

Meßmethoden und Zuverlässigkeitsanalysen für polymere optische Fasern

Werner Daum
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 12200 Berlin
Tel.: 030-8104-1910, Fax: 030-8104-1917 , E-mail: werner.daum@bam.de

1. Einführung

Der Einsatz von Polymer-Lichtwellenleitern zur Signalübertragung im Kurzstreckenbereich gewinnt weltweit zunehmend an Bedeutung. Die Verwendung von Polymer-LWL im Streckenbereich bis ca. 100 m verbindet dabei die allgemeinen Vorteile der faseroptischen Signalübertragung mit ergänzenden spezifischen Vorteilen gegenüber Glasfaser-LWL und Kupferkabel wie

- geringes Gewicht (ca. 4 g/m),
- geringe Kabelabmessungen,
- hohe Flexibilität,
- niedrige Systemkosten für Sender, Empfänger und Verbindungstechnik,
- einfache Handhabung bei der Montage und Konfektionierung.

Aufgrund der zahlreichen positiven Eigenschaften der Polymer-LWL ergeben sich viele vorteilhafte Anwendungsbereiche:

- industrielle Prozeßautomatisierung, -steuerung und -datenerfassung,
- Büro-, Etagen- und Hausvernetzung,
- Rechnernetzwerke,
- Geräteverkabelung,
- Überwachung und Steuerung von Anlagen mit besonderer EMV-Problematik (z.B. Energieverteilanlagen),
- Signalübertragung und Beleuchtung in Transportsystemen (z.B. PKW, Flugzeug),
- Signalübertragung in explosionsgefährdeten Bereichen,
- Verkehrsleit- und Beleuchtungstechnik,
- faseroptische Sensoren.

Polymer-LWL unterliegen, wie andere technische Erzeugnisse auch, während ihrer gesamten Einsatzdauer einer Vielzahl von mechanischen, klimatischen und chemischen Beanspruchungen aus ihrer Umgebung. Diese Beanspruchungen wirken sich auf ihre Funktion und Leistungsfähigkeit sowie Lebensdauer aus. Damit üben die Umweltbeanspruchungen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf die Qualität und Zuverlässigkeit des faseroptischen Übertragungssystems aus. Für einen Einsatz von Polymer-LWL besonders in industriellen Anwendungsbereichen mit hohen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanforderungen ist es deshalb von grundlegender Bedeutung, die Auswirkungen von industriellen Umwelteinflüssen auf die übertragungstechnischen Eigenschaften zu untersuchen.

Wesentliches Ziel derartiger Zuverlässigkeitsanalysen ist die Qualifikation verschiedener Polymer-LWL für das jeweilige Einsatzgebiet und die Verbesserung der Produkteigenschaften in Zusammenarbeit mit Hersteller und Anwender. Eine weitere wichtige Bedeutung kommt den dafür zu entwickelnden Prüf- und Simulationsverfahren zu, insbesondere im Hinblick auf das derzeitige Fehlen bzw. die Unvollständigkeit entsprechender nationaler und internationaler Normen und Richtlinien. Im Rahmen der entwicklungsleitenden Normung ist deshalb die Umsetzung der Ergebnisse und Erfahrungen in entsprechende Richtlinien und Normen eine weitere Zielsetzung derartiger Forschungstätigkeiten.

2. Allgemeine Konzeption der Zuverlässigkeitsanalysen

Ein Polymer-LWL verändert infolge einer Beanspruchung durch Umwelteinflüsse im Verlauf seiner Einsatzzeit seine physikalischen Eigenschaften. Die wichtigste Eigenschaft ist das

Transmissionsverhalten bzw. die optische Dämpfung. Dabei ist im Hinblick auf die Qualifikation eines Polymer-LWL für bestimmte industrielle Einsatzbereiche primär nicht die absolute Dämpfung von Interesse, sondern ihre relative Änderung in Abhängigkeit von der Einwirkung der verschiedenen Umwelteinflüsse. Das Konzept zur systematischen Untersuchung des Transmissionsverhaltens eines Polymer-LWL unter industriellen Umwelteinflüssen gliedert sich deshalb in die drei Teilabschnitte: Umweltanalyse, Umweltsimulation und Klärung der Umweltauswirkungen auf die Transmissionseigenschaften. Auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse kann dann abschließend die Beurteilung der industriellen Einsatzmöglichkeiten erfolgen.

