

# Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit auf die elektrische Leitfähigkeit thermoplastischer Kunststoffe

Norman Katzer, Hagen Bankwitz, Jörg Hübler

Hochschule Mittweida, Professur Intelligente Maschinensysteme, 09648 Mittweida, Technikumplatz 17

## Abstract

Kunststoffe sind aufgrund ihrer sehr niedrigen elektrischen Leitfähigkeit allgemein als Isolationswerkstoff bekannt und sie werden daher in vielen Elektronikanwendungen als Isolator eingesetzt. Fügt man ihnen jedoch leitfähige Additive hinzu, so können sie auch elektrisch leitfähig gemacht werden. Man spricht dann von sogenannten extrinsisch leitenden Polymeren. Diese werden bspw. als Schutz vor elektrostatischer Entladung oder als elektromagnetische Abschirmung eingesetzt. Beginnt man nun die elektrische Leitfähigkeit dieser Kunststoffe als Messgröße in Abhängigkeit von unterschiedlichen Umwelteinwirkungen zu betrachten, so liegt der Schluss nahe, dass leitfähige Kunststoffe auch für Sensorik eingesetzt werden können. Im Zuge dessen untersuchen Forscher an der Professur Intelligente Maschinensysteme der Hochschule Mittweida extrinsisch leitfähige Kunststoffe hinsichtlich ihrer elektrischen Leitfähigkeitseigenschaften unter Variation von Temperatur und Feuchtigkeit. Dazu wurden umfangreiche Messungen in einer Klimakammer mit verschiedenen leitfähig modifizierten Kunststoffen durchgeführt. Die Messreihen wurden als Temperaturwechseltests bei unterschiedlichen Luftfeuchten erbracht. Im hier eingereichten Beitrag wird die Messmethodik erläutert und die wichtigsten Ergebnisse präsentiert. Weiterhin wird ein Anwendungsbeispiel eines Kunststoffgleitlagers mit intelligenter Verschleißüberwachung beschrieben. Dabei wird eine Sensorik aus elektrisch leitfähigen Kunststoffen verwendet, die es ermöglicht, die Temperatur und den Verschleißgrad eines Kunststoffgleitlagers im Betrieb in Echtzeit zu bestimmen. Damit ermöglicht die Sensorik eine Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) und eine vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance) von Kunststoffgleitlagern.

## 1. Einleitung

Kunststoffe lassen sich grundsätzlich nach ihrem mechanisch-thermischen Verhalten in drei große Untergruppen einteilen. Dazu gehören Duroplaste, Elastomere und Thermoplaste. Die unterschiedlichen Polymerarten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften aufgrund der unterschiedlichen Vernetzung der Polymere. Duroplaste zeichnen sich in ihrem Aufbau durch engmaschig vernetzte Polymere aus. Bei Elastomeren liegt hingegen ein weitmaschiges Netz vor. Die Gruppe der Thermoplaste besteht aus vollkommen unvernetzten Polymeren, die oft eine teilkristalline Struktur ausbilden. (Ehrenstein, 2011)

Die Besonderheit der Thermoplaste besteht darin, dass sie mehrere Male geschmolzen und umgeformt werden können, ohne dass es zu einer chemischen Zersetzung des Materials kommt. Diese Eigenschaft ist auf die langkettige Molekülstruktur der Thermoplaste zurückzuführen. Im Vergleich zu anderen Kunststoffarten, wie beispielsweise Duroplasten, die nach dem Erhitzen dauerhaft aushärten, bieten Thermoplaste dadurch

eine größere Flexibilität und Vielseitigkeit in der Verarbeitung und Anwendung. (Ebeling et al., 2015)

