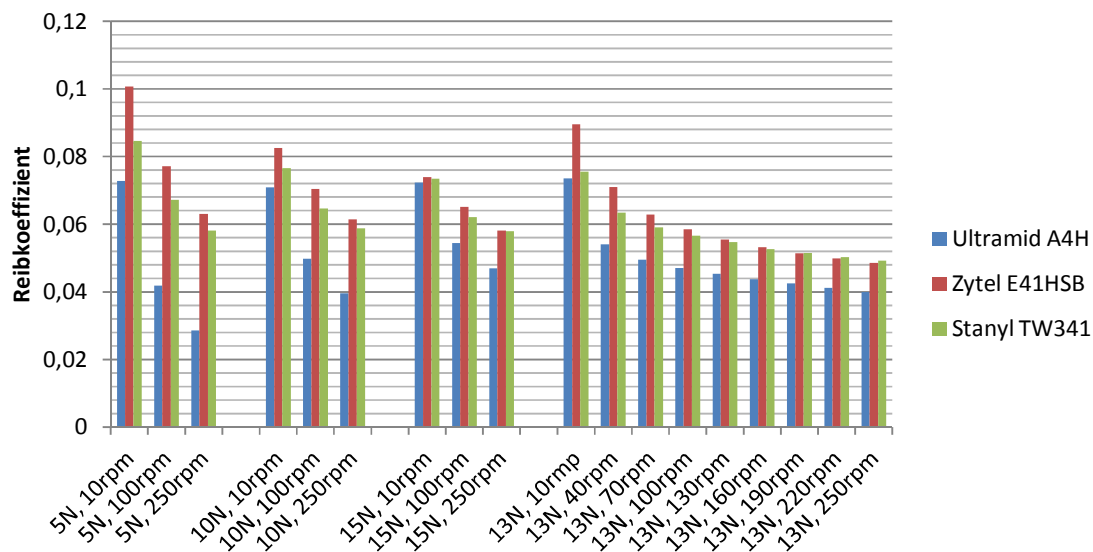


Abbildung 25: Gegenüberstellung der Reibkoeffizienten der drei ungefüllten Polyamide bei sämtlichen geprüften Einstellungen.

Die Abhängigkeit des Reibverhaltens von der Geschwindigkeit der reinen Polymere ist in Abbildung 26 anhand der Messungen bei einer Flächenpressung von 1 N/mm^2 , was bei der Geometrie des Stahlstiftes einer Druckkraft von 13 N entspricht, dargestellt.

Man erkennt wie bereits erwähnt, dass die Reibwerte von Ultramid deutlich niedriger sind als jene der anderen beiden Polymere. Weiters fällt auf, dass der Verlauf der Kurven der beiden PA 66 Typen nahezu parallel ist, während der Geschwindigkeitseinfluss auf das Polyamid 46 weit geringer ist und diese Kurve dadurch wesentlich flacher verläuft. Dadurch ist der Reibkoeffizient von Stanyl TW 341 und der von Ultramid A4H bei niedrigen Relativgeschwindigkeiten nahezu gleich, jener von Zytel E41HSB jedoch wesentlich höher. Bei 250 Umdrehungen pro Minute hingegen ist jener von Zytel sogar geringfügig niedriger als jener von dem PA 46. Das ist insofern von Bedeutung, da das Polymer in der späteren Anwendung als Kettenführung in einem Getriebe mit höheren Geschwindigkeiten belastet wird und diese somit praxisnäher sind. Aus diesem Grund werden in den meisten Abbildungen, die in weiterer Folge gezeigt werden, vorwiegend die bei 250 Umdrehungen pro Minute gemessenen Werte dargestellt.

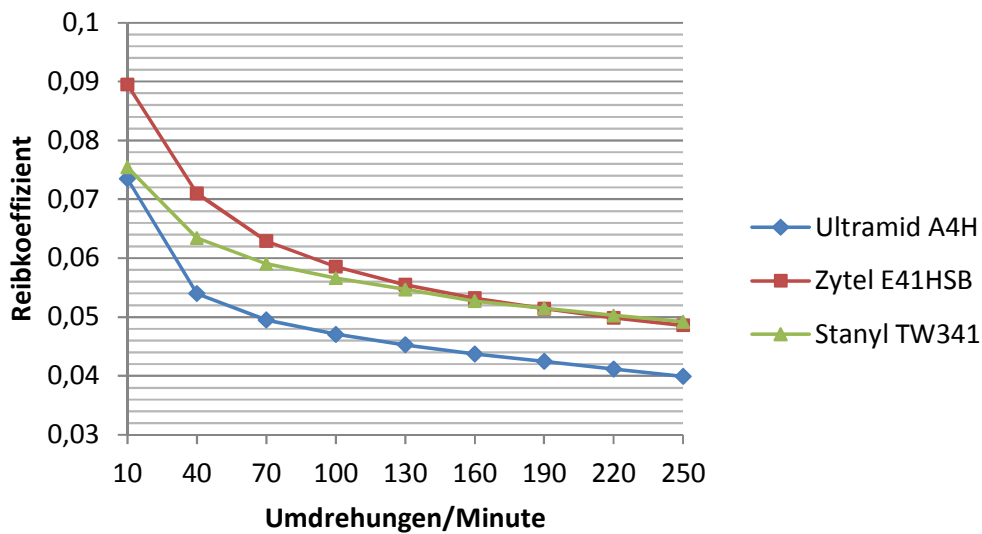


Abbildung 26: Vergleich der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibkoeffizienten der drei Matrixpolymere bei einer Anpresskraft von 13 N.

Die Abhängigkeit des COF der einzelnen Polymere von der Prüfkraft in Abbildung 27 wird, aufgrund der besseren Sichtbarkeit der Effekte, bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 100 Umdrehungen pro Minute (in den Diagrammen auch mit rpm, rounds per minute, bezeichnet) gezeigt. Die Verläufe der entsprechenden Kurven bei 250 rpm sind von den Tendenzen jedoch ähnlich.

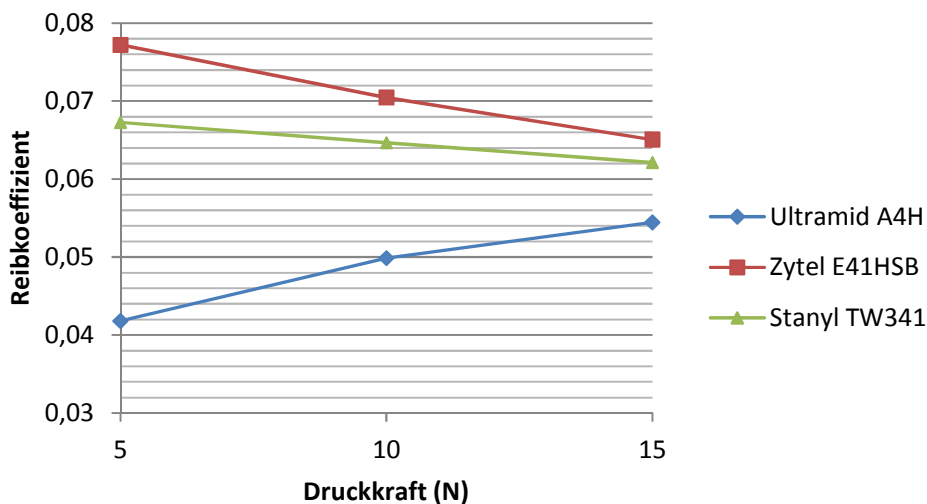


Abbildung 27: Einfluss der Druckkraft des Stahlstiftes auf die rotierende Polymerscheibe bei einer Prüfgeschwindigkeit von 100 Umdrehungen pro Minute.

Die Abbildung zeigt für Stanyl TW341 und Zytel E41HSB einen leichten Abfall der Koeffizienten, wie das auch laut Literatur [21, 31] für Polyamide in diesem Belastungsbereich zu erwarten war. Wobei Thermoplaste nach Uetz et al. [31] nur in werkstoffspezifisch begrenzten Bereichen eine Pressungsabhängigkeit der Reibzahl erwarten lassen.

Der Anstieg des Reibkoeffizienten bei Ultramid A4H ist höchstwahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass es bei diesem Material durch die Erhöhung der Anpresskraft zu einer Zunahme der wirksamen Reibfläche zwischen Polymerscheibe und Stahlstift kommt, was wiederum zu einer Abnahme der Flächenpressung führt. Dadurch stellt sich der genau gegenteilige Effekt zu den Ergebnissen der Messungen bei den beiden anderen Materialien ein. Zurückzuführen kann so ein Verhalten auf eine etwas größere Rauheitstiefe der Polymerplatten, die bei kleinen Normalkräften zu einer geringeren wirksamen Reibfläche führt, sein. Bei einer Erhöhung der Normalkraft und somit der Flächenpressungen ist bei allen polymeren Werkstoffen früher oder später wieder mit einem Anstieg der Reibkoeffizienten zu rechnen. Das ist auf eine Überlagerung dieser Kurve mit der Zunahme des COF, die durch den reibungsbedingten Temperaturanstieg zu Stande kommt, zurückzuführen. Wann, also bei welcher Belastung, ein minimaler Reibwert erreicht wird ist von vielen Faktoren, wie der Materialkombination, der Geschwindigkeit, der Oberflächenbeschaffenheit oder auch dem Einsatz von Schmiermittel abhängig und lässt sich daher nicht voraussagen.

Nach der Betrachtung der Reibkoeffizienten der ungefüllten Polymere werden in den folgenden Diagrammen die Auswirkungen der einzelnen Additive betrachtet. Zunächst zeigt Abbildung 28 die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibkoeffizienten aller Compounds von Ultramid A4H am Beispiel der Messserien, die bei 13 N über das gesamte Geschwindigkeitsspektrum durchgeführt wurden. Die entsprechenden Diagramme (Abbildung 42 und Abbildung 43) der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibwerte der Compounds der beiden anderen Polymere sind im Anhang 10.2 zu finden.

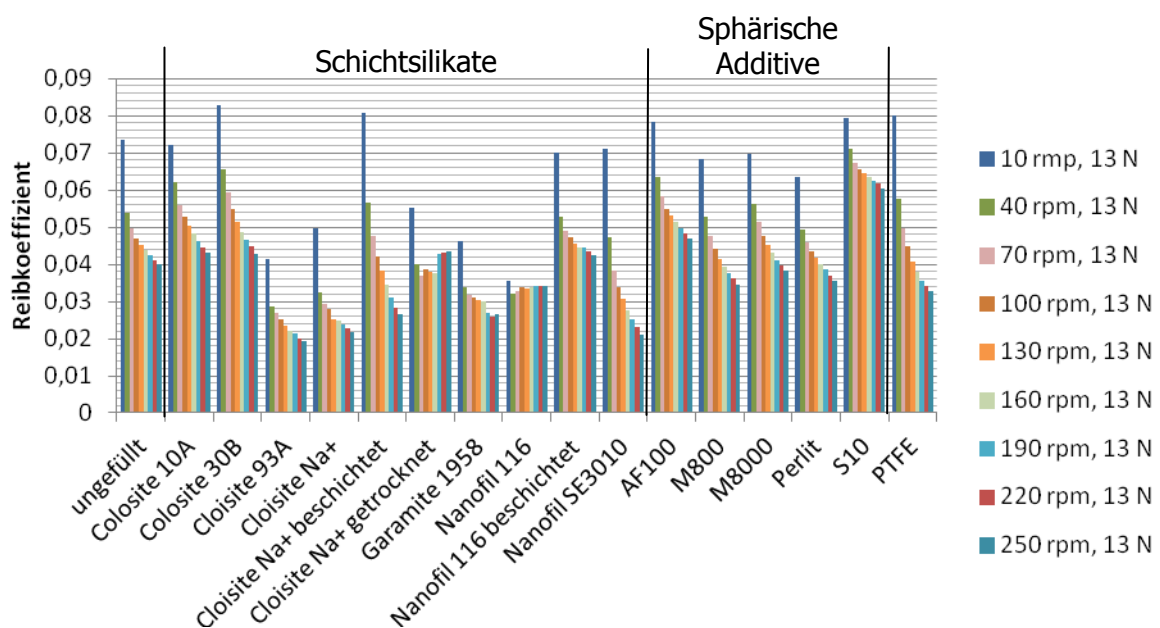


Abbildung 28: Übersicht der Reibwerte der Compounds von PA 66 Ultramid A4H unter einer Last von 13 N bei Variation der Rotationsgeschwindigkeiten der Probekörper.

Die Messungen zeigen, dass die unterschiedlichen Additive nicht nur auf das Niveau der Reibkoeffizienten einen teilweise sehr großen Einfluss haben, sondern durch manche Füllstoffe auch die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibkoeffizienten beeinflusst wird. So ist die Abnahme des Reibkoeffizienten des Compounds von Ultramid mit 5 Gew.-% PTFE oder Nanofil SE3010 bei einer Erhöhung der Geschwindigkeit wesentlich größer als die des reinen Polymers. Durch die Zugabe von Nanofil 116 ist im gemessenen Bereich keine

Geschwindigkeitsabhängigkeit des COF zu erkennen. Die sphärisch Additive beeinflussen die Geschwindigkeitsabhängigkeit offensichtlich nicht merklich. Die Tendenzen dieser Compounds scheinen mit denen des ungefüllten Polyamids gut übereinzustimmen.

Einen Vergleich der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Compounds der unterschiedlichen Matrixpolymere soll in Abbildung 29 anhand der Mischungen mit jeweils 5 Gewichtsprozent Nanofil SE3010 gezeigt werden. Dieses Additiv wurde gewählt, da es bei allen drei Polymeren zu einer Senkung des Reibkoeffizienten geführt hat und daher von besonderem Interesse ist. Als Vergleich dazu dient Abbildung 30, die die Kurven der Compounds mit Cloisite 10A darstellt, welches gegenüber den reinen Polymeren jeweils zu einem, zumindest geringen, Anstieg der Reibkoeffizienten geführt hat. Die Auswirkungen der einzelnen Additive auf die Polymere sind in Abbildung 33 bis Abbildung 35 gut zu erkennen.

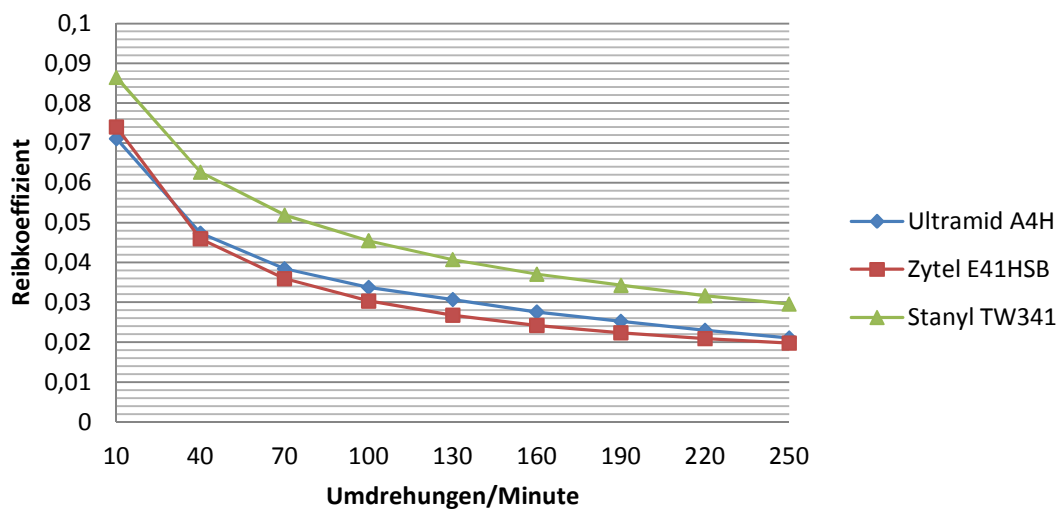


Abbildung 29: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibkoeffizienten der Compounds mit 5 Gewichtsprozent Nanofil SE3010 unter einer Normalkraft von 13 N.

