

Auswirkung verschiedener Nanopulver (NanoVit[®]-) im Epoxidharz auf den Verschleiß

Zusammenfassung

Es wird der Einfluss verschiedener Nanopulvermischungen (Graphit, Graphit / SiO₂, Graphit / SiO₂ / Al₂O₃) auf das Verschleißverhalten von Epoxidharz dargestellt. Variiert wurde dabei jeweils der Füllstoffgehalt.

Abstract

The influence of different mixtures of nanopowders (graphite, graphite / SiO₂, graphite / SiO₂ / Al₂O₃) on the wear performance of epoxy resin is shown in this paper. The filler content was varied.

1. EINLEITUNG

Polymere werden zunehmend für Produkte eingesetzt, die tribologischen Belastungen ausgesetzt sind wie Lagerbuchsen, Zahnräder oder Beschichtungen zur Reibungsverminderung. Dabei zeichnen sich die Epoxidharze (EP) durch hohe Warmform- und Medienbeständigkeit sowie Härte und Steifigkeit aus. Besonders bei hohen Einsatztemperaturen und unter korrosiven Bedingungen sind die EP-Harze in derartigen Anwendungen Thermoplasten häufig überlegen [1]. Allerdings sind sie den Metallen und Keramiken in Tragkraft und thermischer Stabilität unterlegen. Um diese Nachteile zu überwinden und damit den Anwendungsbereich zu erweitern, werden Polymeren mechanische Verstärkungsmittel und interne Schmierstoffe zugemischt.

- Durch Zugabe harter Partikel oder Fasern können Tragfähigkeit und Wärmebeständigkeit verbessert werden. Zusätzlich erhöhen diese Verstärkungsphasen auch die Wärmeleitfähigkeit, was zu einer Verringerung der Temperaturen im Reibkontakt führt.
- Selbstschmierende Zuschlagstoffe wie PTFE oder Graphit reduzieren den Reibungskoeffizienten. Dadurch nehmen die Scherbeanspruchung der Oberfläche und häufig auch der Verschleiß ab.

Seit der letzten Dekade werden zunehmend Nanofüllstoffe als Verstärkung für tribologisch beanspruchte Kunststoff-Compounds verwendet. Die Vorteile gegenüber klassischen Mikrofüllstoffen liegen zum Beispiel in der Möglichkeit sehr dünne Beschichtungen und mikromechanische Komponenten herzustellen. Dabei kommt es gewöhnlich nicht zu Versprödung und Minderung der Zugfestigkeit, wie es bei mikroskopischen Füllungen oft der Fall ist [2,3].

Eine Anzahl von Publikationen beschreibt den vorteilhaften Einfluss einiger Nanofüllstoffe (TiO₂, Al₂O₃, SiO₂, Si₃N₄ und andere) auf die tribologischen Eigenschaften von EP [z.B. 4-8]. Die Kombination von Nanofüllstoffen und mikroskaligen Schmier- und Verstärkungstoffen bringt zusätzliche positive Effekte, wie einige neuere Studien zeigen [z.B. 8-14].

Dieses Papier beschäftigt sich mit der systematischen Verschleißoptimierung von Epoxidharz durch Füllen mit Graphit, Nano-SiO₂ und Nano-Al₂O₃ sowie deren Kombinationen und der Variation der Gesamtmenge an Füllstoff. Zusätzlich wurden Zugversuche und Kerbschlagbiegeversuche durchgeführt.

2. EXPERIMENTELLE DETAILS

2.1 Compoundherstellung

Es wurden Epoxidharz-Compounds mit Mischungen verschiedener Nano-Additive in unterschiedlichen Nano-Konzentrationen hergestellt.

Bei dem verwendeten Harz handelt es sich um Bisphenol-A-EP-Harz (EEW 171). Als Härter kam Albidur HE 600 (AEW 174) beides von der Firma nanoresins AG, Geesthacht zur Anwendung. Bei den Nanofüllstoffen handelt es sich um **NanoVit**[®], einer Mischung aus plasmabehandeltem Grafit, einer modifizierten nanoskaligen Siliziumverbindung (SiO_2), sowie um nanoskaliges Aluminiumoxid (Al_2O_3), die von der Firma MSH zur Verfügung gestellt wurden. Als Additiv in Ölen reduziert **NanoVit**[®], unter Druck und Temperatur Verschleiß und Reibung durch Ausbildung einer festhaftenden, elastischen, selbst regulierenden Schicht auf den Reibflächen [15].

Um den Einfluss der einzelnen Komponenten auf die tribologischen Eigenschaften von Epoxidharz besser zu verstehen, wurden das EP hier sowohl mit Grafit als auch mit einer Mischung aus Grafit und SiO_2 sowie der NanoVit-Mischung aus Grafit und SiO_2 und Al_2O_3 gefüllt. Diese Additive wurden mit Epoxidharz zu 2%-igen Masterbatches (2 Gewichts-% Gesamtadditivanteil bezogen auf die Harzkomponente ohne Härter) gemischt und im Anschluss auf verschiedene Füllgehalte verdünnt. So wurden Mischungen von 0,05 wt-% bis 0,2 wt-% Nanopartikeln im fertigen Compound hergestellt und gemäß der Herstellerangaben ausgehärtet. Mit diesen Proben wurde der optimale Nanofüllstoffgehalt (minimale Verschleißrate) ermittelt.

