

László Paulovics

Assistenzprofessor
István-Széchenyi-Universität
Audi Hungaria Fakultät für Automobile
Maschinenbau
Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren und
Antriebstechnik
Ungarn

Jan Rohde-Brandenburger

Abteilungsleiter
István-Széchenyi-Universität
Audi Hungaria Fakultät für Automobile
Maschinenbau
Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren und
Antriebstechnik
Ungarn

Csaba Toth-Nagy

Außerordentlicher Professor
István-Széchenyi-Universität
Audi Hungaria Fakultät für Automobile
Maschinenbau
Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren und
Antriebstechnik
Ungarn

Untersuchung des Steuerkettenverschleißes Methoden – Rückblick

Zur Untersuchung des Steuerkettenverschleißes kommen mehrere Methoden zum Einsatz, von gefeuerten Motorprüfstandsversuchen über tribologische Modellversuche bis hin zu Simulationen. Die Forschung des letzten Jahrzehnts hat gezeigt, dass Komponenten- oder Tribometertests in vielen Fällen teure Motorprüfstandstests ersetzen können. Simulationsmethoden können die Kosten und die Zeit der Entwicklung weiter reduzieren. Simulationsmodelle benötigen experimentell definierte Eingabeparameter; Daher können experimentelle Methoden nicht vollständig vermieden werden. Ein umfassender Vergleich bzw. Validierung der verschiedenen Experimentier- und Simulationstechniken ist jedoch schwierig, da die Literatur zum Thema relativ rar ist. Ziel dieser Studie ist es, einen systematischen Vergleich der Ergebnisse mehrerer Untersuchungsmethoden des Steuerkettenverschleißes, unterstützt durch an der Széchenyi-István-Universität gemessene Daten, wie z und Einschränkungen, möglichst durch Beispiele und Ergebnisse. Die Studie gibt auch einen Einblick in die Kompatibilität verschiedener Messverfahren.

Stichworte: *Verbrennungsmotor, Tribologie, Verschleiß, Steuerkette, Tribometer, Kettenprüfstand, Radionuklidtechnik*

1. EINLEITUNG

Heutzutage durchläuft die Automobilindustrie eine Revolution, wobei sich die Technologie in einem beispiellosen Tempo ändert, immer mehr Hybrid- und Elektroautos erscheinen auf den Straßen [1], [2]. Verbrennungsmotoren werden voraussichtlich noch viele Jahre in den meisten neu zugelassenen Fahrzeugen vorhanden sein, zumindest als Teil des Hybridantriebsstrangs, da es Jahre dauern wird, die umfangreiche Infrastruktur aufzubauen, die für die vollständige Elektrifizierung des öffentlichen Verkehrs und die Anpassung des globalen Elektroantriebs erforderlich ist Netzwerk zu diesem [3],[4].

Zudem werden die sich in den letzten Jahren verschärfende globale Rohstoffknappheit und Inflation die Verbreitung von Elektrofahrzeugen bremsen [2].

Daher bleibt die Reduzierung der Emissionen neuer Verbrennungsmotoren eine wichtige Aufgabe. Dies kann zum einen durch die Effizienzsteigerung von Motoren [4]-[6] und zum anderen durch den Einsatz von CO₂-neutralen Kraftstoffen [6]-[9] erreicht werden. Die Effizienz der Motoren kann durch Verbesserung des Verbrennungsprozesses oder durch Verringerung der internen Verluste der Motoren, wie Pump- und Reibungsverluste, gesteigert werden. Um die innere Reibung von Motoren zu reduzieren, hat sich auch die Qualität der in Pkw-Motoren verwendeten Schmieröle in den letzten 20 Jahren stark verändert. In mehreren Schritten ist die Automobilindustrie von der üblicherweise verwendeten Viskositätsklasse 10W-40 auf die Viskosität 0W-30 und dann auf die Viskosität 0W 20 umgestiegen [10]. In den kommenden Jahren ist mit einer weiteren Verbreitung der Viskositätsklassen 0W-16 und 0W-8 zu rechnen. Gleichzeitig nimmt die spezifische Belastung zu

Motoren und damit am Motoröl ist durch den Downsizing-Trend der letzten Jahrzehnte stark gestiegen. Neben der mechanischen und thermischen Belastung beeinflussen die Kraftstoffe auch maßgeblich die Alterung des Schmieröls und damit die Tribologie des Motors [11]– [14]; daher sollten auch neu eingeführte CO₂-neutrale Kraftstoffe unter diesem Aspekt betrachtet werden.

Beim Einsatz neuartiger Motoröle und Kraftstoffe erfordern tribologisch empfindliche Bauteile besondere Aufmerksamkeit. Solche Bauteile sind Turboladerlager, Pleuellager und die Steuerkette.

Die Verschleißrate ist eine kritische Eigenschaft von Steuerketten, da von ihnen erwartet wird, dass sie die gesamte Lebensdauer des Motors überdauern [15]. Daher ist es auch notwendig, den Einfluss von Änderungen der Ölqualität auf den Kettenverschleiß und die Einflussfaktoren auf die Ölalterung und Verschmutzung, wie den Verbrennungsprozess und den Kraftstoff selbst, zu prüfen.

2. STEUERKETTENVERSCHLEISS UND SEINE FOLGEN

In Pkw-Motoren werden meist Riemen oder Ketten zum Antrieb von Nockenwellen verwendet. Ihr Anteil beträgt etwa 50-50%. Ein Kettenantrieb ist etwas teurer, aber auch sicherer als ein Riemenantrieb, er kann bei höheren Lasten und höheren Motordrehzahlen eingesetzt werden und hält die gesamte Lebensdauer des Motors [15].

In Verbrennungsmotoren werden hauptsächlich drei Kettentypen als Steuerketten (und zum Antrieb anderer Komponenten wie Ölpumpe, Wasserpumpe, Kraftstoffpumpe und Ausgleichswelle) verwendet: Buchsenkette, Rollenkette und Zahnkette (Silent Kette). Alle drei Kettentypen haben ihre Vor- und Nachteile. Die Buchsenkette (Bild 1/a) ist hochbelastbar und langlebig, aber laut, während die Zahnkette (Bild 1/c) geräuschlos ist (deshalb heißt sie Silentkette), aber einen höheren Reibungsverlust und einen höheren Verschleiß aufweist. Die Rollenkette (Bild 1/b) kann als Kompromiss zwischen den beiden anderen angesehen werden [16],

Eingegangen: April 2022, Angenommen: Juli 2022

Korrespondenz an: Dipl.-Ing. László Paulovics,
Assistenzdozent, Széchenyi-István-Universität, 9026 Győr,
Egyetem tér 1. Ungarn E-Mail: paulovics.laszlo@sze.hu
doi:10.5937/fme2203461P © Fakultät für Maschinenbau,
Belgrad. Alle Rechte vorbehalten

aber seine Verwendung ist relativ selten. Bei Dieselmotoren kommen typischerweise Buchsenketten zum Einsatz, bei Ottomotoren meist Zahn- oder Rollenketten [17].

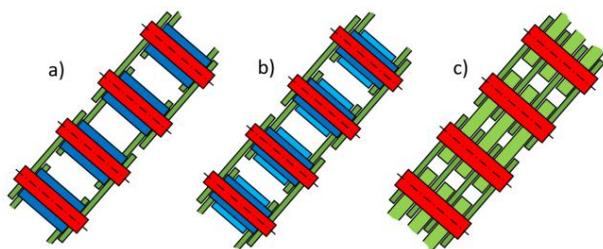


Abbildung 1. Steuerkettentypen: a) Buchsenkette, b) Rollenkette, c) Zahnkette (Silentkette)

Der Verschleiß der Kettenelemente ist nicht nur für die Lebensdauer der Kette, sondern auch für den Betrieb des Motors ein kritischer Punkt, da Verschleiß aufgrund des zunehmenden Spiels zwischen den Kettengliedern zu einer Kettenlängung führt. Kettenverschleiß tritt an den Gelenken auf, dh zwischen Bolzen und Buchse (bei Zahnketten zwischen Bolzen und beweglichen Laschen). Die kleine Winkelschwenkbewegung der Gelenke führt zu einem Grenzreibungsregime, wodurch die Kettengelenke empfindlicher gegenüber Ölqualität und Verschmutzung werden.

Die Länge der Kette ändert sich, was zu einer Verzögerung der Ventilsteuerung führt. (Längung durch Verschleiß kann durch den Kettenspanner nicht kompensiert werden. Der Spanner kann nur Vibrationen reduzieren). Verzögerungen bei der Ventilsteuerung bei Diesel- und Ottomotoren beeinträchtigen die Motorfunktionen: Ladungswechsel, Leistung, Kraftstoffverbrauch und Emissionen. Bei modernen Verbrennungsmotoren ist eine maximale Steuerzeitenabweichung von 1-1,5 °KW (Kurbelwinkel) zulässig [15]. Hoher Verschleiß (Kettenlängung von wenigen mm) kann auch zu einer großen (5-8 °KW) Verzögerung der Ventilsteuerung führen, was besonders für Dieselmotoren gefährlich ist. Aufgrund ihres hohen Verdichtungsverhältnisses nähern sich die Kolben dem Öffnen der Einlass- und dem Schließen der Auslassventile. Und aufgrund einer erheblichen Verzögerung bei der Ventilsteuerung können Kolben auf die spät schließenden Auslassventile treffen. Dies kann zu schweren Motorschäden führen.

Bei starker Abnutzung sitzt die Kette nicht mehr richtig auf den Kettenrädern, wodurch der Lauf immer lauter wird. Außerdem besteht die Gefahr, dass die Kette durch einen plötzlichen Lastwechsel einen oder mehrere Zähne am Kettenrad überspringt, was zu einer groben Verzögerung der Ventilsteuerung und einem schweren Motorschaden durch eine Kollision zwischen den Ventilen und dem führen kann Kolben.

Im Extremfall kann es auch durch übermäßigen Kettenverschleiß zu Kettenbrüchen kommen. Um diese Probleme zu vermeiden, geben die Hersteller an, dass während der Lebensdauer der Kette (ca. 250-300.000 km bei Pkw) eine maximale Längung von 0,3-0,5 % zulässig ist. Wird diese überschritten, muss die Kette ausgetauscht werden [15],[17].

Die lebensdauerkritische Verschleißrate beträgt 10 nm/h für eine durchschnittliche Steuerkette. Das ergibt sich aus folgendem: Steuerketten werden in der Regel mit 6-10 mm Teilung gefertigt und bestehen aus 150-180 Gelenken, was eine Gesamtlänge von 900-1800 mm bedeutet. Über die Lebensdauer einer Kette, die in der Regel 300.000 km oder etwa 5.000 Betriebsstunden beträgt, wird im Allgemeinen eine Längung von 0,5 % zugelassen [17]. Beispielsweise verlängert sich eine Kette mit 9 mm Teilung und 170 Gelenken um 7,65 mm über eine Gesamtlänge von 1530 mm. Aufgeteilt auf 5000 Stunden und 170 Kettenglieder ergibt das

eine durchschnittliche Verschleißrate von 9 nm/h. Daher müssen durchschnittliche Ketten eine mittlere Verschleißrate unter 8...10 nm/h aufweisen, um die erwartete Lebensdauer zu erreichen. Im Vergleich dazu weisen die meisten Steuerketten unter normalen Betriebsbedingungen bei gutem Schmierstoffzustand eine Verschleißrate unter 2 nm/h auf [18].

