

José-Luis Bote-García* und Clemens Gühmann

Schätzung des Verschleißvolumens an Gleitlagern

Estimation of the wear volume journal bearings

DOI 10.1515/teme-2021-0067

Zusammenfassung: Zur Entwicklung eines Systems zur Vorhersage der restlichen Lebensdauer eines Gleitlagers ist es notwendig, den fortschreitenden Verschleiß quantitativ zu überwachen. Hierzu soll ein Datensatz über den Verlauf mehrerer Verschleißexperimente an Gleitlagern erstellt werden. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Überwachung des Verschleißes durch Messung von Rundheits- und Oberflächenprofilen vor und nach einem Experiment. Das Oberflächenprofil kann zur Erkennung und Überwachung des Einlaufvorgangs verwendet werden. Dahingegen kann mit dem Rundheitsprofil das Verschleißvolumens über die gesamte Lebensdauer des Gleitlagers ermittelt werden. Hierzu wird ein Vorgehen zur Schätzung des Verschleißvolumens beschrieben. Die Unsicherheit des Vorgehens wird analysiert, wobei sich zeigt, dass das Vorgehen eine gute Genauigkeit besitzt und die Unsicherheit durch die manuelle Einstellung der Messpositionen induziert wird. Auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit können Schwellenwerte für messbares Verschleißvolumen ermittelt werden.

Schlüsselwörter: Gleitlager, Verschleißmessung, Rundheitsprofil, Oberflächenprofil, Rauigkeit.

Abstract: To develop a system for predicting the remaining service life of a journal bearing, it is necessary to monitor the progressive wear quantitatively. For this purpose, a data set on the progress of several wear experiments on plain bearings is to be created. This work is concerned with monitoring wear by measuring roundness and surface profiles before and after an experiment. The surface profile can be used to detect and monitor the running-in process. On the other hand, the roundness profile can be used to determine the wear volume over the entire life of the journal bearing. For this purpose, a procedure for estimating the wear volume is described. The uncertainty of the procedure is analyzed. It is shown that the procedure has

a good accuracy and that the uncertainty is induced by the manual setting of the measuring positions. Based on the results of this work, threshold values for measurable wear volume can be determined.

Keywords: Journal bearing, wear measurement, roundness profile, surface profile, roughness.

1 Einleitung

Ein System zur Schätzung der restlichen Lebensdauer eines Gleitlagers soll in der Lage sein, den Verschleiß zu überwachen. Hierzu kann zunächst der Reibungsstatus des Gleitlagers mit Hilfe des Körperschallsignals ermittelt werden Mokhtari et al. (2017). Hierbei wird während des Betriebs geprüft, ob sich das Gleitlager in der Flüssigkeits-, Misch- oder Festkörperreibung befindet. Ein Verschleiß durch Materialabtrag findet in der Regel in der Misch- und Festkörperreibung statt. Ein nächster Schritt ist, den auftretenden Verschleiß zu quantifizieren Bote-García et al. (2020); König et al. (2021); Mokhtari et al. (2020). Hierbei wird die Verbindung zwischen Körperschall und Verschleißvolumen genutzt, welcher sich in experimentellen Aufbauten zeigt Boness et al. (1990); Hase et al. (2012). Zur Entwicklung von Systemen zur Verschleißvolumenschätzung an Gleitlagern soll ein Datensatz aufgebaut werden, bei dem in Experimenten mehrerer Gleitlager über einen gewissen Zeitraum bestimmten Betriebsparametern (Drehzahl, Last und Öltemperatur) ausgesetzt sind und abschließend der Verschleißvolumen ermittelt wird.

Das Verschleißvolumen kann über eine Messung der Gewichtsänderung nach einem Experiment ermittelt oder über eine Vergleich der Geometrie des Gleitlagers geschätzt werden. Es zeigt sich, dass die Gewichtsänderung während eines Experimentes gering ist. Ein Verschleißvolumen von 1 mm^3 entspricht einem Gewicht von ca. 1 mg bei dem Material Rotguss. Das entspricht für das verwendete Gleitlager (Innendurchmesser $R = 25 \text{ mm}$ und Breite $b = 25 \text{ mm}$) in etwa $1 \mu\text{m}$ Materialabtrag über 90° der Innenfläche. Eine andere Gewichtsveränderung, zum Beispiel eine

*Korrespondenzautor: José-Luis Bote-García, Fachgebiet Elektronische Mess- und Diagnosetechnik, Technische Universität Berlin, Einsteinufer 17, 10587 Berlin, E-Mail: jose-luis.bote-garcia@tu-berlin.de

Verunreinigung, wird das Ergebnis einer Gewichtsmessung verfälschen.

