

Tribometrie – eine unterschätzte Wissenschaft

Dr. Markus Grebe, M.Eng.; Kompetenzzentrum Tribologie an der Hochschule Mannheim

KURZZUSAMMENFASSUNG

Leider unterschätzen viele, welche Potentiale aber auch welche Fehlerquellen in tribologischen Prüfungen stecken. Moderne Tribometer gaukeln den Nutzern vor, dass quasi jeder tribologische Prüfungen erfolgreich durchführen und auswerten kann. In dem Vortrag wird der Unterschied zwischen einfacher Modellprüftechnik (z.B. Stift/Scheibe-Tests) und speziell geplanten Simulationsprüfungen auf Tribometern erläutert. Es wird aufgezeigt, wie ein anwendungsnaher Tribometerversuch aufbauend auf der Systemanalyse entwickelt werden kann und was dabei zu beachten ist. Ein weiterer häufig unterschätzter Aspekt ist die wissenschaftliche Auswertung und Bewertung der durchgeführten Versuche.

SUMMARY

It seems that more and more people believe that tribological testing (tribometry) is a quite easy job. Unfortunately it is not! The article explains a scientific way of tribological testing based on a system analytic view. It explains why it is maybe difficult to transfer test rig results to real tribological systems and shows ways to increase the significance of laboratory tests by using tribological system analysis. In the paper the advantages and disadvantages of model laboratory tests are discussed. Typical mistakes in laboratory testing are explained.

Einleitung

Das Kompetenzzentrum Tribologie verfügt zurzeit über mehr als 50 verschiedene Tribometer für Modell- und Freigabetesten und zur Simulation unterschiedlichster tribologischer Systeme. Ergänzt wird der umfangreiche Prüfmaschinenpark durch Geräte und Apparaturen zur hochgenauen Analyse und Dokumentation von Oberflächen sowie für die Viskosimetrie, die Untersuchung des Alterungsverhaltens und die Ermittlung chemisch/physikalischer Kennwerte. Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsprojekte sind Untersuchungen unter Grenz- und Mischreibungsbedingungen. Das Kompetenzzentrum Tribologie arbeitet bei der Optimierung von tribologischen Systemen nach einem ganzheitlichen, systemanalytischen Ansatz (siehe „Leitbild des Kompetenzzentrums Tribologie“). Das heißt, dass prinzipiell erst einmal alle möglichen Optimierungsansätze wie Werkstoffe (Metalle, Keramiken, Kunststoffe), Beschichtungen und Schmierstoffe (Öle, Fette, Feststoffe) in Betracht gezogen werden. Ganz wichtig ist aber auch, nach maschinenbaulichen Lösungen zu suchen. Häufig liegt das Problem bereits in einer ungünstigen Konstruktion, ungeeigneter Endbearbeitung oder anderer systematischer Mängel. Mögliche Lösungsansätze werden dann in speziell und individuell geplanten Tribometerversuchen evaluiert. Erst am Ende erfolgt die Bewertung, in die dann auch wirtschaftliche Gesichtspunkte eingehen. Neben den öffentlich geförderten Projekten stellen auch bilaterale Kleinprojekte für KMU sowie der Technologietransfer einen Schwerpunkt der Arbeit dar.

Leitbild des Kompetenzzentrums Tribologie

Im Kompetenzzentrum Tribologie werden angewandte Forschung und Wissenschaft mit zeitgemäßer Lehre verbunden. Schwerpunkt der interdisziplinären wissenschaftlichen Arbeit sind das Erforschen und Optimieren tribologischer Systeme auf Basis praxisnaher Modell- und Bauteilprüftechnik. In der Lehre liegt der Schwerpunkt auf dem systemanalytischen Gedanken der Tribologie sowie den Grundlagen von Reibung, Verschleiß und Schmierung mit praxisnahem Bezug.

In diesem Zusammenhang stellt sich immer wieder die Frage über den Nutzen von Modell- und Laborprüfungen. Insbesondere die Übertragbarkeit der Ergebnisse wird hierbei häufig von skeptischen Kunden angezweifelt. Leider basieren viele dieser Zweifel tatsächlich auf schlechten Erfahrungen. Viele Kunden berichten von vollkommen gegensätzlichen Ergebnissen in den Modelltest und später in der Anwendung. Bei genauerer Betrachtung solcher Fälle muss man häufig feststellen, dass die Laborversuche für die praktische Fragestellung falsch ausgewählt, mit falschen Parametern durchgeführt oder einfach falsch interpretiert wurden. In den letzten Jahren mussten wir mehrfach erkennen, dass es häufig an einem wissenschaftlichen Ansatz und ausreichend tribologischem Background fehlt. Teilweise kaufen sich Institute oder Firmen, die sich jahrelang mit anderen Themen beschäftigt haben ein modernes Tribometer und wollen nun „*auch noch den tribologischen Kennwert ermitteln*“ (Originalzitat einer Firma, die sich zuvor auf chemische Materialanalysen konzentriert hatte). Das gleiche Problem sehen wir bei Instituten oder Abteilungen, die bisher auf die Computersimulation spezialisiert waren und denen nur noch der „*tribologische Kennwert*“ fehlt, um ein tribologisches System hochgenau im Computer abbilden zu können. Unterstützt wird diese Entwicklung von den Tribometerherstellern, die natürlich ein großes Interesse haben, ihre Geräte so zu bewerben, als ob jeder ohne große Vorkenntnisse problemlos tribologische Versuche durchführen könne. Das mag für einfache Modellprüfungen nach Norm vielleicht noch gelten. Werden die Versuche aber etwas anspruchsvoller, sind Bediener ohne Tribologie- und Maschinenbaukenntnisse überfordert.