Aufgrund ersterer ist es notwendig, die Lebenserwartung der Ketten und die Auswirkungen verschiedener Bedingungen und Faktoren auf den Verschleiß zu kennen. Daher muss bei der Entwicklung von Steuerketten, Motoren und Motorölen der Verschleiß von Steuerketten unter verschiedenen Bedingungen untersucht werden [19],[20].

Es stehen mehrere Stufen tribologischer Prüfungen zur Auswahl, vom Modellversuch bis zum Feldversuch, wie in DIN 50322 [21] beschrieben. In der Praxis werden typischerweise und teilweise verschiedene Motorprüfstandsversuche [13]-[18],[22]-[28] und Komponentenversuche [17],[26],[29]-[33] eingesetzt auch Tribometer tests [33] sind üblich.

Die folgenden Kapitel geben einen Überblick über die Methoden zur Verschleißprüfung von Steuerketten und heben die Vorteile, Nachteile, Anwendbarkeit und Grenzen jeder Methode hervor.

3. MESSUNG DES KETTENVERSCHLEISS

Der Kettenverschleiß wird mit kundenspezifischen Messgeräten gemessen, die die Kettenlängung messen (siehe Abbildung 2). Sie basieren auf einem hochsteifen Rahmen und werden normalerweise mit zwei verstellbaren Scheiben geliefert. Diese beiden Scheiben werden mit strengen Toleranzen für jeden Kettentyp hergestellt, da Kettenhersteller Scheiben mit kundenspezifischer Größe zum Messen der Länge verschiedener Kettenarten vorschreiben. Nach dem Auflegen der Kette auf die Scheiben wird diese mit einer definierten Kraft gespannt und der Abstand zwischen den Scheiben mit einer Messuhr oder mit einem optischen Verfahren gemessen. Aus der Abstandsänderung lässt sich die Gesamtlängung der Kette bzw. deren Überstand auf ein einzelnes Gelenk berechnen [15]. Es werden auch andere Kettenlängungsmessgeräte eingesetzt, die nur ein Segment der Kette greifen und im vorgespannten Zustand messen [29], [32]. Das Ergebnis kann dann auf eine vollständige Kettenverlängerung hochgerechnet werden [35]. Genauere Informationen können durch taktiles Messen der Stifte und der Bohrungen der Buchsen [13], [29], [35] gewonnen werden, was jedoch recht zeitaufwändig ist und nur auf Kosten einer endgültigen Demontage und Zerstörung erreicht werden kann der Kette, daher ist sie für eine Verschleißkontrolle während eines Tests nicht geeignet.

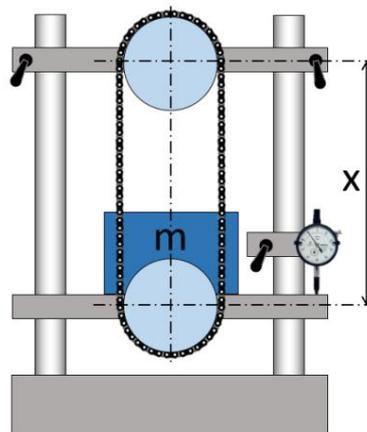


Abbildung 2. Kettenlängungsmessgerät

4. FELDTTESTS

Feldtests sind in der Regel selten, da sie das komplette Produkt unter realen Betriebsbedingungen testen. Fahrzeuge werden einem Langzeittest auf öffentlichen Straßen oder einer Teststrecke unterzogen, an dessen Ende der Motor zerlegt und der Verschleiß der Steuerkette gemessen wird, wie in Kapitel 3 beschrieben. Viele stochastische Einflussfaktoren erschweren naturgemäß die Wiederholung. Außerdem sind sie extrem zeitaufwändig und teuer, da Alterung und Verschleiß nicht beschleunigt werden können. Andernfalls würde der ursprüngliche Nutzen dieser Untersuchungsmethode verloren gehen. Aus diesem Grund werden solche Tests typischerweise erst in der Endphase der Produktentwicklung zu Verifizierungszwecken vor Produktionsbeginn durchgeführt [15],[21].

5. PRÜFUNGEN DES BETRIEBSMOTORDYNAMOMETERS

Motorprüfstandtests sind während der Entwicklung der meisten Motorteile erforderlich, da alle Komponenten oder Modifikationen daran vor Produktionsbeginn im Motor getestet werden müssen. Sie werden im realen Einsatz meist höher belastet und intensiver genutzt als erwartet, um den Worst-Case-Szenario abzubilden, die Alterung der Komponenten zu beschleunigen und Zeit und Geld zu sparen.

5.1 Motortest mit periodischen Verschleißmessungen

Auf einem Motorprüfstand können Motoren dauerhaft unter hohen Belastungen betrieben werden, sogar unter höheren Belastungen oder unter extremeren Bedingungen, als sie in einem Fahrzeug erzeugt werden können.

Bei einem Dauerlaufetest wird traditionell der Verschleiß der Teile durch periodische Verschleißmessungen (z. B. alle 100 Stunden) überprüft. Dazu muss der Test unterbrochen und der Motor zerlegt werden, um den Kettenverschleiß mit den in Kapitel 3 vorgestellten Methoden zu prüfen. Aufgrund der regelmäßigen Demontage des Motors ist dies ein ziemlich zeitaufwendiges Verfahren. Darüber hinaus kann es mehrere hundert oder tausend Stunden dauern, um einen gut messbaren Verschleiß zu erzeugen, was den Vergleich über verschiedene Variablen hinweg ermöglicht. Ein zusätzlicher Nachteil besteht darin, dass direkt nach periodischen Demontagen und Wiedermontagen der Verschleiß der Teile durch einen Wiedereinlaufvorgang vorübergehend ansteigt [13]. Dieser Nachteil kann durch eine Online-Verschleißmessung vermieden werden [28].

5.2 Online-Verschleißmessung mit Radionuklidtechnik (RNT)

Die Radionuklidtechnik (RNT) [40] wurde in den 1970er Jahren entwickelt, um den Komponentenverschleiß online mit hoher Auflösung (0,1 nm/h) zu messen. Dadurch ist es nicht erforderlich, Teile bis zum vollständigen Verschleiß zu testen, es reicht aus, den Verschleiß in jedem Betriebspunkt einige Stunden lang zu messen, um seine charakteristische Verschleißrate zu bestimmen. Der Kern der Technologie besteht darin, dass die Verschleißfläche des geprüften Bauteils in einer Tiefe von wenigen 10 Mikrometern aktiviert, dh radioaktiv markiert wird. Die Auswirkungen der Aktivierung auf die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Materials sind vernachlässigbar. Angenommen, die getestete Komponente arbeitet im Motorölkreislauf. In diesem Fall kann das Filterkonzentrationsmessverfahren verwendet werden, das die Aktivität der radioaktiven Partikel misst

durch das Öl in die Ölkammern der Detektoren transportiert. Die andere Lösung ist das Dünnschichtdifferenzverfahren, bei dem die durch Verschleiß nachlassende Aktivität eines aktivierten Teils gemessen wird. Bei einer Steuerkette kommt die erste Lösung zum Einsatz, da die Kette im Ölkreislauf des Motors arbeitet.

Bei der RNT-Verschleißmessung an einer Kette werden die Verschleißflächen (die Bolzen und die Bohrungen der Buchsen oder Laschen) einiger Kettenglieder aktiviert, bevor die Kette montiert wird. (Zur Sicherstellung der Werksqualität ist hier die Zusammenarbeit mit dem Kettenhersteller unerlässlich, da die Kettenglieder vor der Montage der Kette im Werk aktiviert werden müssen.) Anschließend wird die Kette in den Motor eingebaut und nach einem Kalibriervorgang beginnt der Test mit einem Einlaufprogramm, bei dem der Verschleiß bereits gemessen wird. Radioaktive Verschleißpartikel gelangen in das Motoröl und vermischen sich im gesamten Ölsystem, wo sie nachgewiesen werden können.

Das Messsystem (Abbildung 3) umfasst zwei Messköpfe mit NaI-Szintillatoren zum Nachweis von Radioaktivität. (Ein Szintillationsdetektor ist eine Art nuklearer Detektor, der die kinetische Energie geladener Teilchen in eine Szintillation, dh einen Lichtblitz, umwandelt [41].) Einer der Messköpfe enthält den Motorölfilter, der außerhalb des Motors bewegt wurde. Am Motor wird der Filter durch einen Adapter ersetzt, der das Öl über die Ölpumpe des Motors in den im Messkopf platzierten Filter leitet. Der Detektor im Filtermesskopf misst die Aktivität von radioaktiven Verschleißpartikeln, die sich im Filter ansammeln. Ein zweiter Messkopf ist ebenfalls erforderlich, um kleinere Verschleißpartikel zu erkennen, die den Ölfilter passieren können. Dazu dient der Durchflussmesskopf, der die Strahlung eines bestimmten Ölolumens misst, die proportional zur Konzentration kleinerer radioaktiver Partikel ist. Dieser Messkopf hat seine Pumpe zum Umwälzen des Öls, das durch eine Leitung aus der vorbereiteten Ölwanne des Motors entnommen wird und nach der Messung durch eine weitere Leitung dorthin zurückgeführt wird. Die Summe der von den beiden Messköpfen gemessenen Aktivitäten ergibt den kumulierten Wert des Gesamtverschleißes und der zeitlichen Ableitung, also der Verschleißrate. Letzterer Wert ist für Entwickler wichtiger, da sich damit unterschiedliche Betriebspunkte und unterschiedliche Umgebungs- und Schmierbedingungen vergleichen lassen.

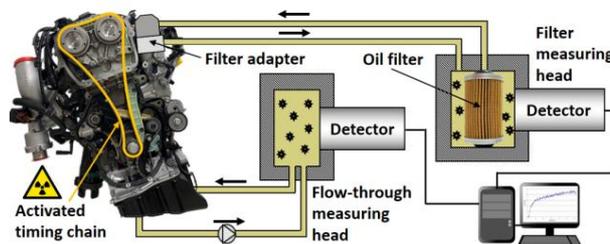


Bild 3. Online-Verschleißmessung einer Steuerkette mit einem RNT-Messsystem

Die Verschleißrate kann mit hoher Sicherheit bestimmt werden, indem ein gegebener stabiler Betriebspunkt für 2-3 Stunden gemessen wird. Mit dieser Methode kann der Verschleiß über das gesamte Motorkennfeld gemessen und unter verschiedenen Bedingungen verglichen werden, und zwar in nur wenigen Wochen, was ein Vielfaches der Zeit wäre, indem die Kette regelmäßig entfernt und ihre Längung gemessen wird.