Für die Herstellung der Masterbatches wurde das Nanopulver zunächst mit dem SpeedMixer[™] DAC 150 FVZ der Firma Hauschild Engineering (Abb. 1a) in das Basis harz eingemischt. Dieser arbeitet nach dem Prinzip einer dual asymmetrischen Zentrifuge. Auf einem Drehteller ist unter einem Winkel ein Dreharm befestigt, der den Becher mit dem Probenmaterial aufnehmen kann. Während sich der Teller mit bis zu 3500 min^{-1} dreht, rotiert der Becher in die entgegen gesetzte Richtung. Bei dieser Höchstdrehzahl von 3500 min^{-1} wurde drei Minuten lang gemischt.

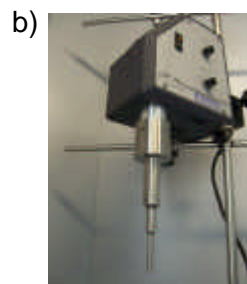


Abbildung 1: SpeedMixer[™]
DAC 150 FVZ der Firma Hauschild

Ultraschall-Prozessor
UP 400S (400W) der Firma Dr. Hielscher

Um eine besser Dispergierung der Partikel zu erhalten, wurde im Anschluss an den Mischprozess mittels Ultraschall dispergiert. Dazu wurde der Ultraschall-Prozessor UP 400S (400 W Leistung) der Firma Dr. Hielscher GmbH (Abb. 1b), mit einer 7 mm Titan-Sonotrode, verwendet. Wegen der Erwärmung des Harzes während des Beschallens, wurde intermittierend in Intervallen von einer Minute bei voller Amplitude gemischt. Die effektive Dauer der Ultraschall-Behandlung betrug 10 Minuten.

Um die Luft, die während des Mischprozesses in das Harzgemisch prozessbedingt eingemischt wurde, wieder aus dem Harz zu eliminieren, wurde die Mischung 10 Minuten lang evakuiert.

Diese Masterbatches wurden mit dem Basisharz auf die entsprechenden Füllgehalte von 0,05% bis 0,2% verdünnt und wiederum im SpeedMixer und mit Ultraschall gemischt. Anschließend wurde der Härter zugegeben. Dieser wurde unter Vakuum mittels Magnetrührer eingemischt.

Die so vorbereiteten Mischungen wurden aus den Bechern in dafür hergestellte Silikonformen gegossen. Die anschließende Aushärtung erfolgte im Ofen entsprechend der Angaben in Tabelle 1.

Tabelle 1: Härtingszyklus für das Bisphenol-A-EP-Harz + Albidur HE 600

Zeit [h]	1	1	1	4
Temperatur [°C]	90	120	140	160

2.2 Versuchsdurchführung

Die hier vorgestellten Verschleißversuche wurden in Kugel-Prisma-Tribometern „Tribodata“ der Dr. Tillwich GmbH Werner Stehr entsprechend ISO 7148-2 durchgeführt. In diesen Tribometern werden die Proben einer gleichförmigen Gleitbewegung ausgesetzt. Das Funktionsprinzip dieses Prüfstandes sowie die Anordnung von Proben und Kugel im Prisma zeigt die Abbildung 2.

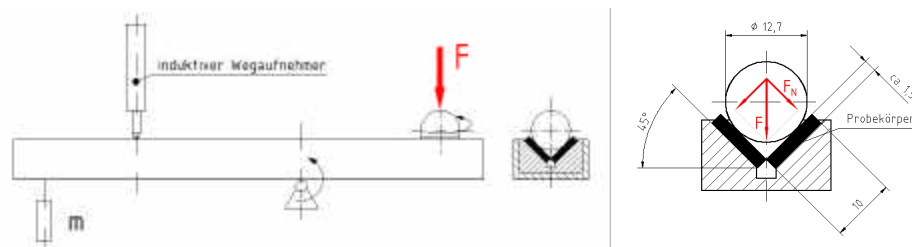


Abbildung 2: Prinzipskizze des Kugel-Prisma-Tribometers, Prismenöffnungswinkel 90°, sowie die Anordnung von Proben und Kugel im Prisma

Die Probenplättchen werden in die Innenflächen eines Prismas geklebt, welches an dem Ende einer Belastungswippe befestigt ist. Durch ein Gewicht wird das Prisma gegen eine 1/2-Zoll Kugel gedrückt, die um ihre vertikale Achse gleichförmig rotiert.