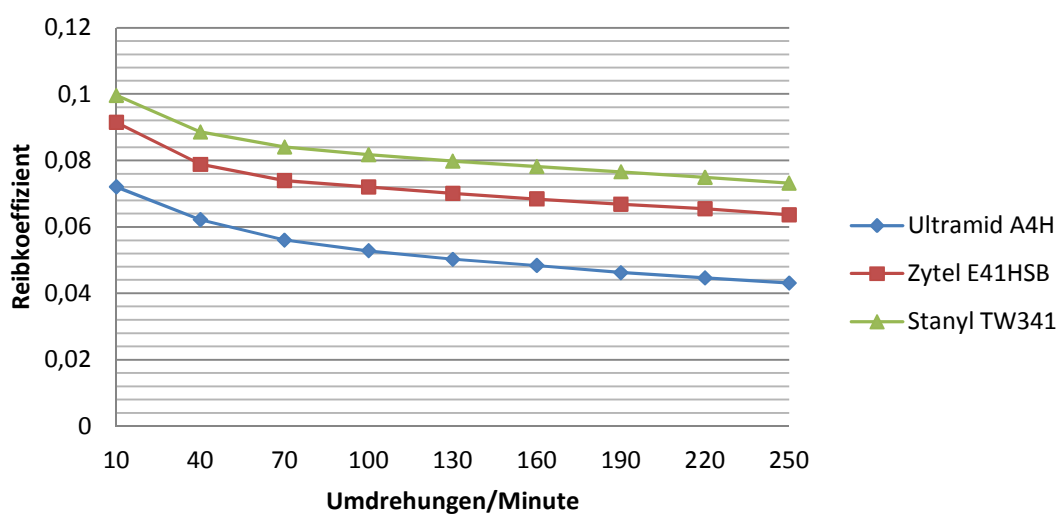


Abbildung 30: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibkoeffizienten der Compounds mit 5 Gewichtsprozent Cloisite 10A unter einer Normalkraft von 13 N.

Bei dem Vergleich dieser beiden Darstellungen wird deutlich, dass sich die beiden unterschiedlichen Zusätze nicht nur auf die Absolutwerte der Reibkoeffizienten auswirken, sondern auch, wie auch schon bei der Übersicht in Abbildung 28 erwähnt, die Geschwindigkeitsabhängigkeit stark verändern. Was zusätzlich auffällt ist, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeit in diesen Compounds offensichtlich hauptsächlich von den Zusätzen beeinflusst wird und das Matrixpolymer nur geringe Auswirkungen darauf zu haben scheint. Waren die Kurven der ungefüllten PA 66 Typen in Abbildung 26 noch wesentlich steiler als jene des PA 46, sind hier die Verläufe des Reibkoeffizienten der jeweiligen Compounds mit unterschiedlichen Matrixpolymeren annähernd parallel. Ein Unterschied ist jedoch bei dem Einfluss der Füllstoffe auf das Niveau der Kurven zu erkennen. Während die Reibkoeffizienten der Polyamid 66 Compounds mit Nanofil SE3010 bei allen Geschwindigkeiten nahezu gleich sind, sind jene von Zytel mit Cloisite 10A deutlich höher als die entsprechenden mit Ultramid als Matrix.

Der Einfluss der Normalkraft auf die Reibwerte ist für dieselben Compounds, an denen auch die Geschwindigkeitsabhängigkeit diskutiert wurde, in Abbildung 31 und Abbildung 32 gezeigt. Dazu werden wie auch zuvor bei der Gegenüberstellung der ungefüllten Polyamide die Messungen bei 100 Umdrehungen pro Minute verglichen.

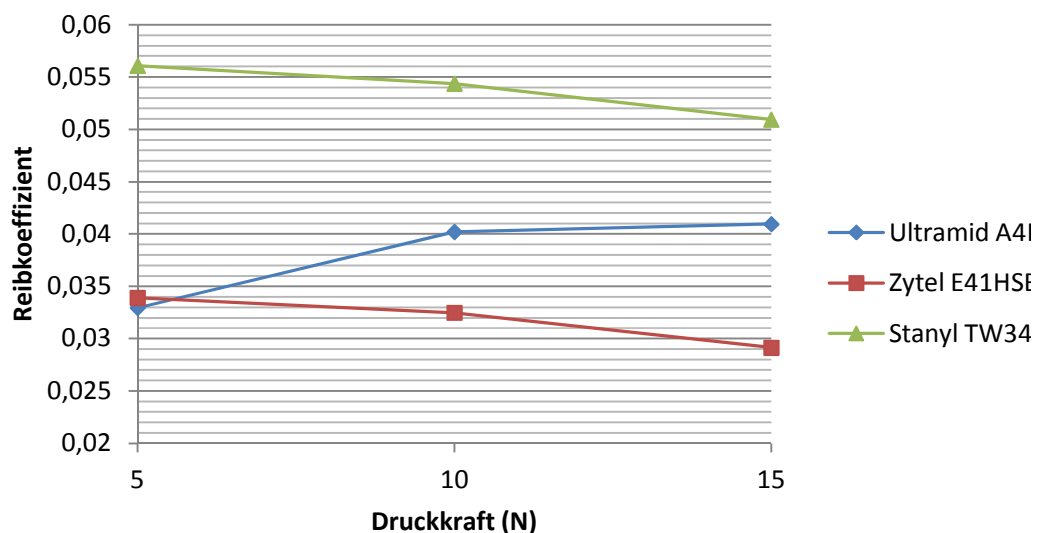


Abbildung 31: Abhängigkeit der Reibkoeffizienten der Compounds mit 5% Nanofil SE3010 von der Normalkraft bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 100 Umdrehungen pro Minute.

Hier zeigt sich für die Compounds von Zytel und Stanyl mit Nanofil SE3010, wie auch zuvor für die ungefüllten Polymere, das erwartete Absinken der Reibkoeffizienten mit der Zunahme der Normalkraft. Auch der Anstieg der Reibung mit Zunahme der Last bei Ultramid ist, ähnlich dem reinen Polymer, auch bei dem Compound mit Nanofil SE3010 zu erkennen. Dieser ist jedoch etwas geringer und fällt bei der Erhöhung der Kraft von 10 auf 15 N mit einer Erhöhung um etwa 0,01 nur minimal aus. Daraus lässt sich schließen, dass es über 10 N zu keinem großen Anstieg der wirksamen Reibfläche mehr kommt.

Die in Abbildung 32 gezeigten Abhängigkeiten der Reibzahlen der Compounds mit Cloisite 10A von der Prüfkraft zeigt hingegen ein etwas anderes Bild für die Mischung mit Ultramid. Durch die Zugabe dieses Additivs kann, wie das auch bei den Compounds der anderen beiden Polymeren der Fall ist, das in der Literatur [21, 31] beschriebene leichte Absinken der Reibung mit Zunahme der Kraft beobachtet werden.

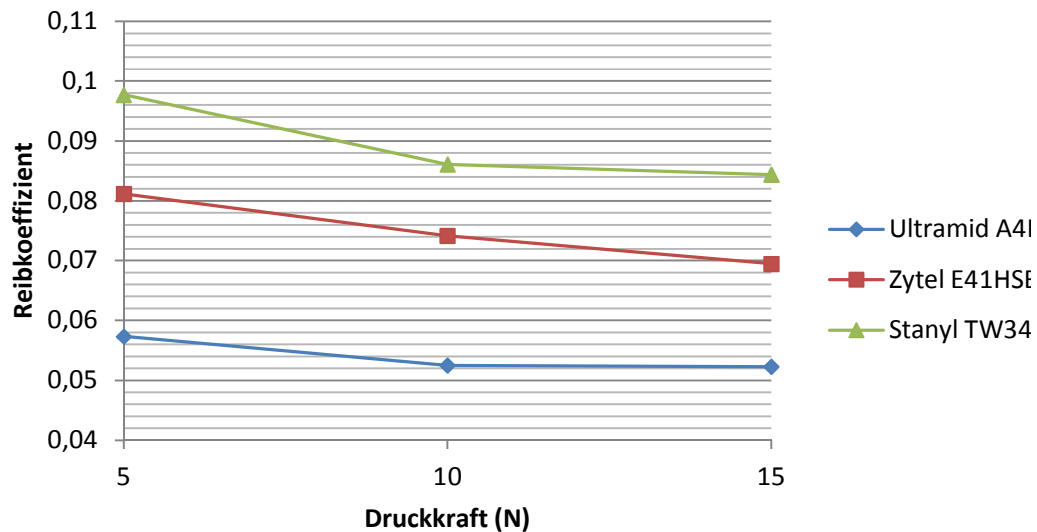


Abbildung 32: Abhängigkeit der Reibkoeffizienten der Compounds mit 5% Cloisite 10A von der Normalkraft bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 100 Umdrehungen pro Minute.

Dieses Verhalten kann entweder auf eine geringere Rauheitstiefe der Probekörperoberfläche oder auf einen, durch das Additiv bewirkten Anstieg der Härte beziehungsweise der Steifigkeit des Compounds, was auf eine stützenden Wirkung dieses Füllstoffs schließen lässt, zurückgeführt werden. Durch einen Anstieg der Härte oder Steifigkeit ist das Polymer weniger deformierbar und dadurch verändert sich die an der Reibung beteiligte Oberfläche mit einem Anstieg der Normalkraft nicht.

In den nachfolgenden Diagrammen ist die Belastungsabhängigkeit der Reibkoeffizienten aller Compounds von Ultramid A4H (Abbildung 33), Zytel E41HSB (Abbildung 34) und Stanyl TW341 (Abbildung 35) für eine Rotationsgeschwindigkeit von 250 rpm gezeigt. Diese Geschwindigkeit wurde zur Gegenüberstellung der einzelnen Compounds gewählt, da diese aufgrund der Belastungen in einer Kettenführung, wo eher hohe Geschwindigkeiten auftreten, realitätsnäher und somit relevanter sind, als die langsam gemessenen Reibkoeffizienten.

Bei den dargestellten Ergebnissen von Ultramid und seinen Compounds ist zu erkennen, dass es mit einem Anstieg der Anpresskraft bei nahezu allen Mischungen auch zu einem Anstieg des Reibkoeffizienten kommt. Das deckt sich auch mit der beim ungefüllten Material beobachteten Trend. Bei dieser Geschwindigkeit bilden nur die Compounds mit Cloisite 10A, das bei der Messung mit 5 N einen besonders hohen Reibungskoeffizienten aufweist, Cloisite 30B, bei dem eine Veränderung des Drucks keine besonders großen Auswirkungen zu haben scheint und mit dem sphärischen Füllstoff S10, der als einziger ein Absinken der Reibung bei beiden Druckerhöhungen zur Folge hat, eine Ausnahme. Desweiteren zeigt sich, dass eine Zugabe von 5 Gew.-% PTFE den COF nahezu unabhängig von der Normalkraft macht.

Bei den Compounds mit Zytel, lassen sich keine eindeutigen Trends durch die Additive erkennen. Vor allem bei den Schichtsilikaten sind die Tendenzen äußerst unterschiedlich: Während zum Beispiel Cloisite 10A oder Nanofil SE3010 zu einer Abnahme der Reibzahl führt, was auch beim reinen Polymer zu beobachten ist, bewirkt zum Beispiel Cloisite 93A das genaue Gegenteil. Bei den Compounds mit Garamite und Nanofil 116 ist hingegen keine Änderung der Reibeigenschaften bei einer Variation der Prüfkraft zu erkennen. Die

4. Ergebnisse

Compounds mit den sphärischen Zusätzen haben mit erhöhter Flächenpressung einen Anstieg des Reibkoeffizienten zur Folge, PTFE führt hingegen zu einer geringen Abnahme.

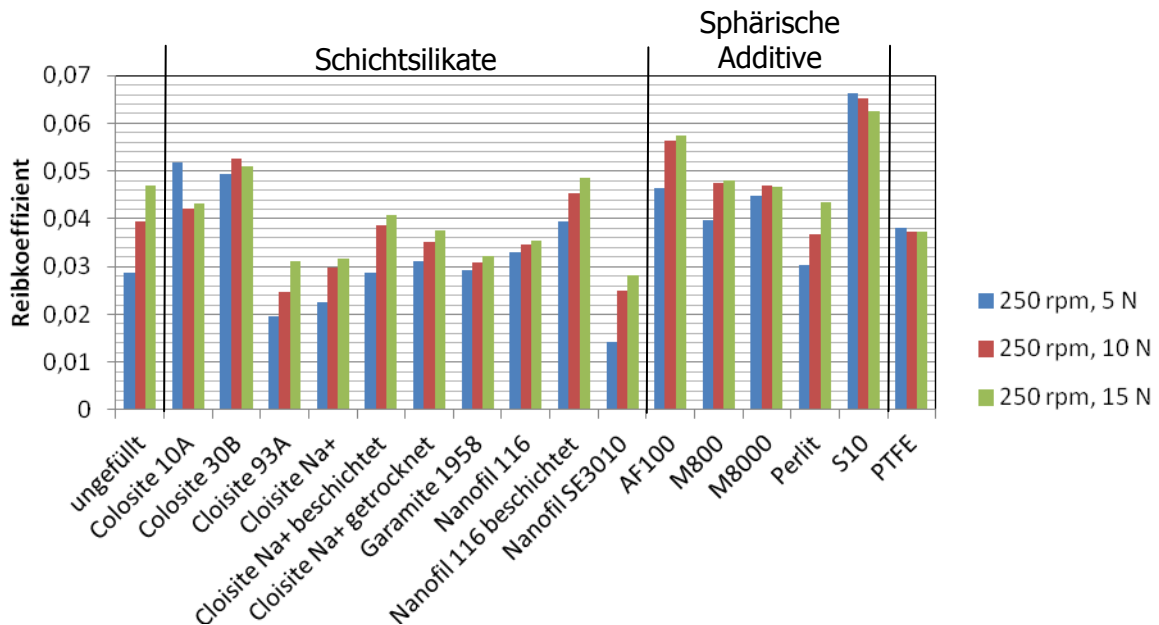


Abbildung 33: Auswirkungen der Variation der Normalkraft auf die Reibkoeffizienten der Compounds von Ultramid A4H bei 250 Umdrehungen pro Minute.

