

Neuer Pb-freier Kupferwerkstoff für Gleitlageranwendungen in Verbrennungsmotoren und Getrieben

Weber, K. (1); Pucher, K. (2)

Im Automobilbau werden in einem breiten Anwendungsbereich Komponenten aus Kupfer und Kupferlegierungen eingesetzt. Kupferbasierte Bauelemente sind einerseits aufgrund ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit unverzichtbar für die Funktionalität elektrischer und elektronischer Aggregate in Kraftfahrzeugen. Andererseits besitzen sie dort in Form von Gleitelementen ein breites Einsatzfeld. Infolge der steigenden mechanischen und thermischen Beanspruchung der Lager in modernen Motoren geraten die bislang verwendeten Messingwerkstoffe zunehmend an die Grenzen ihrer Belastbarkeit. Außerdem limitieren zukünftig geltende Umweltgesetze wie die EU-Altautoverordnung insbesondere den Gehalt des Legierungselementes Blei. Aus dieser Notwendigkeit heraus wurde eine neuartige Pb-freie Lagerlegierung mit der geforderten Eigenschaftskombination entwickelt.

Die Wieland-Werke AG gehört zu den weltweit führenden Herstellern von Halbzeugen und Komponenten aus Kupfer und Kupferlegierungen. Zu dem breiten Produktsortiment, das im Automobilbau zur Anwendung kommt, gehören auch Gleitelemente für verschiedene Bereiche der Kraftfahrzeuge.

Gleitelemente aus speziellen Messinglegierungen gewährleisten u.a. als Kolbenaugenbuchsen eine Übertragung bzw. Umwandlung der Antriebsenergie in Verbrennungsmotoren (Bild 1). Die Vielzahl an Beanspruchungsarten, denen diese Lager ausgesetzt sind, er-

fordert zunächst eine systematische Betrachtung der einzelnen Verschleißarten und Schädigungsmechanismen.

Verschleiß

Um den Werkstoff eines Verschleißteiles an die vorherrschenden Betriebsbedingungen anpassen zu können, ist es erforderlich, die elementaren Vorgänge im jeweiligen Tribosystem zu erfassen [1]. Als Grundlage hierfür soll die Klassifizierung der Hauptverschleißmechanismen von Zum Gahr in Bild 2 dienen [2].

Die Schmierfilmdicke zwischen Gleitelement und Gegenlaufpartner führt nicht in allen Betriebszuständen zu einer vollkommenen Trennung der Gleitflächen. Die sich damit einstellende Mischreibung verursacht eine Beanspruchung der Lager durch Adhäsion (Fressverschleiß). Dieser Verschleißmechanismus hat bei einem Radialgleitlager schließlich das Festgehen des Wellenzapfens und damit den Totschaden zur Folge [3]. Ein zielgerichtet eingestelltes Gefüge des Lagerwerkstoffes kann dessen Fressneigung maßgeblich vermindern. Als Gefügebestandteile mit höherem Widerstand gegen die Adhäsion gelten Phasen mit kubisch-raumzentrierter (krz.) und hexagonaler (hex.) Gitter-

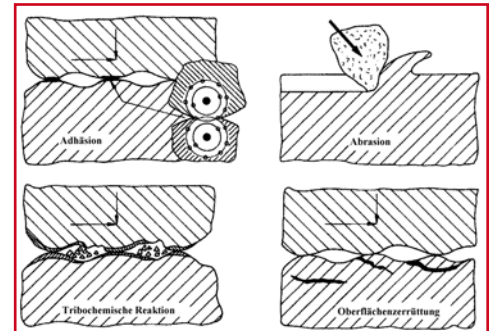


Bild 2: Hauptverschleißmechanismen [2]

struktur. Gefügeanteile mit kubisch-flächenzentrierter (kfz.) Struktur sind hingegen anfälliger gegenüber dem Fressverschleiß [4]. Durch den vom Gesetzgeber geforderten Wegfall des Legierungselementes Blei, dem eine Verbesserung der Notlaufeigenschaften der Gleitelemente zugeschrieben wird, rücken die Verschleißigenschaften der einzelnen Phasenbestandteile verstärkt in den Vordergrund.