Zur Überwachung der Geometrie gibt es optische und taktile Messverfahren. Bei optischen Messverfahren wird die Oberfläche durch ein Mikroskop dreidimensional vermessen. Bei taktile Messverfahren wird sie zweidimensional entlang einer Linie abgetastet. Hier kann das Oberflächen- und Rundheitsprofil genutzt werden Sharma and Hargreaves (2014).

Für den Datensatz zur Entwicklung eines Systems zur Verschleißvolumenschätzung soll der fortschreitende Verschleiß an Gleitlager überwacht und über deren Lebenszeit mehrmals erfasst werden. Hierzu sollen mit demselben Gleitlager mehrerer Verschleißexperimente durchgeführt werden. Aufgrund dessen eignen sich optische Messverfahren nach unserem besten Wissen nicht, da das Gleitlager in zwei Teile geteilt werden müsste, damit die Oberfläche erfasst werden kann.

Daher werden in dieser Arbeit taktile Messverfahren betrachtet. Das Vorgehen zur Ermittlung des Verschleißvolumens lassen sich grundsätzlich auf optische Messverfahren übertragen.

Im Folgenden werden Methoden zur Verschleißüberwachung auf Basis des Oberflächen- und Rundheitsprofils evaluiert. Zunächst wird die Überwachung mittels Oberflächenprofils untersucht. Im Anschluss wird ein Vorgehen zur Schätzung des Verschleißvolumens beschrieben und eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt.

2 Oberflächenprofil

Das Oberflächenprofil (oder Primärprofil) erfasst die Struktur der Oberfläche entlang einer Geraden. Aus dem Oberflächenprofil kann durch Hochpassfilterung das Rauheitsprofil ISO (2010) ermittelt werden, welche sensibel gegenüber kleinen Veränderungen der Oberfläche ist.

In Abb. 1 ist zu sehen, an welchen Stellen Messungen durchgeführt werden. Dabei zeigen die blauen Linien die Messpositionen der Oberflächenprofile. Das Oberflächenprofil wird alle 30° beginnend bei 30° mit einem ACCRETECH SURFCOM TOUCH 50 ACC (2021) erfasst.

Für eine Verschleißvolumenschätzung müssen die Oberflächenprofile vor und nach einem Experiment zueinander ausgerichtet werden. Zum Ausrichten muss ein Bereich genutzt werden, indem kein Materialabtrag stattfand. Für eine Untersuchung des Einlaufverhaltens kann hier das Rauheitsprofil genutzt werden, um einen solchen Bereich zu erkennen.

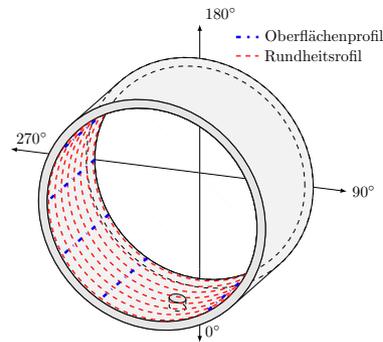


Abb. 1: Messposition für das Oberflächen- und Rundheitsprofil an der Innenfläche des Gleitlagers. Bei 0° ist der Öl-Einlass dargestellt.

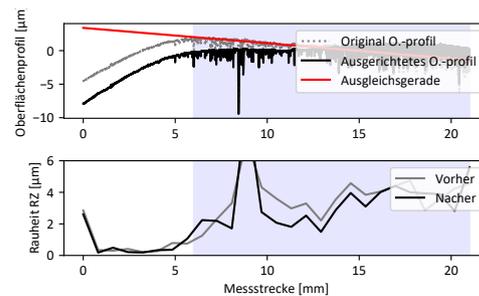


Abb. 2: Zu sehen ist das originale (grau) und ausgerichtete (schwarz) Oberflächenprofil nach einem Experiment. Der farblich hervorgehobene Bereich wurde zur Ausrichtung verwendet, da hier die Differenz der Rauheit gering ist.