In den durchgeführten Versuchen wurde mit einem Gewicht von 30 N gearbeitet, woraus sich eine Normalkraft von 21,2 N pro Probe ergibt. Die Drehzahl betrug 1 Hz, die Gleitgeschwindigkeit im Reibkontakt lag demnach bei ca. 28,2 mm/s. Die Versuchsdauer betrug 60 Stunden (entsprechend 6000 m Gleitweg). Wegen der sphärischen Kontaktgeometrie ist der $p \cdot v$ -Wert während des Versuchs nicht konstant, sondern nimmt stetig ab. Nach Versuche betragen die Durchmesser der Verschleißmarken dann etwa 2-5 mm, was Kontaktdrücken von 1-7 MPa entspricht. Die $p \cdot v$ -Werte am Versuche betragen demnach maximal 0,2 MPa \cdot m/s.

Ein induktiver Wegaufnehmer erfasste die Bewegung der Wippe. Aus deren Kippbewegung wurde das Verschleißvolumen V berechnet. Das Verschleißvolumen wurde als Funktion des Gleitwegs L aufgetragen. Im stationären Zustand ergab sich dann eine Gerade, an die eine Funktion der Form $V = V_0 + w \cdot L$ gefittet wurde. Die Steigung die-

ser Kurve wurde durch die Normalkraft F_N dividiert, um die spezifische Verschleißrate k_s zu erhalten:

$$k_s = \frac{w}{21,2 N} \left[\frac{mm^3}{Nm} \right]$$

Alle Versuche wurden unter Normklima (23 °C; 50% Luftfeuchtigkeit) durchgeführt. Jede Kombination wurde dreimal getestet, die Ergebnisse gemittelt. Da zwei Tribometer mit jeweils sechs Belastungswippen vorhanden sind, konnten zwölf Proben (vier Kombinationen) gleichzeitig getestet werden. Die Verschleißflächen waren stets die unbehandelten Gussoberflächen.

Die mit unterschiedlichen Nanofüllstoffen gefüllten Proben wurden gegen X5CrNi18-10 getestet. Rauigkeit und Härte des Gegenpartnermaterials sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Gemessene Rauigkeit und Härte der Kugeln

Material	Rauigkeit Rz [µm]	Härte [HV]
X5CrNi18-10	0,31	375

Die Bestimmung der Zugfestigkeit wurde im Zugversuch nach EN ISO 527-2 mit Probekörpertyp 1BA (Länge des parallelen Teils = 30 mm; Breite in der Taille 5 mm; Dicke 2 mm) an einer Zugprüfmaschine der Fa. Instron Wolpert durchgeführt. Zur Kraftmessung kam eine Kraftmessdose mit einer Nennlast von 25 kN zum Einsatz. Die direkte Dehnungsmessung erfolgte am Querschnitt in der Mitte der Probe. Neben dem Maschinenweg wurde mittels induktivem Wegaufnehmer die Längenänderung der Proben direkt gemessen und daraus die Dehnung berechnet. Die Messlänge des Wegaufnehmers betrug 25 mm. Der Probekörper wurde entlang seiner größten Hauptachse bei konstanter Geschwindigkeit von 1 mm/min gedehnt, bis er brach.

Alle Messwerte stellen das arithmetische Mittel aus der Prüfung von 5 - 6 Probekörpern je Probenmaterial dar.

Zur Beurteilung der Zähigkeit wurden Schlagbiegeversuche nach Charpy (EN ISO 179) an ungekerbten Prüfkörpern durchgeführt. Für die Prüfung wurde ein Pendel mit einem Arbeitsvermögen von 0,981 Nm verwendet. Die Probekörper hatten die Abmessung 80 mm x 6 mm x 5 mm. Die angegebene Schlagzähigkeit stellt das arithmetische Mittel aus der Prüfung von 5 Probekörpern je Probenmaterial dar.

3. ERGEBNISSE UND DISKUSSIONEN

3.1 EP-Harz mit Grafit

Abbildung 3 zeigt die Verschleißvolumen-Reibweg-Diagramme der Compounds mit unterschiedlichen Grafit-Konzentrationen. Dargestellt sind jeweils die Mittelwertkurven, die aus den Einzelwerten aus drei Versuchen berechnet wurden.

Während die Verschleißzunahme am Beginn des Versuchs bei allen Compounds relativ gleich ist, bei reinem Harz sogar am niedrigsten, steigt sie dort im weiteren Verlauf stark an und erreicht erst nach mehr als 4000 m Gleitweg einen stationären Bereich mit einer sehr hohen Verschleißrate. Die Probe mit dem niedrigsten Grafitgehalt von 0,05% verhält sich ähnlich. Sie hat am Anfang die nächst niedrigere Verschleißrate, der folgende Anstieg ist allerdings deutlich geringer als der des reinen Harzes. Die Proben mit 0,1%

und 0,15% zeigen beinahe von Anfang an ein lineares Verhalten, während die Verschleißrate der Probe mit dem höchsten getesteten Füllgrad von 0,2% im Laufe des Versuchs abnimmt und im stationären Bereich den niedrigsten Wert aller nur mit Grafit gefüllten Proben erreicht.