2.1 Analyse der Umwelteinflüsse

Grundlage der Umweltsimulation ist eine Analyse der industriellen Umweltbeanspruchungen, der ein Polymer-LWL im jeweiligen Anwendungsfall ausgesetzt ist. Dazu müssen die zu erwartenden Umwelteinflüsse erfaßt und definiert werden. Zu unterscheiden ist dabei zwischen Art des Einflusses, Häufigkeit, Intensität und Einwirkungsmöglichkeit. Je nach speziellem Anwendungsfall müssen eine Vielzahl von Einflußarten und deren mögliche Kombination berücksichtigt werden. Prinzipiell kann man zwischen mechanischen, klimatischen und chemischen Einflüssen unterscheiden, die, wie Tab. 1 zeigt, jeweils in unterschiedlichster Form in Erscheinung treten können.

<i>Einflußarten</i>		
<i>mechanisch</i>	<i>klimatisch</i>	<i>chemisch</i>
Biegung Wechselbiegung Rollenwechselbiegung Querdruck Schlag Torsion Vibration Zug	hohe Feuchte extreme Temperaturen Klimawechsel Betauung Vereisung UV-Strahlung	Schmierstoffe Treibstoffe Bremsflüssigkeit Hydrauliköl Säuren, Laugen Lösungsmittel Ozon
auch in Kombination		

Tab. 1: Zusammenstellung industrieller Umwelteinflüsse auf Polymer-LWL

2.2 Simulation der Umwelteinflüsse

Prinzipiell wird bei jeder Simulation eines Umwelteinflusses im Versuchslabor eine weitgehend realitätsnahe Nachbildung der tatsächlichen Umweltbeanspruchung angestrebt. Dementsprechend sind für die Untersuchung des Transmissionsverhaltens eines Polymer-LWL bei Beanspruchung durch industrielle Umwelteinflüsse problemangepaßte Simulationstechniken und -strategien entwickelt worden. Entwicklung und Aufbau der Simulationstechnik für die einzelnen Umwelteinflüsse haben sich weitgehend an bestehenden Prüfnormen z. B. für elektrische Kabel und Leitungen sowie für Lichtwellenleiter orientiert. Die spezifischen Eigenschaften des Polymer-LWL als Prüfobjekt haben dabei besondere Berücksichtigung gefunden.

Die Wahl der jeweiligen Simulationsstrategie hängt im wesentlichen vom zeitlichen Verlauf der realen Beanspruchung ab. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen zeitlich begrenzten, nur phasenweise auftretenden Beanspruchungen und kontinuierlichen bzw. quasi-kontinuierlichen Beanspruchungen. Phasenweise Beanspruchungen treten beispielsweise beim Kraftfahrzeug auf, wo Vibrationen nur

während der Betriebszeiten auf den Polymer-LWL einwirken. Bei der Simulation werden die dazwischen liegenden Ruhezeiten ausgeblendet und die Beanspruchungsperioden aneinandergereiht. Man erzielt einen Zeitraffungseffekt. In diesem Fall entsprechen im allgemeinen die Beanspruchungsbedingungen den realen Verhältnissen. Kontinuierliche oder quasi-kontinuierliche Beanspruchungen wirken auf einen Polymer-LWL während der ganzen oder zumindest langer Perioden der Einsatzdauer ein. Hierzu zählen z. B. klimatische Einflüsse oder statische mechanische Beanspruchungen. Die Strategie der Zeitraffung basiert in diesem Fall auf der Verschärfung der Beanspruchungsbedingungen während der Simulation gegenüber der Realität. Eine Verschärfung kann durch verschiedene Maßnahmen erzeugt werden:

- Aufprägung extremer Beanspruchungen als Dauerbeanspruchung,
- zyklischer Beanspruchungswechsel zwischen entgegengesetzten Extremwerten,
- Erhöhung der Beanspruchung über die realen Extremwerte hinaus oder
- Vergrößerung der Änderungsgeschwindigkeit bei Beanspruchungswechsel.