Dieser Artikel soll eine wissenschaftliche Vorgehensweise bei der Auswahl und dem Design geeigneter Laborprüfungen aufzeigen sowie Hinweise zur Auswertung der Versuche geben. Aufgrund des beschränkten Seitenumfangs sind die meisten Punkte allerdings lediglich stichpunktartig aufgezählt.

Wissenschaftliche Vorgehensweise in der Laborprüftechnik

Tribologische Prüfungen können – hoffentlich bekanntermaßen - in verschiedene Arten (Kategorien) unterteilt werden. Zwischen der so genannten Feldprüfung und der Modellprüfung gibt es vier verschiedene Zwischenstufen (Abbildung 1). Diese und weitere Begriffsdefinitionen in der Tribologie enthält das GfT-Arbeitsblatt 7 [GfT7], das die Inhalte verschiedener ausgelaufener DIN-Normen enthält (u. a. ehemalige DIN 50322) und kostenlos auf den Seiten der GfT heruntergeladen werden kann (www.gft-ev.de).

Unter dem Begriff Tribometrie versteht man allgemein die mechanisch-dynamische Prüftechnik in der Tribologie. Obwohl diese aus sechs Kategorien besteht wird der Begriff aber meistens nur für Prüfungen nach Kategorie VI und V verwendet. Auch dieser Artikel konzentriert sich auf die Laborprüftechnik. Sind die zu untersuchenden Bauteile allerdings ausreichend klein oder können die interessanten Bereiche herauspräpariert werden, ist es durchaus möglich, auch Bauteilversuche auf einem Labortribometer durchzuführen. Gerade auf diese sehr anwendungsnahen Prüfungen wird später noch detailliert eingegangen.

Modellprüfung versus Simulationsprüfung

Bereits zwischen der reinen Modellprüfung (Kategorie VI) und der anwendungsnäheren Simulationsprüfungen (Kategorie V) gibt es signifikante Unterschiede auf die im Weiteren eingegangen wird.

Reine Modellprüfungen

Ziel der reinen Modellprüfung ist das Abtesten einer Einzeleigenschaft relativ unabhängig von der tribologischen Beanspruchung des realen Systems. Zu dieser Gruppe zählen zum Beispiel Tests unter sehr hohen örtlichen Pressungen zur Ermittlung der Hochdrucktragfähigkeit (engl: *Extreme-Pressure-Properties*). Der bekannteste Test dürfte hier die Ermittlung der Schweißkraft im Vierkugel-Apparat (VKA) sein (DIN 51350 T2 und 4). Weitere bekannte Vertreter sind die Norm-SRV-Prüfungen nach DIN 51834 oder klassische Pin-on-disc-Tests.

Reine Modellprüfungen sind relativ einfach und schnell durchzuführen, da es hierfür in der Regel Normen oder Laborvorschriften gibt. Nichtsdestotrotz müssen die Versuche ordentlich geplant, durchgeführt und ausgewertet werden. Gerade für die Auswertung ist auch ein gewisses tribologisches Verständnis notwendig, da man ansonsten systematische Fehler nicht erkennt. So werden in Ringversuchen regelmäßig Verschleißkalotten-Durchmesser angegeben, die kleiner als die Kontaktfläche der Hertzschen Pressung sind. Auch die beliebige Wahl des Reinigungsmediums - unabhängig von den Vorgaben der Norm - hat schon so manchen Arbeitskreis-Obmann zur Verzweiflung gebracht.

Vorgehen bei der Modellprüfung

Zu aller erst muss die Prüferin oder der Prüfer entscheiden, welche Eigenschaft eines Schmierstoffs oder Werkstoffs untersucht werden soll. Anschließend erfolgen die Auswahl einer hierfür geeigneten Prüfmaschine und die Festlegung der geeigneten Prüfparameter. Hierbei kann man sich häufig an Normvorgaben halten. Eine gute und aktuelle Norm sollte auch gleich eine Arbeitsanleitung und praktische Hinweise liefern. Die ermittelten Werte können relativ leicht mit Literaturwerten verglichen werden, da die Variationsmöglichkeiten hinsichtlich Beanspruchungskollektiv und Elementen tendenziell gering sind. Problematisch ist, dass die Werte verschiedener Prüfmaschinen nur schlecht oder gar nicht miteinander verglichen werden können [CZIC2002], auch wenn scheinbar ähnliche Eigenschaften abgeprüft werden. So zeigen aktuelle Untersuchungen von RIGO im Rahmen seiner Promotion deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen EP-Tests wie VKA-Schweißkraft (DIN 51350-T2), SRV-Laststeigerungslauf (ASTM 7421-11) oder der Reichert- und Brugger-Prüfung (DIN 51347) [RIGO2016]. Der Grund hierfür ist, dass sich die Beanspruchungskollektive trotz gleicher Zielsetzung der Prüfung (hier z.B. EP-Test) deutlich unterscheiden. Selbst bei ähnlichen Hauptprüfbedingungen haben zahlreiche nicht so offensichtliche Randbedingungen einer Prüfung einen großen Einfluss auf das tribologische System und somit auf das Messergebnis.