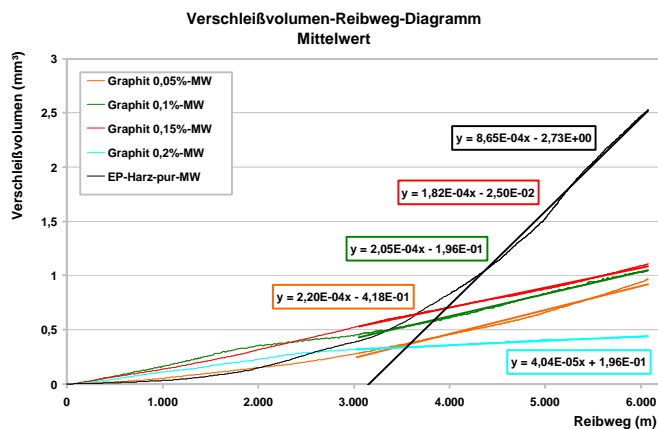


Abbildung 3: Verschleißvolumen über Reibweg von EP-Harz mit unterschiedlichen Grafit-Konzentrationen vs. X5CrNi18-10

In Tabelle 3 sind die spezifischen Verschleißraten (k_s) der EP-Grafit-Proben, sowie die mechanischen Kennwerte zusammengefasst. Die Verschleißraten wurden aus der Steigung der Mittelwertkurven im stationären Bereich ermittelt.

Tabelle 3: Verschleißraten sowie mechanische Kennwerte von EP-Harz mit unterschiedlichen Grafit-Konzentrationen

EP-Harz mit Grafit	k_s [10^{-3} mm ³ /Nm]	a_{cu} [mm ³ /Nm]	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]	E-Modul [MPa]
0,05%	1.037	12	47,18	2,48	2.770
0,10%	967	8	54,69	3,39	2.780
0,15%	858	8	46,76	2,39	2.926
0,20%	190	9	53,71	2,52	3.019
EP-Harz pur	4.078	22	71,39	3,68	2.655

3.2 EP-Harz mit Grafit und SiO₂

Die Verschleißvolumen-Reibweg-Diagramme der Proben, die mit Grafit und SiO₂ gefüllt sind, zeigt Abbildung 4 im Vergleich zum ungefüllten Harz.

Die gefüllten Proben verhalten sich von Anfang an fast linear, der Anstieg der Verschleißrate, der bei dem reinen Harz zu sehen ist, tritt nicht auf. Die Verschleißrate im stationären Bereich ist somit deutlich geringer. Einzige Ausnahme bildet der mit 0,05% gefüllte Compound. Dort ist der Verschleiß schon zu Beginn des Versuchs höher als bei allen anderen Proben, der Kurvenverlauf ist zudem leicht progressiv. Dennoch ist die spezifische Verschleißrate im stationären Bereich kleiner als die des reinen Harzes.

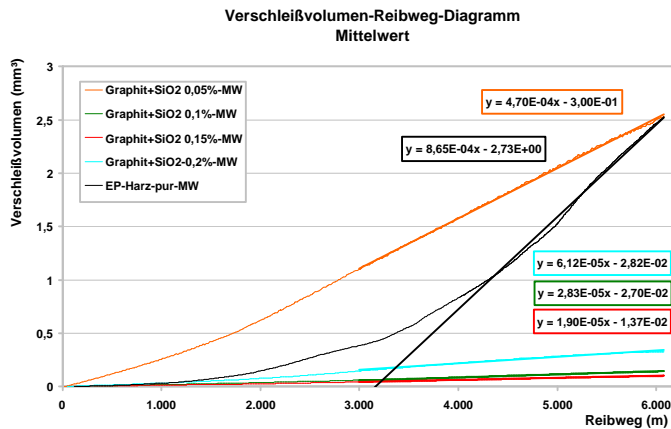


Abbildung 4: Verschleißvolumen von EP-Harz mit unterschiedlichen Konzentrationen der Mischung aus Graphit und SiO₂

Tabelle 4 stellt die aus Abbildung ermittelten spezifischen Verschleißraten den mechanischen Kennwerten gegenüber.

Tabelle 4: Verschleißrate und mechanische Kennwerte der mit unterschiedlichen Konzentrationen an Graphit und SiO₂-gefüllten Compounds

EP-Harz mit Graphit / SiO ₂	k _s [10 ⁻⁸ mm ³ /Nm]	a _{cu} [mm ³ /Nm]	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]	E-Modul [MPa]
0,05%	2.216	11	43,89	2,08	2.756
0,10%	133	12	71,44	4,36	2.614
0,15%	89	11	74,54	5,75	2.433
0,20%	288	10	64,47	3,26	2.795
EP-Harz pur	4.078	22	71,39	3,68	2.655

3.3 EP-Harz mit Graphit, SiO₂ und Al₂O₃ (NanoVit[®])

Die Mittelwertkurven von EP-Harz mit unterschiedlichen Graphit / SiO₂ / Al₂O₃ – Konzentrationen sind in Abbildung 5 dargestellt.