In Abb. 2 sind oben das originale (grau) und ausgerichtete Oberflächenprofil (schwarz) nach einem Experiment dargestellt. Der farblich hervorgehobene Bereich wird zur Berechnung einer Ausgleichsgerade genutzt. Für die Ausrichtung wird angenommen, dass in diesem Bereich kein Verschleiß aufgetreten ist und Oberflächenprofile vor und nach dem Versuch identisch sind. Hierzu wird der RZ-Wert betrachtet, welcher sich wenig verändert hat. Der RZ-Wert beschreibt die abschnittsweise Differenz zwischen Minimal- und Maximalwert im Rauheitsprofil ISO (2010).

Im Laufe der Experimente an einem Gleitlager sollte ein Materialabtrag über die gesamte Breite des Lagers auftreten, sodass die Ausrichtung der einzelnen Messungen zueinander nicht möglich ist. Ab einem RZ-Wert nahe 0 µm kann kein Unterschied zwischen einer Messung vor und nach einem Experiment festgestellt werden und daher kein Bereich zur Ausrichtung bestimmt werden.

Ein solches Verhalten ist in Abb. 3 zu sehen. Hier sind zunächst die jeweils ausgerichteten Oberflächenprofile vor und nach einem Experiment und darunter deren Differenz dargestellt. Es ist Materialabtrag auf der rechten Seite zu erkennen. Zum Schluss ist der RZ-Werte vor und nach

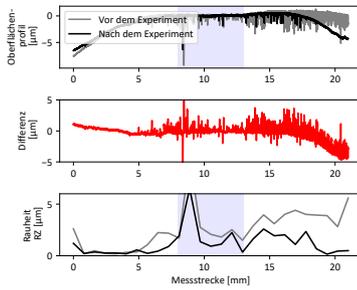


Abb. 3: Vergleich von Oberflächenprofilen vor und nach einem Experiment. Der hervorgehobene Bereich wurde zur Ausrichtung der Profile zueinander verwendet. Auf der rechten Seite ist Materialabtrag zu erkennen. Die schlechte Übereinstimmung auf der linken Seite kommt von der nicht identischen Messposition vor und nach dem Experiment.

dem Experiment zu sehen. Für die Ausrichtung kann nur ein kleinen Bereich verwendet werden, da sich der Rauheitswert fasst über die gesamte Breite des Lagers stark verringert hat.

Sobald das Gleitlager eingelaufen ist, das Rauheitsprofil entlang einer Messposition an der Innenfläche des Gleitlagers unweit $0 \mu\text{m}$ ist, kann das Oberflächenprofil nicht mehr genutzt werden, um das Verschleißvolumen zu schätzen. Die Oberflächenprofile vor und nach einem Experiment lassen nicht mehr eindeutig zueinander ausrichten. Ein gleichmäßiger Materialabtrag wäre nicht erfassbar.

3 Verschleißvolumenschätzung mittels Rundheitsprofil

Das Rundheitsprofil erfasst die Abweichung zu einem idealen Kreis entlang des Umfangs. Im Folgenden wird ein Vorgehen zur Schätzung des Verschleißvolumens über den Vergleich der Rundheitsprofile vor und nach einem Experiment beschrieben und die Unsicherheit dieser Schätzung untersucht.

3.1 Vorgehen

Das Rundheitsprofil wird, wie in Abb. 1 dargestellt, an acht äquidistanten Position mit einem Zeiss RONDCOM Touch ZEI (2021) aufgenommen. Die Rundheitsprofile vor und nach einem Experiment müssen zunächst zueinander ausgerichtet werden. Zur Ausrichtung muss ein Bereich verwendet werden, indem kein Materialabtrag stattfindet. Hier wird die Konstruktion des Prüfstandes ausgenutzt, durch welchen Verschleiß stets im Winkelbereich von 180°

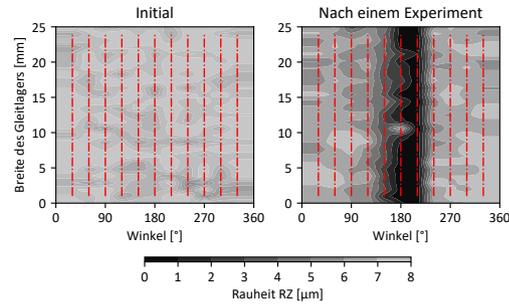


Abb. 4: Vergleich der Oberflächenrauheit nach einem Experiment zum Initialzustand. Die Rauheit hat sich hauptsächlich im Winkelbereich von 180° des Gleitlagers verändert.