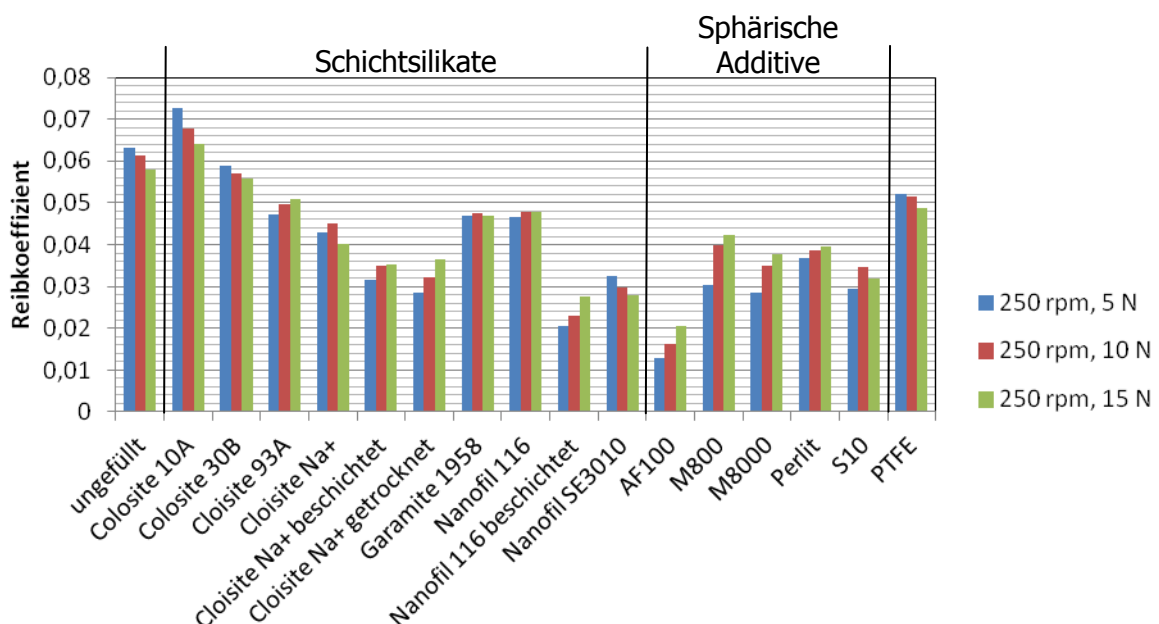


Abbildung 34: Auswirkungen der Variation der Normalkraft auf die Reibkoeffizienten der Compounds von Zytel E41 HSB bei 250 Umdrehungen pro Minute.

Das reine Stanyl TW341 und seine Compounds mit Schichtsilikaten zeigen generell eher keine allzu große Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Prüfkraft. Lediglich bei Cloisite Na⁺ kommt es zu einer Verringerung und bei Nanofil 116 zu einem Anstieg des COF

als Folge der Erhöhung der Belastung. Die sphärischen Zusätze, mit der Ausnahme von AF 100, führen so wie PTFE bei größeren Normalkräften zu geringeren Reibzahlen.

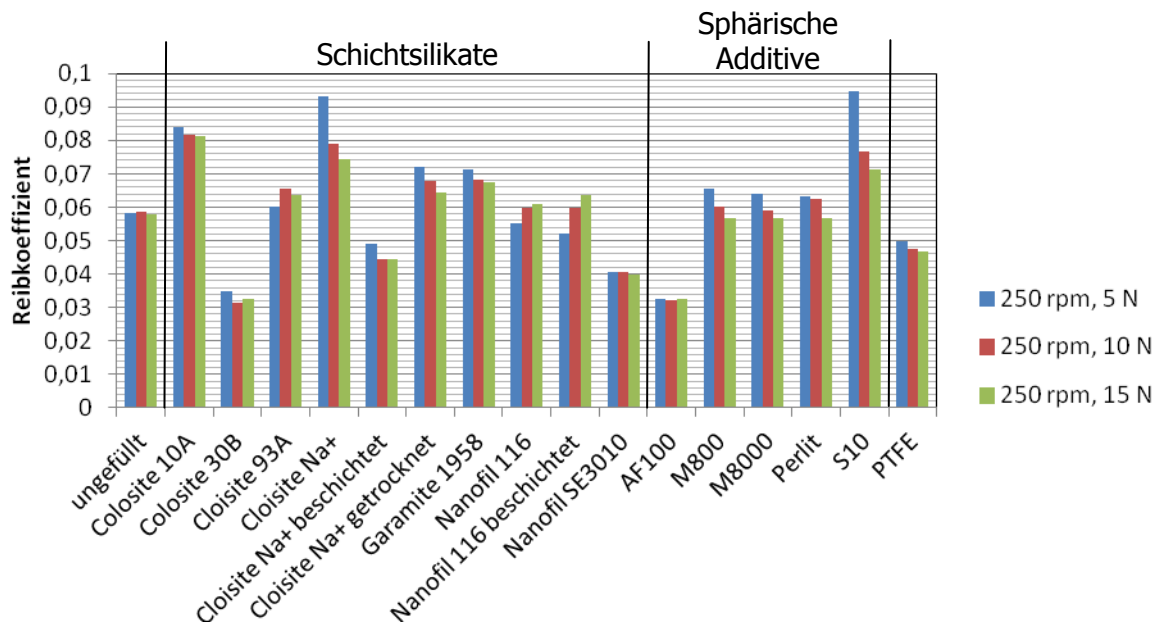


Abbildung 35: Auswirkungen der Variation der Normalkraft auf die Reibkoeffizienten der Compounds von Stanyl TW341 bei 250 Umdrehungen pro Minute.

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Additive auf die einzelnen Polymere deutlicher sichtbar zu machen, sind in Abbildung 36 bis Abbildung 38 die Reibkoeffizienten der Compounds mit jenen der jeweils ungefüllten Polyamide bei einer Normalkraft von 13 N und einer Geschwindigkeit von 250 Umdrehungen pro Minute einander vergleichend gegenübergestellt.

Als Ergänzung zu den hier abgebildeten Reibkoeffizienten der einzelnen Compounds bei 13 N und 250 Umdrehungen pro Minute sind in Abbildung 44 bis Abbildung 46 im Anhang 10.2 die äquivalenten Diagramme für 130 Umdrehungen pro Minute.

Wenn man die Einflüsse der Additive auf die Reibkoeffizienten der drei Polymere in Abbildung 33 bis Abbildung 35 für 250 Umdrehungen pro Minute bei 5, 10 und 15 N sowie in Abbildung 36 bis Abbildung 38 bei 13 N betrachtet, fällt auf, dass die einzelnen Polyamide, ähnlich wie das auch bei dem Verschleiß der Fall ist, unterschiedlich auf die Füllstoffe reagieren.

Die Reibeigenschaften von Ultramid A4H, das selbst ungefüllt einen vergleichsweise niedrigen Reibwert aufweist, lassen sich durch das Hinzufügen von einigen Additiven noch weiter verbessern. Einige Schichtsilikate, allen voran Cloisite 93A und Nanofil SE3010, das bei sämtlichen Polymeren zu jenen Füllstoffen mit den positivsten Einflüssen zählt, können eine starke Absenkung der Reibung herbeiführen. Bei den dargestellten 13 N und 250 Umdrehungen pro Minute lassen sich bis zu 50 % niedrigere Reibkoeffizienten als bei den beim ungefüllten Polymer erzielen. Die Compounds mit einigen anderen Schichtsilikaten zeigen Verbesserungen in der Größenordnung von etwa 30 % oder etwas weniger. Vier haben einen geringen Anstieg der Reibkoeffizienten zwischen 5 und 10 % zur Folge. Von den sphärischen Additiven haben nur drei einen verhältnismäßig geringen positiven Einfluss mit Verbesserungen zwischen etwa 5 und 15 %. Die Compounds mit 5 Gew.-% AF100 und S10 führen zu einem Anstieg des Reibwertes um rund 15 bzw. 50 %.

4. Ergebnisse

Auch das Teflon hat mit rund 20 % geringeren Reibwerten im Vergleich zu den besten Schichtsilikaten einen geringeren Einfluss.

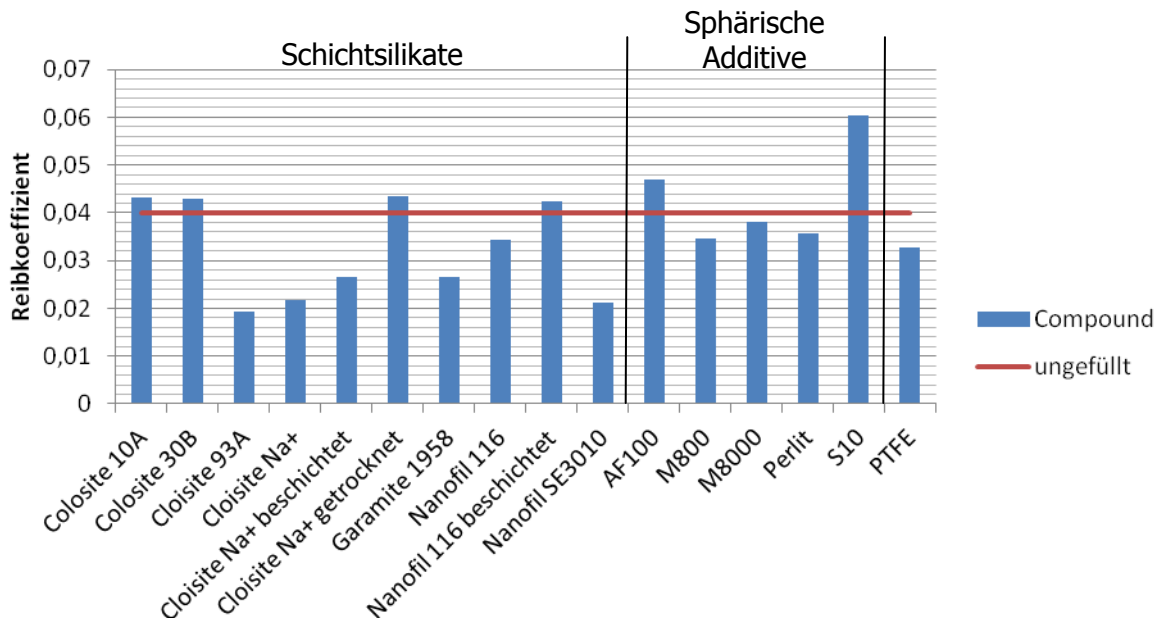


Abbildung 36: Vergleich der Reibkoeffizienten der Compounds von PA 66 Ultramid A4H mit dem Reibkoeffizienten des ungefüllten Polymers bei 13 N Normalkraft und 250 Umdrehungen pro Minute.

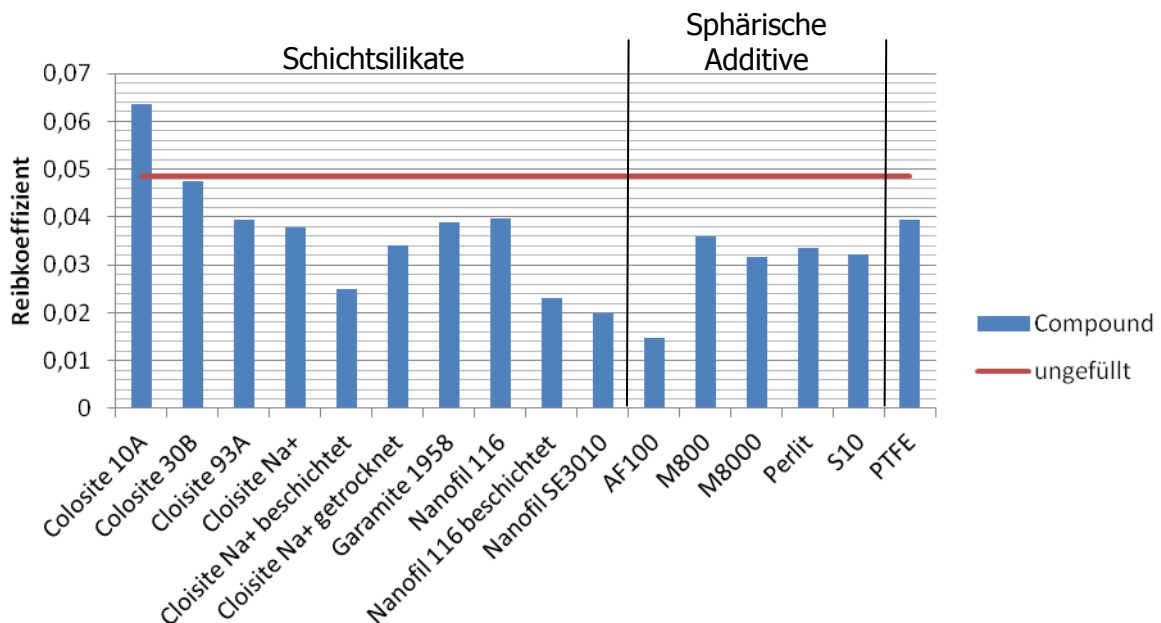


Abbildung 37: Vergleich der Reibkoeffizienten der Compounds von PA 66 Zytel E41HSB mit dem Reibkoeffizienten des ungefüllten Polymers bei 13 N Normalkraft und 250 Umdrehungen pro Minute.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Additive auf die Reibwerte der Compounds von Zytel E41HSB sind jenen der entsprechenden Ultramid Compounds sehr ähnlich. Auch hier bewirkt die Zugabe fast aller Schichtsilikate, mit den Ausnahmen von Cloisite 10A und 30B, eine Verbesserung des COF. Auch die Größenordnung der Verbesserungen ist vergleichbar und bewegt sich zwischen rund 20 % bei Cloisite 93A oder Garamite 1958 und 60 % bei Nanofil SE3010. Der markanteste Unterschied zwischen den Compounds der beiden PA 66 Typen ist, dass das Reibverhalten der mit Zytel hergestellten Probekörper auch durch die Zugabe von kugelförmigen Partikeln deutlich verbessert werden kann. Besonders auffällig sind dabei die Compounds mit AF100 und S10, welche bei Ultramid jeweils einen deutlich höheren Reibkoeffizienten aufweisen, als das reine Polymer. Bei Zytel hingegen ist die Mischung mit AF100 sogar jene, die bei allen drei Belastungseinstellungen die niedrigsten Werte erreicht. Bei den dargestellten Einstellungen wird mit mineralischen Füllstoffen mit sphärischen Partikeln eine Verbesserung von rund 30 %, mit AF100 sogar um 70 % erreicht. Das Compoundieren mit PTFE führt, so wie auch bei Ultramid zu einem 20 % niedrigeren Reibkoeffizienten als beim reinen Polyamid.

Bei Stanyl TW341, dem Polyamid 46, macht sich bei nahezu allen Mischungen kein so markanter Unterschied der Reibkoeffizienten zwischen dem ungefüllten Polymer und den Compounds bemerkbar, wie das bei den PA 66 Typen der Fall war. Lediglich durch das Beigeben von Cloisite 30B (-40 %), welches bei den PA 66 Typen keine Verbesserung des Reibwerts mit sich bringt, vom beschichteten Cloisite Na⁺ (-35 %), sowie von Nanofil SE3010 (-40 %) und von AF100 (-45 %) lässt sich ein Absinken des Reibwerts erreichen. Die meisten Compounds weisen einen rund 20 % höheren COF auf als das ungefüllte Polyamid. Auch der positive Einfluss von PTFE fällt mit 10 % deutlich geringer, als bei den beiden anderen Matrixpolymeren aus.