Wieder verlaufen die Kurven der gefüllten Harze von Anfang an fast linear mit sehr geringer Steigung. Eine Ausnahme bildet der Compound mit 0,05% NanoVit[®]. Hier ist der Verschleiß am Anfang wieder relativ groß. Der Kurvenverlauf ist allerdings degressiv, so dass nach ca. 1000 m eine stationäre Phase mit ebenfalls geringer Steigung erreicht wird. Nach kurzer Zeit weisen alle Compounds einen deutlich geringeren Verschleiß als das Reinharz auf.

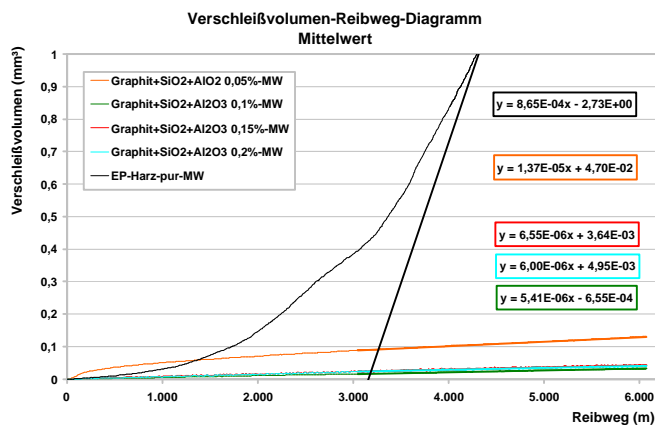


Abbildung 5: Verschleißvolumen von EP-Harz mit unterschiedlichen Graphit / SiO₂ / Al₂O₃-Konzentrationen

In Tabelle 5 sind wieder die spezifischen Verschleißraten und mechanischen Kennwerte der mit NanoVit gefüllten Proben zusammengefasst.

Tabelle 5: Verschleißvolumen und mechanische Kennwerte von EP-Harz mit unterschiedlichen Graphit / SiO₂ / Al₂O₃-Konzentrationen

EP-Harz mit Graphit / SiO ₂ / Al ₂ O ₃	k _s [10 ⁻⁸ mm ³ /Nm]	a _{cu} [mm ³ /Nm]	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]	E-Modul [MPa]
0,05%	65	11	51,84	2,69	2.267
0,10%	26	13	73,61	5,58	2.136
0,15%	31	12	75,56	5,69	2.330
0,20%	28	13	57,78	2,82	3.002
EP-Harz pur	4.078	22	71,39	3,68	2.655

3.4 Gegenüberstellung der verschiedenen Materialien

Die folgenden Diagramme verdeutlichen die Abhängigkeit der Eigenschaften vom Füllstoffgehalt und der Zusammensetzung. In Abbildung 6 sind die Verschleißraten der Compounds mit den verschiedenen Füllstoffmischungen in Abhängigkeit vom Gesamtfüllstoffgehalt aufgetragen.

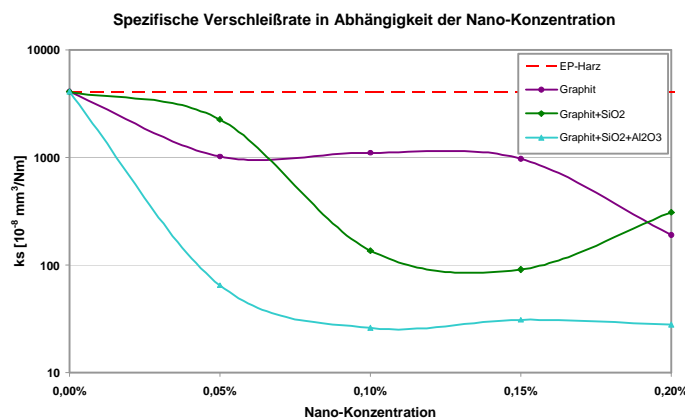


Abbildung 6: Auswirkung des Füllstoffgehalts auf die spezifische Verschleißrate

Zunächst fällt auf, dass alle gefüllten Proben eine zum Teil deutlich geringere spezifische Verschleißrate aufweisen als das reine Harz. Bei den Compounds die mit der **NanoVit**[®]-Mischung aus Graphit, SiO₂ und Al₂O₃ gefüllt sind, ist diese bei allen Füllstoffgehalten um zwei Größenordnungen kleiner und damit auch geringer als bei allen anderen getesteten Materialien.