Zu nennen sind hier beispielsweise:

- Pressungsverteilung,
- Eingriffsverhältnis,
- Schmierstoffversorgung,
- thermische Bedingungen,
- Schwingungen,
- Rund-/Planlauf usw.

Aussagefähigkeit der Modellprüfung

Da das tribologische System in der Modellprüfung stark von dem des realen Systems abweicht, ist auch die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf ein reales Bauteil äußerst problematisch. Der Anwender darf nicht vergessen, dass er lediglich eine Einzeleigenschaft abprüft und diese auch noch unter ganz speziellen Modellbedingungen. Vergleichende Untersuchungen, beispielsweise zum Ansprechverhalten von Additiven unter vorgegebenen Bedingungen, sind somit möglich - Aussagen zum Verhalten im realen Bauteil dagegen nur sehr eingeschränkt!

Werte für Normalkraft, Drehzahl oder Temperatur in den Modellprüfungen sowie die zu verwendenden Werkstoffe sind häufig historisch und gerätetechnisch bedingt und stellen nicht wirklich sinnvolle und anwendungsnahe Parameterkombinationen dar. Schaut man sich z.B. die Drehzahlen oder Frequenzen von Normprüfungen an, so sind dies häufig „zufällig“ die Werte unregelmäßiger Asynchronmotoren und basieren nicht auf wissenschaftlichen Überlegungen. Die Vielzahl der Modellprüfungen mit Punktkontakte basiert auf der Tatsache, dass die teilweise hohen Pressungen in der Praxis auf relativ kleinen Laborprüfmaschinen nur im Punktkontakt erreicht werden. Außerdem ist die Ausrichtung eines Punktkontaktes unproblematisch, sodass Fehler bei der Durchführung reduziert werden, was dann eine gute Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit in der Norm ergibt.

Wichtig für die Aussagefähigkeit von Modellversuchen ist auch die Teilnahme an Ringversuchen, um die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit des Verfahrens zu überprüfen und mit anderen Gerätenutzern abzugleichen. Häufig ist dies die einzige Möglichkeit, Fehler am Gerät und/oder auch bei der Bedienung durch das Personal aufzudecken. Wenn neben der bereits beschriebenen Problematik der Modellprüfung auch noch unzulässige Schwankungen und Messfehler hinzukommen, ist die Prüfung wirklich reine Zeit- und Geldverschwendung.

Grundsätzlich ist es unserer Erfahrung nach leichter, mit gezielten Modellprüfungen, schlechte Formulierungen / Varianten herauszufiltern als gute zu erkennen. Fällt ein Muster in der Modellprüfung bereits negativ auf, ist dies in vielen Fällen ein KO-Kriterium. Fällt es positiv auf, ist dies in der Regel noch lange kein Freigabekriterium.

Simulationsprüfung

Im Gegensatz zur reinen Modellprüfung benötigt man für einen „beanspruchungsähnlichen Versuch mit Probekörpern“ [GfT7], nachfolgend Simulationsprüfung genannt, viel Erfahrung und tribologisches Verständnis. Häufig gibt es hierzu keinen Standards oder Laborvorschriften sodass jede Prüfung individuell neu geplant werden muss. Ziel einer jeden Simulation ist es, möglichst nah an der Praxis zu bleiben und dennoch Vorteile gegenüber einer Prüfung einer höheren Kategorie (z.B. Prüfstandversuch oder Feldprüfung) zu erzielen. Diese Vorteile sind üblicherweise kürzere Prüfzeiten und eine höhere Messgenauigkeit unter fest definierten und nachvollziehbaren Randbedingungen.

Abbildung 2 zeigt, welche Größen nach aktuellem Wissensstand bei der Simulationsprüfung verändert werden dürfen

	Systemgröße	Größen, die im Prüfgerät und in dem zu simulierenden Tribosystem sein müssen.	
		gleich	verschieden
Beanspruchungskollektiv	Bewegungsform	X	
	Bewegungsablauf	X	
	Normalkraft		X
	"wahre" Kontaktpressung	X	(X)
	Geschwindigkeit		
	Temperatur	X	
	Zeit		X
Struktur des Tribosystems	Anzahl der stofflichen Elemente	X	
	Stoffeigenschaften der Elemente	X	
	Formeigenschaften der Elemente		X
	Wechselwirkungen zwischen den Elementen		
	a) Reibungszustand b) Verschleißmechanismen	X	

Abbildung 1: Parameter, die in der Laborprüfung verändert werden dürfen [CZIC2002]

und welche nicht. Dazu ist es allerdings notwendig, das reale System genauestens zu kennen. Dieser Punkt gestaltet sich in der Praxis häufig schwieriger als gedacht. Nur selten erhält man ausreichend Informationen über das reale System und die dort vorherrschenden realen Beanspruchungsbedingungen.