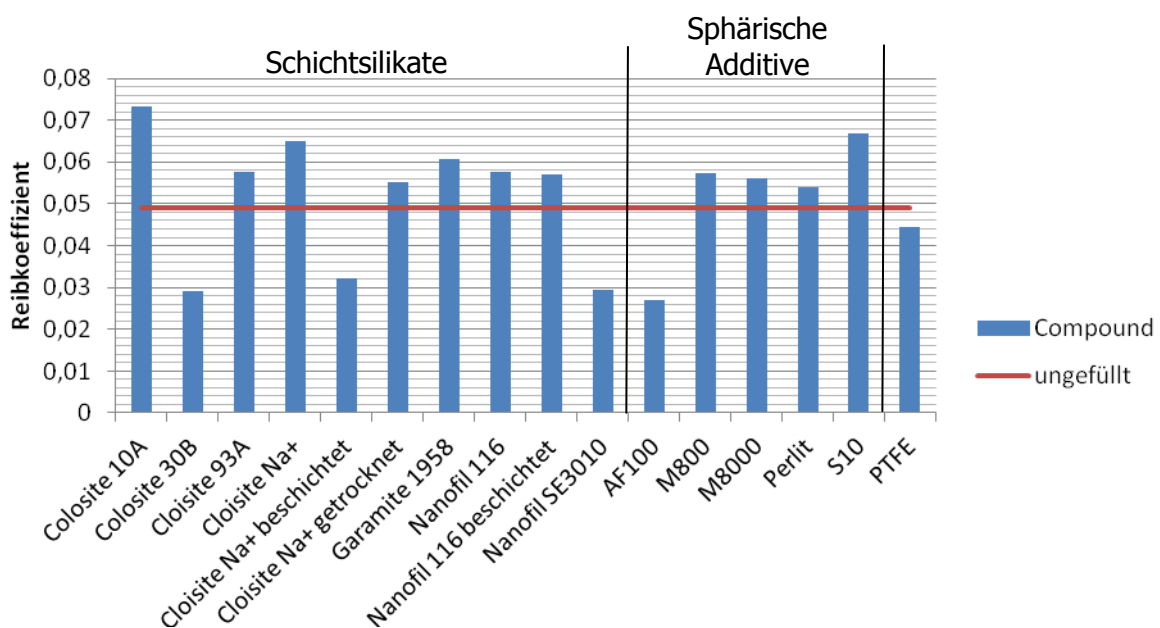


Abbildung 38: Vergleich der Reibkoeffizienten der Compounds von PA 46 Stanyl TW341 mit dem Reibkoeffizienten des ungefüllten Polymers bei 13 N Normalkraft und 250 Umdrehungen pro Minute.

Allgemein lässt sich, vor allem für die beiden PA 66, aber teilweise auch für Stanyl, ein positiver Einfluss durch das Beimengen von Schichtsilikaten erkennen. Über die Auswirkungen der Beschichtungen von Cloisite Na⁺ und Nanofil 116 lassen sich anhand der

gemessenen Ergebnisse keine eindeutigen Rückschlüsse ziehen. Während die Beschichtung bei beiden Additiven in Kombination mit Ultramid zu jeweils höheren Reibkoeffizienten als bei den gemessenen unbeschichteten Additiven führen, ist bei Zytel das genaue Gegenteil der Fall. Bei Stanyl hingegen bewirkt die Beschichtung von Cloisite Na⁺ sogar eine markante Senkung des Reibwertes, bei Nanofil 116 hingegen verändert sich mit der Beschichtung praktisch nichts an den Reibeigenschaften des Compounds. Ähnliches gilt auch für das Vortrocknen des Cloisite Na⁺: Die mit vorgetrocknetem Additiv hergestellten Compounds von Zytel und Stanyl erzielten um etwa 10% niedrigere Werte als jene, bei denen vor der Verarbeitung keine Vortrocknung stattgefunden hat. Bei den Compounds mit Ultramid sind die Werte hingegen wesentlich höher. Bei 250 rpm und 13 N kommt es fast zu einer Verdopplung des Reibkoeffizienten. Es macht also den Anschein, als ob ein Vortrocknen der Additive keinen positiven Einfluss auf den Reibkoeffizienten hat und daher darauf verzichtet werden kann.

Abschließend sind in Abbildung 39 noch einige Compounds, bei denen durch die zugegebenen Additive besonders auffällige Änderungen des Reibkoeffizienten zu beobachten sind, dargestellt. Diese Auffälligkeiten können sich entweder durch eine besonders positive Auswirkung des jeweiligen Zusatzstoffes auf den Reibkoeffizienten oder aber auch durch große Unterschiede der Auswirkungen auf die einzelnen Matrixpolymere bemerkbar machen. Diese Abbildung 39 soll sowohl auf das unterschiedliche Ausgangsniveau des Reibkoeffizienten bei den ungefüllten Polyamiden als auch auf die unterschiedlichen Auswirkungen, die die einzelnen Additive auf die Reibwerte der Polymere haben können, hinweisen. Im Anhang 10.2 sind die Reibkoeffizienten derselben Compounds für 10 N Normalkraft und 100 Umdrehungen pro Minute in Abbildung 47 und für 13 N bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 130 rpm in Abbildung 48 dargestellt. Diese Abbildungen zeigen ganz deutlich, dass sich diese Trends unabhängig von Normalkraft und Prüfgeschwindigkeit für all diese Compounds reproduzieren lassen.

Bei den gezeigten Reibwerten von Cloisite 30B und 93A zeigt sich, dass die Matrixpolymere sehr unterschiedlich auf diese beiden Schichtsilikate reagieren. Während bei den beiden PA 66 Typen der Reibwert leicht ansteigt beziehungsweise nur geringfügig sinkt, bewirkt dieses Additiv hingegen in Polyamid 46 einen wesentlich niedrigeren COF. Bei Cloisite 93A ist ein gegenteiliger Trend zu erkennen. Die Compounds mit Nanofil SE3010 haben durchwegs deutlich geringere Reibungskoeffizienten, als die ungefüllten Polyamide und auch der Einfluss von PTFE ist, wie bereits erwähnt auf alle Polymere positiv, wenn auch nicht so groß wie bei einigen Schichtsilikaten. S10 senkt nur den Reibwert von Zytel, bei Ultramid und Stanyl führt dieses Additiv zu einem deutlichen Anstieg. Die Auswirkungen von AF100 sind bei Zytel und Stanyl besonders positiv. Bei 250 Umdrehungen pro Minute und 13 N erreicht kein anderer Füllstoff niedrigere Werte (siehe Abbildung 37 und Abbildung 38). Bei Ultramid zeigt AF100 jedoch keine positiven Effekte.

Zu den Resultaten von AF100 muss erwähnt werden, dass die Verarbeitung dieses Additivs bei der Compoundproduktion etwas problematisch war. Durch die hohe Schüttgutdichte dieses Materials konnte mit der bei den anderen Materialien eingesetzten Dosierwaage keine gleichbleibende Förderleistung erreicht werden. Dieses Problem konnte jedoch mit Hilfe einer speziellen Masterbatchwaage, mit der eine konstante Dosierung von 5 Gewichtsprozent realisiert werden konnte, gelöst werden. Die großen Unterschiede in den Resultaten der Reibwertmessung dieser Compounds in den unterschiedlichen Matrixpolymeren lassen jedoch darauf schließen, dass die Füllstoffverteilung in den Mischungen eventuell nicht ganz homogen sein dürfte. Solche Inhomogenitäten in den Compounds können natürlich auch einen großen Einfluss auf die Probekörper haben, da sich dadurch nicht nur die Eigenschaften des Werkstoffes selbst verändern, sondern auch die Oberfläche stark beeinflusst werden kann. Beides hat einen großen Einfluss auf den Reibwert eines

Compounds. Die Messergebnisse dieser Compounds sind daher mit etwas Vorsicht zu betrachten und die Compounds bzw. deren Probekörper sollten für weiterführende Versuche gegebenenfalls noch genauer untersucht werden.

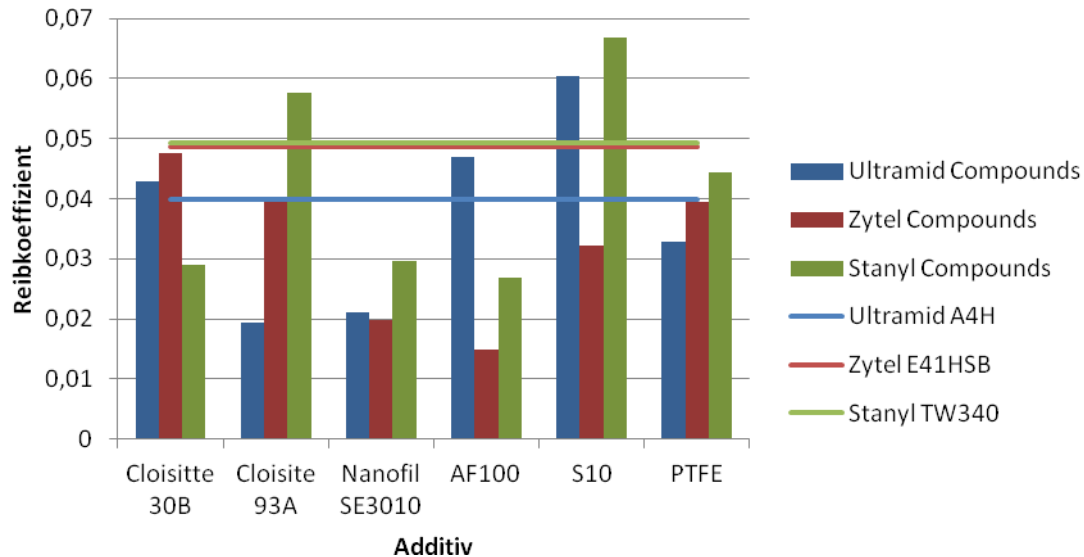


Abbildung 39: Markante Veränderungen des COF durch Additive zu den drei Polyamiden bei 13 N Normalkraft und 250 Umdrehungen pro Minute.

4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Hier sollen die in 4.1 und 4.2 gesammelten und ausgewerteten Ergebnisse für die Beeinflussung der tribologischen Eigenschaften der Polyamide durch die unterschiedlichen Additive miteinander in Zusammenhang gebracht werden. Dadurch soll abschließend ein Überblick über die Eignung der eingesetzten Zusatzstoffe zur Verbesserung der Reib- und Verschleißigenschaften bei den ausgewählten Matrixpolymeren gegeben werden.

Sämtliche Messungen, unabhängig von Normalkraft und Belastungsgeschwindigkeit, zeigen, dass die Reibeigenschaften von PA 66, allen voran jene von Ultramid A4H, jenen des PA 46 überlegen sind. Dasselbe gilt auch für die Verschleißkoeffizienten.

Eine Verbesserung der Verschleißigenschaften kann vorwiegend durch das Beimengen von Schichtsilikaten erreicht werden, was wiederum auf die bessere Anknüpfung der einzelnen Partikel mit einer großen spezifischen Oberfläche an die Matrix zurückzuführen ist. Die mineralischen Additive mit sphärischen Partikeln können kaum und wenn dann nur geringe Verbesserungen erwirken. Die vereinzelt Verbesserungen sind wahrscheinlich auf einen Anstieg der Härte des Compounds, die durch eine stützende Wirkung der Additivpartikel bewirkt werden kann, sowie einer Hinderung der Fließneigung des Polymers bei Temperaturanstieg, zu dem es durch die Reibwärme kommt, zurückzuführen. Eine Parallele ist bei der Betrachtung des Einflusses von Polytetrafluorethylen zu erkennen, denn dieses wirkt sich vor allem bei einer höheren Flächenpressung positiv auf das Verschleißverhalten aus. Aus den Messungen geht hervor, dass sich die ohnehin schon geringeren Verschleißwerte von den beiden Polyamid 66 Typen durch die Zugabe von Schichtsilikaten noch merklich, auf teilweise sogar weniger als die Hälfte des Ausgangswerts, verbessern

lassen. Auf den Verschleißkoeffizient von Polyamid 46 haben die meisten Additive hingegen einen negativen Einfluss.

Ähnliches ist auch für den Einfluss der Additive auf die Reibkoeffizienten der Polymere zu erkennen: Jene von Stanyl TW341, dem Polyamid 46, sind von Grund auf höher als jene von Ultramid A4H und lassen sich durch die verwendeten Zusatzstoffe nur vereinzelt positiv beeinflussen. Am Beispiel der Messungen bei 250 Umdrehungen pro Minute bei einer Prüfkraft von 13 N zeigt sich, dass nur durch Cloisite 30B ($f=0,029$), beschichtetes Cloisite Na⁺ ($f=0,032$) Nanofil SE3010 ($f=0,030$) und AF100 ($f=0,027$) ein geringerer Reibwert als bei dem ungefüllten Ultramid ($f=0,040$) erreicht werden kann. Alle anderen Additive führen zu keinen wesentlichen Verbesserungen des PA 46.

Bei den beiden PA 66 Typen kann die Reibungszahl durch die Zusatzstoffe jeweils noch weiter abgesenkt werden, wobei die Additive auf Zytel einen stärkeren Einfluss zeigen. Wenn man die absoluten Zahlen betrachtet, zeigt sich, dass mit Schichtsilikaten (vor allem mit Cloisite 93A und Cloisite Na⁺ sowie mit Nanofil 3010) gefülltes Ultramid die geringsten Reibungswerte aufweist.

Somit lässt sich sagen, dass sich die tribologischen Eigenschaften von Polyamid 66 sowohl in Bezug auf die Reibung als auch auf den Verschleiß durch Schichtsilikate verbessern lassen. Die detaillierten Auswirkungen der einzelnen Additive und deren Beschichtung können sich von Polymer zu Polymer leicht unterscheiden. Das Additiv, das sich sowohl auf das Verschleißverhalten als auch auf die Reibkoeffizienten aller Matrixpolymere deutlich positiv auswirkt ist das Schichtsilikat Nanofil SE3010. Dieses gehört bei allen drei Polymeren zu den Additiven, die den größten Einfluss auf die tribologischen Eigenschaften haben.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit ist ein Teil eines Projektes mit dem Ziel die tribologischen Eigenschaften von Kettenführungsschienen in einem Getriebe zu verbessern. Dazu wurde eine Auswahl an drei geeigneten Polymeren, zwei PA 66 Typen und einem PA 46, getroffen, aus welchen dann Compounds mit unterschiedlichen Füllstoffen hergestellt wurden. Die Additive, die den Polymeren mit jeweils 5 Gewichtsprozent beigemischt wurden, sind zum einen Schichtsilikate und zum anderen sphärische Füllstoffe. Des Weiteren wurden auch Compounds mit der gleichen Menge PTFE, das für seine guten tribologischen Eigenschaften bekannt ist, hergestellt. Aus diesen Compounds und den ungefüllten Polymeren wurden Probekörper gepresst.

Die Analyse der tribologischen Eigenschaften wurde auf einem Mikrotribometer mittels der Pin-on-Disc Methode durchgeführt. Die Verschleißkoeffizienten wurden bei zwei unterschiedlichen Normalkräften (7 und 13 N) und ohne Schmiermittel gemessen. Bei der Ermittlung der Reibkoeffizienten wurde mit einem Prüfprogramm aus 18 unterschiedlichen Kombinationen aus Normalkraft und Prüfgeschwindigkeit gearbeitet. So konnten die Einflüsse der unterschiedlichen Belastungen auf die Reibzahl deutlich gemacht werden. Diese Messungen wurden mit einer Schmierung mit einem handelsüblichen Motoröl durchgeführt.

Aus den ermittelten Ergebnissen aus den Verschleiß- und Reibwertmessungen zeigt sich, dass die beiden PA 66 Typen dem PA 46, sowohl ungefüllt als auch compoundiert, bezogen auf ihre tribologischen Kennwerte im Vorteil sind. Auch der Einfluss der einzelnen Additive auf den Reibkoeffizienten fällt bei Stanyl, dem Polyamid 46, wesentlich geringer aus als bei den beiden anderen Polyamiden, deren Eigenschaften noch dazu von einer größeren Anzahl von Füllstoffen verbessert werden können.

Das größere Potential von Schichtsilikaten im Vergleich zu anderen mineralischen Additiven mit sphärischen Partikeln die Reibungseigenschaften der Polymere zu verbessern, zeigt sich auch vorwiegend bei den beiden PA 66 Typen. Die Ausnahme dabei stellt eigentlich nur der Füllstoff AF100 dar, der aus den mit Abstand größten Partikeln besteht. Diese Resultate sind jedoch, wie bereits im Abschnitt 4.2 diskutiert, mit Vorsicht zu betrachten und sollten in nachfolgenden Versuchen genauer analysiert werden.