Die Auswahl der Simulationsstrategie und der zugehörigen Parameter erfolgt auf Grundlage der Umweltanalyse, der Auswertung entsprechender Prüfnormen und an Hand von Voruntersuchungen an Adern und Fasern.

2.3 Auswirkung der Umwelteinflüsse auf das Transmissionsverhalten

Grundlage für die Interpretation der Versuchsergebnisse und die abschließende Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten bildet die Klärung des ursächlichen Zusammenhangs zwischen einzelnen Umwelteinflüssen und den Dämpfungsmechanismen im Polymer-LWL. Prinzipiell unterscheidet man beim Polymer-LWL zwischen werkstoffspezifischen und/oder durch Störstellen verursachten Dämpfungsmechanismen (Tab. 2). Verantwortlich für die Veränderung der optischen Dämpfung bzw. Transmission infolge der Einwirkung von Umwelteinflüssen sind die Störstellenverluste. Neue Störstellen können entstehen und vorhandene können sich durch äußere Beanspruchung ausweiten und somit zu einem vorzeitigen Bauteilversagen führen.

werkstoffspezifische Verluste	Absorption	- Molekül-Oberschwingungen der CH-Banden - Elektronenübergänge
	Streuung	- Rayleigh-Streuung
Störstellenverluste	Absorption	- organische Verunreinigungen - Wasseraufnahme - Werkstoffveränderung durch chemisch aktive Medien
	Streuung	- Mikroporosität - Mikrorisse - Mikroeinschlüsse - Kerndurchmesseränderungen - Fehlstellen in der Grenzschicht

Tab. 2: Dämpfungsmechanismen beim Polymer-LWL

2.4 Meßverfahren zur Ermittlung des Transmissionsverhaltens

Zum Nachweis entstehender Störstellen und den damit verbundenen Transmissionsverlusten ist eine geeignete Meßeinrichtung erforderlich. Für die Dämpfungs- bzw. Transmissionsmessung existieren verschiedenen Meßverfahren, die von der einfachen Pegelmessung bis hin zur aufwendigen Impulsreflektometrie reichen. Ein wesentlicher Aspekt bei der Verfahrensauswahl ist die Meßunsicherheit. Diese wird u. a. beeinflusst durch: Temperatur, Fehlanpassung und Reproduzierbarkeit der optischen Ankopplung und Nichtlinearitäten. Im Hinblick auf eine hohe Nachweisempfindlichkeit von Veränderungen der Transmissionseigenschaften gilt es, diese Einflüsse möglichst gering zu halten. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte und abhängig von den zu erwartenden Störstellenverlusten wurde für die Untersuchungen ein modifiziertes Einfüge-Meßverfahren ausgewählt und eingesetzt.

Das Einfüge-Verfahren ist gekennzeichnet durch eine deutlich geringere Meßunsicherheit im Vergleich zur Pegelmessung. Dazu wird die Messung in zwei Schritten ausgeführt. Zuerst wird mit dem optischen Leistungsmesser die Leistung des Senders direkt gemessen. Dieser Meßwert stellt als Bezugswert die eingekoppelte Strahlungsleistung dar. Im zweiten Schritt wird der zu messende Polymer-LWL eingefügt und die Ausgangsleistung des LWL ermittelt. Aus beiden Meßwerten läßt sich die Dämpfung bzw. Transmission des LWL berechnen. Die Meßunsicherheit dieses Verfahrens hängt im wesentlichen nur von der Stabilität der Meßgeräte zwischen den Zeitpunkten bei der Messung und der Reproduzierbarkeit der Ankopplung ab. Langzeitdrifteffekte der Meßgeräte haben keinen Einfluß, was insbesondere bei zeitlich ausgedehnten Untersuchungen positiv zum Tragen kommt. Um die Reproduzierbarkeit bei der Ankopplung noch deutlich zu verbessern, wurde eine Modifikation des Verfahrens dahingehend vorgenommen, daß ein spezieller optischer Multiplexer für Polymer-LWL mit integriertem Sender und Empfänger entwickelt und eingesetzt worden ist.