Verschmutzungsteilchen bzw. Abriebpartikel können die Lauffläche des Gleitelementes auf unterschiedliche Weise durch Abrasion (Furchungverschleiß) beschädigen (Bild 3). Für die Verminderung der Verschleißfolgen durch das Mikrospannen und -pflügen ist eine größere Härte sowie eine höhere Dehngrenze $R_{p0,2}$ des Lagermaterials bedeutsam. Zusätzlich sind durch das Auftreten der Mechanismen des Mikroermüdens und -brechens dessen



Bild 1: Einbausituation der Kolbenaugenbuchsen

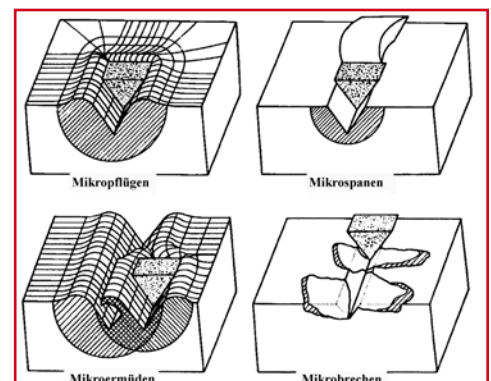


Bild 3: Werkstoffschädigung beim abrasiven Verschleiß [5]

Zähigkeitseigenschaften wichtig [5, 6]. Für den Lagerwerkstoff wäre somit ein heterogenes Gefüge mit in eine duktile Matrix eingelagerten Hartphasen vorteilhaft.

Die Reibbeanspruchung führt zur Bildung von Partikeln und Schichten zwischen den sich berührenden Oberflächen (Tribochemische Reaktion). Die Reaktionsschichten neigen beim Erreichen einer kritischen Dicke zum spröden Ausbrechen und damit zum Entstehen von Verschleißpartikeln [7]. Für den Betrieb von Gleitelementen sind derartige Reaktionsschichten allerdings von großer Bedeutung, da sie als sogenannte Triboschichten die Beständigkeit des Lagerwerkstoffes gegenüber der Adhäsion erhöhen [3]. Der veränderliche hydrodynamische Schmierfilmdruck in den Lagerstellen hat eine Zug-/Druck-Wechselbeanspruchung der Gleitschicht zur Folge. Auftretende Rissbildungen führen zu einer Oberflächenzerrüttung des Lagers (Ermüdungverschleiß). Der Werkstoff sollte daher ein heterogenes Gefüge mit einer duktilen Matrix aufweisen, um einen hohen Widerstand gegen Rissinitiierung und -ausbreitung zu besitzen.

Zusätzlich zu den Verschleißmechanismen sind die Gleitelemente in Verbrennungsmotoren einer thermischen Beanspruchung ausgesetzt. Diese kann zur unerwünschten Veränderung des Gefüges sowie zur Spannungsrelaxation des Bauteils führen. Der damit verbundene Verlust an Festigkeit und Formstabilität schränkt die Betriebssicherheit der Gleitelemente stark ein. Zur Erhöhung der Temperaturstabilität des Gefüges sollte der Anteil an Phasen mit höherer Umwandlungsaktivität begrenzt werden. Außerdem können feine Ausscheidungen dazu dienen, das Ausmaß der thermisch induzierten Spannungsrelaxation des Gleitelementes herabzusetzen.

Messingwerkstoffe für Gleitlager

Den Ausgangspunkt für die Entwicklung einer neuen verschleißbeständigen Kupferlegierung stellten die beiden Sondermessinge CuZn31Si1 (Wieland-Bezeichnung: SB8) und

Leg.	Cu	Zn	Pb	Si	Mn	Ni	Fe	Al
SB8	68	Rest	< 0,3	1	-	-	-	-
S40	58	Rest	0,5	1	2	0,5	0,5	2
SX1	64	Rest	-	1	2	1	0,5	1

Tabelle 1: Zusammensetzung der Lagerwerkstoffe (Richtwerte in Gew.-%)

CuZn37Mn3Al2PbSi (Wieland-Bezeichnung: S40) dar.

Das Gefüge von CuZn31Si1 besitzt eine ausreichende Stabilität bis zu Temperaturen von ca. 200-250 °C. Demgegenüber liegt die adhäsive Verschleißbeständigkeit von Bauelementen aus CuZn37Mn3Al2PbSi auf sehr hohem Niveau.