Die durchgeführten Versuche zeigen aber eindeutig das Potential einiger Additive, hauptsächlich der Schichtsilikate, die Tribologie von Polyamid deutlich zu verbessern und den gestellten Anforderungen an eine reibungsarme Kettenführung gerecht zu werden. Auch die Mischung von Polyamiden mit PTFE zeigte einen positiven Einfluss auf das Reibungsverhalten der Proben.

Im Anschluss an die Versuche zu dieser Diplomarbeit wurden anhand der gewonnenen Erkenntnisse weiterführende Versuche mit spritzgegossenen Probekörpern von einigen der Mischungen durchgeführt. Dafür wurden erneut Compounds aus einer Auswahl an Additiven, die zumindest bei einem Polymer deutlich positive Auswirkungen auf die Reibzahl hatten, mit den drei Polyamiden hergestellt.

Die spritzgegossenen Scheiben wurden sowohl bei Raumtemperatur als auch bei 90 °C auf ihre Reibkoeffizienten mit Ölschmierfilm hin getestet, um so auch den Temperatureinfluss berücksichtigen zu können.

Durch die glattere und ebenere Oberflächenstruktur der gespritzten Probekörper konnten Messkurven mit geringeren Schwankungen des Reibwertes erreicht werden als in den Versuchen mit den gepressten Scheiben (siehe Abbildung 22, beziehungsweise Abbildung 23 und Abbildung 24). Außerdem sind die gemessenen Reibkoeffizienten jeweils deutlich niedriger als die für diese Arbeit gemessenen Werte, was wiederum an der glatteren Oberfläche der neuen Probekörper liegt und nochmals bestätigt, wie wichtig es ist, die tribologischen Kennwerte als System- und nicht als Werkstoffparameter anzusehen.

Die Reibkoeffizienten, die bei den Versuchen bei Raumtemperatur als Mittelwert aus Messungen an drei unterschiedlichen Positionen ermittelt wurden, zeigen im Großen und Ganzen vergleichbare Tendenzen wie die Versuche, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Als Beispiel dafür kann hier der durchwegs positive Einfluss von Nanofil SE3010, sowie die wesentlich deutlichere Verbesserung der Reibkoeffizienten der beiden Polyamid 66 Typen durch Cloisite 93A genannt werden. Beide Tendenzen gehen aus den Versuchen, die im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurden, hervor und wurden auch bei den gespritzten Compoundscheiben bestätigt. Auch der Verdacht, dass die unterschiedliche Wirkung von AF100 eher auf eine günstigere bzw. ungünstigere Verteilung der Partikel in den einzelnen Probekörpern zurückzuführen ist, scheint sich durch die nun bei allen Polymeren eher durchschnittlichen Werte zu bewahrheiten.

Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Daten bieten eine gute Grundlage, um ein geeignetes Compound zur Herstellung von Kettenführungsschienen mit deutlich verbesserten tribologischen Eigenschaften zu entwickeln. Es konnten eindeutige Unterschiede zwischen die einzelnen Polymeren sichtbar gemacht werden und die große Auswahl an unterschiedlichen Additiven, die den Polyamiden beigegeben wurden, bietet einen guten Überblick über die Einflüsse unterschiedlicher Zusatzstoffe mit unterschiedlichen Partikelformen.

Die durch die Aufgabenstellung bedingte große Anzahl an Compounds, die zweifellos einen guten Überblick über unterschiedliche Polymere und Additive gibt und somit eine breite Basis für weiterführende Untersuchungen bietet, hatte jedoch auch gewisse Nachteile. Durch die große Anzahl an nötigen Einzelmessungen für jede der 51 Materialien konnten die Analysen der Verschleiß- und Reibkoeffizienten jeweils nur einmal durchgeführt werden. Das liegt zum einen daran, dass dadurch eine mehrfache Wiederholung eine wesentlich größere Anzahl an Probekörpern, die jeweils einzeln aufzubereiten sind, nötig gewesen wäre. Das ist jedoch sehr zeitaufwändig und hätte aus projekttechnischer Sicht nicht viel Sinn gemacht, zumal die gemessenen Tendenzen durch die, im weiteren Verlauf des Projekts an spritzgegossenen Proben gemessenen Reibkoeffizienten bestätigt werden konnten. Daraus lässt sich also auf eine Reproduzierbarkeit der Resultate schließen. Somit lässt sich sagen, dass die Messbedingungen für die Aufgabenstellung eines Vergleichs vieler unterschiedlicher Compounds zweckmäßig waren und eine gute Basis für eine Weiterentwicklung der getesteten Compounds darstellen. In weiterführenden Versuchen, bei denen weniger unterschiedliche Compounds zum Einsatz kommen, empfiehlt es sich jedoch die Messungen mehrfach und eventuell auch an unterschiedlichen Positionen durchzuführen.

Neben den gemessenen Reibungs- und Verschleißkoeffizienten wurden im Laufe dieser Arbeit noch weitere wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Analysen der tribologischen Eigenschaften von Compounds gewonnen. Es hat sich gezeigt, dass die gepressten Polymerscheiben sehr aufwändig aufbereitet werden müssen, da diese für Messungen nach der Pin-on-Disc Methode sehr eben sein müssen. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten ist außerdem gleichmäßige Oberflächenqualität notwendig. Das konnte zwar durch Schleifen und Polieren der gepressten Platten erreicht werden, war jedoch sehr zeitintensiv. Aus diesem Grund und der Tatsache, dass die Kettenführungen später spritzgegossen werden, wurden die Probekörper für die nachfolgenden Versuche ebenfalls spritzgegossen. Diese Probekörper weisen eine geringere Rauigkeit als die gepressten und polierten Probekörper auf und sind zudem auch noch ebener.

Um die unterschiedlichen Auswirkungen einzelner Additive, wie zum Beispiel jene von AF100, auf die einzelnen Polymere besser zu verstehen wäre eine Analyse der Partikelverteilung der Additive in den Probekörpern interessant. Auch eine Messung der Härte und der Oberflächenrauigkeit der einzelnen Compounds ist für weitere Versuche zu empfehlen.

Sollten, was momentan nicht geplant ist, auch noch weitere Versuche zum Verschleißkoeffizienten durchgeführt werden, würde es sich empfehlen die Belastungsdauer deutlich zu erhöhen, um so einen höheren Verschleiß zu erzielen. Es ist zum Beispiel denkbar, dass es durch das Entfernen der Probekörper aus der Halterung zu einem minimalen, von Probe zu Probe unterschiedlichen Abrieb kommen kann. Bei einer größeren Belastungsdauer und einem somit größeren Materialverlust wird ein möglicher Fehler wie dieser vernachlässigbar klein.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Bely, V.A.; Savkin V.G.; Sviridyonok, A.I.: *Wear* 18, 11, 1971.
- [2] Bhimaraj, P., Burris, D.L., Action, J., Sawyer, G.W., Toney, G.C., Siegel, R.W., Schadler, L.S.: Effect of matrix morphology on the wear and friction behavior of alumina nanoparticle/poly(ethylene) terephthalate composites, *Wear* 258 (2005) 1437-1443.
- [3] Bottenbruch, L., Binsack, R.: *Kunststoff Handbuch (3/4): Polyamide*, Carl Hansa Verlag, München, 1998.
- [4] Chang, L., Zhang, Z., Zhang, H., Schlarb, A.K.: On the sliding wear of nanoparticle filled polyamide 66 composites, *Composites Science and Technology* 66 (2006), 3188-5198.
- [5] Czichos, H., Habig, K.-H.: *Tribologiehandbuch, 3.Auflage+6*, Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2010.
- [6] Ehrenstein, G.W.: *Polymer Werkstoffe Struktur – Eigenschaften – Anwendung (3.Auflage)*, Carl Hanser Verlag München, 2011.
- [7] Elsner, P., Eyerer, P., Hirth, T.: *Kunststoffe Eigenschaften und Anwendungen 8.Auflage*, Springer Verlag, Heidelberg, 2012.
- [8] Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für virtuelle Produktion, URL: http://www.ivp.ethz.ch/research/forschungsgebiete/pin_on_disc.jpg?hires (abgerufen am 19.September 2013).
- [9] Extricom Blach Extruder & Components: URL: <http://www.extricom.de> (abgerufen am 30.9.2013).
- [10] Ferry, J.B.: *Viscoelastic Properties of Polymers*, John Wiley, New York, 1978.
- [11] Friedrich, K., Zhang, Z., Schlarb, A.K.: Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites, *Composites Science and Technology* 65 (2005), 2329-2343.
- [12] García, M., de Rooij, M., Winnbust, L., van Zyl, W.E., Verweij, H.: Friction and Wear Studies on Nylon-6/SiO₂ Nanocomposites, *Journal of Applied Polymer Science* Vol. 92, 1855-1862 (2004).
- [13] Gesellschaft für Tribologie, *Arbeitsblatt 7: Tribologie Verschleiß, Reibung, Definitionen, Begriffe, Prüfungen*.
- [14] Grellmann, W., Seidler, S.: *Kunststoffprüfung, 2.Auflage*, Carl Hanser Verlag München, 2011.
- [15] Haberfellner, R., Nagel, P., Becker, M.: *Systems Engineering – Methodik und Praxis 11. Auflage*, Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 2002.
- [16] Habig, K.-H.: *Tribologie*, in *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau (20. Auflage)*, Beitz, W; Grote, K.-H., Springer Verlag, Berlin, 2001.
- [17] Habig, K.-H.: *Verschleiß und Härte von Werkstoffen*, Carl Hanser Verlag, München, 1990.
- [18] Häger, A. M.: *Polyaryletherketone für den Einsatz in Gleitlagern und Gleitelementen*. Shaker Verlag, Aachen, 1997.
- [19] Hellrich, W., Harsch, G., Baur, E.: *Werkstoffführer Kunststoffe 10. Auflage*, Carl Hansa Verlag, München, 2010.

- [20] Kaiser, W.: Kunststoffchemie für Ingenieure Von der Synthese bis zur Anwendung (3.Auflage), Carl Hanser Verlag München, 2011.
- [21] Li-xin, Z., Li-yun, Z., Shu-guo, Z.: Tribological Performance of nano-AL₂O₃ reinforced polyamide 6 Composites, *Materials Letters* (60) 2006, 2590-2593, Elsevier.
- [22] Manufacturing Chemist: URL: <http://www.manufacturingchemist.com> (abgerufen am 20.11.2013).
- [23] McElwain, S.E., Blanchet, T.A., Schadler, L.S.: Effects of Particle Size on the Wear Resistance of Alumina-Filled PTFE Micro- and Nanocomposites, *Society of Tribologists and Lubrication Engineers Annual Meeting, SLTE, Calgary (Alberta), Canada, 2006.*
- [24] Reinemann, S.: Eigenschaften gezielt modifizieren, *Kunststoffe* (6) 2006, 46–50.
- [25] Reuter, M.: Methodik der Werkstoffauswahl: Der systematische Weg zum richtigen Material, Carl Hansa Verlag, München, 2007.
- [26] Saechtling, H, Oberbach, K.: Kunststoff-Taschenbuch 28. Auflage, Carl Hansa Verlag, München, 2001.
- [27] Sawyer, G., Freudenberg, K.D., Bhimaraj, P, Schadler, L.S.: A Study on the friction and wear behaviour of PTFE filled with alumina nanoparticles, *Wear* 254 (2003), 573-580.
- [28] Schönfeld, S.; Lechner F.: Nanocomposites, *Kunststoffe* (7) 2003, 28–33.
- [29] Stanyl® TW341: Materialdatenblatt: Koninklijke DSM N.V., NL-6417 Heerlen, 2007.
- [30] Uetz, H., Sommer, K., Kohsrawi, M.A.: Übertragbarkeit von Versuchs- und Prüfergebnissen bei abrasiver Verchleißbeanspruchung auf Bauteile., *VDI-Berichte Nr. 354 (1979)*, 107-124.
- [31] *Uetz, H.; Wiedemeyer, J.: Tribologie der Polymere, Carl Hanser Verlag München, 1985.*
- [32] Ultramid® A4H: Materialdatenblatt, BASF SE, D-67056 Ludwigshafen, 2013.
- [33] Zytel® E41HSB NC010: Materialdatenblatt: DuPont AG, US-19898 Wilmington, 2005.

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Eigenschaftsübersicht unterschiedlicher Polyamide [7, 26].....	4
Tabelle 2:	Form und Längen-Dickenverhältnisse verschiedener Additive.....	6
Tabelle 3:	Übersicht über die allgemeinen Verschleißmechanismen nach [31].....	11
Tabelle 4:	Überblick über die sechs Kategorien der Verschleißprüfung [31].....	17
Tabelle 5:	Übersicht über die verwendeten Polymere.....	19
Tabelle 6:	Verwendete Additive mit der jeweiligen Partikelgröße.....	20
Tabelle 7:	Geräteübersicht.....	21
Tabelle 8:	Schneckenkonfiguration des ZSK zur Herstellung der PA-Compounds.	21
Tabelle 9:	Temperaturprofil (in °C) der Zonen im Compounder.....	22
Tabelle 10:	Verarbeitungsparameter für sämtliche Mischungen.	22
Tabelle 11:	Einstellungen zum Pressen der Probepplatten an der Plattenpresse Collin 200....	22
Tabelle 12:	Prüfprogramm zur Ermittlung des COF bei unterschiedlichen Lasten und Beanspruchungsgeschwindigkeiten.	26
Tabelle 13:	Ergebnisse der Dichtemessungen und der Verschleißanalyse von PA 66 Ultramid H4A und seinen Compounds.	28
Tabelle 14:	Ergebnisse der Dichtemessungen und der Verschleißanalyse von PA 66 Zytel E41HSB und seinen Compounds.....	59
Tabelle 15:	Ergebnisse der Dichtemessungen und der Verschleißanalyse von PA 46 Stanyl TW341 und seinen Compounds.....	60
Tabelle 16:	Ermittelte Reibwerte von Ultramid A4H und sämtlicher daraus hergestellter Compounds mit allen Einstellungen nach Tabelle 12.....	60
Tabelle 17:	Ermittelte Reibwerte von Zytel E41HSB und sämtlicher daraus hergestellter Compounds mit allen Einstellungen nach Tabelle 12.....	62
Tabelle 18:	Ermittelte Reibwerte von Stanyl TW341 und sämtlicher daraus hergestellter Compounds mit allen Einstellungen nach Tabelle 12.....	63