Häufig gibt es nur theoretische Annahmen basierend auf idealen Geometrien und Verhältnissen, die die Realität nicht widerspiegeln. Daraus resultieren dann massive Probleme bei der Systemanalyse und der darauf aufbauenden Versuchsplanung.

Vorgehen bei der Simulationsprüfung

Der wichtigste Punkt bei der Simulationsprüfung ist die umfangreiche Systemanalyse [CZIC2010] (Abbildung 3). Fehler bei der Einschätzung der realen tribologischen Beanspruchung oder den Stoff- und Formeigenschaften der Elemente führen zwangsläufig zu einer fehlerhaften Modellbildung und einem ungeeigneten Laborversuch.

Systemanalyse

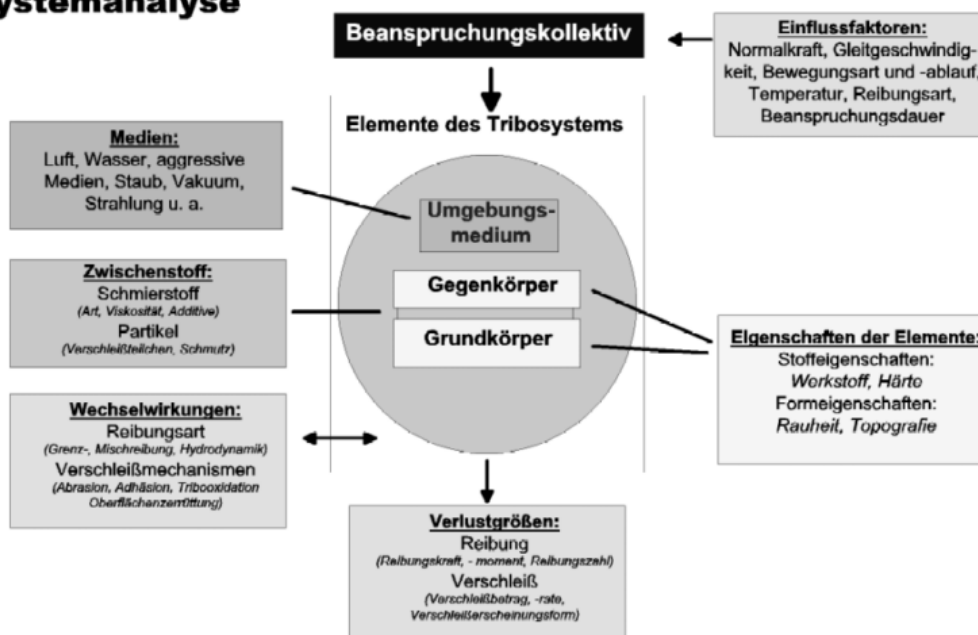


Abbildung 2: Systemanalyse

Eine beliebte Fehlerquelle stellt beispielsweise das Nichtberücksichtigen der wahren Kontaktfläche dar, die sich aufgrund von realen Form- und Lagefehlern sowie der Rauigkeiten einstellt. Die wahre Kontaktfläche ist immer deutlich kleiner als die geometrische Kontaktfläche. Unwissentlich können hier leicht Differenzen um mehrere Größenordnungen zwischen realem System und Laborversuch entstehen. Ein schönes Beispiel ist die kardanische Lagerung von Proben im Laborversuch, um einen idealen Linien- oder Flächenkontakt zu erzeugen. Durch diese Lagerung entfällt ein aufwändiges und fehleranfälliges Ausrichten der Prüflinge. Der Versuch lässt sich schnell einrichten und zeigt eine gute Wiederholbarkeit. Probleme mit der Übertragbarkeit ergeben sich, wenn die zu simulierenden Realsysteme in der Praxis z.B. aufgrund von Formfehlern oder Verformungen nicht so gut ausgerichtet sind. In der Praxis muss das System dann ggf. lokal sehr hohe Pressungen aushalten. Hier sind eine gute Anpassungsfähigkeit und

ausreichender EP-Schutz notwendig. Dieses Problem findet man beispielsweise bei Pumpenlaufflächen. Zur Optimierung werden hier gerne dünne und sehr harte Beschichtungen (z.B. DLC) vorgeschlagen, die in idealen Tribometertests sehr gute Ergebnisse liefern. In der Realität sind dann aber häufig Form- und Lagetoleranzen bzw. Verformungen so groß, dass es bei Neuteilen fast zwangsläufig zu Kanteneffekten kommt. Die im Labor gut getesteten Hartstoffschichten versagen dann plötzlich im Realsystem, da sie nahezu kein Einlaufverhalten zeigen und dann für solche lokalen Presungsüberhöhungen ungeeignet sind.