Die Nachteile von RNT-Verschleißmessungen bestehen darin, dass die Komponenten sehr aufwendig aktiviert werden müssen, ein qualifiziertes Isotopenlabor für die Durchführung des Tests benötigt wird und dann die Handhabung und sichere Lagerung der radioaktiven Abfälle über mehrere Jahre gewährleistet werden muss. (Meßisotope, wie Co-56, Cr-51 haben in der Regel eine Halbwertszeit von wenigen Wochen, daher werden diese Bestandteile nach einigen Jahren völlig unschädlich.)

5.3 Verschleißmessung an Steuerketten mit der Radionuklid-Technik (RNT)

Schwarze et al. [13] untersuchten den Einfluss von Blow-by-Gase auf die Ölalterung in einem laufenden Ottomotor bei verschiedenen Temperaturen. An den Bolzen einer aktivierten Steuerkette wurde der Verschleiß mit der Radionuklid-Technik gemessen. Auch die Steuerkette wurde alle 100 Stunden ausgebaut und geometrische Messungen verifizierten die Online-Messung.

Das 500-stündige Dynamometer-Testprogramm simulierte den realen Einsatz und umfasste Stadt- (geringe Last, häufig gestoppter Motor) und Autobahnphasen (höhere Last, starke Beschleunigungen) in einem Verhältnis von 6:1. Das Testprogramm wurde im Kaltlauf (Öl konditioniert auf 20 bis 50 °C) und im Warmlauf (Öl konditioniert auf 110 bis 140 °C) durchgeführt. Außerdem wurde der Kalt- und Warmlauf mit originalen und modifizierten Blow-by-Systemen durchgeführt. Im letzteren Fall wurde versucht, die Blow-by-Gase weitestgehend vom Motorölkreislauf zu trennen und aus dem Kurbelgehäuse abzusaugen.

Die Ergebnisse zeigten, dass mit dem originalen Blow-by-System der Gesamtverschleiß der Kette im Kaltlauf 10-mal so hoch war wie im Warmlauf, trotz 1/3 so vielen Überrollungen, dh Verschleißrate etwa 30-mal so hoch hoch für die gleiche projizierte Entfernung. Mit dem modifizierten Blow-by-System verringerte sich der Verschleiß im Kaltlauf um die Hälfte, änderte sich aber im Warmlauf nicht. Dies wurde durch Oberflächenanalysen bestätigt: Die durchschnittliche Verschleißtiefe der Pins nach 500 Stunden betrug 3 µm nach Warmlauf, 15 µm nach Kaltlauf mit Original-Blow-by-System und 7 µm nach Kaltlauf mit abgesaugtem Blow-by Gase.

Der Grund für den Unterschied liegt darin, dass bei niedrigen Temperaturen Wasser, Säuren (Schwefel- und Salpetersäure) und Kraftstoff aus den Blow-by-Gase kondensieren. Säuren sind stark ätzend und greifen zusammen mit Wasser metallische Oberflächen und Öl an. Der Kraftstoff verdünnt das Öl und verringert seine Viskosität, was seine Schmierfähigkeit erheblich beeinträchtigt. Wasseremulsion, saure Verunreinigungen und Ölabbau können durch Absaugen von Blow-by-Gasen reduziert werden, aber die Kraftstoffverdünnung bleibt bestehen.

In einer anderen Studie untersuchten Schwarze et al. [14] untersuchten die Wirkung von E85-Kraftstoff beim Betrieb eines Benzinmotors mit einem Dynamometerprogramm, das dem vorherigen ähnlich war. Außerdem untersuchten sie den Verschleiß der Kettenbolzen mit der RNT-Verschleißmessung. Tests haben gezeigt, dass E85 den Verschleiß der Kettenbolzen im Kaltlauf um 20 % im Vergleich zu RON95-Kraftstoff erhöht. Bei Heißlauf steigt der Verschleiß stark an; in diesem Fall ist der Verschleiß bei E85 ca. 30 % höher. Ursache für erhöhten Verschleiß im Heißbetrieb ist die Kavitation des Kraftstoffs im Öl, die in den Kettengelenken auftritt.

Gergye et al. [23] am Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren und Antriebstechnik der Széchenyi-István-Universität verglichen den Verschleiß der Steuerkette eines Ottomotors mit neuem und gebrauchtem Öl (15.000 km) und bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen in einer Versuchsreihe. Bei der Zahnkette wurde auf der Lastseite die Umfangsfläche von zwei Bolzen bei 360° und die Bohrungen von 4-4 beweglichen Laschen bei 90° aktiviert. Die Versuchsreihe hat gezeigt, dass der Kettenverschleiß proportional zur Motordrehzahl und -last zunimmt. Unter Verwendung von Altöl verdoppelte sich der Verschleiß an den mit Vanadium beschichteten Stiften im Durchschnitt, und der Verschleiß an den unbeschichteten Platten stieg im Durchschnitt um das Zehnfache. Der Einfluss der Temperatur war auch auf den Verschleiß nachweisbar; bei 120 °C hatte die Öltemperatur einen etwas höheren Verschleiß als bei 90 °C, aber dieser Unterschied war für die Lebensdauer der Kette nicht signifikant.

In einer anderen Versuchsreihe haben Paulovics et al. [18] am Institut für Verbrennungsmotoren und Antriebstechnik der Széchenyi-István-Universität untersuchten den Verschleiß der Steuerkette eines Dieselmotors mit verschiedenen neuen und gebrauchten Motorölen. Während der Versuchsreihe wurde der Steuerkettenverschleiß mit verschiedenen Ölen gemessen: neues OW-20, neues OW-30 und eine gebrauchte Version des gleichen OW-30-Öls aus einem 200-Stunden-Prüfstandstest (entspricht etwa 15.000 km, das ist das vorgeschriebene Ölwechselintervall für diesen Motor). Bei der Buchsenkette wurden 10 Bolzen und die Bohrung von 10 Hülsen mit zwei unterschiedlichen Isotopen über die gesamte Umfangsfläche aktiviert, so dass der Wert des gemessenen Verschleißes der Mittelwert über den gesamten Umfang für beide Bohrungen und Bolzen war.

Während des Tests wurde der Motor bei relativ hoher Last (50 und 100 % Drosselklappenstellung) und in einem relativ hohen Drehzahlbereich (1250–4000 U/min) betrieben, dh bei einer höheren Last als im durchschnittlichen realen Betrieb. Alle Betriebspunkte wurden 3 Stunden lang gemessen, um eine stabile und zuverlässige Verschleißrate zu haben. Der Verschleiß der Buchsen wurde bei allen drei Ölen an 5 verschiedenen Drehzahl/Last-Betriebspunkten dargestellt. Das Ergebnis war eine Verschleißrate von 0,5 bis 0,8 Nm/h in allen Betriebspunkten bei beiden Frischölsorten, was ausreichend niedrige Werte sind. Mit dem 200 Stunden gebrauchten OW-30-Öl stieg der Kettenverschleiß deutlich an und führte zu Verschleißraten von 7,2 bis 11,2 Nm/h in verschiedenen Betriebspunkten, mehr als das Zehnfache der Werte, die mit neuen Ölen gemessen wurden.

Schlussfolgerungen aus den vorgestellten Studien sind, dass die Art des verwendeten Kraftstoffs, die Nutzung des Motors, die Kraftstoffverdünnung durch den Motorbetrieb, der Rußgehalt und die Ölalterung den Verschleiß von Steuerketten stark beeinflussen. Tests an Benzin- und Dieselmotoren, die mit Buchsen- und Zahnketten ausgestattet sind, haben gezeigt, dass gealterte, abgenutzte, versäuerte, stark verrostete und mit Wasser und Kraftstoff verdünnte Öle den Verschleiß um mehr als das Zehnfache erhöhen können. Die Radionuklidtechnik hat den Zeit- und Kostenaufwand für Motordynamometertests, die für Verschleißmessungen erforderlich sind, erheblich reduziert.

Der Preis für die oben genannten Ergebnisse waren jedoch mehrere 100 Stunden Motorprüfstandstests und mehrere 1000 Liter verbrauchter Kraftstoff. Die Kosten der radioaktiven Aktivierung sind ebenfalls erheblich. Er liegt typischerweise in der Größenordnung des Preises des während der Tests verbrauchten Kraftstoffs. Es lohnt sich also zu überlegen, ob einfachere Tribo-

logische Tests oder Simulationen können den Motordynamo ersetzen – Zählertests.

6. LEISTUNGSPRÜFUNGEN MIT KALTEM MOTOR

Steuerketten werden häufig in Motoren ohne Verbrennung getestet, um Geräuschpegel, Reibungsverluste oder Verschleiß zu bestimmen. Solche Tests werden häufig von der Automobilindustrie und deren Zulieferindustrie [16],[17],[20],[27] sowie von Universitäten und Forschungsinstituten [25],[26] eingesetzt, da sie wichtige Hinweise liefern können Informationen über Reibungsverluste, Verschleiß, Vibrationen und Geräusche im Motor.

Obwohl die Amplitude der Belastung der Kette ohne Verbrennung kleiner ist, sind die während einer Umdrehung auf die Kette wirkenden Kräfte nahe am realen Betrieb. Der einzige signifikante Unterschied sind die von Verbrennungseignissen ausgehenden Anregungen [27]. Somit eignet sich diese Methode zum Vergleich unterschiedlicher Ketten und Ölqualitäten in einem bestimmten Motor.

Am Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren und Antriebstechnik der Széchenyi-István-Universität wurden zwei Steuerketten verschiedener Hersteller auf einem Kaltprüfstand verglichen. Ziel des Tests war es zu überprüfen, ob die beiden Produkte einen signifikanten Verschleißunterschied aufweisen, dh ob die Ketten austauschbar sind. Die beiden unterschiedlichen Ketten wurden in einem mit unterschiedlichen Altölen geschmierten fremdgetriebenen Benzinmotor bei dynamisch variierenden Drehzahlen zwischen 1000 und 6000 U/min über mehr als 1000 Stunden pro Kette getestet. Beide Ketten wurden alle 100 Stunden vom Motor demontiert, um die Kettenlänge in einem in Kapitel 3 beschriebenen Messgerät zu messen. Die Ergebnisse zeigten einen kleinen Unterschied zwischen den Steuerketten der beiden Hersteller. Die Gesamtdéhnung der Ketten betrug 0,81 mm und 1,01 mm nach 1000 Stunden.

Neben periodischen Längungsmessungen wurde die Kettenlänge zuverlässig überwacht, indem die Position des Kettenspanners in stabilen Betriebspunkten mit einem Laservibrometer gemessen wurde. Die Ergebnisse der Vibrometermessungen und der Kettenlängungsmessungen waren vergleichbar.