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Problemlösungszyklus bei der Werkstoffauswahl [15].	2
Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau von Polyamiden: links mit einem und rechts mit zwei unterschiedlichen Ausgangsstoffen [19].	4
Abbildung 3: Aufbau der Schichtsilikate sowie Auswirkungen von Interkalierung und Exfolierung auf die Zwischenschichtabstände [24].	6
Abbildung 4: Unterschiedliche Schneckenelemente. Von links: Förderelement, Knetblock und Mischteil [9].	7
Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Compounders nach [22].	8
Abbildung 6: Schema eines Tribosystems [13].	9
Abbildung 7: Die Stribeck-Kurve zeigt die Reibungs- und Schmierzustände in einem Tribosystem [5].	12
Abbildung 8: Chemische Struktur tribologisch relevanter Thermoplaste [31].	14
Abbildung 9: Beeinflussung des Reibungsverhaltens eines Polymer/Metall-Systems durch die Mikrostruktur des Polymeren [31].	14
Abbildung 10: Geschwindigkeitseinfluss auf die Reibungszahl [31].	15
Abbildung 11: Temperatureinfluss auf Reibungszahl und Verschleißfaktor [31].	16
Abbildung 12: Schematische Darstellung des Pin-on-Disc Verfahrens [8].	18
Abbildung 13: Schleif-/Poliermaschine Tegrapol 31 während des Schleifvorgangs.	23
Abbildung 14: Skizze des eingesetzten Metallpins.	24
Abbildung 15: Das Tribometer CETR-UMT-2 während (li.) und nach (re.) einer Messung	25
Abbildung 16: Gegeüberstellung des Verschleißkoeffizienten der ungefüllten Polyamide unter einer Last von 7 N bzw. 13 N.	29
Abbildung 17: Schematischer Verlauf des Verschleiß in Abhängigkeit von der Prüfzeit.	30
Abbildung 18: Einfluss der einzelnen Additive auf den Verschleißkoeffizienten von Ultramid A4H unter einer Last von 7 N.	31
Abbildung 19: Einfluss der einzelnen Additive auf den Verschleißkoeffizienten von Ultramid A4H unter einer Last von 13 N.	31
Abbildung 20: Einfluss der einzelnen Additive auf den Verschleißkoeffizienten von Zytel E41HSB unter einer Last von 13 N.	32
Abbildung 21: Einfluss der einzelnen Additive auf den Verschleißkoeffizienten von Stanyl TW341 unter einer Last von 13 N.	33
Abbildung 22: Reibkoeffizient (COF) von Ultramid A4H Ultramid mit 5 Gewichtsprozent M8000 bei einer Last von 10 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 10 Umdrehungen/Minute.	34
Abbildung 23: Ungefilterter Verlauf des Reibkoeffizient (COF) von Ultramid A4H mit 5% ungetrocknetem Na ⁺ bei einer Last von 5 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 10 Umdrehungen/Minute.	35

Abbildung 24: Gefilterter Verlauf des COF von Ultramid A4H mit 5% ungetrocknetem Na ⁺ bei 5 N und 10 Umdrehungen/Minute.....	35
Abbildung 25: Gegenüberstellung der Reibkoeffizienten der drei ungefüllten Polyamide bei sämtlichen geprüften Einstellungen.....	36
Abbildung 26: Vergleich der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibkoeffizienten der drei Matrixpolymere bei einer Anpresskraft von 13 N.	37
Abbildung 27: Einfluss der Druckkraft des Stahlstiftes auf die rotierende Polymerscheibe bei einer Prüfgeschwindigkeit von 100 Umdrehungen pro Minute.....	37
Abbildung 28: Übersicht der Reibwerte der Compounds von PA 66 Ultramid A4H unter einer Last von 13 N bei Variation der Rotationsgeschwindigkeiten der Probekörper. ...	38
Abbildung 29: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibkoeffizienten der Compounds mit 5 Gewichtsprozent Nanofil SE3010 unter einer Normalkraft von 13 N.....	39
Abbildung 30: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibkoeffizienten der Compounds mit 5 Gewichtsprozent Cloisite 10A unter einer Normalkraft von 13 N.....	39
Abbildung 31: Abhängigkeit der Reibkoeffizienten der Compounds mit 5% Nanofil SE3010 von der Normalkraft bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 100 Umdrehungen pro Minute.....	40
Abbildung 32: Abhängigkeit der Reibkoeffizienten der Compounds mit 5% Cloisite 10A von der Normalkraft bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 100 Umdrehungen pro Minute.....	41
Abbildung 33: Auswirkungen der Variation der Normalkraft auf die Reibkoeffizienten der Compounds von Ultramid A4H bei 250 Umdrehungen pro Minute.	42
Abbildung 34: Auswirkungen der Variation der Normalkraft auf die Reibkoeffizienten der Compounds von Zytel E41 HSB bei 250 Umdrehungen pro Minute.....	42
Abbildung 35: Auswirkungen der Variation der Normalkraft auf die Reibkoeffizienten der Compounds von Stanyl TW341 bei 250 Umdrehungen pro Minute.	43
Abbildung 36: Vergleich der Reibkoeffizienten der Compounds von PA 66 Ultramid A4H mit dem Reibkoeffizienten des ungefüllten Polymers bei 13 N Normalkraft und 250 Umdrehungen pro Minute.....	44
Abbildung 37: Vergleich der Reibkoeffizienten der Compounds von PA 66 Zytel E41HSB mit dem Reibkoeffizienten des ungefüllten Polymers bei 13 N Normalkraft und 250 Umdrehungen pro Minute.....	44
Abbildung 38: Vergleich der Reibkoeffizienten der Compounds von PA 46 Stanyl TW341 mit dem Reibkoeffizienten des ungefüllten Polymers bei 13 N Normalkraft und 250 Umdrehungen pro Minute.....	45
Abbildung 39: Markante Veränderungen des COF durch Additive zu den drei Polyamiden bei 13 N Normalkraft und 250 Umdrehungen pro Minute.....	47
Abbildung 40: Einfluss der einzelnen Additive auf den Verschleißkoeffizienten von Zytel E41HSB unter einer Last von 7 N.....	65
Abbildung 41: Einfluss der einzelnen Additive auf den Verschleißkoeffizienten von Stanyl TW341 unter einer Last von 7 N.....	65
Abbildung 42: Übersicht der Reibwerte der Compounds von PA 66 Zytel E41 HSB unter einer Last von 13 N bei Variation der Rotationsgeschwindigkeiten der Probekörper. ...	66

Abbildung 43: Übersicht der Reibwerte der Compounds von PA 46 Stanyl TW341 unter einer Last von 13 N bei Variation der Rotationsgeschwindigkeiten der Probekörper. ..66

Abbildung 44: Vergleich der Reibkoeffizienten der Compounds von PA 66 Ultramid A4H mit dem Reibkoeffizienten des ungefüllten Polymers bei 13 N Normalkraft und 130 Umdrehungen pro Minute.67

Abbildung 45: Vergleich der Reibkoeffizienten der Compounds von PA 66 Zytel E41HSB mit dem Reibkoeffizienten des ungefüllten Polymers bei 13 N Normalkraft und 130 Umdrehungen pro Minute.67

Abbildung 46: Vergleich der Reibkoeffizienten der Compounds von PA 46 Stanyl TW341 mit dem Reibkoeffizienten des ungefüllten Polymers bei 13 N Normalkraft und 130 Umdrehungen pro Minute.68

Abbildung 47: Markante Veränderungen des COF durch Additive zu den drei Polyamiden bei 10 N Normalkraft und 100 Umdrehungen pro Minute.....68

Abbildung 48: Markante Veränderungen des COF durch Additive zu den drei Polyamiden bei 13 N Normalkraft und 130 Umdrehungen pro Minute.....69

9 Symbole

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m ²
f	Reibkoeffizient, Gleitreibwert, Coefficient of friction (COF)	-
F	Kraft	N
F _f	Reibkraft	N
F _n	Normalkraft	N
K	Verschleißkoeffizient	mm ³ /(m*N)
L	Länge	M
N	Wärmetransportwege	-
R	Thermischer Widerstandsparameter	K/W
S	Strecke	M
V	Relativgeschwindigkeit	m/s
W _v	Verschleißvolumen	mm ³
Δm	Masseverlust	G
ΔT	Temperaturänderung	°C
λ	Spezifische Wärmeleitfähigkeit	W/(m*K)
λ	Vergleichszahl (Filmdicke/Rauheit) in Abbildung 7	-
P	Dichte	g/cm ³

10 Anhang

10.1 Tabellen

Tabelle 14: Ergebnisse der Dichtemessungen und der Verschleißanalyse von PA 66 Zytel E41HSB und seinen Compounds.

Additiv	Normalkraft					
	7 N			13 N		
	ρ (g/cm ³)	Δm (g)	k (mm ³ /Nm)	ρ (g/cm ³)	Δm (g)	k (mm ³ /Nm)
Ungefüllt	1,150	0,00192	1,205*10 ⁻⁴	1,150	0,00083	2,805*10 ⁻⁵
Cloisite10A	1,171	0,00106	6,534*10 ⁻⁵	1,171	0,00172	5,708*10 ⁻⁵
Cloisite 30B	1,150	0,00054	2,190*10 ⁻⁵	1,150	0,00026	8,787*10 ⁻⁶
Cloisite 93A	1,159	0,00342	2,130*10 ⁻⁴	1,159	0,00525	1,761*10 ⁻⁴
Cloisite Na ⁺	1,177	0,00264	1,619*10 ⁻⁴	1,177	0,00091	3,005*10 ⁻⁵
Cloisite Na ⁺ , beschichtet	1,130	0,00127	8,111*10 ⁻⁵	1,130	0,00052	1,788*10 ⁻⁵
Cloisite Na ⁺ , getrocknet	1,162	0,00150	9,316*10 ⁻⁵	1,162	0,00134	4,481*10 ⁻⁵
Garamite 1958	1,097	0,00087	5,723*10 ⁻⁵	1,097	0,00038	1,346*10 ⁻⁵
Nanofil 116	1,161	0,00086	5,347*10 ⁻⁵	1,161	0,00033	1,105*10 ⁻⁵
Nanofil 116, beschichtet	1,150	0,00365	2,291*10 ⁻⁴	1,150	0,00225	7,603*10 ⁻⁵
Nanofil SE 3010	1,150	0,00118	7,405*10 ⁻⁵	1,150	0,00072	2,433*10 ⁻⁵
AF100	1,180	0,00335	2,049*10 ⁻⁴	1,180	0,00241	7,937*10 ⁻⁵
M800	1,166	0,00143	8,853*10 ⁻⁵	1,166	0,00090	3,000*10 ⁻⁵
M8000	1,173	0,00207	1,274*10 ⁻⁵	1,173	0,00080	2,651*10 ⁻⁵
Perlit	1,176	0,00132	8,102*10 ⁻⁵	1,176	0,00058	1,917*10 ⁻⁵
S10	1,174	0,00248	1,525*10 ⁻⁴	1,174	0,00099	3,277*10 ⁻⁵
PTFE	1,165	0,00241	1,493*10 ⁻⁴	1,165	0,00040	1,334*10 ⁻⁵

Tabelle 15: Ergebnisse der Dichtemessungen und der Verschleißanalyse von PA 46 Stanyl TW341 und seinen Compounds.

Additiv	Normalkraft					
	7 N			13 N		
	ρ (g/cm ³)	Δm (g)	k (mm ³ /Nm)	ρ (g/cm ³)	Δm (g)	k (mm ³ /Nm)
Ungefüllt	1,194	0,00231	1,397*10 ⁻⁴	1,194	0,00103	3,353*10 ⁻⁵
Cloisite10A	1,189	0,00615	3,734*10 ⁻⁴	1,189	0,00169	5,525*10 ⁻⁵
Cloisite 30B	1,189	0,00296	1,798 *10 ⁻⁴	1,189	0,00220	7,192*10 ⁻⁵
Cloisite 93A	1,205	0,00293	1,755*10 ⁻⁴	1,205	0,00052	1,677*10 ⁻⁵
Cloisite Na ⁺	1,223	0,00117	6,905*10 ⁻⁵	1,223	0,00043	1,367*10 ⁻⁵
Cloisite Na ⁺ , beschichtet	1,210	0,00580	3,460*10 ⁻⁴	1,210	0,00843	2,708*10 ⁻⁵
Cloisite Na ⁺ , getrocknet	1,220	0,00464	2,745*10 ⁻⁴	1,220	0,00249	7,931*10 ⁻⁵
Garamite 1958	1,192	0,00336	2,035*10 ⁻⁴	1,192	0,00171	5,576*10 ⁻⁵
Nanofil 116	1,190	0,00388	2,353*10 ⁻⁴	1,190	0,00143	4,671*10 ⁻⁵
Nanofil 116, beschichtet	1,125	0,00360	2,121*10 ⁻⁴	1,125	0,00642	2,037*10 ⁻⁴
Nanofil SE 3010	1,184	0,00150	9,023*10 ⁻⁵	1,184	0,00023	7,550*10 ⁻⁶
AF100	1,123	0,00488	3,138*10 ⁻⁴	1,123	0,00484	1,340*10 ⁻⁴
M800	1,190	0,00113	6,854*10 ⁻⁵	1,190	0,00370	1,208*10 ⁻⁴
M8000	1,190	0,00417	2,5 29*10 ⁻⁴	1,190	0,00110	3,593*10 ⁻⁵
Perlit	1,120	0,00669	4,311*10 ⁻⁴	1,120	0,00817	2,835*10 ⁻⁵
S10	1,126	0,00288	1,846*10 ⁻⁴	1,126	0,00319	1,311*10 ⁻⁵
PTFE	1,180	0,00249	1,523*10 ⁻⁴	1,180	0,00083	2,734*10 ⁻⁵

Tabelle 16: Ermittelte Reibwerte von Ultramid A4H und sämtlicher daraus hergestellter Compounds mit allen Einstellungen nach Tabelle 12.

Schritt	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ungefüllt	0,073	0,071	0,072	0,042	0,050	0,054	0,029	0,040	0,047
Cloisite 10A	0,082	0,076	0,052	0,057	0,052	0,052	0,052	0,042	0,043
Cloisite 30B	0,091	0,083	0,081	0,025	0,065	0,063	0,049	0,053	0,051
Cloisite 93A	0,046	0,046	0,044	0,022	0,024	0,025	0,020	0,025	0,031

10. Anhang

Schritt	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cloisite Na ⁺	0,069	0,064	0,060	0,029	0,032	0,031	0,023	0,030	0,032
Cloisite Na ⁺ beschichtet	0,072	0,073	0,070	0,046	0,053	0,053	0,029	0,039	0,041
Cloisite Na ⁺ getrocknet	0,072	0,072	0,072	0,034	0,038	0,039	0,031	0,035	0,038
Garamite 1958	0,052	0,051	0,048	0,033	0,035	0,035	0,029	0,031	0,032
Nanofil 116	0,039	0,037	0,037	0,032	0,030	0,030	0,033	0,035	0,035
Nanofil 116 beschichtet	0,081	0,075	0,070	0,045	0,050	0,053	0,039	0,045	0,049
Nanofil SE3010	0,066	0,067	0,064	0,033	0,040	0,041	0,014	0,025	0,028
AF100	0,087	0,079	0,073	0,064	0,065	0,064	0,047	0,056	0,057
M800	0,080	0,074	0,069	0,054	0,052	0,047	0,040	0,048	0,048
M8000	0,087	0,078	0,070	0,063	0,057	0,051	0,045	0,047	0,047
Perlit	0,072	0,068	0,066	0,038	0,046	0,052	0,030	0,037	0,044
S10	0,085	0,074	0,069	0,078	0,071	0,066	0,066	0,065	0,062
PTFE	0,083	0,076	0,070	0,054	0,051	0,048	0,038	0,037	0,037
Schritt	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ungefüllt	0,073	0,054	0,050	0,047	0,045	0,044	0,042	0,041	0,040
Cloisite 10A	0,072	0,062	0,056	0,053	0,050	0,048	0,046	0,045	0,043
Cloisite 30B	0,083	0,066	0,059	0,055	0,051	0,049	0,047	0,045	0,043
Cloisite 93A	0,041	0,029	0,027	0,025	0,024	0,022	0,021	0,020	0,019
Cloisite Na ⁺	0,050	0,032	0,029	0,028	0,025	0,025	0,024	0,023	0,022
Cloisite Na ⁺ beschichtet	0,081	0,057	0,047	0,042	0,038	0,034	0,031	0,028	0,027
Cloisite Na ⁺ getrocknet	0,055	0,040	0,037	0,038	0,038	0,038	0,043	0,043	0,043
Garamite 1958	0,046	0,034	0,032	0,031	0,031	0,030	0,027	0,026	0,027
Nanofil 116	0,036	0,032	0,033	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
Nanofil 116 beschichtet	0,070	0,053	0,049	0,047	0,046	0,044	0,044	0,043	0,042
Nanofil SE3010	0,071	0,047	0,038	0,034	0,031	0,028	0,025	0,023	0,021
AF100	0,078	0,064	0,058	0,055	0,053	0,051	0,050	0,048	0,047
M800	0,068	0,053	0,048	0,044	0,041	0,039	0,038	0,036	0,035

Schritt	10	11	12	13	14	15	16	17	18
M8000	0,070	0,056	0,051	0,048	0,045	0,043	0,041	0,040	0,038
Perlit	0,063	0,049	0,046	0,043	0,042	0,040	0,039	0,037	0,036
S10	0,080	0,071	0,067	0,066	0,064	0,063	0,063	0,062	0,060
PTFE	0,080	0,058	0,050	0,045	0,041	0,038	0,036	0,034	0,033

Tabelle 17: Ermittelte Reibwerte von Zytel E41HSB und sämtlicher daraus hergestellter Compounds mit allen Einstellungen nach Tabelle 12.