Als Zielsetzung für die Entwicklung einer neuen Kupferlegierung für Gleitelemente auf Messingbasis lässt sich daher ausführen, dass diese optimalerweise die Eigenschaftskombination aus hinreichender Temperaturstabilität von SB8 und sehr guten Gleiteigenschaften von S40 aufweisen sollte.

Die vorangegangene Analyse der wirksamen Verschleißmechanismen sowie der Möglichkeiten der werkstofftechnischen Beeinflussung des Ausmaßes der Verschleißschädigung stellte eine grundlegende Voraussetzung für die Konzipierung der neuen Lagerlegierung CuZn31Mn2Al1Ni1Si1 (Wieland-Bezeichnung: SX1) dar.

Nachfolgend werden Legierungszusammensetzung, Gefüge und Eigenschaften dieser drei Lagerwerkstoffe miteinander verglichen.

Gefüge

In der Tabelle 1 sind die Richtwerte für die chemische Zusammensetzung der beiden Bezugswerkstoffe SB8 und S40 sowie der Legierungsgehalt des neuen Sondermessings SX1 aufgelistet.

Aufgrund des hohen Cu-Gehaltes und des fehlenden Mn-Anteils kommt SB8 einem α-β-Messing gleich (Bild 4). Dabei besteht die Matrix aus der α-Phase, in der die dunkel eingefärbten, zeilenförmig verstreckten β-Phasenanteile eingelagert sind.

In der Gefügeaufnahme von S40 wird deutlich, dass die Matrix bedingt durch den vergleichsweise niedrigen Cu-Gehalt nahezu ausschließlich aus der β-Phase aufgebaut ist (Bild 5). Diese

ist durchzogen von grau dargestellten Siliziden der Modifikation Mn₃Si₃.

Das sehr feine Gefüge mit dem in die α-Matrix eingelagerten Netz von β-Inseln (gelb) und mit Mn-Mischsiliziden unterschiedlicher Größe und Form ist charakteristisch für den neuen Lagerwerkstoff SX1 (Bild 6). Dieses Gefüge vereint das Merkmal eines niedrigeren β-Anteils der Legierung SB8 mit dem Gehalt von harten Siliziden des S40. Bei höherer Vergrößerung sind zusätzlich sehr feine Silizide ersichtlich, die vornehmlich in der α-Matrix eingebettet sind (Bild 7).

Mechanische Eigenschaften

Als Vormaterial für die spanende Fertigung der Gleitelemente dienen u.a. Stangen bzw. Rohre, die mittels der Prozesse Gießen/Warmumformung/Kaltumformung + Glühen hergestellt werden. Die Mittelwerte der wichtigs-

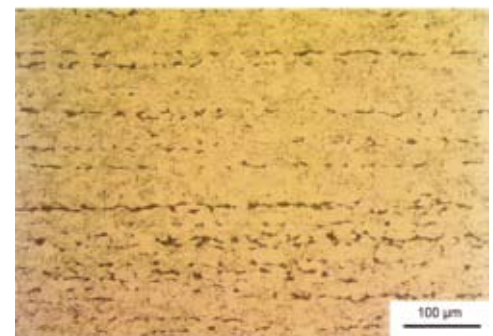


Bild 4: Gefüge SB8 (Vergröß. 200-fach)

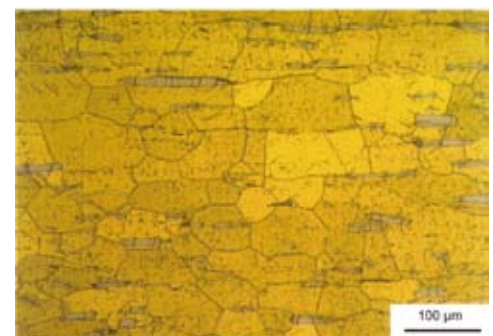


Bild 5: Gefüge S40 (Vergröß. 200-fach)

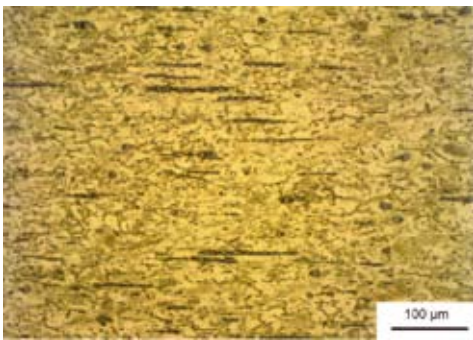


Bild 6: Gefüge SX1 (Vergröß. 200-fach)