Optimale Messtechnik

Gegebenenfalls muss die an den Tribometern vorhandene Messtechnik für ein optimales Prüfergebnis ergänzt und aktualisiert werden: Aufwendigere Messtechnik für Übergangswiderstand, Schmierfilmhöhe, lokale Temperaturen, Akustikemission, Schwingungen oder lokalen Druck bieten eine bessere Interpretationsmöglichkeit der Ergebnisse und erleichtern somit das Verständnis für die im tribologischen Kontakt ablaufenden Prozesse. Bei Verschleißprüfungen ist die Auflösung der Sensoren so zu wählen, dass eine sichere Interpretation der Ergebnisse auch bei moderaten und praxisnahen Verschleißbeträgen möglich ist. So können mittels hoch auflösender Verfahren (z.B. kapazitive Sensoren, Radionuklidtechnik) bereits winzigste Verschleißbeträge gemessen werden ohne dass extrem lange Prüfzeiten anfallen oder das System unrealistisch überlastet werden muss.

Es empfiehlt sich grundsätzlich immer, möglichst viele Messgrößen aufzunehmen. Häufig stellt sich erst bei der Interpretation der Ergebnisse heraus, dass ein Zusammenhang mit einer im Vorfeld für unbedeutend eingeschätzten Mess- bzw. Einflussgröße besteht (z.B. Rundlauffehler, Beharrungstemperatur, Stillstandszeit vor Versuchsbeginn usw.). Wurde diese dann nicht ordentlich aufgenommen und dokumentiert, sind die Versuche nutzlos bzw. die Aussagefähigkeit stark eingeschränkt. Ein Problem bei der Erfassung vieler Messgrößen mit hoher Abtastrate stellt die dabei entstehende Datenmenge dar. Insbesondere bei Dauerläufen werden riesige Datenmengen erzeugt, die selbst mit speziellen Auswertungsprogrammen nahezu nicht mehr bearbeitbar sind. Dennoch muss die Abtastrate hoch genug gewählt werden, um auch spontane Ereignisse aufzeichnen zu können. Es empfiehlt sich, in der Versuchsplanung zu überlegen, welche Abtastraten für welche Messgrößen und zu welchen Versuchszeitpunkten notwendig sind und die Daten dann entsprechend aufzunehmen.

Festlegung der Prüfparameter

Die Auswahl geeigneter Prüfparameter muss unter Berücksichtigung der in Abbildung 2 aufgeführten Variationsgrenzen und auf Basis einer umfangreichen Systemanalyse erfolgen. Um für verschiedenste Anforderungen die geeignete Prüfung auswählen zu können, sind eine Vielzahl an Tribometern notwendig. Fehlt im Labor die geeignete Prüfmaschine werden häufig nicht zulässige Kompromisse geschlossen. Wurde beispielsweise in einer Firma nach langem Ringen endlich ein Tribometer angeschafft, das sich dann im Folgejahr für eine neue Fragestellung als ungeeignet darstellt, so fällt es den entsprechenden Verantwortlichen häufig schwer, dies gegenüber dem Vorgesetzten zuzugeben und die Test ggf. extern zu beauftragen. Statt dessen werden zweifelhafte Versuche durchgeführt - nur um irgendein Ergebnis zu haben und nicht in Erklärungsnot zu geraten.

Berücksichtigung der Energiedissipation (Tribomutation)

Einer der wichtigsten Punkte bei der Auswahl geeigneter Parameter ist die Energiedissipation in der Reibstelle. Versuche, Prüfzeiten zu verkürzen, indem mit übermäßigen Energieeinträgen aufgrund zu hoher Pressungen oder Gleitgeschwindigkeiten gearbeitet wird, sind von Anfang an zum Scheitern verurteilt. Für eine moderate tribologische Belastung empfiehlt es sich, mit einer Einlaufbeanspruchung zu beginnen und erst dann die Leistungsgrenzen auszutesten. Wenn es die Prüfmaschine hergibt, sind dynamische Beanspruchungsprofile empfehlenswert, da sie auch Ruhephasen enthalten können und so näher an einer realen Beanspruchung liegen als Prüfungen unter kontinuierlicher Höchstbeanspruchung. Die wenigsten Realsysteme arbeiten unter konstanten Bedingungen, daher ist eine gewisse Dynamik in den Prüfzyklen deutlich realitätsnäher.

Der Begriff der Tribomutation wurde von Prof. Dr. Gervé eingeführt [GERV1996]. Man versteht darunter die Veränderung der Oberflächenbereiche der Reibpartner durch eine tribologische Beanspruchung. Bereits die Herstellung mittels formgebender Verfahren, seien sie nun spanend oder spanlos, stellen eine tribologische Beanspruchung dar und verändern somit die Eigenschaften der Werkstoffoberflächen [MACH2000]. Während der tribologischen Beanspruchung verändern sich die Oberflächen ständig weiter. Reaktionsschichten reiben sich ab und werden wieder nachgebildet. Die Reibenergie verändert die Werkstoffkennwerte in den für die Tribologie so wichtigen Oberflächenbereichen [NMI2001]. Dies hat wiederum Einfluss auf die Funktion des tribologischen Systems und seiner Verlustgrößen. Sind die Vorgänge in der Praxis und im Tribometer nicht ausreichend ähnlich, ergeben sich bei der Laborprüfung zwangsläufig nicht übertragbare Ergebnisse.