Schritt	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ungefüllt	0,101	0,082	0,074	0,077	0,070	0,065	0,063	0,061	0,058
Cloisite 10A	0,093	0,086	0,082	0,081	0,074	0,069	0,073	0,068	0,064
Cloisite 30B	0,090	0,082	0,077	0,072	0,068	0,064	0,059	0,057	0,056
Cloisite 93A	0,083	0,075	0,070	0,060	0,058	0,055	0,047	0,050	0,051
Cloisite Na ⁺	0,065	0,059	0,057	0,047	0,048	0,048	0,043	0,045	0,040
Cloisite Na ⁺ beschichtet	0,087	0,087	0,087	0,048	0,050	0,048	0,032	0,035	0,035
Cloisite Na ⁺ getrocknet	0,068	0,061	0,058	0,036	0,039	0,042	0,028	0,032	0,036
Garamite 1958	0,081	0,079	0,074	0,065	0,063	0,060	0,047	0,047	0,047
Nanofil 116	0,086	0,077	0,072	0,056	0,053	0,052	0,047	0,048	0,048
Nanofil 116 beschichtet	0,066	0,058	0,055	0,029	0,031	0,033	0,020	0,023	0,028
Nanofil SE3010	0,077	0,069	0,062	0,034	0,032	0,029	0,033	0,030	0,028
AF100	0,066	0,058	0,054	0,020	0,024	0,029	0,013	0,016	0,021
M800	0,072	0,064	0,060	0,048	0,047	0,048	0,030	0,040	0,042
M8000	0,068	0,061	0,055	0,038	0,044	0,045	0,029	0,035	0,038
Perlit	0,074	0,065	0,062	0,050	0,049	0,050	0,037	0,039	0,040
S10	0,054	0,052	0,052	0,035	0,040	0,043	0,029	0,035	0,032
PTFE	0,079	0,075	0,072	0,065	0,060	0,057	0,052	0,051	0,049
Schritt	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ungefüllt	0,089	0,071	0,063	0,059	0,056	0,053	0,051	0,050	0,049
Cloisite 10A	0,092	0,079	0,074	0,072	0,070	0,068	0,067	0,065	0,064

Schritt	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Cloisite 30B	0,085	0,068	0,062	0,058	0,055	0,052	0,051	0,049	0,048
Cloisite 93A	0,078	0,059	0,054	0,050	0,047	0,045	0,043	0,041	0,039
Cloisite Na ⁺	0,068	0,052	0,048	0,045	0,043	0,041	0,040	0,039	0,038
Cloisite Na ⁺ beschichtet	0,080	0,053	0,044	0,038	0,034	0,031	0,029	0,027	0,025
Cloisite Na ⁺ getrocknet	0,067	0,050	0,045	0,042	0,040	0,038	0,036	0,035	0,034
Garamite 1958	0,086	0,067	0,059	0,053	0,049	0,046	0,043	0,041	0,039
Nanofil 116	0,075	0,056	0,051	0,049	0,046	0,044	0,042	0,041	0,040
Nanofil 116 beschichtet	0,059	0,040	0,035	0,031	0,029	0,027	0,026	0,024	0,023
Nanofil SE3010	0,074	0,046	0,036	0,030	0,027	0,024	0,022	0,021	0,020
AF100	0,057	0,032	0,025	0,021	0,019	0,018	0,016	0,016	0,015
M800	0,068	0,052	0,047	0,044	0,042	0,040	0,039	0,037	0,036
M8000	0,062	0,047	0,042	0,039	0,037	0,036	0,034	0,033	0,032
Perlit	0,070	0,052	0,046	0,042	0,040	0,038	0,036	0,035	0,034
S10	0,056	0,043	0,040	0,038	0,036	0,035	0,034	0,033	0,032
PTFE	0,084	0,064	0,056	0,051	0,048	0,045	0,043	0,041	0,039

Tabelle 18: Ermittelte Reibwerte von Stanyl TW341 und sämtlicher daraus hergestellter Compounds mit allen Einstellungen nach Tabelle 12.

Schritt	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ungefüllt	0,085	0,077	0,073	0,067	0,065	0,062	0,058	0,059	0,058
Cloisite 10A	0,098	0,094	0,093	0,098	0,086	0,084	0,084	0,082	0,081
Cloisite 30B	0,085	0,076	0,071	0,050	0,048	0,046	0,035	0,031	0,033
Cloisite 93A	0,086	0,084	0,082	0,065	0,069	0,068	0,060	0,066	0,064
Cloisite Na ⁺	0,096	0,089	0,084	0,089	0,082	0,076	0,093	0,079	0,074
Cloisite Na ⁺ beschichtet	0,100	0,089	0,082	0,068	0,062	0,055	0,049	0,045	0,044
Cloisite Na ⁺ getrocknet	0,094	0,080	0,071	0,093	0,071	0,063	0,072	0,068	0,064
Garamite 1958	0,087	0,079	0,076	0,081	0,075	0,072	0,071	0,068	0,067
Nanofil 116	0,083	0,080	0,077	0,072	0,070	0,067	0,055	0,060	0,061

Schritt	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nanofil 116 beschichtet	0,087	0,081	0,077	0,074	0,072	0,073	0,052	0,060	0,064
Nanofil SE3010	0,085	0,079	0,075	0,056	0,054	0,051	0,041	0,041	0,040
AF100	0,096	0,086	0,080	0,057	0,053	0,049	0,032	0,032	0,033
M800	0,069	0,067	0,065	0,069	0,064	0,060	0,066	0,060	0,057
M8000	0,062	0,058	0,057	0,066	0,061	0,058	0,064	0,059	0,057
Perlit	0,088	0,081	0,077	0,078	0,072	0,071	0,063	0,062	0,057
S10	0,094	0,087	0,087	0,086	0,079	0,075	0,095	0,076	0,071
PTFE	0,059	0,059	0,058	0,055	0,051	0,050	0,050	0,047	0,047
Schritt	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ungefüllt	0,075	0,063	0,059	0,057	0,055	0,053	0,052	0,050	0,049
Cloisite 10A	0,100	0,089	0,084	0,082	0,080	0,078	0,077	0,075	0,073
Cloisite 30B	0,079	0,054	0,047	0,042	0,038	0,035	0,033	0,031	0,029
Cloisite 93A	0,083	0,070	0,067	0,066	0,064	0,062	0,061	0,059	0,058
Cloisite Na ⁺	0,088	0,077	0,073	0,071	0,069	0,068	0,067	0,066	0,065
Cloisite Na ⁺ beschichtet	0,101	0,066	0,054	0,046	0,041	0,038	0,035	0,034	0,032
Cloisite Na ⁺ getrocknet	0,082	0,062	0,063	0,061	0,059	0,058	0,057	0,056	0,055
Garamite 1958	0,086	0,076	0,072	0,070	0,068	0,066	0,065	0,063	0,061
Nanofil 116	0,084	0,072	0,068	0,066	0,065	0,063	0,061	0,059	0,058
Nanofil 116 beschichtet	0,082	0,069	0,066	0,064	0,062	0,061	0,060	0,058	0,057
Nanofil SE3010	0,086	0,063	0,052	0,045	0,041	0,037	0,034	0,032	0,030
AF100	0,071	0,049	0,040	0,036	0,033	0,030	0,029	0,027	0,027
M800	0,060	0,061	0,060	0,060	0,059	0,058	0,058	0,058	0,057
M8000	0,058	0,060	0,059	0,059	0,058	0,057	0,057	0,057	0,056
Perlit	0,086	0,071	0,066	0,063	0,061	0,059	0,057	0,055	0,054
S10	0,089	0,072	0,077	0,067	0,067	0,066	0,065	0,064	0,067
PTFE	0,055	0,053	0,051	0,049	0,048	0,047	0,046	0,045	0,044

10.2 Diagramme

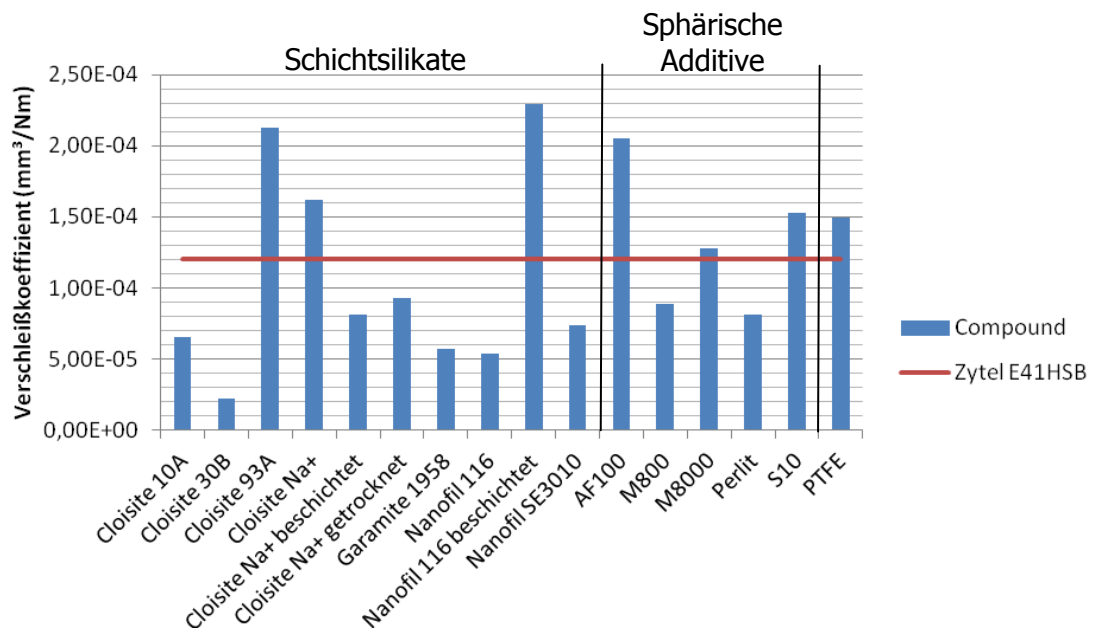


Abbildung 40: Einfluss der einzelnen Additive auf den Verschleißkoeffizienten von Zytel E41HSB unter einer Last von 7 N.

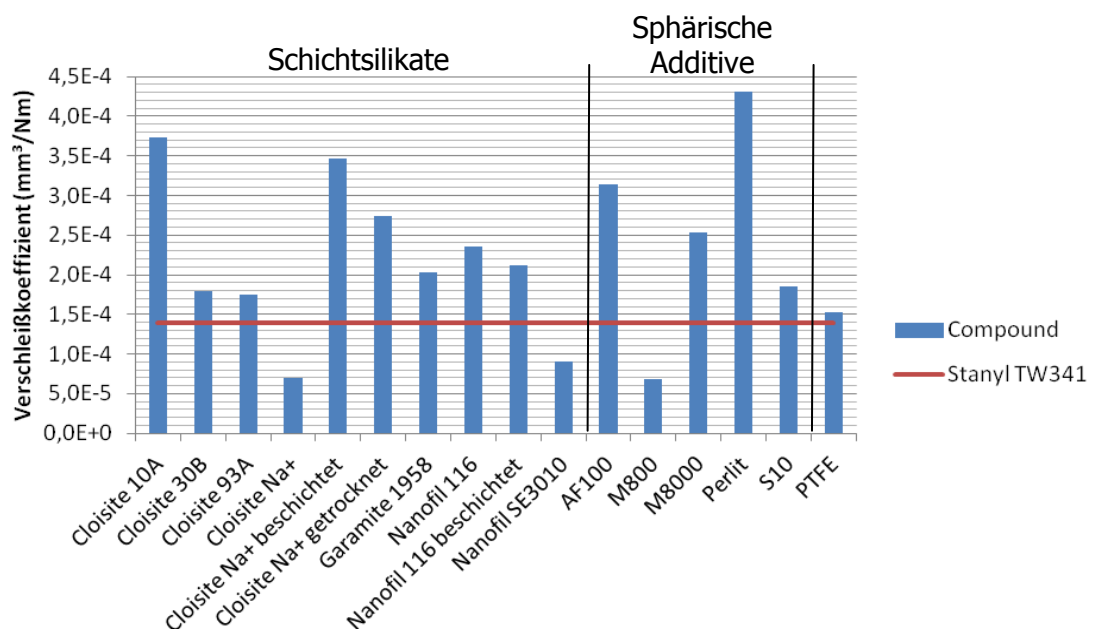


Abbildung 41: Einfluss der einzelnen Additive auf den Verschleißkoeffizienten von Stanyl TW341 unter einer Last von 7 N.

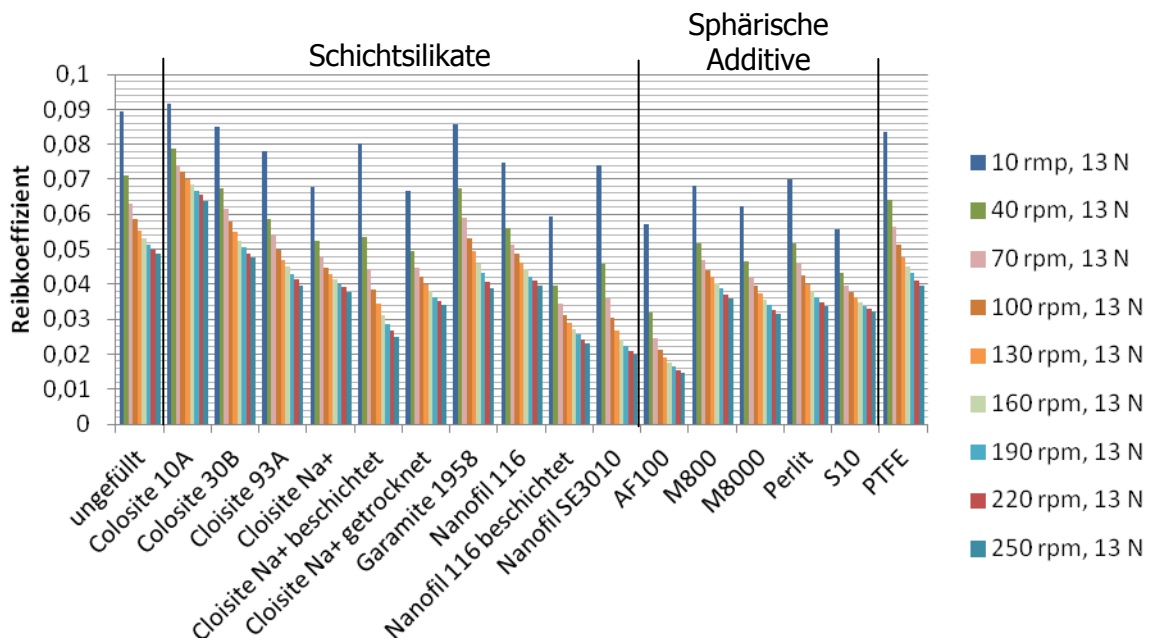


Abbildung 42: Übersicht der Reibwerte der Compounds von PA 66 Zytel E41 HSB unter einer Last von 13 N bei Variation der Rotationsgeschwindigkeiten der Probekörper.