Alle Transmissionsmessungen werden entsprechend den zu erwartenden realen Betriebsbedingungen bei einer Wellenlänge von 660 nm und unter Einsatz praxisüblicher Sender ausgeführt.

3. Beispiel für eine Zuverlässigkeitsanalyse

Die Wechselbiegebeanspruchung ist bei industriellen Anwendungen eine der häufigsten auftretenden Beanspruchungsarten und besitzt deshalb große Bedeutung im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der faseroptischen Signalübertragung. Wechselbiegung kann beispielsweise im Bereich von Maschinensteuerungen beim Einsatz an einem Roboterarm oder an sonstigen Übergängen zwischen beweglichen Maschinen-teilen auftreten. Bei Anwendungen in Fahrzeugen ist eine wechselnde Biegebeanspruchung des Polymer-LWL zum Beispiel im Türbereich anzutreffen.

Allgemein ist die Wechselbiegebeanspruchung dadurch gekennzeichnet, daß der Polymer-LWL an der Biegestelle insbesondere in den Randbereichen zyklisch gedehnt und gestaucht wird. D. h., es treten dort abwechselnd drei mechanische Spannungszustände auf: Zugspannung, spannungslos und Druckspannung. Die Höhe der Spannung hängt dabei vom Biegeradius und -winkel ab. In erster Näherung ist die Spannung im Randbereich umgekehrt proportional zum Biegeradius. Ist die Beanspruchung so hoch, daß es zu linear-elastischen bzw. linear-viskoelastischen Verformungen kommt, besteht die Gefahr einer Mikrorißbildung in den Randzonen der Faser. Dies hätte unmittelbar eine Verschlechterung der Transmissionseigenschaften zur Folge. Mit fortschreitender Mikrorißbildung kann es zum Faserbruch und damit zum Bauteilversagen kommen.

Da bekanntermaßen die Festigkeitseigenschaften und das E-Modul eines Polymer-LWL von der Temperatur abhängen, ist zu erwarten, daß die Höhe der zulässigen Grenzbeanspruchung ebenfalls von der Temperatur abhängt. Weiterhin kann es bei hohen Temperaturen an der Biegestelle zu irreversiblen Geometrieänderungen der Faser kommen, die zwangsläufig mit einer Abnahme der Transmission verbunden wären.

Unter Berücksichtigung dieser Vorüberlegungen ist es deshalb das Ziel dieser Umweltsimulation, das Transmissionsverhalten bei unterschiedlicher Wechselbiegebeanspruchung unter verschiedenen Klimabedingungen zu untersuchen und entsprechende Grenzwerte für den minimal zulässigen Biegeradius bei extremer Biegebeanspruchung zu ermitteln.

Die Versuchseinrichtung (Abb. 1) besteht aus einer in der Klimakammer integrierten LWL-Wechselbiegeprüfeinrichtung mit zugehöriger, außerhalb der Kammer befindlicher mechanischer Antriebseinheit. Sie ermöglicht die Simulation von Wechselbiegebeanspruchungen an zwei Biegestellen