Moderne Oberflächenanalysesysteme wie SIMS, SNMS usw. helfen, diese Umwandlungsvorgänge nachzuweisen und besser zu verstehen [INNA2002]. Dennoch ist es sehr schwer abzuschätzen, wie sich ein System während der tribologischen Beanspruchung verändert und welchen Einfluss dies auf die Messergebnisse hat.

Auswahl einer geeigneten Prüfdauer

Eine weitere leider typische Fehlerquelle sind zu kurze Prüfzeiten. Unter Zeit- und/oder Kostendruck werden vom Kunden häufig Kurzzeitprüfungen gefordert. Da aber Reibungs- und Verschleißverläufe über die Zeit nur selten konstant sind, kommt es häufig zu Fehlinterpretationen, die bei ausreichender Prüfdauer leicht zu vermeiden gewesen wären (Abbildung 4). Ein vernünftiger Kompromiss zwischen Prüfzeit - und damit auch Kosten - und Aussagesicherheit ist hier nötig. Geeignete Messtechnik hilft, das Ende des Einlaufvorgangs zu erkennen.

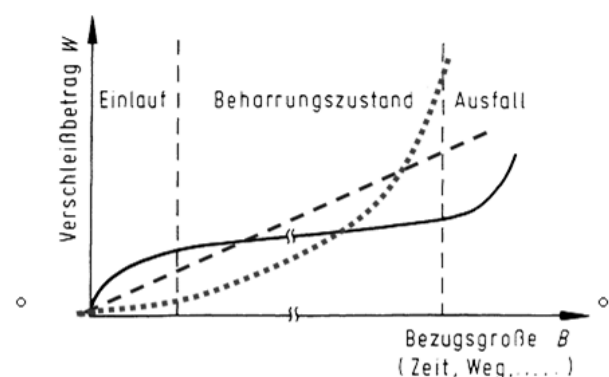


Abbildung 3: Degressiver, konstanter und progressiver Verlauf über der Prüfdauer

Merke: Eine kurze und günstige aber dafür wertlose Prüfung ist immer zu lang und zu teuer!

Statistische Absicherung der Ergebnisse

In den meisten Wissenschaften ist es üblich, zur statistischen Absicherung und Auswertung der Ergebnisse zahlreiche Wiederholprüfungen durchzuführen. In der Tribologie begnügt man sich jedoch häufig mit einem einzigen Wiederhollauf! Bei aufwändigen und teuren Bauteilprüfungen wie dem FE8- oder FZG-Test gibt's man sich sogar üblicherweise mit einem Einzellauf zufrieden. Auch eine noch so gut geplante Prüfung kann von Zufälligkeiten beeinflusst werden. Daher führt kein Weg an einer statistischen Absicherung der Ergebnisse durch Wiederholläufe vorbei. Nur bei sehr guten Kenntnissen und einer Vielzahl ähnlicher Prüfungen, kann es in Ausnahmefällen ausreichend sein, lediglich eine Plausibilitätsprüfung der Einzelergebnisse durchzuführen.

Streut ein tribologischer Versuch stark, sollte man immer erst einmal prüfen, ob die Durchführung einwandfrei ist. Findet man hierbei keinen Fehler, kann es gut sein, dass sich das System an einer Belastungsgrenze befindet und, in Abhängigkeit eines quasi zufälligen minimalen Ereignisses, das eine oder das andere Ergebnis zeigt (Chaostheorie). Solche Varianten sind grundsätzlich als kritisch anzusehen und sollten daher vermieden werden. Wir würden hier immer eine stabilere Variante vorziehen, auch wenn einzelne Ergebnis der anderen Variante scheinbar besser sind.

Unvermeidliche Toleranzen

Toleranzen zwischen Soll- und Ist-Wert lassen sich in der Realität nicht verhindern, allerdings wird deren Einfluss häufig unterschätzt. Der Prüfer bzw. die Prüferin muss entscheiden, welche Abweichungen von einer Soll-Last und Soll-Temperatur, aber auch Abweichungen im Rund- oder Planlauf, noch tolerierbar sind und welche bereits signifikanten Einfluss auf das Messergebnis haben. Häufig ist der Einfluss von Abweichungen allerdings nicht bekannt und müsste in eigenen Versuchsreihen ermittelt werden. Hierzu fehlen aber in aller Regel die Zeit und das Geld. Eine pauschale Aussage hierzu ist leider nicht möglich. Auch hier hilft nur ausreichende Erfahrung, um ein Gefühl für bestimmte Einflussfaktoren zu bekommen.

Sonstige Einflussquellen

Wie bereits angemerkt, spielen auch noch zahlreiche Randbedingungen eine Rolle, die auf den ersten Blick nicht offensichtlich sind. Hierzu gehören Größen wie Luftfeuchte, Form- und Lagefehler, Rauigkeiten, Inhomogenitäten, Rund- und Planlauffehler, Wärmeabfuhr usw. Es ist wichtig, den Einfluss dieser Größen richtig einzuschätzen und gegebenenfalls Maßnahmen einzuleiten, um den negativen Einfluss auf das Prüfergebnis zu minimieren.