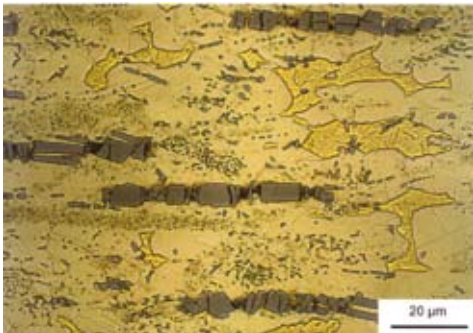


Bild 7: Gefüge SX1 (Vergröß. 1000-fach)

ten mechanischen Eigenschaften von Rohren einer Chargenzahl sind in der Tabelle 2 dargestellt.

Insbesondere der Wert für die Härte HB und die für Gleitelemente so bedeutsame Dehngrenze $R_{p0,2}$ der S40-Rohre liegen auf vergleichsweise niedrigem Niveau. Hinsichtlich dieser beiden Eigenschaften gewährleistet SX1 eine weitgehende Annäherung an die Maximalwerte der Vergleichswerkstoffe. Damit kann das Ziel einer Einstellung ausreichender mechanischer Kennwerte als erreicht angesehen werden.

Die hohe Härte stellt die Grundvoraussetzung für eine zweckentsprechend große Beständigkeit gegenüber den abrasiven Schädigungsmechanismen des Mikroflügens und Mikrospanens dar

(Bild 3). Weiterhin erfüllt das Gefüge durch seine heterogene Struktur, die durch eine duktile Matrix mit eingelagerten harten Phasenbestandteilen gekennzeichnet ist, die Forderung nach einem hohen Widerstand gegen das Mikroermüden und -brechen sowie gegen die Oberflächenzerrüttung.

Warmfestigkeit

Für die betrachteten Lagerwerkstoffe geht aus den Bildern 8 und 9 die Veränderung der Zugfestigkeit R_m und der Dehngrenze $R_{p0,2}$ im Verlaufe einer Temperaturerhöhung auf bis zu 400 °C hervor. Mit steigender Temperatur ist ein deutlicher Abfall von R_m und $R_{p0,2}$ der β -reichen Legierung S40 ersichtlich. Dieser wird durch die thermisch induzierte Umwandlung der β - in die α -Phase verursacht. Infolge des β -ärmeren Gefüges der Lagerwerkstoffe SB8 und SX1 fällt die Verringerung der Festigkeitswerte bei diesen Legierungen während einer Temperaturerhöhung bis ca. 200-250 °C geringer aus. Daher kann konstatiert werden, dass die neue Legierung SX1 die Anforderungen an die Temperaturstabilität des Gefüges erfüllt.

Adhäsive Verschleißeigenschaften

Bei der Auswahl einer Prüfmethode sollte eine Annäherung an die tatsächlich wirkenden Beanspruchungsbedingungen erfolgen [8-11]. Deshalb wurde für die Überprüfung des adhäsiven Verschleißverhaltens der drei Sondermessing SB8, S40 und SX1 das Modellverfahren Ringsegment-Scheibe eingesetzt. Durch die Umsetzung dieses Verfahrenstyps als Fress-test kann mittels einer intervallartigen