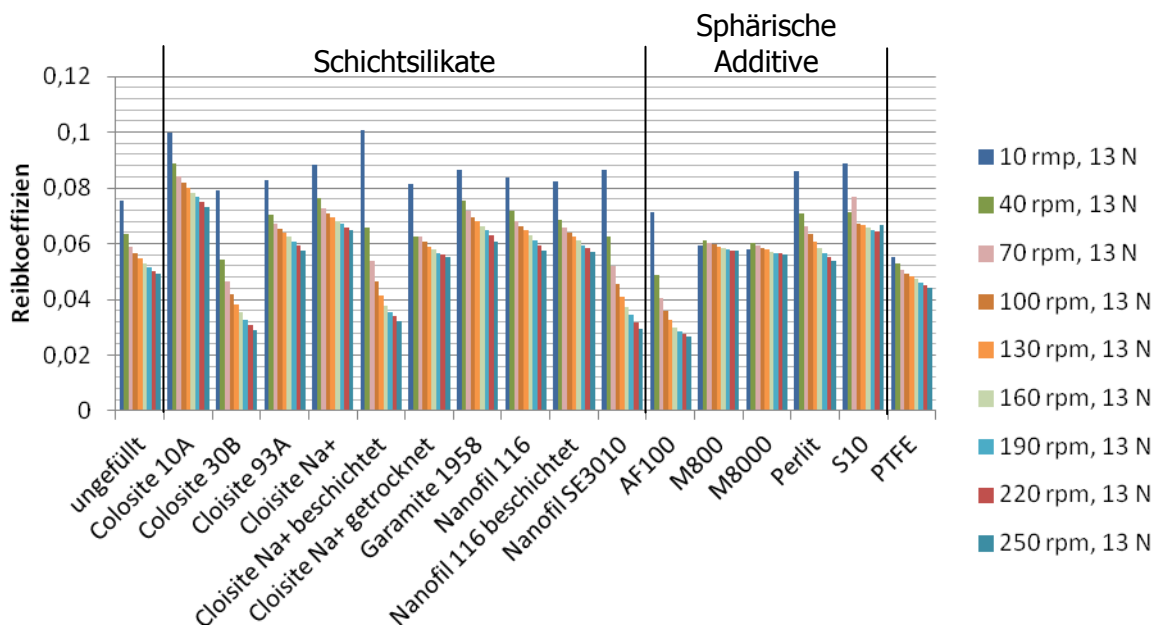


Abbildung 43: Übersicht der Reibwerte der Compounds von PA 46 Stanyl TW341 unter einer Last von 13 N bei Variation der Rotationsgeschwindigkeiten der Probekörper.

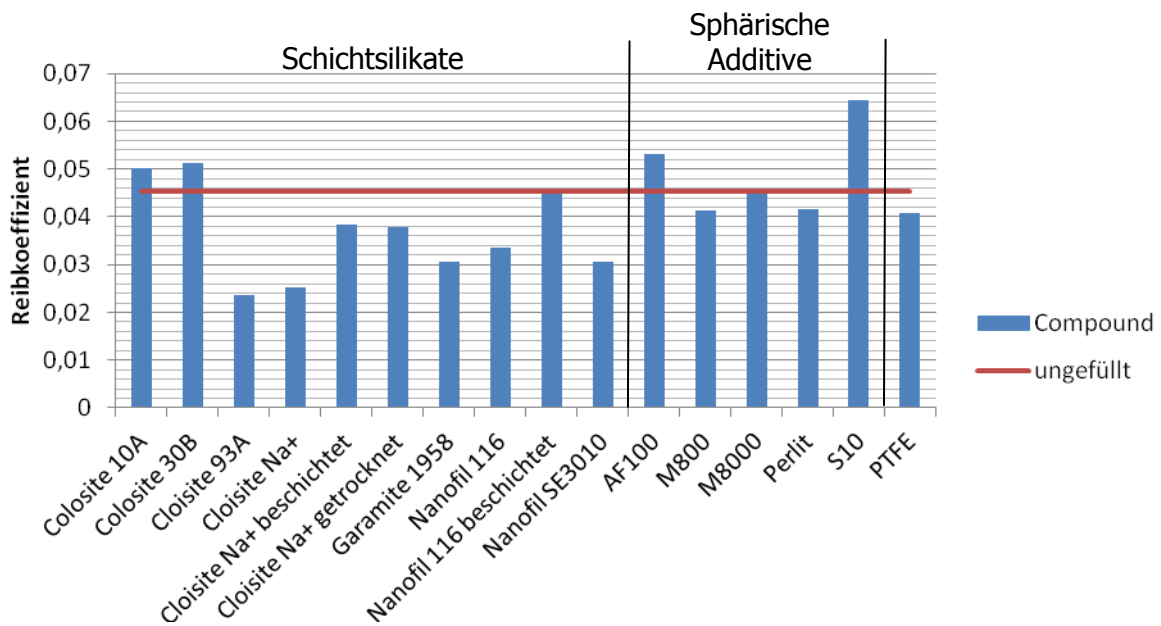


Abbildung 44: Vergleich der Reibkoeffizienten der Compounds von PA 66 Ultramid A4H mit dem Reibkoeffizienten des ungefüllten Polymers bei 13 N Normalkraft und 130 Umdrehungen pro Minute.

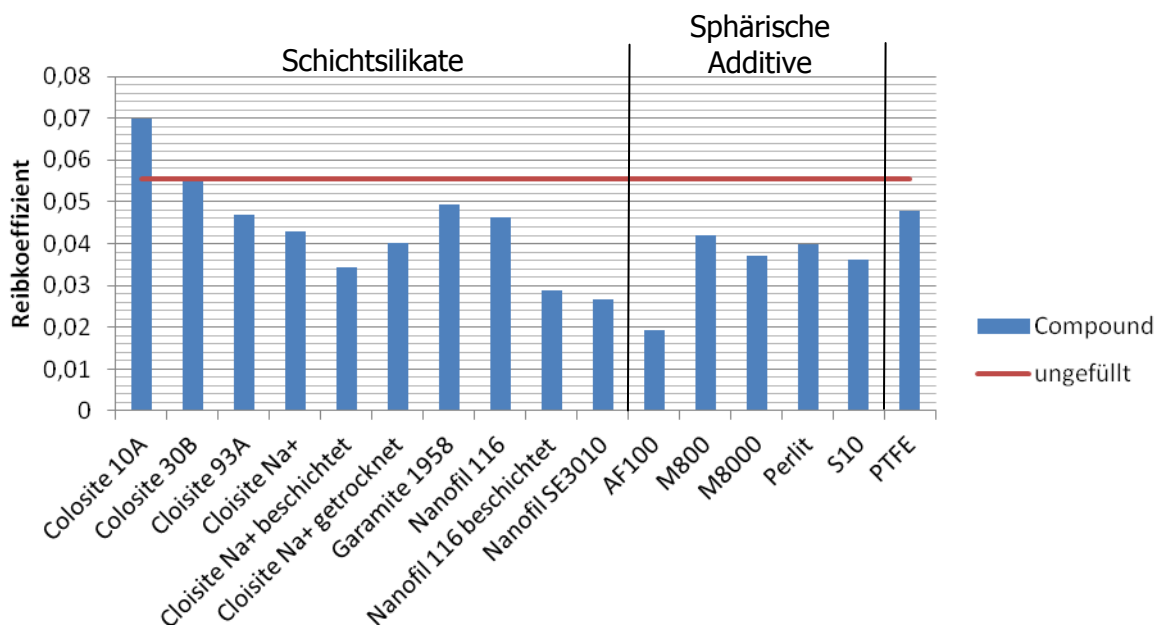


Abbildung 45: Vergleich der Reibkoeffizienten der Compounds von PA 66 Zytel E41HSB mit dem Reibkoeffizienten des ungefüllten Polymers bei 13 N Normalkraft und 130 Umdrehungen pro Minute.

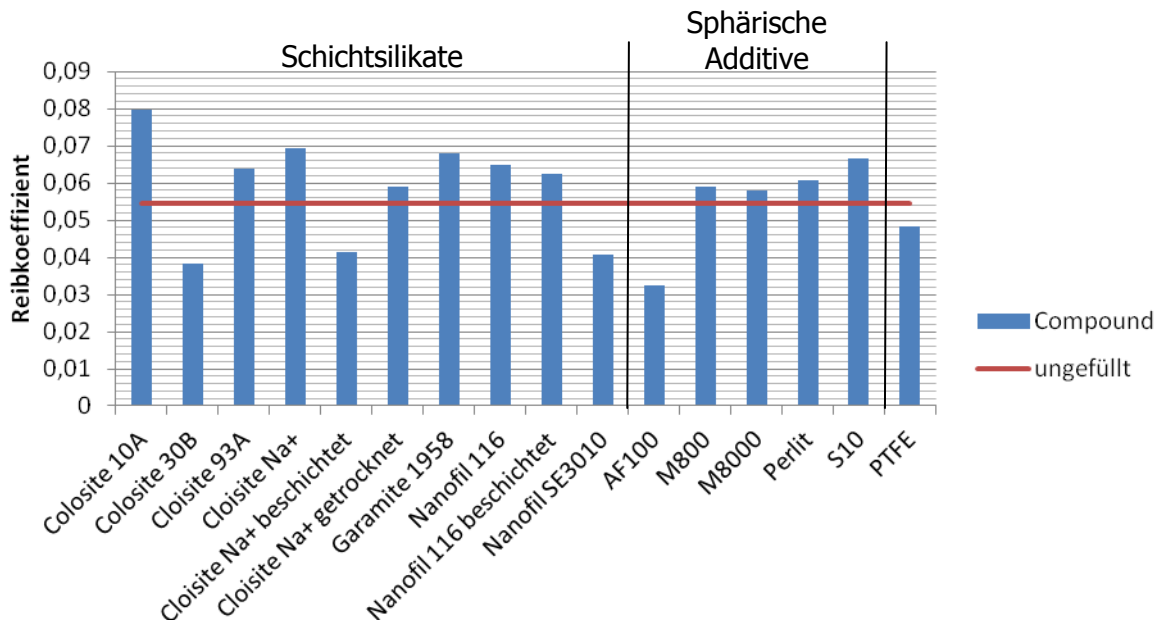


Abbildung 46: Vergleich der Reibkoeffizienten der Compounds von PA 46 Stanyl TW341 mit dem Reibkoeffizienten des ungefüllten Polymers bei 13 N Normalkraft und 130 Umdrehungen pro Minute.

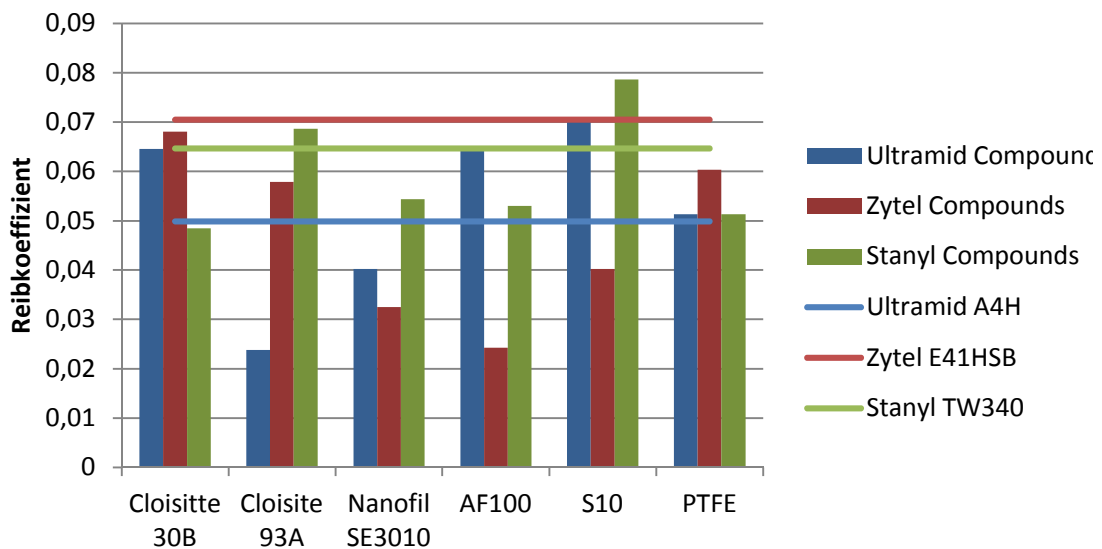


Abbildung 47: Markante Veränderungen des COF durch Additive zu den drei Polyamiden bei 10 N Normalkraft und 100 Umdrehungen pro Minute.

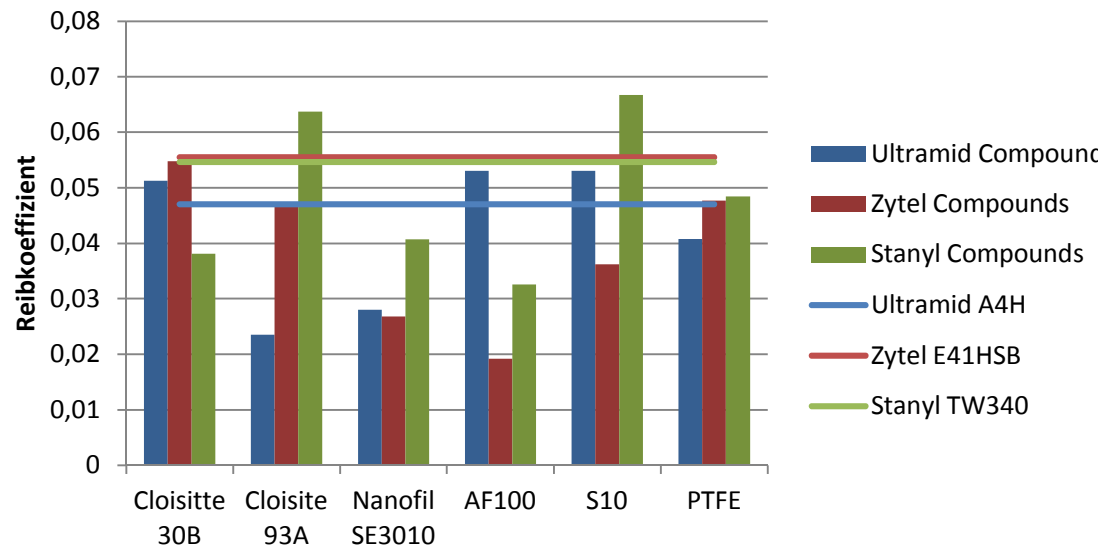


Abbildung 48: Markante Veränderungen des COF durch Additive zu den drei Polyamiden bei 13 N Normalkraft und 130 Umdrehungen pro Minute.