Ein weiterer wichtiger Punkt für einen guten Laborversuch ist die Qualität der Probekörper bzw. der Probenpräparation. Wir müssen leider immer wieder feststellen, dass hier nicht mit ausreichender Sorgfalt gearbeitet wird. Gerne wird die Prüfkörperfertigung aus Zeit- und Kostengründen in Lehrwerkstätten gegeben. Aber auch aus professionellen Fertigungsbetrieben kommen immer wieder Proben, bei denen die Kanten nicht ordnungsgemäß gebrochen sind, Toleranzen nicht eingehalten werden oder die massive Beschädigungen aufweisen. Aufgrund von Zeitdruck werden solche Proben dann zwangsläufig trotzdem verwendet. Unter solch ungünstigen Startvoraussetzungen ist wissenschaftliches Arbeiten nicht möglich.

Abbruchkriterien

Ein gewisses Problem stellt häufig auch die Definition eines geeigneten Abbruchkriteriums dar. Ein rechtzeitiger Abbruch einer Prüfung ist aber notwendig, um die Reibstellen nach dem Versuch noch analysieren zu können, da es ansonsten zu einer Zerstörung der Kontaktfläche kommt und eine spätere Beurteilung nicht mehr möglich ist. Andererseits laufen tribologische Systeme teilweise auch nach einem Reibwertpeak problemlos weiter. Hier ist es wichtig, die Folge eines solchen Ereignisses auf das reale Bauteil abzuschätzen. So laufen viele Tribometertests auch mit Fressern weiter, da es nicht zu einem Verklemmen oder einer progressiven Wärmeentwicklung kommen kann, wohingegen diese Schädigungen in der Praxis zu einem Spontanausfall eines Bauteils, z.B. eines Lagers, führen würden.

Auswertung

Bei der Auswertung ist eine lückenlose Dokumentation aller Größen und Parameter notwendig. Auch die bereits beschriebenen Randbedingungen müssen dokumentiert werden, da sie ansonsten bereits nach wenigen Tagen nicht mehr nachvollziehbar sind.

Ebenso sollte eine optische (mikroskopische) Analyse der Reibstellen und der Verschleißpartikel Standard einer guten Modell- und Simulationsprüfung sein. Aufwändigere Verfahren wie Rasterelektronenmikroskopie, laseroptische Messgeräte oder Oberflächenanalysen mit modernsten Geräten (Augerelektronenspektrometrie, Sekundärionenmassenspektrometrie, Transmissionselektronenmikroskopie, usw.) können im Bedarfsfall weitere Erkenntnisse liefern.

Wenn möglich, sollte immer der zeitliche Verlauf der Messgrößen dokumentiert werden. Leider möchten zahlreiche Kunden (vorwiegend aus dem Management) viel lieber Balkendiagramme, da diese für den Laien leichter zu interpretieren sind. Der erfahrene Tribologe muss abschätzen, in wie fern er durch die Reduzierung auf eine solche vereinfachte Darstellung das Ergebnis verfälscht und ob er dies verantworten kann. Dasselbe gilt für die Angabe von Mittelwerten. Ein Versuch, der entweder relativ wenig oder aber sehr viel Verschleiß zeigt, ist durch die Angabe eines Mittelwertes sicher nicht korrekt beschrieben. Viele tribologische Versuche zeigen keine klassische Gauß-Verteilung, so dass die Angabe eines Mittelwertes auch aus statistischen Gründen falsch ist.

Bei der Auswertung empfiehlt es sich, die tatsächlich gemessenen Größen anzugeben anstatt diese umzurechnen, da sich die Fehler hierbei potenzieren können. So wächst ein Messfehler von 10% bei der Vermessung eines Verschleißkalottendurchmessers einer Kugel bei der Umrechnung auf einen volumetrischen Verschleißbetrag auf einen Fehler von über 46% an!

Ein weiteres Problem bei der Auswertung der Versuche kann das blinde Vertrauen in die moderne Prüftechnik sein. Viele computergestützte Prüfstände führen Prüfungen semiautomatisch durch, schalten bei Grenzwerten ab und generieren Standardauswertungen, sodass der Anwender / die Anwenderin sich die Messdaten und Probekörper gar nicht mehr genau ansieht. Bei Normausschusstreffen und in Ringversuchen werden regelmäßig Durchläufer präsentiert. Schaut man sich die Reibwertverläufe dieser Versuche genauer an, erkennt man häufig schon bei deutlich niedrigeren Lasten deutliche Fresser, die allerdings nicht das automatische Abschaltkriterium der Maschine erfüllt haben.

Bei jeder Versuchsserie sollte eine Plausibilitätsprüfung aller ermittelten Ergebnisse erfolgen. Hierzu zählt die Mikroskopie von Grund- und Gegenkörper nach dem Versuch sowie die Überprüfung aller Messdaten. Bei oszillierenden Versuchen sollten auch hochfrequente Messdaten analysiert werden. Teilweise erkennt man dann, dass z.B. der reale Gleitweg aufgrund Elastizitäten deutlich geringer war als der Sollwert oder dass das Reibsignal über dem Hub nicht plausibel ist.