auftritt Bote-Garcia et al. (2020). Daher werden die Bereiche zwischen 30° und 150° sowie 210° und 330° zur Ausrichtung der Rundheitsprofile genutzt, um den Verschleißbereich und Öl-Einlass zur Schmierung auszublenken. Für das Vorgehen wird angenommen, dass in diesen Bereichen kein Materialabtrag stattfindet.

Rauheitsmessungen an den Gleitlagern nach einem Experiment zeigen, dass sich die Oberfläche in diesen Bereich wenig verändert. Dies ist in Abb. 4 dargestellt. Hier ist links die Rauheit vor dem ersten Experiment und rechts einem Experimente zu sehen.

Zur Ausrichtung der Rundheitsprofile wird der kleinste Quadrate-Referenzkreis genutzt. Dieser wird aus den Werten des Rundheitsprofils in den Bereichen 60° und 120° sowie 240° und 300° bestimmt. Durch Rotation der Rundheitsprofile nach dem Experiment wird die Differenz der Rundheitsprofile minimiert, um abweichende Einspannung bei der Messung zu beheben.

In Abb. 5 ist das Ergebnis einer Ausrichtung der Rundheitsprofile zu sehen. Dabei sind Rundheitsprofile vor dem Experiment in Grau nach dem Experiment in Schwarz dargestellt. Unten ist für die einzelnen Messpositionen jeweils die Differenz der Rundheitsprofile dargestellt.

Ausgehend von der Gleichung

$$A = \pi p(2R + p),$$

welche die Flächendifferenz A zwischen zwei Kreisen mit dem Radius R und $R + p$ beschreibt, lässt sich mit den an den Messpositionen aufgenommenen Rundheitsprofilen jeweils eine Flächendifferenz A_i bestimmen. A_i an einer Messposition i lässt sich mit

$$A_i = \int_{120^\circ}^{240^\circ} \pi p_i(\varphi)(2R + p_i(\varphi))d\varphi$$

bestimmen. Hier ist $p_i(\varphi)$ die Differenz der Rundheitsprofile an Messposition i über den Winkel φ und R

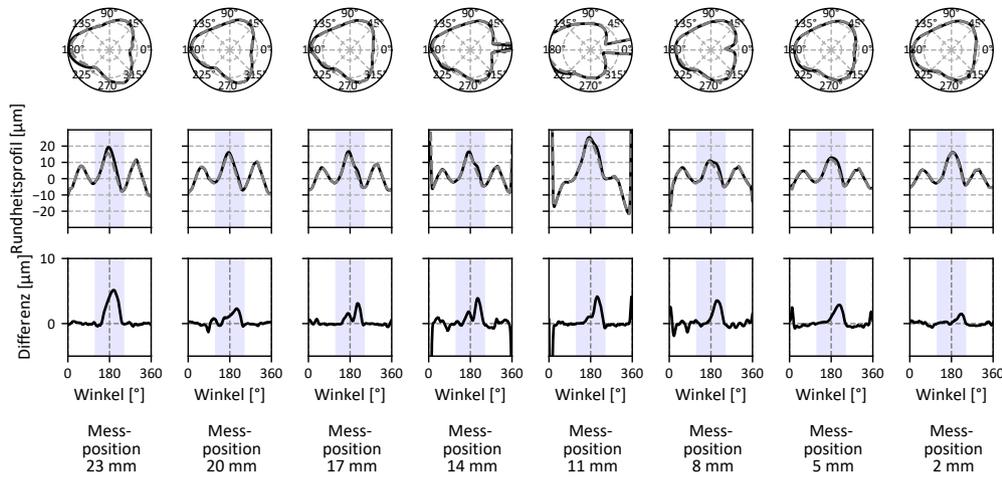


Abb. 5: Ausgerichtete Rundheitsprofile. Es sind die Profile vor (grau) und nach (schwarz) einem Experiment dargestellt. Die unterste Reihe zeigt jeweils die Differenz. Für die Verschleißvolumenschätzung wird der hervorgehobene Bereich genutzt. Bei den dargestellten Messungen ist deutlich Verschleiß in der Lastzone zu erkennen.

der Radius des Gleitlagers. Zur Berechnung A_i wird der Bereich von 120° bis 240° genutzt. Dieser ist in Abb. 5 hervorgehoben.