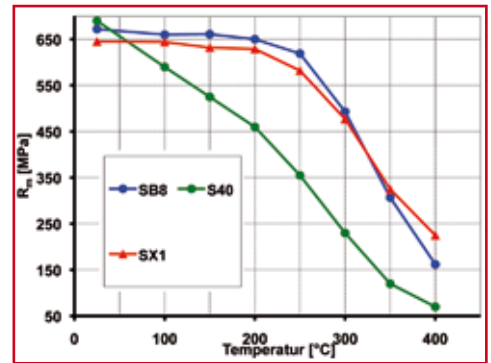


Bild 8: Zugfestigkeit R_m in Abhängigkeit von der Temperatur

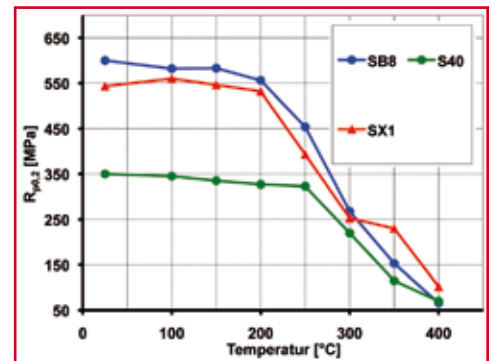


Bild 9: Dehngrenze $R_{p0,2}$ in Abhängigkeit von der Temperatur

Legierung	SB8	S40	SX1
Vormaterial	Rohr 30,1 x 24,7 mm	Rohr 60 x 48 mm	Rohr 30,1 x 24,7 mm
HB	195	163	207
R_m [MPa]	654	628	648
$R_{p0,2}$ [MPa]	593	315	566
A5 [%]	14,4	21,4	13,7

Tabelle 2: Mittelwerte einiger mechanischen Eigenschaften der Lagerwerkstoffe

Laststeigerung die Belastungsgrenze des Gleitwerkstoffes ermittelt werden. Die verwendeten Testbedingungen sind in der Tabelle 3 aufgelistet.

In Bild 10 ist der besonders aussagekräftige Verlauf des Reibwertes in Abhängigkeit von der Last und der Laufzeit der Prüfung der drei Lagerwerkstoffe dargestellt. Bedingt durch den vorherrschenden Gefügeanteil der α -Phase mit kfz.-Struktur in der SB8-Legierung kommt es schon bei kleinerer Last zum Fressen der Lagerpartner. Demgegenüber gewährleistet die S40-Matrix aus β -Phase (krz.) zusammen mit den Mn_5Si_3 -Siliziden hexagonaler Struktur die vergleichsweise höchste Beständigkeit gegenüber dem adhäsiven Verschleiß.

Der im Vergleich zu S40 abgesenkte β -Gehalt im Gefüge von SX1 führt zu einer stärker ausgebildeten Einlaufphase. Allerdings verhindern der hohe Anteil größerer Mn_5Si_3 -Silizide sowie die tribologische Stabilisierung der α -Phase durch die feineren Silizide ein Fressen der Proben sogar bei Maximallast. Das leichte Absinken des Reibwertes ab ca.

Parameter	
Tribometer	Wazau TRM 1000
Scheiben-Werkstoff	100Cr6
Ring-Werkstoff	SB8, S40, SX1
Schmierung	Tauchschrnerung mit Motorenöl Shell Rimula SAE30
Starttemperatur	120 °C
Einlaufphase	5 min bei 200 N
Laststeigerung	alle 2 min um 50 N
Maximallast	1050 N
Maximale Flächenpressung	16 N/mm ²
Gleitgeschwindigkeit	1 m/s
Abschaltkriterien	Drehmoment > 2,5 Nm oder Erreichen der Maximallast
Messgrößen	Reibmoment, Temperatur, Verschleiß

Tabelle 3: Parameter des Triboverfahrens Ringsegment-Scheibe

der Hälfte der Versuchsdauer weist auf eine bezüglich S40 größere Bedeutung der Ausbildung einer Triboschicht für den adhäsiven Verschleißwiderstand hin. Diese Trennschicht zwischen den metallischen Kontaktflächen lässt in Einheit mit dem vorteilhaften heterogenen Gefüge der Legierung auch bei Fortsetzung des Versuches ein stabiles Laufverhalten der Gleitelemente aus SX1 erwarten.

Es kann somit die Feststellung getroffen werden, dass die neue Lagerlegierung SX1 trotz fehlendem Pb-Gehalt die notwendige Beständigkeit gegenüber dem Fressverschleiß aufweist.

Zusammenfassung

Die herkömmlichen Gleitlagerwerkstoffe erreichen in Verbrennungsmotoren zunehmend ihre Leistungsgren-

zen. Die tribologischen und thermischen Beanspruchungen steigen, da aus Leichtbaugründen die Abmessungen der Bauteile reduziert und gleichzeitig aus Emissionsgründen die Zünddrücke angehoben werden. Weiterhin führt der Einsatz von niedrigviskosen Ölen zu einem Anstieg von verschleißintensiven Mischreibungszuständen, die bei Gleitelementen im Motorraum besonders während der Anfahr- und Stopvorgänge sowie beim Zusammenbruch des Schmierfilms auftreten.