Dieser Test ist deutlich kostengünstiger als ein befeuerter Motorprüfstandstest mit RNT-Verschleißmessung. Außerdem entfällt der Kraftstoffverbrauch, was die Umweltauswirkungen des Tests deutlich verringert. Nachteilig ist jedoch, dass die Belastung der Bauteile ohne Verbrennung etwa halb so hoch ist, der Verschleiß also langsamer ist. Der Kälteprüfstand ist aufgrund der Auslegung seines (meist offenen) Ölkreislaufes nicht für den Einsatz der Radionuklidtechnik geeignet; Daher muss ein herkömmliches Kettenlängungsmessgerät (siehe Kapitel 3) verwendet werden, das nur einen höheren Verschleiß zuverlässig messen kann, was Hunderte von Betriebsstunden erfordert.

7. KETTENPRÜFSTÄNDE

Antriebskettenhersteller und Forschungsinstitute nutzen häufig Komponentenprüfstände zum Testen von Ketten [15]-[17]. Die Tests zielen darauf ab, Reibungsverluste, Verschleiß oder akustische Eigenschaften der Ketten zu untersuchen. Je nach Einsatzzweck variiert auch der Aufbau von Prüfständen, aber in der Regel treibt ein Elektromotor die Steuerkette an.

Die Durchführung der Last und die Installation der Kette und ihrer Peripherie können unterschiedlich sein.

Wenn es darum geht, die Kette für einen bestimmten Verbrennungsmotor zu optimieren, um Geräusche und Reibung zu minimieren, wird der komplette Kettentrieb mit Kettenführungen und Spanner typischerweise auf einem starren Rahmen in einer dem Motor entsprechenden geometrischen Anordnung aufgebaut. Die Kette wird dann durch den Antrieb des kompletten Ventiltriebs in einem Zylinderkopf oder durch eine ähnliche dynamische Belastung dynamisch belastet [17],[25].

Prüfstände mit einfacherem Aufbau – typischerweise ohne Kettenführungen – werden in der Regel verwendet, um die Verschleißfestigkeit zu testen. Verschleiß wird in der Regel durch eine konstante Spannkraft/Drehmoment erzeugt. Die Ketten werden normalerweise paarweise getestet, wobei zwei Ketten gleichzeitig an den Kettenrädern montiert werden, die an den Enden der Antriebs- und der Abtriebswelle angeordnet sind (siehe Abbildung 4). Das Spannen kann durch Verschieben einer der Wellen [42], [43], Verdrehen der beiden Kettenräder auf der Abtriebswelle gegeneinander [29], [31], [35], [37] oder durch synchronen Einsatz erfolgen von zwei Elektromotoren, wenn ein Motor antreibt und der andere durch die Ketten bremst [31]. Der Hauptunterschied zwischen den Methoden besteht darin, dass beide Spannweiten beider Ketten straff sind, wenn eine konstante Kraft auf die bewegliche Welle ausgeübt wird (Abbildung 4/a), während eine Spannweite jeder Kette straff und die andere durch Drehen locker ist Kettenräder relativ zueinander (Bild 4/b) oder mit zwei synchronisierten Elektromotoren (Bild 4/c). Die beiden letztgenannten Lösungen sind komplizierter zu implementieren, aber sie sind näher an den realen Betriebsbedingungen der Kette. Bei Variante b) können die Kettenräder mechanisch [29], [31], [35] oder hydraulisch [37] gedreht werden (in Bild 4/b mit C gekennzeichnet). Bei einer mechanischen Kopplung wird zu Beginn des Versuchs die Verspannung der Ketten gegeneinander definiert, mit dem Verschleiß der Ketten nimmt aber auch die Spannkraft kontinuierlich ab [31],[35].

Ein hydraulischer Spanner hält die Last jedoch unabhängig vom Verschleiß immer konstant [37].

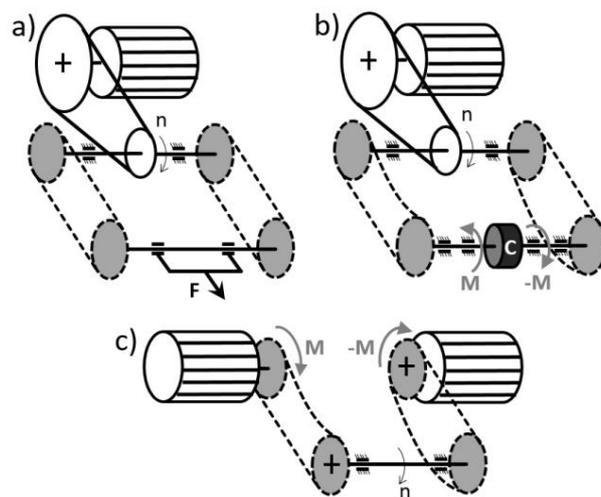


Abbildung 4. Spannmethoden auf Kettenprüfständen

Der Vorteil von Komponentenbänken besteht darin, dass komplette Ketten zusammen mit Kettenrädern getestet werden können. Die Belastung wird im Vergleich zu Motortests vereinfacht, aber auch die Kosten der Tests sind deutlich geringer. Gleichzeitig kann die Belastung gegenüber der Belastung in einem Motor sogar erhöht werden, so dass der Verschleiß beschleunigt werden kann.

Solche Komponentenprüfstände eignen sich, um Unterschiede im Kettendesign oder in der Schmierstoffqualität festzustellen und die Ketten unabhängig vom Motortyp zu testen. Tests können je nach Verschleißgrad Tage oder Wochen dauern, erfordern jedoch deutlich weniger menschliche Überwachung als ein Motorprüfstand.

Messungen auf Komponentenprüfständen müssen in regelmäßigen Abständen unterbrochen werden, um die Kettenlänge zu messen. Diese Unterbrechungen können jedoch vermieden werden, wenn der Prüfstand mit einem Positions- oder Winkelsensor mit ausreichender Genauigkeit ausgestattet ist, um die Länge der Ketten während des Betriebs zu messen [37].

8. KOMPONENTENTESTS AM TRIBOMETER

Tribometer werden am häufigsten für die Grundlagenforschung und Prüfung von Schmierstoffen unter Verwendung von Standardprüfkörpern verwendet [44] - [48]. Darüber hinaus eignen sich die meisten Tribometer für einzelne Prüfkörper, die aus den realen Maschinen- oder Motorkomponenten herausgearbeitet werden. Die Kolbenring-Zylinderwand-Paarung wird häufig verwendet [49],[50] um verschiedene Materialqualitäten, Oberflächentechnologien, Beschichtungen oder Schmierstoffe zu vergleichen, da sie um Größenordnungen schneller und wirtschaftlicher ist als Motorprüfstandstests. Komponententests können Motortests natürlich nicht ersetzen, aber die Anzahl der auf einem Motorprüfstand getesteten Varianten kann deutlich reduziert werden.

Auch bei Steuerketten sind Tribometerprüfungen möglich. Üblicherweise wird ein einzelnes Gelenk der Kette auf dem Tribometer geprüft. Bei einer Buchsenkette bedeutet dies Bolzen und Buchse, die Montage kann jedoch nach mehreren Varianten erfolgen, zB als Bolzen-in-Buchse (wie beim originalen Kettengelenk) oder Buchse-auf-Bolzen Konfiguration, wie sie in Abbildung 5 zu sehen ist.

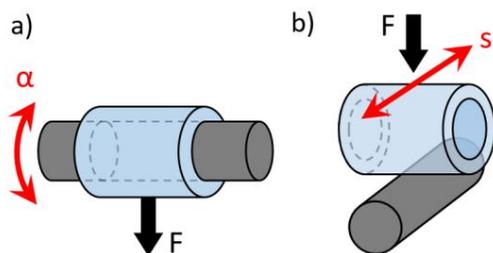


Abbildung 5. Kettenmusterkonfigurationen auf einem Tribometer: a) Stift-in-Buchse, b) Buchse-auf-Stift

7.1 Kettengelenk-Tribometer (Pin-in-Bush-Test)

Der klare Vorteil einer Pin-in-Bush-Anordnung besteht darin, dass sie das Kettengelenk in einer realitätsnahen Montage mit einer realitätsnahen Belastung untersucht. Deshalb wird es auch als Kettengelenk-Tribometer bezeichnet. Ihr Nachteil besteht konstruktionsbedingt darin, dass vorhandene Universal-Tribometer für diese Art der Kettenmontage in der Regel nicht geeignet sind. Außerdem ist zu beachten, dass eventuelle geometrische Abweichungen der Stifte und Buchsen (auch innerhalb der Fertigungstoleranzen) das Ergebnis beeinflussen. Diese Effekte können reduziert werden, indem die Proben sortiert werden, mehr Wiederholungen verwendet werden oder die Proben innerhalb des Tribometers aufgrund des stetigen Griffs nicht bewegt werden können, und es gibt auch eine gewisse Vereinfachung in der Lastfunktion.

An der TU Kaiserslautern wurde ein Kettengelenk-Tribometer entwickelt [29],[34],[35], mit dem ein Gelenk einer Buchsenkette in realitätsnaher Konfiguration (Bild 5/a) mit realitätsnaher Belastung getestet werden kann. Eine Kette

Segment mit 4 Stiften ist erforderlich, um einen sicheren Halt und eine sichere Belastung zu gewährleisten, aber nur ein Gelenk wird getestet. Ein hochdynamischer Elektromotor sorgt für die kleine Winkelschwenkbewegung des getesteten Gelenks und ein Linearaktuator für die Spannkraft. Auch Reibmoment und Verschleiß können online gemessen werden, letzteres durch Messung der Verschiebung in Zugrichtung. Mit dem Kettengelenk-Tribometer ist es möglich, stationäre und dynamische Belastungen mit unterschiedlichen Schwenkwinkeln aufzubringen, sodass eine realistische Belastung eines einzelnen Kettengelenks bei einem Kettenüberschlag gut simuliert werden kann. Mittels Mehrkörpersimulation (MKS) [35] können diese realitätsnahen Schwenkwinkel- und Spannlastfunktionen ermittelt werden. Das Funktionsprinzip des Tribometers ist in Bild 6 dargestellt.

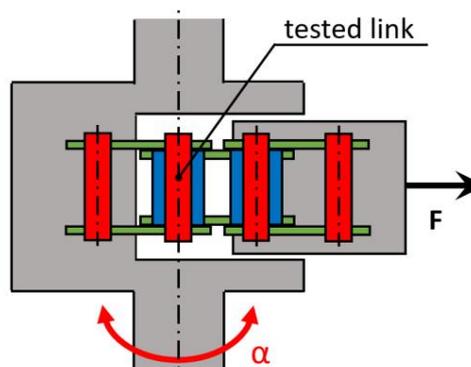


Abbildung 6. Schematischer Aufbau eines Kettengelenk-Tribometers

Das Kettengelenk-Tribometer ist besonders hilfreich bei der Kettenentwicklung, da eine experimentelle Lösung (z. B. Kettenkomponenten mit neuer Beschichtung, Oberflächenbehandlung oder Mikrostruktur) nicht die Herstellung großer Mengen von Stiften und Buchsen und die Montage kompletter Ketten erfordert. Gleichzeitig ist es notwendig, solche Entwicklungen bei der Montage des Kettengelenks zu untersuchen; daher kann dies eine optimale Lösung für das oben Genannte sein [35].