Das gesuchte Verschleißvolumen V kann mit

$$V = \int_0^b A(x) dx$$

ermittelt werden. Wobei $A(x)$ eine lineare Interpolation der einzelnen Flächendifferenzen A_i über alle acht Messpositionen i über die gesamte Breite b des Gleitlagers beschreibt.

3.2 Analyse der Schätzunsicherheit

Zur Untersuchung des Schätzunsicherheit wird die Genauigkeit und Präzision analysiert. Im Folgenden wird zur Vereinfachung ein gleichmäßiger Materialabtrag p_c über 90° der Gleitlagerinnenfläche angenommen. Folgende Gleichung beschreibt die Schätzunsicherheit:

$$\Delta A_c = \left| \frac{\partial A_c}{\partial R} \right| \Delta R + \left| \frac{\partial A_c}{\partial p_c} \right| \Delta p_c \quad (1)$$

$$A_c = \pi p_c (2R + p_c) \frac{90^\circ}{360^\circ} \quad (2)$$

$$\Delta A_c = 2\pi (p_c \Delta R + (R + p_c) \Delta p_c) \frac{90^\circ}{360^\circ}. \quad (3)$$

Für eine Analyse der Genauigkeit wird die Fertigungstoleranz und ein systematischer Fehler durch die Ausrichtung betrachtet. Der erste Term der Gleichung 1 beschreibt

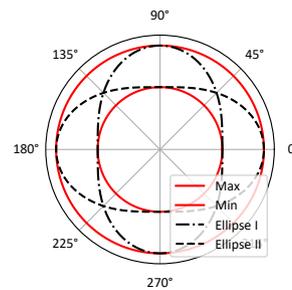


Abb. 6: Mögliche Szenarien für den initialen Zustand der Rundheitsprofile, welche bei der Unsicherheitsanalyse betrachtet werden.

den Fehler durch die Fertigungstoleranz. Für den Fehler durch die Ausrichtung werden zwei Szenarien betrachtet, jeweils eine Ellipse innerhalb der Fertigungstoleranz des Gleitlagers. Die beiden Szenarien sind in Abb. 6 dargestellt und stellen zwei ungünstigste Ausgangssituationen dar. Da der Bereich zur Zentrierung symmetrisch gewählt wurde, wird die Form nicht verändert. Deshalb wird für die Unsicherheitsanalyse nur die Fertigungstoleranz betrachtet.

Bei der Analyse der Präzision, dem zweiten Term der Gleichung 1, lassen sich mehrere Störquellen identifizieren:

- Das Gleitlager muss im Messgerät händisch nivelliert werden.
- Die Messposition muss händisch eingestellt werden.
- Das Messgerät selbst hat ein Messrauschen.

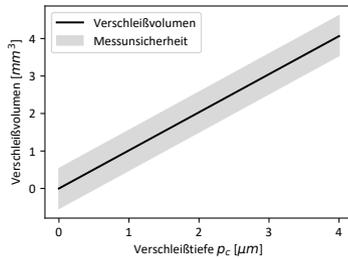


Abb. 7: Messunsicherheit der Verschleißvolumenschätzung über die Verschleißtiefe p_c . Es wird einem konstanten Materialabtrag über einem Viertel der Gleitlagerfläche angenommen.

Um die Präzision abzuschätzen, werden die Rundheitsprofile vor und nach einem Experiment mehrmals erfasst. Hierzu werden die Gleitlager jeweils aus dem Messgerät entfernt, erneut eingesetzt und nivelliert. Das Verschleißvolumen V unter den Messungen vor beziehungsweise nach einem Experiment sollte 0 mm^3 betragen. Es wird jeweils V geschätzt und eine Standardabweichung $\sigma(V)$ berechnet. Aus V kann ein entsprechender Materialabtrag p_c berechnet werden. Hierzu wird Gleichung 2 nach p_c umgestellt. So ergibt sich

$$p_c = \sqrt{\frac{V \cdot 360^\circ}{\pi b \cdot 120^\circ} + R^2} - R.$$

Es wird ein gleichmäßiger Materialabtrag p_c über 60° der Gleitlagerinnenfläche und eine Normalverteilung der Schätzung von $\sigma(V)$ angenommen.