mit wählbaren Biegeradien von $R= 5, 10, 20$ und 40 mm. Ein mittig der Anordnung drehbar gelagerter Hebelarm führt eine oszillierende Bewegung aus, wobei der durch das Kopfende geführte Polymer-LWL über die links- und rechtsseitig angeordneten Biegeradienpaare gebogen wird. Zwei Ständer nehmen sowohl die an Querträgern drehbar gelagerten Radienscheiben als auch die zwischen den Ständern geführten Belastungsgewichte auf. Die Beweglichkeit der Radienscheiben und Gewichte verhindern hier das Auftreten unerwünschter Zugspannungen in der Probe und Abriebsbeanspruchungen der Schutzumhüllung während des Biegevorganges. Die Masse der Belastungsgewichte ist mit jeweils 200 g so gewählt worden, daß ein befriedigendes Anlegen der Probe an den Biegeradius sichergestellt wird. Der Antrieb des Hebelarms erfolgt über einen Zahnstangentrieb durch eine Schrittmotor-Getriebe-Kombination. Bezogen auf die Mittelstellung liegen die möglichen Biegewinkel im Bereich von $\pm 90^\circ$.

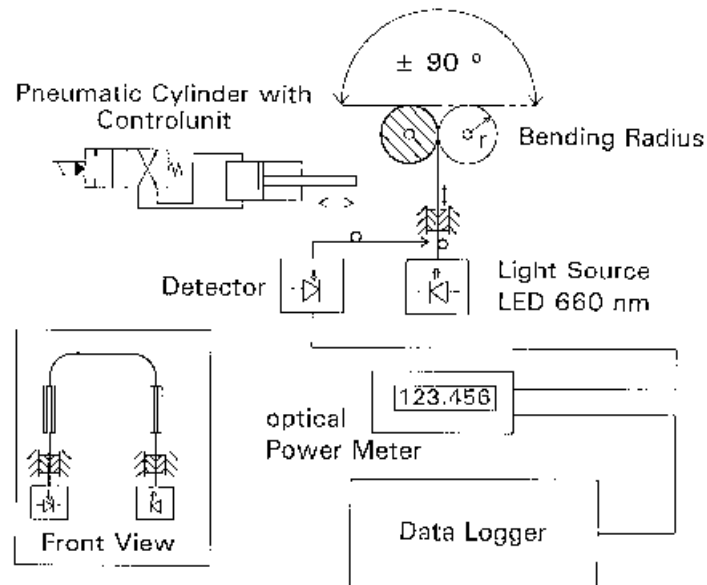


Abb. 1: Versuchseinrichtung für die Wechselbiegeprüfung

Während der Wechselbiegeprüfung eines LWL wird wiederkehrend nach Ausführung einer definierten Anzahl von Wechselbiegezyklen die optischen Leistung gemessen. Dazu wird jeweils der Hebelarm in eine senkrechte Position gebracht, so daß die Probe während der Transmissionsmessung keine Biegebeanspruchung erfährt. Nach Ablauf einer Relaxationszeit von 60 sec wird dann die optische Leistung gemessen. Das Versuchsergebnis besteht aus der berechneten prozentualen Transmissionsänderung während der steigenden Zahl von Wechselbiegezyklen bezogen auf den unbeanspruchten Zustand zu Beginn der Wechselbiegeprüfung. Die wichtigsten Erkenntnisse, wie sich Wechselbiegebeanspruchungen auf die Funktion und Lebensdauer eines Polymer-LWL auswirken, können Abb. 2 und Abb. 3 entnommen werden. Aufgetragen ist jeweils die optische Transmission über der Anzahl der Wechselbiegezyklen: in Abb. 2 bei verschiedenen Biegeradien und Raumtemperatur, in Abb. 3 bei einem Biegeradius und verschiedenen Temperatur- bzw. Klimabedingungen.

Zum Funktionsverhalten ist festzustellen, daß Wechselbiegebeanspruchung mit verschiedenen Biegeradien sich bei Raumtemperatur und extrem niedrigen Temperaturen zunächst nicht auf die Transmissionseigenschaft auswirkt. Die Transmission verändert sich gegenüber dem unbeanspruchten Zustand nicht. Sie verbleibt bei 100% . Bezüglich der Lebensdauer zeigt sich, daß es in Abhängigkeit vom Biegeradius und von der Temperatur nach einer spezifischen Zahl von Wechselbiegungen zu einer schnellen Verschlechterung der Transmissionseigenschaften kommt und bei Erreichen der 50% -Schwelle definitionsgemäß Bauteilversagen eintritt. Erwartungsgemäß führen kleinere Biegeradien und niedrigere Temperatur zu einer kürzeren Lebensdauer.