Becker et al. [35] validierten Tests am Kettengelenktribometer, indem sie den gleichen Kettentyp auf einem eigenen Kettenprüfstand testeten (siehe Kapitel 7.). Ketten wurden auf dem Kettenprüfstand bei 500 U/min mit einem Spannmoment von 40 Nm für 100 Stunden betrieben. Beim Kettengelenk-Tribometer wurde das Kettengelenk einer äquivalenten Belastung ausgesetzt, dh es wurden eine Rotations- und Belastungsfunktion vorgegeben, die die Belastung eines einzelnen Kettengelenks einer Kette auf dem Kettenprüfstand bei einem Kettenüberschlag wiedergeben. Die wechselnde Belastung simuliert sowohl im gespannten als auch im schlaffen Kettentrum ein einzelnes belastetes Gelenk. Die Schwenkfunktion simuliert das Auf- und Abbewegen des einzelnen Gelenks an den Kettenrädern.

Der Verschleiß zeigte auf dem Kettengelenktribometer und dem Kettenprüfstand sehr ähnliche Ergebnisse. Die Verschleißrate und -verteilung auf Buchsen und Bolzen war bei beiden Verfahren nahezu identisch. Während der Einlaufphase, während der ersten 20 Stunden, trat ein Unterschied auf, da im Kettengelenk-Tribometer ein stärkerer Einlaufverschleiß auftrat. Der Hauptgrund liegt darin, dass sich das Gelenk im Tribometer während des Einlaufvorgangs aufgrund des stetigen Griffs nicht bewegen kann, und es gibt auch eine gewisse Vereinfachung in der Lastfunktion.

Insgesamt ist das Kettengelenktribometer dazu in der Lage kommen den realen Verhältnissen sehr gut nach.

7.2 Buchse-auf-Stift-Tribometertest

Die Buchse-auf-Stift-Anordnung ist weiter vom realen System entfernt als die Stift-in-Buchse-Anordnung (Kettengelenk-Tribometer), da der Stift Kontakt mit der Außenfläche der Buchse hat und dieser Kontakt punktförmig ist. Sein Vorteil besteht darin, dass die meisten der vorhandenen Kolbentribometer für diesen Aufbau geeignet sind, der nur die Konstruktion eines kundenspezifischen Adapters erfordert, sodass für diesen Zweck kein kundenspezifischer Tribometer entwickelt oder gekauft werden muss.

Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung ist, dass durch die punktförmige Berührung Formabweichungen und Oberflächenstruktur weniger Einfluss auf die Funktion des tribologischen Systems haben [33]. Obwohl der Absolutwert von Reibung und Verschleiß nicht der Realität entspricht, spiegelt der Verschleißunterschied (z. B. beim Vergleich verschiedener Ölqualitäten) die realen Verhältnisse wider. Daher eignet sich diese Konfiguration zB zum Ranking von Ölsorten unter Berücksichtigung des Originalmaterials der Ketten.

Sappoket al. der Universität Kaiserslautern [33] und Paulovics et al. von der Széchenyi-István-Universität [18],[36]-[39] führten unabhängig Experimente mit einer Bush-on-Pin-Konfiguration durch (Abbildung 5/b); beide durchgeführt auf einem bestehenden reziproken Tribometer, das mit einem kundenspezifischen Adapter geliefert wird. Die von den beiden Instituten untersuchten Buchsenketten waren unterschiedliche Typen, die sich in Größe, Materialqualität, Härte und Oberflächenrauheit unterschieden. Außerdem unterschieden sich die Testparameter, sodass die Ergebnisse nicht direkt vergleichbar waren.

Da Materialqualität und Oberflächenrauheit entscheidend für Verschleiß und Reibung sind, muss der Unterschied zwischen Außen- und Innenfläche der Buchsen für jeden Kettentyp überprüft werden. In den oben genannten Fällen zeigte die Härte der Buchsen keinen signifikanten Unterschied an den Außen- und Innenflächen, sodass sich die Buchsen-auf-Stift-Konfiguration in Bezug auf die Materialqualität nicht vom realen System unterscheidet. Die Oberflächenrauheit der Buchsen unterschied sich nur in einem Fall signifikant. Allerdings ist er nur zu Beginn des Tests von Bedeutung, da der Verschleiß in den ersten Minuten sehr intensiv ist.

Zu Beginn der Versuche ist die Hertz'sche Pressung aufgrund punktueller Berührungen deutlich höher als bei einem echten Kettengelenk, diese nimmt jedoch schnell ab, da der Verschleiß anfangs recht hoch ist. (Eine hohe Verschleißrate verringert den Druck aufgrund der vergrößerten Kontaktfläche.)

Der Verschleiß tritt überwiegend an der Buchse auf, da diese eine konstante Kontaktfläche hat, während er beim Bolzen über den Gleitweg (Hub) auf der Oberfläche des Bolzens verteilt ist. Es muss auch beachtet werden, dass die Härte des Bolzens normalerweise viel höher ist als die der Buchsen.

Untersuchungen an der Széchenyi-István-Universität [18] konzentrierten sich auf den Einfluss der Ölqualität auf den Verschleiß. Unter Verwendung von Bush-on-Pin-Tribometertests wurden verschiedene Motoröle verglichen: neues 0W-20, neues 0W-30 und eine gebrauchte Version des gleichen 0W-30-Öls aus einem 200-Stunden-Motordynamometertest. Diese Ölproben entsprechen den in einem früheren RNT-Test verwendeten Ölen (siehe Kapitel 5.3), daher wurden die Ergebnisse der Tribometertests auch mit den Ergebnissen der RNT-Verschleißmessung auf dem Motorprüfstand verglichen. Die auf dem Tribometer getestete Buchsenkette und die Schmierstoffe waren identisch mit denen, die auf dem Motorprüfstand getestet wurden [16].

Beim Vergleich musste der geometrische Unterschied zwischen den Verschleißflächen berücksichtigt werden. Beim RNT-Test wird die Verschleißfläche in der realen Kette als konstant betrachtet, sodass der Verschleiß durch die durchschnittliche Verschleißrate und die durchschnittliche Verschleißtiefe charakterisiert werden kann. Bei Tribometerproben ist der Durchmesser der Verschleißnarbe (WSD) jedoch normalerweise der gemessene Standardparameter [44], [45], der jedoch nicht mit der mit RNT gemessenen Verschleißtiefe oder Verschleißrate vergleichbar ist. Um dieses Problem zu lösen und die Ergebnisse vergleichbar zu machen, war es außerdem erforderlich, die mittlere Verschleißtiefe an den Tribometerproben zu beurteilen, was durch 3D-Scannen der Verschleißnarben möglich war [18]. Die Vereinheitlichung der Verschleißparameter in beiden Tests verdeutlichte, dass der Verschleiß mit den drei verschiedenen Ölen ein sehr ähnliches Verhältnis aufwies, wenn die mittlere Verschleißtiefe bei den Tribometer- und RNT-Tests verglichen wurde (

Tabelle 1. Vergleich der mit Tribometer und Motordynamometer gemessenen Kettenverschleißergebnisse

Öl	Bush-on-Pin-Tribometer Prüfung		RNT-Kettenverschleiß Messung
	Narbandurchmesser	Mittlere Verschleißtiefe	Mittlere Verschleißtiefe (mittlere Verschleißrate)
0W-30	100%	100 %	100 %
0W-20	96%	85%	86%
0W-30 200h	249%	1018%	1167%

Anhand der in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse lässt sich festhalten, dass der Bush-on-Pin-Tribometertest geeignet ist, den Einfluss der Bodenqualität auf den Kettenverschleiß zu beurteilen und Ölqualitäten zu vergleichen, jedoch die Methode der Verschleißmessung bzw. Verschleißberechnung stark beeinflusst die Zuverlässigkeit der Ergebnisse [18],[46].

9. MODELLTESTS AM BALL-ON-DISC-TRIBOMETER

Mehrere standardisierte Tribometertests zur Untersuchung von Schmierölen sind weit verbreitet [44],[45]. Allerdings sind die Parameter dieser Tests (Last, Temperatur, Frequenz, Ölvolumen oder Volumenstrom) typischerweise nicht für Motorenöle optimiert, sodass auf die Prüfung von Motorenölen spezialisierte Institute individuelle Testparameter anwenden [47]-[53].

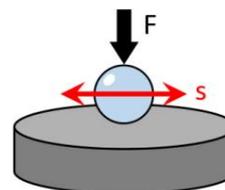


Abbildung 7. Ball-on-Disc-Tribometertest

Der Ball-on-Disc-Test (Abbildung 7) wird häufig zum Testen von Motorölen verwendet. Seine punktförmige Berührung, die Belastung und das dort auftretende Schmierregime sowie die Form der Verschleißnarbe sind nicht weit entfernt von den im vorigen Kapitel vorgestellten Bush-on-Pin-Tests. Der Hauptunterschied besteht im Material der Prüfkörper. Für Ball-on-Disc-Tests werden typischerweise geläppte Scheiben und polierte 10-mm-Lagerkugeln verwendet; sowohl die Kugel als auch die Scheibe bestehen aus 100Cr6-Material gemäß ISO 19291:2016 [44].

An der Széchenyi-István-Universität wurde der im vorigen

Kapitel vorgestellte Bush-on-Pin-Test verglichen

Ball-on-Disc-Tests mit Standardproben [39]. Ziel der Studie war es, die Ähnlichkeiten und Unterschiede in Bezug auf Reibung und Verschleiß zwischen den Standardproben und den Kettenproben mit denselben Ölsorten zu bewerten. Beide Methoden verglichen drei neue und reine Öle mit den Viskositätsklassen 0W-20, 0W-30 und 10W-60 und dasselbe 0W-30, gemischt mit 0,5 Gew.-%, 1 Gew.-% und 2 Gew.-% zugesetztem Ruß (aus jetzt: CB – wird in Laborversuchen als Ersatz für Motorruß verwendet). Der Reibungskoeffizient und der Verschleißnarbendurchmesser wurden mit den beiden Verfahren verglichen. Die Öltemperatur betrug in beiden Fällen 100 °C, die anderen Prüfparameter (Belastung, Frequenz, Ölmenge, Prüfzeit) waren jedoch unterschiedlich.

Hinsichtlich des Reibungskoeffizienten ergaben die 3 unverschmutzten Öle bei beiden Methoden die gleiche Reihenfolge: 10W-60 war am besten, gefolgt von 0W-20 und dann 0W-30. Andererseits verhielten sich mit CB gemischte Öle bei beiden Methoden unterschiedlich. Bei Bush-on-Pin verringerte CB die Reibung leicht, während sie bei Ball-on-Disc zunahm [39].