Sonstiges

Zu guter Letzt noch ein vielleicht ungewöhnlicher Tipp: Man sollte nie Versuche durchführen, die man nicht versteht bzw. bei denen in der Kontaktstelle Dinge ablaufen, die man nicht einschätzen kann. Ein gutes Beispiel sind z.B. Tests unter Bohrreibung. In einem solchen Kontakt hat man im Zentrum keine Relativgeschwindigkeit. Dadurch kommt es dort erst einmal auch nicht zum Verschleiß. Nach außen hin nimmt die Gleitgeschwindigkeit linear zu; demzufolge tritt hier vermutlich zuerst Verschleiß auf. Nun beginnt die Spitze in der Mitte, die komplette Normalkraft aufzunehmen. Ggf. bricht dieser Bereich dann unter mechanischer Überlast ein. In der Kontaktfläche herrschen somit lokal vollkommen unterschiedliche und zudem unbekanntere Bedingungen. Am Ende betrachtet man den Verschleiß und die Reibung aber wieder global.

ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Artikel soll dazu dienen, den Wert und den wissenschaftlichen Anspruch tribologischer Prüfungen darzustellen. Leider müssen wir in letzter Zeit feststellen, dass der Gedanken des tribologischen Systems und der Systemanalyse im Umfeld der Tribometrie teilweise verloren geht. Tribologische Versuche werden ohne das nötige Knowhow von unerfahrenen Personen geplant, durchgeführt und ausgewertet. Unter Kosten- und Zeitdruck werden unsinnige Tests mit Alibi-Charakter durchgeführt. Letztendlich schädigt das den Ruf der Tribometrie, da die Ergebnisse solcher Prüfungen in aller Regel nicht auf die Praxis übertragbar sind.

Modell- und Simulationsprüfungen sind in der tribologischen Forschung und Entwicklung unersetzlich. Sie sind notwendig, um unter Berücksichtigung von Kosten und Nutzen verbesserte tribologische Systeme zu entwickeln. Allerdings ist es wichtig, sich Gedanken über die Aussagefähigkeit einer jeden Prüfung zu machen und keine Ergebnisse aus einer Prüfung ziehen zu wollen, die über die geprüfte Einzeleigenschaft hinausgehen. Häufig ist auch eine Vielzahl an Prüfungen auf verschiedenen Prüfgeräten notwendig, um unterschiedliche Eigenschaften unter unterschiedlichen Randbedingungen (Beanspruchungskollektive) zu testen, da tribologische Systeme in der Praxis extrem komplex sind und die Funktionalität nahezu nie von einer Einzeleigenschaft abhängt. Eine einzelne Modellprüfung hat somit noch keine Aussagekraft für das reale Bauteil.

Leider ist es nicht möglich, für alle angesprochenen Probleme Lösungsmöglichkeiten anzugeben. Wichtig ist aber, dass alle Anwender von Modell- und Simulationsprüfungen um die Schwierigkeiten wissen und mit der nötigen Sorgfalt an diese Prüfungen herangehen. Hierfür ist ein umfangreiches Wissen notwendig. Wichtig wäre es daher, dieses Wissen um Vor- und Nachteile sowie die richtige Vorgehensweise stärker als bisher an „Neulinge“ weiterzugeben (Ausbildung, Studium, Tagungen, Lehrgänge).

LITERATURVERZEICHNIS

- [GFT7] GfT-Arbeitsblatt Nr. 7: Tribologie Definitionen, Begriffe, Prüfung; Ausgabe 8/2002, Gesellschaft für Tribologie, Moers
- [HABI1980] K.-H Habig: "Verschleiß von Werkstoffen", C. Hansen Verlag, München 1980
- [GERV1996] A. Gerve: „Tribomutation im Einlauf“; Tagungsband GfT-Jahrestagung "Reibung, Schmierung und Verschleiß"; 1996
- [MACH2000] Mach G., Gervé, A.; Mehr, A.; „ Auswirkungen von Tribomutationen in der Fertigung auf die tribologischen Eigenschaften im Betrieb“; Gft-Jahrestagung, 2000; Band 1
- [NMI2001] Kurzbericht zum Verbundprojekt Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei der Entwicklung und Anwendung tribologischer Systeme, Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut an der Universität Tübingen, 2001
- [INNA2002] O. Inacker, P. Beckmann; „Optimierung tribologischer Probleme mit Hilfe angewandter Grenzflächenforschung, Tagungsband TAE-Tagung "Tribology 2002"
- [CZIC2002] D. Czichowski; R. Kündgen: "Vergleichbarkeit der verschiedenen tribologischen Prüfverfahren am Institut für Tribologie", Studienarbeit FH Mannheim, 2002)
- [CZIC2010] H. Czichos; k.-H. Habig: ."Tribologie Handbuch“; Vieweg-Verlag, 2010
- [RIGO2016] J. Rigo, P. Blaškoviš: Vergleich standardisierter Schmierstoffprüfungen an verschiedenen Tribometern; GfT-Jahrstagung, Göttingen 2016