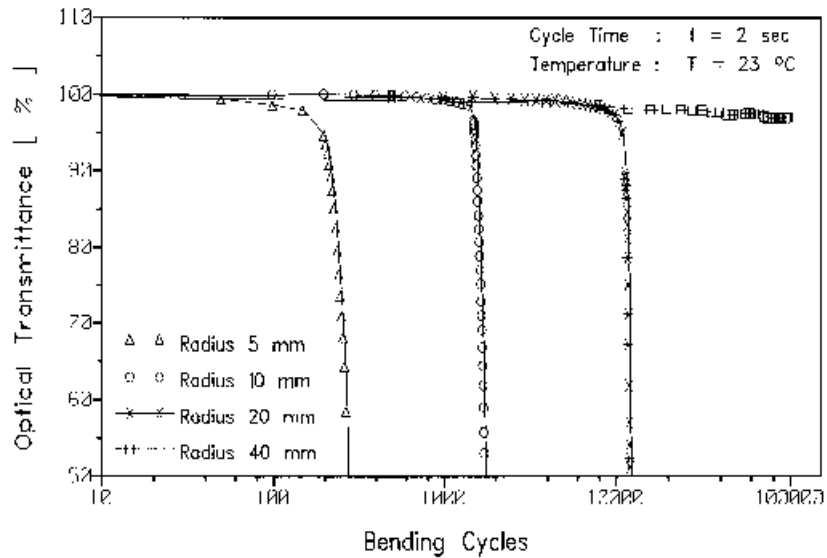


Abb. 2: Transmissionsverhalten bei Wechselbiegebeanspruchung mit verschiedenen Biegeradien und $T = +23\text{ °C}$

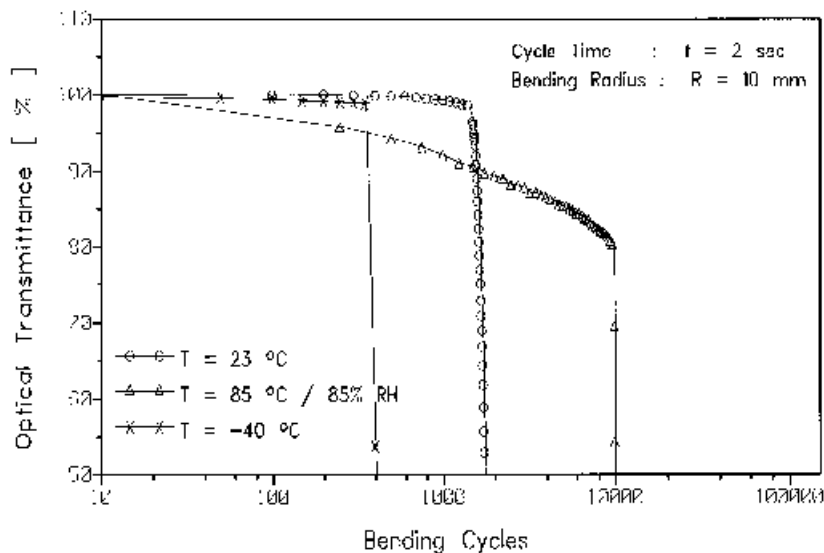


Abb. 3: Transmissionsverhalten bei Wechselbiegebeanspruchung mit verschiedenen Temperatur- bzw. Klimabedingungen und $R = 10\text{ mm}$