Das Füllen mit Graphit bewirkt eine Verbesserung des Verschleißwiderstandes mit steigendem Füllstoffgehalt, während die beiden Füllstoffmischungen, die nanoskaliges SiO₂ bzw. Al₂O₃ enthalten, zunächst eine Abnahme der Verschleißrate mit steigendem Füllstoffgehalt aufweisen. Diese erreicht bei 0,1% bzw. 0,15% ein Minimum und steigt dann mit zunehmendem Füllstoffgehalt wieder leicht an, bzw. bleibt innerhalb des getesteten Bereichs fast konstant niedrig. Dieses Durchlaufen eines Verschleißminimums ist typisch für nanopartikelverstärkte Kunststoffe (vergl. z.B. [7-11]).

Abbildung 7 zeigt die Zusammenhänge noch einmal als Balkendiagramm. Dort sind auch die Fehlerbalken eingezeichnet, deren Begrenzungen der höchste bzw. der niedrigste Wert aus den drei Einzelmessungen bilden. Es ist erkennbar, dass die Compounds mit der geringsten Verschleißrate auch die geringste Streuung aufweisen.

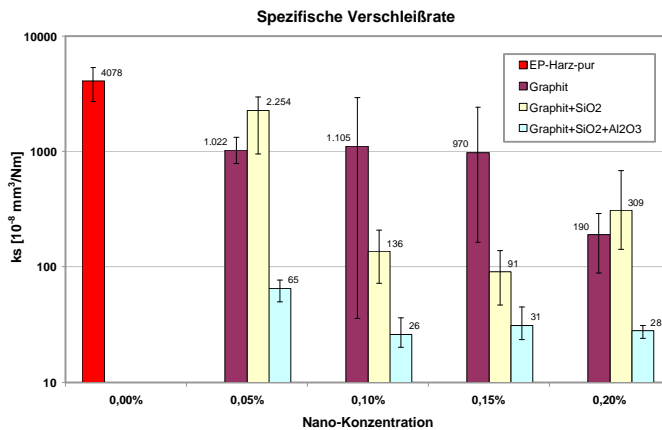


Abbildung 7: Vergleich der spezifischen Verschleißraten

Die Schlagzähigkeiten aller getesteten Materialien sind in Abbildung 8 gegenübergestellt.

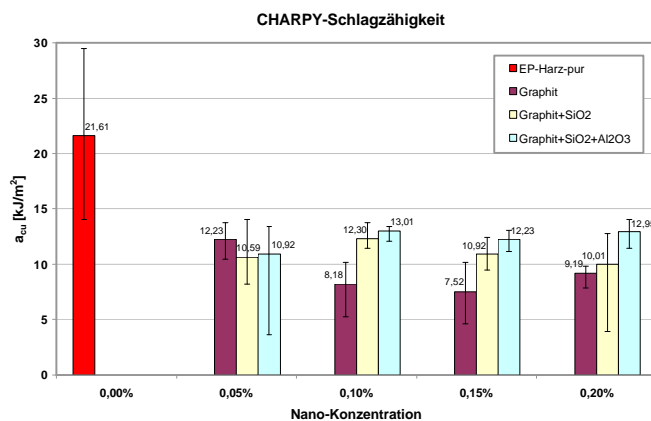


Abbildung 8: Vergleich der CHARPY-Schlagzähigkeit

Von den gefüllten Harzen weisen die Proben mit dem Gemisch aus allen drei Füllstoffen bei Füllgraden von 0,1% bis 0,2% die höchsten Schlagzähigkeiten mit der geringsten Streuung auf (dargestellt ist wieder der höchste und der niedrigste tatsächlich gemessene Wert). Diese Proben hatten auch den höchsten Verschleißwiderstand. Die Zähigkeit aller gefüllten Compounds ist allerdings geringer als die des Reinharzes. Die Unterschiede der verschiedenen gefüllten Proben untereinander sind zudem geringer als die Differenz zum ungefüllten Harz, welches allerdings auch eine hohe Streuung aufweist. Den negativsten Einfluss auf die Zähigkeit hat das Graphit, was sich auch in der Bruchdehnung widerspiegelt, wie Abbildung 10 zeigt.

In Abbildung 9 werden die Zugfestigkeiten der Proben verglichen. Während die Proben mit Mischungen aus Graphit und SiO₂ bzw. Graphit, SiO₂ und Al₂O₃ bei 0,1% und 0,15% Füllstoffanteil eine leicht höhere Zugfestigkeit als das Reinharz aufweisen, wird sie bei den anderen Konzentrationen verringert. Graphit hat auch hier wieder den größten Einfluss.

Ein fast identisches Bild zeigt sich beim Vergleich der Bruchdehnungen in Abbildung 10. Die mehrkomponentigen Compounds übertreffen auch hier bei Konzentrationen von 0,1% und 0,15% die Werte des Reinharzes, während bei den anderen Konzentrationen und beim Graphit ein Abfall zu beobachten ist.