Der Verschleiß zeigte ähnliche Trends wie die Reibung. Der geringste Verschleiß trat bei beiden Methoden mit 10W-60 Öl auf. Es folgten 0W-20 und 0W-30 Öle. Bei Kugel-Scheibe-Tests gab es einen deutlichen Unterschied zwischen ihnen, während der Verschleiß an den Kettenbuchsen mit 0W-20- und 0W-30-Ölen kaum einen Unterschied zeigte. Die Differenz lag innerhalb des Bereichs der Standardabweichung.

CB-Mischöle zeigten größere Unterschiede im Ball-on-Disc-Test, und der Verschleiß war selbst bei 0,5 % CB höher als bei unbelastetem 0W-30-Öl. Im Gegensatz dazu führte bei Kettenproben (Bush-on-Pin) selbst 1 Gew.-% CB nicht zu einer erhöhten Abnutzung, die Erhöhung trat nur durch Hinzufügen von 2 Gew.-% CB auf.

Obwohl der Ball-on-Disc-Test aufgrund der geringeren Standardabweichung der Probeneigenschaften eine bessere Wiederholbarkeit bietet, verhält sich das tribologische System nicht wie das System mit Kettenteilen. Folglich führten eine zu starke Vereinfachung der Tests und eine Änderung der Material- und Oberflächenbeschaffenheit der Proben zu erheblichen Unterschieden, insbesondere bei kontaminierten Ölen. Daraus kann geschlossen werden, dass es sich nicht lohnt, die Tests auf dieses Niveau zu vereinfachen.

Die tribologischen Auswirkungen von Ruß sind ein intensiv untersuchtes Problem [54]-[57], in den meisten Fällen unter Verwendung von Standard-Tribometerproben. Der Einfluss von Ruß auf Verschleiß und Reibung ist jedoch stark vom gegebenen tribologischen System abhängig, daher ist es vorteilhafter, ihn an aus realen Bauteilen herausgearbeiteten Proben zu testen.

Man könnte auf die Idee kommen, aus dem Material oder der Beschichtung von Kettenbauteilen Tribometer-Prüfkörper mit einfacher Geometrie herzustellen. Dies würde jedoch nicht die gleiche Materialqualität wie die Massenteile garantieren [33]. Prüfkörper müssten individuell hergestellt werden. Daher können viele Parameter, zB die Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit bei der Wärmebehandlung und damit das metallographische Gefüge, von den Serienteilen abweichen. Damit würde das ursprüngliche Ziel nicht erreicht, sondern nur angenähert.

Darüber hinaus ist die Herstellung individueller Proben mit erheblichen Kosten verbunden, sodass solche Tests nicht wirtschaftlich wären. Stattdessen ist es vorteilhafter, Serienbauteile (oder Teile davon) als Proben zu verwenden und die Spannvorrichtung des Tribometers darauf anzupassen.

10. VERSCHLEISSIMULATION

Computersimulationsmodelle übernehmen heute in immer mehr Bereichen der Forschung und Entwicklung die Rolle experimenteller Methoden. Der Verschleiß wird jedoch von so vielen Faktoren beeinflusst, dass er nur auf der Ebene größerer Flächen oder Bauteile mit empirischen Formeln simuliert werden kann. Das bedeutet, dass der grundlegende Verschleißprozess bekannt sein muss, um das Verschleißvolumen durch Simulation zu bestimmen. Dies erfordert eine Reihe traditioneller tribologischer Untersuchungen und Messungen am tribologischen Modell des gegebenen Systems [58],[59].

Zwischen dem Ende der Einlaufphase und dem End-of-Life-Verschleiß verlaufen die Verschleißvorgänge im Allgemeinen linear, eine dauerhafte Kontaktfläche vorausgesetzt. In dieser Phase hängt der Verschleiß von der Belastung und dem Gleitweg ab. Dieses Phänomen kann mit bestimmten tribologischen Modellversuchen (z. B. Stift-Scheibe-Tribometer) gut beobachtet werden. Aufgrund der linearen Natur des Verschleißprozesses kann dieser gut simuliert und vorhergesagt werden, sofern die Randbedingungen und die Intensität des Prozesses, dh der Verschleißkoeffizient, bekannt sind [58],[59].

Die heute verwendeten Verschleißsimulationen [58]-[65] basieren auf dem Verschleißmodell von Archard [66]. Nach seinem Ansatz (1) hängt das Verschleißvolumen (V) von der Belastung (FN), der Relativverschiebung (s) und der Härte (H) des weicheren Materials ab. Es hängt auch von einem dimensionslosen Koeffizienten ab, einem konstanten Verschleißmerkmal, das auf Beobachtungen und Messungen basiert. Das ist der Verschleißbeiwert (K), der von den Materialeigenschaften, der Oberflächenbeschaffenheit, dem Schmiermittel, der chemischen Reaktivität der Materialien und vielen anderen Umständen abhängt. Da viele Faktoren darauf einwirken, hat praktisch jedes tribologische System einen einzigartigen Verschleißkoeffizienten. Sie kann daher nur empirisch ermittelt werden, typischerweise durch Tribometermessungen [58],[59].

$$V = K \cdot (FN/H) \cdot s \quad (1)$$

Verschleißsimulationsmodelle arbeiten nach folgendem Iterationsprozess [60]: 1. Berechnung von Kontaktfläche und Druck, 2. Anwendung des Verschleißmodells: Verschleißberechnung, 3. zurück zu Schritt 1. mit der verschlissenen Oberfläche.

Sappok et al. [33] verwendeten ein ähnliches Verschleißsimulationsprogramm für Ketten, modifizierten das Archard-Modell, indem sie die Kontaktfläche (A) berücksichtigten und aufgrund des nichtlinearen Einflusses der Kraft einen Exponenten (m) gemäß (2) verwendeten.

$$V = K \cdot (F/A)^m \cdot s \quad (2)$$

Die Schritte der Sappok-Simulation sind die folgenden: 1. Berechnung der Kontaktfläche zwischen Stift und Buchse (dies hängt von der Geometrie, den mechanischen Eigenschaften des Stifts und der Buchse und der Kraftverteilung entlang der Stiftachse ab) ,

2. Berechnung der Druckverteilung entlang der Kontaktfläche, 3. Verschleißvolumenberechnung nach (2), 4. zurück zu Schritt 1. mit der verschlissenen Oberfläche.

Die von Sappok et al. berechnet nur den Verschleiß der Buchse, dabei berücksichtigt er den

Die Bolzenform muss konstant sein, daher kann sie nur in Ketten verwendet werden, bei denen der Verschleiß der Bolzen vernachlässigbar ist. Der errechnete Verschleiß hängt maßgeblich von der Druckverteilung entlang der Kontaktfläche ab. Um dies zu definieren, wurde zunächst eine Mehrkörpersimulation (MKS) zur Bestimmung der Belastung eines einzelnen Kettengelenks verwendet, gefolgt von einer FEM-Simulation zur Bestimmung der Druckverteilung innerhalb des Gelenks.

Für die Simulation muss der Verschleißbeiwert (K) für eine gegebene Kette und Schmierstoff wieder bekannt sein. Der Verschleißkoeffizient kann durch eine Reihe von Vorversuchen bestimmt werden, z. B. am Kettengelenk-Tribometer oder am Kettenprüfstand.

Tandler et al. [65] verwendeten eine ähnliche Simulationsmethode wie die vorherige, aber sie verwendeten Fleischer's **Error!**

Bezugsquelle nicht gefunden. Gleichung (3) als Verschleißmodell. Demnach ist das Verschleißvolumen (V) proportional zur Reibarbeit (WF). Die Energiedichte im Nenner (e) ist das Verhältnis der Reibarbeit (WF) zum Verschleißvolumen (V), welches ein Erfahrungswert ist.

$$V = WF/e \quad (3)$$

Auch diese Simulation benötigte Daten aus vorangegangenen Messungen. Die Reibarbeit wurde auf einem Komponentenprüfstand [67] und der Verschleißkoeffizient (der Kehrwert der Energiedichte) mittels RNT-Verschleißmessung ermittelt [65]. Bei der Simulation wurde versucht, Randbedingungen und Belastungen vorzugeben, die den Betriebsbedingungen der Referenzkette mit 48.885 km in einem Versuchsfahrzeug möglichst nahe kommen. Nach dem Test wurde auch der Verschleiß der aus dem Fahrzeug ausgebauten Kette gemessen. Die an den Kettenbolzen gemessene Verschleißverteilung entlang der Achse und des Umfangs war der mit der Simulation berechneten Verschleißverteilung sehr ähnlich. Auch die maximale Verschleißtiefe entlang der Achse ist sehr ähnlich: Am Kettenbolzen wurden 6 μm gemessen, 5,028 μm war der simulierte Wert. (Leider wurde nicht erwähnt, wie viele Kettenstifte gemessen wurden; es kann nur davon ausgegangen werden, dass der verschlissene Stift die gesamte Kette darstellt).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es mit richtig konstruierten Simulationsmodellen möglich ist, reale Prozesse zu modellieren, wenn genügend Daten aus früheren Messungen verfügbar sind. Eine Simulation ist daher ein kostengünstiges Werkzeug, aber empirische Daten, die für ein bestimmtes tribologisches System spezifisch sind, sind unerlässlich.

11. DISKUSSION

Motorenhersteller arbeiten nach strengen Qualitätsstandards und Vorschriften, die vorschreiben, dass neu eingeführte Motorkomponenten verschiedenen Motordauertests unterzogen werden, bevor sie in die Produktion freigegeben werden.

Diese Tests haben erhebliche Kostenauswirkungen. Motortests sind daher der letzte Schritt im Entwicklungsprozess, dem eine Reihe vereinfachter Komponenten- und/oder Tribometertests vorausgehen. Motorprüfstandstests sind unvermeidlich, aber die Anwendung einfacherer Testmethoden kann ihre Anzahl minimieren. Das reduziert Entwicklungszeit und -kosten sowie den ökologischen Fußabdruck der Entwicklung. Beide Aspekte haben heute einen hohen Stellenwert.

Das vorliegende Papier hat mehrere vereinfachte Methoden zum Testen des Verschleißes von Steuerketten besprochen, die von der Prüfung realer und vollständiger Kettenantriebe bis hin zu einfachen Modelltests und Simulationen reichen, wobei die Vorteile, Nachteile, Anwendbarkeit und Einschränkungen jeder Methode und jedes Testniveaus hervorgehoben wurden. Unterschiede in den Ergebnissen resultieren in der Regel aus dem Vereinfachungsgrad des betrachteten Modells im Vergleich zum realen System.

Von den untersuchten Untersuchungen haben Becker et al. [35] zeigten, dass die mit dem Kettengelenktribometer und dem Kettenprüfstand erzielten Ergebnisse vergleichbar waren. Paulovics et al. [18] zeigte, dass die bei Bush-on-Pin-Tribometerversuchen erzielten Ergebnisse hinsichtlich des Verschleißanteils verschiedener Neu- und Gebrauchtöle dem gemessenen Verschleiß an der in einem befeuerten Motor getesteten Steuerkette entsprachen. Tandler et al. [65] bewiesen, dass ein gut konstruiertes Simulationsmodell die Höhe und Verteilung des Verschleißes in einem in einem Fahrzeug verwendeten Steuerkettengelenk zuverlässig berechnen kann.