Ein besonderes Bauteilverhalten ist bei hohen Temperaturen festzustellen. In diesen Fall ist zwar eine längere Lebensdauer zu beobachten, aber bezüglich des Funktionsverhaltens zeigt sich, daß schon nach nur 100 Wechselbiegezyklen eine stetig zunehmende Verschlechterung der Transmission auftritt. Zu erklären ist diese Veränderung des Transmissionsverhaltens mit einer zunehmenden irreversiblen Geometrieänderung im Bereich der Biegestelle der bei diesen Temperaturen doch relativ weichen lichtführenden Faser. Wird die Einschnürung zu groß für die jeweilige Beanspruchung, so kommt es zum Faserbruch. Für den praktischen Einsatz bedeutet dies, daß bei hohen Dauerbetriebstemperaturen der Polymer-Lichtwellenleiter keiner bzw. nur einer sehr geringen Wechselbiegebeanspruchung ausgesetzt werden darf. Bei tiefen Temperaturen ist das Bauteilversagen typischerweise durch einen weitgehend glatten Bruch der Faser gekennzeichnet.

Die Abschätzung des minimal zulässigen Biegeradius bei vorgegebener Wechselbiegezyklenzahl wird in Anlehnung an das Wöhler-Verfahren durchgeführt und basiert auf folgenden Überlegungen: Wie bereits erwähnt gilt in erster Näherung, daß bei Biegebeanspruchung die mechanische Spannung in den Randbereichen umgekehrt proportional zum Biegeradius ist. Mit abnehmender Spannung (d.h. größerem

Biegeradius) erhöht sich die Zyklenzahl bis zum Bauteilversagen. Durch Extrapolation der Versuchsergebnisse (Zahl der Wechselbiegezyklen bis zum Bauteilversagen bei verschiedenen Biegeradien) bis zu einer vorgegebenen Zahl von Wechselbiegezyklen kann man den zugehörigen minimal zulässigen Biegeradius abschätzen. Führt man dies beispielweise für Versuchsergebnisse bei T= +23 °C und verschiedene Polymer-LWL-Typen durch, so erhält man das in Tab. 3 zusammengefaßte Ergebnis für den kleinsten noch zulässigen Wechselbiegeradius:

vorgegebene Zyklenzahl	abgeschätzter minimal zulässiger Wechselbiegeradius in [mm]				
	POF A	POF B	POF C	POF D	POF F
10 ⁴	20	20	25	25	25
10 ⁵	40	40	55	50	40
10 ⁶	100	85	135	120	80

Tab. 3: Abschätzung des minimal zulässigen Wechselbiegeradius bei vorgegebener Zyklenzahl und T= +23 °C

4. Zusammenfassung

Mit der Zielsetzung einer Zuverlässigkeitsanalyse ausgewählter Polymer-LWL für verschiedene industrielle Anwendungsbereiche sind in der BAM die Auswirkungen von mehr als 30 verschiedenen Umweltbeanspruchungen eingehend untersucht worden. Unter anderem ist das Transmissionsverhalten bei Klimawechselbeanspruchung, bei mechanischer Beanspruchung unter verschiedenen Temperatur- und Klimabedingungen sowie bei Beanspruchung durch flüssige aggressive Medien, Ozon und UV-Strahlung analysiert worden. Eine gesonderte Untersuchung war dem Alterungsverhalten gewidmet.

Die Untersuchungsergebnisse lassen den Schluß zu, daß ausgewählte Polymer-LWL für eine Vielzahl von industriellen Anwendungsbereichen gut bis sehr gut geeignet sind. Hierzu gehört u. a. die Signalübertragung im Maschinenbau, im Energieübertragungs- und Verteilungsbereich, in der Medizintechnik, in der Bürokommunikation und in bestimmten Bereichen im Kraftfahrzeug. Restriktionen im Einsatz der untersuchten Polymer-LWL sind dort geboten, wo mit hohen Dauerbetriebstemperaturen und bestimmten chemischen Beanspruchungen zu rechnen ist. Ein erweiterter Einsatzbereich ist aber durch geeignete Optimierungs- oder zusätzliche Schutzmaßnahmen möglich.