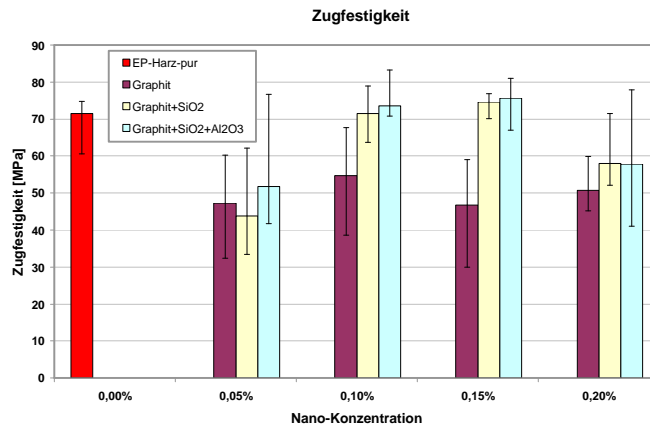


Abbildung 9: Vergleich der Zugfestigkeit

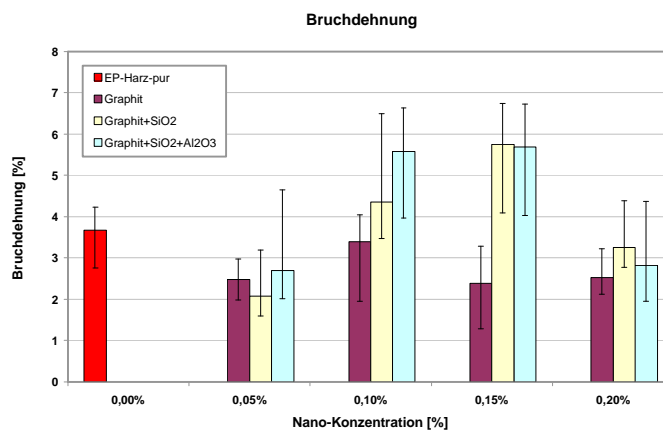


Abbildung 10: Vergleich der Bruchdehnungen

Der E-Modul wird hingegen durch das Grafit leicht erhöht (Abbildung 11), während die anderen Compounds den E-Modul kaum beeinflussen, bzw. zu einer Verringerung führen. Letzteres ist am stärksten bei dem Mehrkomponenten-Compound mit Al₂O₃ der Fall. Ausnahme bilden die Compounds mit 0,2% Gesamtfüllstoffanteil. Dort ist der E-Modul gegenüber dem des Reinharzes leicht erhöht, dessen E-Modul aber im Streubereich der gefüllten Harze liegt.

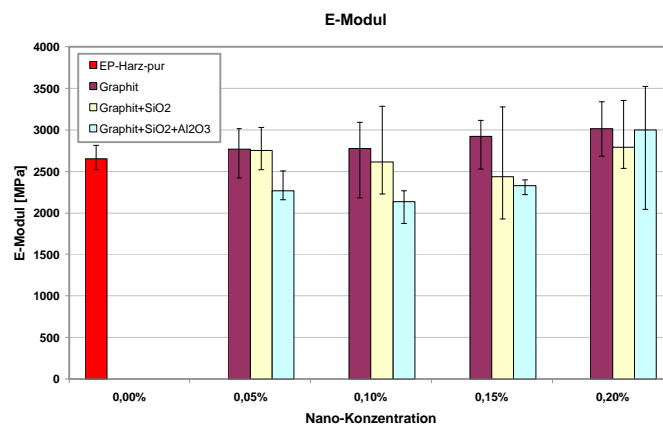


Abbildung 11: Vergleich des E-Moduls

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Durch das Füllen mit Mischungen aus plasmabehandeltem Grafit, Nano-SiO₂ sowie Nano-Al₂O₃ (**NanoVit**[®]) kann der Verschleiß von Epoxidharz signifikant (bis zu zwei Größenordnungen) verringert werden. Den deutlichsten Effekt zeigte der Mehrkomponentencompound aus allen drei Füllstoffen. Dort zeigt sich ein leichtes Minimum der Verschleißrate bei 0,1%. Bei dem Compound mit Grafit und SiO₂ war bei 0,15% ein deutliches Minimum zu beobachten, allerdings bei höheren Verschleißraten. Beim Grafit-EP-Compound sinkt die Verschleißrate mit steigendem Füllstoffgehalt.

Die verschleißbeständigen Compounds zeigen kein spezielles Einlaufverhalten, ein Anstieg der Verschleißrate findet im Gegensatz zum ungefüllten Harz nicht statt.

Die Zähigkeit wird dagegen negativ durch die Füllstoffe beeinflusst. Die Compounds mit dem höchsten Verschleißwiderstand weisen allerdings im Vergleich zu den anderen gefüllten Compounds die höchste Zähigkeit sowie die höchste Zugfestigkeit und Bruchdehnung auf. Die Zugfestigkeit ist dabei leicht, die Bruchdehnung deutlich höher als die des Reinharzes. Zugfestigkeit und Bruchdehnung der anderen Compounds sind gegenüber den Werten des Reinharzes dagegen vermindert.