Die Legierungssysteme CuZn31Si11 und CuZn37Mn3Al2PbSi weisen entweder eine hohe Warmfestigkeit oder einen außerordentlich großen Widerstand gegen den Fressverschleiß auf. Außerdem enthalten beide Lagermaterialien Blei als Legierungsbestandteil. Gemäß der EU-Altautoverordnung ist allerdings dieses als toxisch bewertete Legierungselement in Zukunft nicht mehr zulässig.

Daher bestand die Zielsetzung, einen alternativen Pb-freien Messingwerkstoff zu entwickeln, der gleichzeitig die Anforderungen an die thermischen und tribologischen Werkstoffeigenschaften erfüllt.

Die heterogene Gefügeausbildung mit dem in die duktile α-Matrix eingelagerten Netz von β-Inseln und mit Mn-Siliziden unterschiedlicher Größe und Form verleiht der neuen Lagerlegierung SX1 ein hohes Maß an thermischer Stabilität und komplexer Ver-

schleißbeständigkeit. Durch die zusätzliche Erfüllung der Umweltrichtlinien ist dieser Werkstoff in besonderem Maße geeignet, um als Gleitelement in zukünftigen Verbrennungsmotoren, Getrieben, Nebenaggregaten, Antriebssträngen und Bremsen eingesetzt zu werden.

Literatur

- [1] Burwell Jr., U.T.: Survey of possible wear mechanism. *Wear* 1 (1957/58), S. 19-141
- [2] Zum Gahr, K.H.: Entwicklung und Einsatz verschleißfester Werkstoffe. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 19 (1988), S. 223-230
- [3] Bartel, D.; Bobach, L.; Deters, L.: Fresskriterien für ölgeschmierte Radialgleitlager. *Tribologie und Schmierungstechnik* 51 (2004) 5, S. 29-38
- [4] Wendl, F.: Verschleiß – Abrasion und Adhäsion. *Wissenschaftlicher Praktikumsbericht, Märkische Fachhochschule Iserlohn*, http://www.Scriptum-menden.de/swf/Sondergebiete_der_Werkstofftechnik_-_Abrasion_und_Adhasion.pdf
- [5] Zum Gahr, K.H.: Reibung und Verschleiß. Ursachen-Arten-Mechanismen. In: H. Grewe (Hrsg.): *Reibung und Verschleiß. Verschleiß-Symposium der DGM, DGM Informationsgesellschaft* (1992), S. 3-14
- [6] Habig, K.-H.: *Verschleiß und Härte von Werkstoffen*. Carl Hanser Verlag, München-Wien (1980), S. 62-73
- [7] Collenberg, H.F.: *Untersuchungen zur Fresstragfähigkeit schnelllaufender Stirnradgetriebe*. Dissertation, Technische Universität München (1991)
- [8] Römer, E.; Bartz, W.J.: *Gleitlagertechnik*. Expert-Verlag, Grafenau/Württ (1981)
- [9] Czichos, H.; Habig, K.-H.: *Tribologie-Handbuch*. Vieweg-Verlag, 2.Auflage, Wiesbaden (2003)
- [10] Grün, F.; Godor, I.; Eichseder, W.: Schadensorientierte Prüfmethoden und abgeleitete Funktionsmodelle für Gleitwerkstoffe. *Tribologie und Schmierungstechnik* 54 (2007) 5, S. 26-30
- [11] *Modellverschleiß-Untersuchungen an unterschiedlichen Kontaktgeometrien und Einbaulagen*. *Tribologie und Schmierungstechnik* 56 (2009) 2, S. 19-23

(1) *Dr.-Ing. Kai Weber, Zentrallabor und Entwicklung im Unternehmensbereich Metall der Wieland-Werke AG Ulm*

(2) *Dr. Klaus Pucher, Unternehmensbereich Gleitelemente der Wieland-Werke AG Ulm*

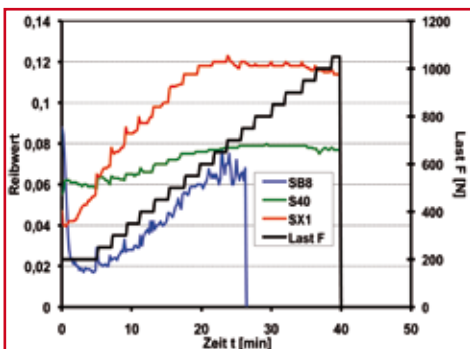


Bild 10: Verlauf des Reibwertes in Abhängigkeit von Last und Laufzeit