Für das verwendete Gleitlager und Rundheitsmessgerät ergeben sich die Werte $\Delta R = 8 \text{ µm}$ und $\sigma(p_c) = 0,262 \text{ µm}$. In Abb. 7 ist das Ergebnis der Schätzunsicherheitsanalyse für das Verschleißvolumen über die Verschleißtiefe p_c dargestellt. Die Schätzunsicherheit der vorgestellten Methode wird letztendlich durch deren Präzision bestimmt. Der systematische Schätzfehler durch die Fertigungstoleranz fällt nichts ins Gewicht. Bei einer Verschleißtiefe p_c von 10 µm beträgt der durch ΔR und $\sigma(p_c)$ hervorgerufene Fehler $\pm 0.0314 \text{ mm}^3$ und $\pm 0.533 \text{ mm}^3$. Für $\Delta p_c = 2\sigma(p_c)$ genutzt.

4 Diskussion & Ausblick

Die vorgestellte Arbeit zeigt, dass das Oberflächenprofil für eine quantitative Überwachung des Verschleißvolumens über die gesamte Lebenszeit des Gleitlagers ungeeignet ist. Es lassen sich lediglich Bereiche erkennen, in denen Verschleiß stattgefunden hat. Besser ist hier die Verschleißvolumenschätzung auf Basis der Differenzbildung

aufgenommener Rundheitsprofile vor und nach einem Experiment. Das Vorgehen hierzu und die Unsicherheit der Schätzung wurde beschrieben.

Das Ergebnis der Schätzunsicherheitsanalyse ist, dass sich das Verschleißvolumen an einem Gleitlager mit guter Genauigkeit über das Rundheitsprofil ermitteln lässt. Die Präzision der Schätzung wird durch die manuelle Einstellung der Messpositionen und Nivellierung beeinflusst und wurde durch Wiederholungsmessung bestimmt. Durch einen automatisierten Messvorgang könnte die Präzision verbessert werden.

Die ermittelte Schätzunsicherheit kann genutzt werden, um belastbare Grenzwerte für eine Klassifikation (beispielsweise, Verschleiß oder kein Verschleiß) für ein Verschleißexperiment zu bestimmen.

Literatur

- DIN EN ISO 4287, 2010.
- SURFCOM TOUCH Series. ACCRETECH, 2021. URL <https://metrology.accretech.eu/surcom-touch-serie-de>.
- R. Boness, S. McBride und M. Sobczyk. Wear studies using acoustic emission techniques. *Tribology International*, 23(5): 291–295, 1990.
- J.-L. Bote-Garcia, N. Mokhtari und C. Gühmann. Wear monitoring of journal bearings with acoustic emission under different operating conditions. In *PHM Society European Conference*, Band 5, S. 8–8, 2020.
- A. Hase, H. Mishina und M. Wada. Correlation between features of acoustic emission signals and mechanical wear mechanisms. *Wear*, 292:144–150, 2012.
- F. König, C. Sous, A. O. Chaib und G. Jacobs. Machine learning based anomaly detection and classification of acoustic emission events for wear monitoring in sliding bearing systems. *Tribology International*, 155:106811, 2021.
- N. Mokhtari, F. Rahbar und C. Gühmann. Differentiation of journal bearing friction states and friction intensities based on feature extraction methods applied on acoustic emission signals. *tm-Technisches Messen*, 84(s1):42–47, 2017.
- N. Mokhtari, J. G. Pelham, S. Nowoisky, J.-L. Bote-Garcia und C. Gühmann. Friction and Wear Monitoring Methods for Journal Bearings of Geared Turbofans Based on Acoustic Emission Signals and Machine Learning. *Lubricants*, 8(3):29, 2020.
- S. C. Sharma und D. Hargreaves. A suitable method for journal bearing wear measurement. *Industrial lubrication and tribology*, 2014.
- Oberflächen-, Kontur- und Formmessgeräte. ZEISS, 2021. URL <https://www.zeiss.de/messtechnik/broschueren.html?catalog=rondcom>.