Die E-Module der gefüllten Compounds haben in etwa das Niveau des Reinharzes, wobei hier das Grafit eine leichte Erhöhung bewirkt, während die mit Al₂O₃ gefüllten Materialien bei den niedrigen Füllgraden zu einer Verringerung führen.

Durch Füllen mit Al₂O₃ konnte insbesondere der Verschleiß der multikomponentigen Epoxy-Compounds weiter verbessert werden. Um den Einfluss des Al₂O₃ besser zu verstehen, wären weitere Untersuchungen, bei denen das Harz nur mit Aluminiumoxid bzw. mit Mischungen aus Al₂O₃ und Grafit sowie Kombinationen von Al₂O₃ und SiO₂ gefüllt wird, von Nöten.

Um die Compounds weiter zu optimieren besteht darüber hinaus die Möglichkeit, die Verhältnisse der Füllstoffe zueinander zu variieren. Zum Beispiel wäre zu untersuchen, ob Grafit auch in Kombination mit den Nanofüllstoffen bei höherem Füllgrad den Verschleiß weiter verringern kann.

Nicht zuletzt bieten die kleinen Abmessungen der Füllstoffe und das Potenzial, verbesserte tribologische Eigenschaften in polymeren Matrices zu erzielen, auch interessante Möglichkeiten für den Einsatz in Gleitlacken.

Fachhochschule Lübeck, Mönkhofer Weg 239, 23562 Lübeck, Email: Jacobs@FH-Luebeck.de, Tel.: 0451-300-5323 / 5233, Fax: 0451-300-5037

MSH Mineralstoffhandel GmbH, Nicolaus-Otto Str. 10, 89079 Ulm-Donautal, E-mail: u.eschner@msh-nanovit.de, Tel.: 0731-Tel.: 0731-705 33 40, Fax: 0731-705 33 41

QUELLEN

- [1] O. Jacobs, R. Jaskulka, Ch. Tegethoff, G. Schlicke, J. Brand, Optimierung von Gleitpaarungen auf Kunststoffbasis für unterschiedliche Einsatzbedingungen, 44. Tribologie-Fachtagung, Göttingen, 2003
- [2] F.H. Gojny, M.H.G. Wichmann, U. Köpke, B. Fiedler, K. Schulte, Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content, *Comp. Sci. Technol.* 64 (2004) 2363-2371
- [3] Ch. Roscher, J. Adam, Ch. Eger, M. Pyrlík, Novel Radiation Curable Nanocomposites with Outstanding Material Properties, *Proc. RadTech 2002*, April 28 – May 1, 2002, Indiana
- [4] C.B. Ng, L.S. Schadler, R.W. Siegel, Synthesis and Mechanical Properties of TiO₂-Epoxy Nano-composites, *NanoStructured Materials* 12 (1999) 507-510
- [5] B. Wetzel, M.Z. Rong, F. Hauptert, K. Friedrich, Verbesserung der Eigenschaften von Polymeren durch Nanopartikel, in: M. Neitzel (Hrsg.), *IVW-Kolloquium 2002*, Kaiserslautern 2002
- [6] Ming Qiu Zhang, Min Zhi Rong, Shu Li Yu, Bernd Wetzel, Klaus Friedrich, Effect of particle surface treatment on the tribological performance of epoxy based nanocomposites, *Wear* 253 (2002) 1086-1093
- [7] Guang Shi, Ming Qiu Zhang, Min Zhi Rong, Bernd Wetzel, Klaus Friedrich, Friction and wear of low nanometer Si₃N₄ filled epoxy composites, *Wear* 254 (2003) 784-796
- [8] O. Jacobs, B. Schädel, M. Cholewa, Verschleißminimierte Nano-Composites auf Epoxidharzbasis, Tribologie-Fachtagung, Göttingen, 2004
- [9] K. Friedrich, Z. Zhang, A.K. Schlarb, Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites, *Composites Science and Technology* 65 (2005) 2329-2343
- [10] O. Jacobs, B. Schädel, G. Rüdiger, Verschleißverhalten von Nano-SiO₂-gefülltem Epoxidharz, *Tribologie und Schmierungstechnik*, 2007, in press
- [11] O. Jacobs, W. Xu, B. Schädel, W. Wu, Wear Behaviour of Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Resin Composites, *Tribol. Lett.* 23 (2006) 65-75
- [12] M.L. McCook, B. Boesl, D.L. Burris, W.G. Sawyer, Epoxy, ZnO, and PTFE nanocomposite: friction and wear optimisation, *Tribology Letters* 22 (2006) 253-257
- [13] Li Chang, Zhong Zhang, Lin Ye, Klaus Friedrich, Tribological properties of epoxy nanocomposites III. Characteristics of transfer films, *Wear* 262 (2007) 699-706
- [14] H. Chen, O. Jacobs, W. Wu, G. Rüdiger, B. Schädel, Effect of Dispersion Method on Tribological Properties of Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Resin Composites, *Polymer Testing*, 2007, in press
- [15] TÜV Thüringen, Prüfbericht 8141.076.06, Arnstadt, 2006