Die betrachteten Methoden finden ihre Anwendbarkeit bei der Beurteilung des Kettenverschleißes mit eigenen Vorteilen und Einschränkungen. Die vorliegende Studie hilft bei der Navigation durch die Methoden und die Anwendungen der Kettenverschleißprüfung.

12. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Nach Literaturrecherche lassen sich Simulationsmodelle ableiten, um den Verschleiß über eine längere Betriebszeit vorherzusagen oder die Lebenserwartung von Ketten unter wechselnden Belastungs- und Drehzahlbedingungen zu bestimmen. Verschleißsimulationsmodelle benötigen jedoch einen empirisch definierten Verschleißkoeffizienten, der das gegebene tribologische System charakterisiert. Verschleißwerte können durch Tribometer oder Bauteilversuche ermittelt werden.

Um die Wirkung von Schmiermitteln und deren Verschmutzungsgehalt zu untersuchen, eigneten sich Tribometertests an Kettenelementen. Bush-on-Pin-Tribometertests haben sich als geeignet erwiesen, um den Einfluss der Ölqualität auf den Verschleiß zu bestimmen.

Angenommen, als Reaktion auf neue Randbedingungen sind Konstruktionsverbesserungen an der Kette erforderlich. Dann ist das Kettengelenk-Tribometer eine praktikable Möglichkeit, die Auswirkungen unterschiedlicher Konstruktionsänderungen auf den Verschleiß zu untersuchen.

Großserien- oder serienreife Ketten können auf einem für Gesamtketten ausgelegten Komponentenprüfstand unter realitätsnahen Bedingungen effektiv getestet werden.

Komponententests werden auch verwendet, um die Ergebnisse von Tribometertests und/oder Simulationsergebnissen zu validieren.

VERWEISE

[1] Cui, H., Hall, D., Lutsey, N.: Update on the Global Transition to Electric Vehicles through 2019, International Council on Clean Transportation: Beijing, China, Berlin, Germany, 2020, Online verfügbar: <https://theicct.org/publications/update-global-ev-transition-2019> (Zugriff am 28. Februar 2022).

[2] IEA (2022), Electric cars wehren Supply Challenges to more than double global sales, IEA, Paris, online verfügbar: <https://www.iea.org/commentaries/electric-cars-fend-off-supply-challenges-to-more-than-double-global-sales> (Zugriff am 22. Februar 2022).

- [3] Infineum: Den Energieverlust senken. Infineum Insight, (Februar 2019), 1–6. Online verfügbar: <https://www.infineuminsight.com/en/gb/articles/lubricant-trends/driving-down-energy-loss/> (Zugriff am 22. Februar 2022)
- [4] Infineum: Ricardo über zukünftige Schmierstoffe. Infineum Insight, (Januar 2019), 1–6. Online verfügbar: <https://www.infineuminsight.com/en/gb/articles/lubricant-trends/ricardo-on-future-lubricants/> (Zugriff am 22. Februar 2022)
- [5] Hirose, I., Hitomi, M.: Mazda's Way to More Efficient Internal Combustion Engines, *MTZ Worldwide*, 2016 (77), S. 28-33, 2016.
- [6] Leach, F., Kalghatgi, G., Stone, R., Miles, P.: Die Möglichkeiten zur Verbesserung der Effizienz und Umweltverträglichkeit von Verbrennungsmotoren. *Verkehrstechnik*, 2020 (1), 2020.
- [7] Aakko-Saksa, P., Koponen, P., Roslund, P., Laurikko, J., Nylund, N.-O., Karjalainen, P., Rönkkö, T., Timonen, H.: Umfassende Emission Charakterisierung von Abgasen aus mit alternativen Kraftstoffen betriebenen Autos, *Atmos. Umgebung*, 236, 117643, 2020.
- [8] Chen, Y., Ma, J., Han, B., Zhang, P., Hua, H., Chen, H., Su, X.: Emissionen von Automobilen, die mit alternativen Kraftstoffen auf Basis von Motortechnologie betrieben werden: Eine Rezension. *J. Verkehrstransp. Eng.*, 5, 318–334, 2018.
- [9] Niethammer, B., Wodarz, S., Betz, M., Haltenort, P., Oestreich, D., Hackbarth, K., Arnold, U., Otto, T., Sauer, J.: Alternative Liquid Fuels from Renewable Resources. *Chem. Ing. Tech.*, 90, pp. 99–112, 2018.
- [10] Infineum: Übergang zu noch niedrigeren Viskositäten. Infineum Insight, (Juni 2020), online verfügbar: <https://www.infineuminsight.com/en/gb/articles/lubricant-trends/moving-to-even-lower-viscosities/>. (Zugriff am 22. Februar 2022)
- [11] Nagy, AL et al.: Experimente zur künstlichen Alterung von sauberen und kontaminierten Motorölproben. *Schmierstoffe* 2021, 9(6), 63, 2021.
- [12] Nagy, AL, Knaup, J., & Zsoldos, I.: Eine Reibungs- und Verschleißstudie von im Labor gealtertem Motoröl in Gegenwart von Dieselmotorkraftstoff und Oxymethylenether. *Tribologie - Materialien, Oberflächen und Grenzflächen*, 1–11, 2018.
- [13] Schwarze, H., Brouwer, L., Knoll, G., Kopnarski, M., Schlegel, F., Müller-Frank, U., Emrich, S.: Schmierstoffabbau und Verschleißverhalten bei Fremdzündung Motor, *MTZ Worldwide*, vol. 69, Nr. 10, S. 60–67, 2008.
- [14] Schwarze, H., Brouwer, L., Knoll, G., Longo, C., Kopnarski, M., Emrich, S.: Wirkung von Ethanolkraftstoff E85 auf Schmiermittelabbau und Verschleiß in Ottomotoren, *MTZ Worldwide*, Bd. 71, Nr. 4, S. 56–61, 2010.
- [15] Bauer, P.: *Kettensteuertriebe*, Die Bibliothek der Technik, Band 353, Verlag Moderne Industrie, 2013, (in German)
- [16] Fink, T., Bodenstein, H.: Möglichkeiten der Reibungsreduzierung in Kettenrieben. *Motortech-* nische Zeitschrift - MTZ, 72 (7-8), pp. 582-587, 2011. (in German)
- [17] Fink, T., Hirschmann, V.: Kettenriebe für den Einsatz in modernen Verbrennungsmotoren. *MTZ – Motortechische Zeitschrift* 62, pp. 796–806, 2001. (in German)
- [18] Paulovics, L., Tabakov, ZM, Tóth-Nagy C., Rohde-Brandenburger, J., Kuti, R.: Vergleich des Steuerkettenverschleißes, der auf Motordynamik und Tribometern unter Verwendung von 3D-Scannen von Verschleißnarben erzeugt wird, In: Nikodem, J., Klempous, R. (Hrsg.): *12th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2021) Proceedings, International: IEEE (2021)* S. 485- 490, 2021.
- [19] Shah, R., Gokhale, SV: ILSAC GF-6: Die mit Spannung erwartete Motorölspezifikation, an der fast ein Jahrzehnt gearbeitet wurde, ist da (Juli 2020), *Motorindia*. Online verfügbar: <https://www.motorindiaonline.in/ilsac-gf-6-the-highly-accepted-engine-oil-specification-fast-a-decade-in-the-making-is-here/>. (Zugriff am 16. März 2022)
- [20] Infineum: Timing Chain Wear, Infineum Insight, (Oktober 2016), S. 1–6, Online verfügbar: <https://www.infineuminsight.com/en-gb/articles/passenger-cars/timing-chain-tragen/>. (Zugriff am 16. März 2022)
- [21] Czichos, H., Habig, K.: Tribologische Mess- und Prüftechnik, in: *Tribologie-Handbuch*, 3. Auflage, Vieweg + Teubner, pp. 193-195, 2010. (in German)
- [22] Dreyer, MR, Gergye, T.: Tribologische Tests an Verbrennungsmotoren, *Das Fahrzeug der Zukunft*, 2012.1/2, 41-57, 2012. (auf Ungarisch)
- [23] Gergye, T., Dreyer, MR, Kehrwald, B., Opatzky, W.: Analyse des Verschleißverhaltens von Verbrennungsmotorkomponenten mittels Radionuklidtechnik, in: SAE-China, FISITA (Hrsg.): *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress* (1) S. 171-181, 2012.
- [24] Gergye, T., Dreyer, M. R.: Tribologische Untersuchung einer Steuerkette, in: Dreyer, M. R., Demmelbauer-Ebner, W. (eds.) *2. Győrer Tribologie Tagung*, Győr, Universitas-Győr Nonprofit Kft., pp. 173-186., 2012. (in German)
- [25] Krupp, F., Sauer, B.: Reibungsminderung im Steuerkettentrieb. in: *56. Tribologie-Fachtagung (GfT)*, 21.-23.09.2015, *Göttingen*, Band II, pp. 53/1- 53/11., 2015. (in German)
- [26] Sauer, B., Nicola, A., Flierl, R. et al. Merkmale von Steuerkettenantrieben, *MTZ Worldwide*, 68, S. 28–30, 2007.
- [27] Weber, C., Herrmann, W., Stadtmann, J.: Experimental Investigation into the Dynamic Engine Timing Chain Behaviour, *International Congress and Exposition*, Detroit, Michigan, 23.-26. Februar 1998.
- [28] Kowalski, TD, Hirano, S., Buscher, WA, Liu, E., Wang, JC, Linden, JL: Entwicklung eines neuen Ventiltrieb-Verschleißtests – Der Sequenz-IVB-Test, *SAE Technical Paper Series*. 2016.

- [29] Sappok, D., Sauer, B.: Wear Measurement on Chain Joint Components Using a Roundness Instrument, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 59(2), S. 51–59, 2015.
- [30] Becker, A., Krupp, F., Sauer, B.: Systematische Verschleißuntersuchungen an Kettenkomponenten, in: *58. Tribologie-Fachtagung (GfT), 25.-27.09.2017, Göttingen*, 2017. (in German)
- [31] Gummer, A., Fábrián, C., Sauer, B.: Modularer Kettenprüfstand für undnWerkzeugmaschinen. *52. Tribologie-Fachtagung (GfT), 26.-28.09.2011, Göttingen*, 2011. (in German)
- [32] Gummer, A., Sappok, D., Sauer, B.: Experimentelle und analytische Verschleißuntersuchung von Hülsen- und Rollenketten, in: *53. Tribologie Fachtagung (GfT), 24.-26.09.2012, Göttingen*, 2012. (in German)
- [33] Sappok, D., Merz, R., Sauer, B., Kopnarski, M.: Oberflächenanalyse von Kettengelenkkomponenten nach tribologischer Belastung und Einsatz von Verschleißschutzadditiven, *Conference Papers in Science*, vol. 2015, Beitrags-ID 407048, p. 12., 2015.
- [34] Becker, A., Sauer, B.: Verschleißuntersuchungen an Steuerketten mit einem Kettengelenk-Tribometer. *STLE's 73rd Annual Meeting and Exhibition*, 20.-24.05.2018, Minneapolis, 2018.
- [35] Becker, A., Meffert, D., Sauer, B.: Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an einfachen Kettengelenken. *Forschung Im Ingenieurwesen*, 83(1), pp. 53–63. 2019.
- [36] Paulovics, L., Tóth, Á. D., Hanula, B., Kopp, A., Knaup, J.: Tribometerversuche an Steuerketten, in: *58. Tribologie-Fachtagung (GfT): 25.-27.09.2017, Göttingen*, P9, 2017. (in German)
- [37] Paulovics, L., Németh, M., Knaup, J.: Alternative Verschleißmessverfahren für Steuerketten, in: Knaup, J. (ed.): *5. Győrer Tribologie- und Effizienztagung*, Győr, Universitas-Győr Nonprofit Kft., pp. 199-216, 2018. (in German)
- [38] Tabakov, ZM, Paulovics, L.: Entwicklung der Verschleißanalyse von Steuerkettenelementen auf einer Hochfrequenz-Kolbenanlage, In: Dernóczy-Polyák, A. (Hrsg.): *Forschungsbericht 2. - Forschungsbericht*, Győr, Universitas-Győr Nonprofit Kft., S. 248-252, 2020.
- [39] Paulovics, L., Kuti, R., Rohde-Brandenburger, J., Tóth-Nagy, C.: Entwicklung einer vergleichenden Untersuchungsmethode zur Steuerkettenverschleißanalyse mittels oszillierendem Tribometer. *Acta Technica Jaurinensis* 14 (4), S. 406-423, 2021.
- [40] Scherge, M., Pöhlmann, K., Gervé, A.: Verschleißmessung mittels Radionuklid-Technik (RNT), *Wear*, vol. 254 (9), S. 801-817, 2003.
- [41] Leo, WR: *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, 2. Aufl., Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1994
- [42] Fink, T.: Entwicklung hochleistungsfähiger Steuertriebe für Verbrennungsmotoren, Präsenz-
tation, *VDI-Fachkonferenz Umschlingungsgetriebe 2011 in Nuertingen*, December 14th and 15th, 2011.
- [43] Tandler, R., Bohn, N., Gabbert, U., Woschke, E.: Experimentelle Untersuchungen zur inneren Reibung in Buchsenkettenantriebssystemen für Kraftfahrzeuge, *Tribology International*, vol. 140, Nr. Juli, S. 105871, 2019.
- [44] Schmierstoffe – Bestimmung tribologischer Größen für Öle und Fette – Tribologische Prüfung im Translationsschwingungsgerät, ISO 19291:2016
- [45] Standardtestverfahren für linear hin- und hergehenden Kugel-auf-Flach-Gleitverschleiß, ASTM G133 - 05 (2016)
- [46] Reichelt, M., Cappella, B., Vergleichende Analyse von Fehlerquellen bei der Bestimmung von Verschleißvolumina oszillierender Ball-on-Plane-Versuche, in: *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 6, S. 25, 2020.
- [47] Tóth, Á. D., Szabó, I. Á., Kuti, R.: Tribological Properties of Nano-Size ZrO₂ Ceramic Particles in Automotive Lubricants, *FME Transactions*, vol. 49, Nr. 1, S. 36–43, 2021.
- [48] Tóth, Á. D., Szabó, I. Á., Leskó, M. Zs., Rohde-Brandenburger, J., Kuti, R.: Tribological Properties of the Nanoscale Spherical Y₂O₃ Particles as Lubricant Additives in Automotive Application, *Lubricants* 10: 2, p. 28., 2022.
- [49] Trivedi, HK, Bhatt DV: Wirkung von Schmiermitteln auf die Reibung von Zylinderlaufbuchsen- und Kolbenringmaterialien in einem hin- und hergehenden Prüfstandstest, *FME Transactions* 47, S. 23-28, 2019.
- [50] Dudás, A., Laki, G., Nagy, AL, Zsoldos, I., Hannula, B., Bartel, D.: Verschleißverhalten keramikpartikelverstärkter atmosphärischer Plasmaspritzschichten auf der Zylinderlauffläche der Verbrennung Motoren, Verschleiß, Bände 502-503, 204373, 2022.
- [51] Papp, Cs., Kuti, R.: Identification of Engine Damages of Vintage Vehicles with Tribological Examination, *FME Transactions* 49, S. 608–614, 2021.
- [52] Agocs, A, Besser, C., Brenner, J., Budnik, S., Frauscher, M., Dörr, N.: Motorenöle im Feld: Eine umfassende tribologische Bewertung der Motoröldegradation in einem Pkw . *Briefe zur Tribologie*. 70(1), 2022.
- [53] Tóth, Á. D., Paulovics, L., B. Hanula, B., Kopp, A., Knaup, J.: Methodenentwicklung zur Einstufung Motorölen von anhand tribologischer Parameter, in: *58. Tribologie-Fachtagung (GfT), 25.-27.09.2017, Göttingen*, P8, 2017.
- [54] Ratoi, M., Castle, RC, Bovington, CH, Spikes, HA: Der Einfluss von Ruß und Dispergiertmittel auf die ZDDP-Filmdicke und -reibung. *Lubrication Science*, 17(1), S. 25–43, 2004.
- [55] Antusch, S., Dienwiebel, M., Nold, E., Albers, P., Spicher, U., Scherge, M.: Zur tribochemischen Wirkung von Motorruß, Verschleiß, Band 269, Hefte 1–2, S. 1–12, 2010.

- [56]Hu, E., Hu, X., Liu, T., Fang, L., Dearn, KD, Xu, H.: Die Rolle von Rußpartikeln im tribologischen Verhalten von Motorschmierölen, *Verschleiß*, Band 304 , Ausgaben 1–2, S. 152–161, 2013.
- [57]Uy, D., Ford, MA, Jayne, DT, O'Neill, AE, Haack, LP, Kangas, J, Jagger, MJ, Sammut, A., Gangopadhyay, AK: Charakterisierung von Benzinruß und Vergleich mit Dieselruß: Morphologie, Chemie und Verschleiß, *Tribology International*, Band 80, S. 198-209, 2014.
- [58] Andersson, S.: Wear Simulation, in: *Advanced Knowledge Application in Practice*. London, Vereinigtes Königreich: IntechOpen, 2010 [Online].
Online verfügbar: <https://www.intechopen.com/kapitel/12340> (abgerufen am 10. März 2022)
- [59] Tong, D., Diao, Z., Sun, N., Du, X., Zhang, Y., Liu, Z.: Eine Übersicht über dynamisch-tribologische Simulationsmethoden für Gleitlager in Verbrennungsmotoren, *J Phys. Konf. Ser.*, Bd. 2101, Nr. 1, 2021.
- [60]Mudras, SMS: Computersimulation/Vorhersage des Verschleißes in mechanischen Komponenten, *Fortschritte in der Tribologie*, vol. 2020, Beitrags-ID 8867351, 15 Seiten, 2020.
- [61]Schmidt, AA, Plánka, J., Schmidt, T., Grabherr, O., Bartel, D.: Validierung eines Trockengleitverschleiß-Simulationsverfahrens für Wastegate-Lager in Kfz-Turboladern, *Tribology International*, vol. 155, p. 106711, 2021.
- [62] Ottosson, HJ, Mattson, CA, Johnson, OK, Iron, I.: Verwendung von Simulation und Verschleißvorhersage zur Erforschung von Konstruktionsverbesserungen an der Topfdichtung im Handpumpensystem India Mark II/III, *Dev. Eng.*, Bd. 7, p. 100092, 2022.
- [63]Yan, Y., Jiang, C., Li, W.: Simulation von Kopplungseffekten zwischen Oberflächenverschleiß und Ermüdung im Stirnradgetriebe, *Eng. Scheitern. Anal.*, Bd. 134, p. 106055, 2022.
- [64]Zhang J., Lyu, F, Bing, X., Huang, W., Wu, W., Guo, Z., Xu, H., Huang, X.: Simulation und experimentelle Untersuchung einer Oberfläche mit geringer Verschleißrate Kontur eines Kolben/Zylinder-Paares in einer Axialkolbenpumpe, *Tribology International*, vol. 162, p. 107127, 2021.
- [65] Tandler, R., Bohn, N., Gabbert, U., Woschke, E.: Analytisches Verschleißmodell und seine Anwendung für die Verschleißsimulation in Buchsenkettenantriebssystemen für Kraftfahrzeuge, *Wear*, vol. 446–447, p. 203193, 2020.
- [66]Richard, JF: Contact and Rubbing of Flat Surfaces, *Journal of Applied Physics*, 24(8), S. 981–988, 1953.
- [67]Fleischer, G.: Energetische methode der bestimmung des verschleißes, *Schmieringstechnik* 4.9, pp. 269-274, 1973. (in German)
- [68]Tandler, R., Bohn, N., Gabbert, U., Woschke, E.: Experimentelle Untersuchungen zur inneren Reibung in automobilen Buchsenkettenantriebssystemen, *Tribology International*, vol. 140, Nr. Juli, S. 105871, 2019.

METHODEN ZUR VERSCHLEISSPRÜFUNG DER STEUERKETTE – ÜBERSICHT

J. Paulovič, J.R. Brandenburger, C. Tot-Find

Zur Prüfung des Steuerkettenverschleißes kommen mehrere Methoden zum Einsatz, von Motorprüfstandsversuchen über tribologische Modelle bis hin zu Simulationen. Die Forschung des letzten Jahrzehnts hat gezeigt, dass Komponenten- oder Tribometertests in vielen Fällen teure Motorprüfstandstests ersetzen können. Simulationsmethoden können Entwicklungskosten und -zeit weiter reduzieren. Simulationsmodelle benötigen experimentell definierte Eingabeparameter; Daher können experimentell basierte Methoden nicht vollständig vermieden werden. Ein umfassender Vergleich bzw. Validierung verschiedener Experimental- und Simulationstechniken ist jedoch schwierig, da die Literatur zu diesem Thema relativ spärlich ist. Ziel dieser Studie ist es, einen systematischen Vergleich der Ergebnisse mehrerer Forschungsmethoden zum Verschleiß von Steuerketten bereitzustellen, die durch an der Sechenyi Istvan University gemessene Daten wie Motorprüfstandstests, Kaltprüfstandstests, Komponententests und Tribometertests gestützt werden, und deren Vorteile darzustellen und Einschränkungen, möglichst durch Beispiele und Ergebnisse. Die Studie gibt auch Aufschluss über die Kompatibilität verschiedener Messverfahren.