Sie werden daher in einer Vielzahl von Branchen eingesetzt, unter anderem in der Automobil-, Luft- und Raumfahrt-, Elektronik-, Medizin-, Verpackungs- und Baubranche. Einige gängige Beispiele für Thermoplaste umfassen Polyethylen, Polypropylen, Polycarbonat und PVC (Polyvinylchlorid). Jedes dieser Materialien hat einzigartige Eigenschaften, die es für bestimmte Anwendungen geeignet machen, wie z. B. hohe Festigkeit und Haltbarkeit, chemische Beständigkeit oder Flexibilität. Ein Anwendungsbeispiel in Form eines Kunststoffgleitlagers ist in Abbildung 1 dargestellt. Dieses soll später im Kapitel 7 noch näher betrachtet werden. (Dispan, 2013)

Einer der Hauptvorteile von Thermoplasten ist ihre Fähigkeit, recycelt und wiederverwendet zu werden, was sie für viele Anwendungen zu einer umweltfreundlichen Wahl macht. Darüber hinaus können Thermoplaste mit Additiven wie Füllstoffen, Verstärkungen und Stabilisatoren modifiziert werden, um ihre Eigenschaften und ihre Leistung in bestimmten Anwendungen zu verbessern. (Ebeling et al., 2015)

Insgesamt haben die Vielseitigkeit, Haltbarkeit und Recyclingfähigkeit von Thermoplasten sie zu einer beliebten Wahl für eine Vielzahl von Industrie- und Verbraucheranwendungen gemacht und sie sind weiterhin ein wichtiger und sich entwickelnder Bereich der Materialwissenschaft und -technik.

Der Einsatz thermoplastischer Kunststoffe als Sensormaterial ist allerdings noch relativ neu und bisher noch nicht ausreichend erforscht. Der Grundgedanke beim Einsatz eines Kunststoffs als Sensormaterial besteht darin, dass ihr elektrischer Widerstand gemessen wird und bspw. als Indikator für eine Temperaturänderung dient. Damit dies gelingt, müssen die im Allgemeinen als Nichtleiter bekannten Thermoplaste zunächst leitfähig gemacht werden. Alternativ können sogenannte intrinsisch leitfähige Polymere verwendet werden, die eine mit Metallen vergleichbare elektrische Leitfähigkeit besitzen. Ihre Leitfähigkeit wird durch konjugierte Doppelbindungen erreicht, die eine freie Beweglichkeit von Ladungsträgern im dotierten Zustand ermöglichen (Inzelt, 2008).



Abbildung 1: Kunststoffgleitlager aus leitfähigem und nichtleitfähigem thermoplastischem Kunststoff

## 2. Werkstoffphysikalische Grundlagen

Bei extrinsisch leitfähigen Polymeren werden elektrisch leitende Füllstoffe hinzugefügt. Zu den üblichen Füllstoffen gehören unter anderem kohlenstoffbasierte Materialien wie z.B. Ruß, Graphit, Kohlenstoff-Nanoröhrchen und Graphen. Weiterhin können auch Metalle wie z.B. Silber, Kupfer, Nickel, Zinn und Aluminium, die alle in Fasern, Flocken, Dendriten und Sphäroiden vorhanden sind, beigemischt werden. Entscheidend für die elektrischen Leitfähigkeitseigenschaften ist die Konzentration der Füllstoffe im Kunststoff. Werden die Füllstoffe in zu geringer Konzentration dem Kunststoff beigemischt, so hat dies praktisch keinerlei Auswirkungen auf die elektrische Leitfähigkeit. Der Werkstoff besitzt dann weiterhin die ursprüngliche Leitfähigkeit der Polymermatrix. Erst ab einer bestimmten „kritischen Konzentration“  $K_C$  steigt die Leitfähigkeit in einem schmalen Konzentrationsbereich sehr stark an. Die Additive sind dann so zahlreich vorhanden, dass die Wahrscheinlichkeit einer Berührung untereinander so stark gestiegen ist, dass sie entsprechende leitfähige Strompfade ausbilden. Eine weitere Erhöhung der Additive sorgt dafür, dass sich immer mehr solcher Strompfade ausbilden und die elektrische Leitfähigkeit dementsprechend steigt. Schematisch ist dieser Zusammenhang in Abbildung 2 dargestellt. (Leute, 2015)

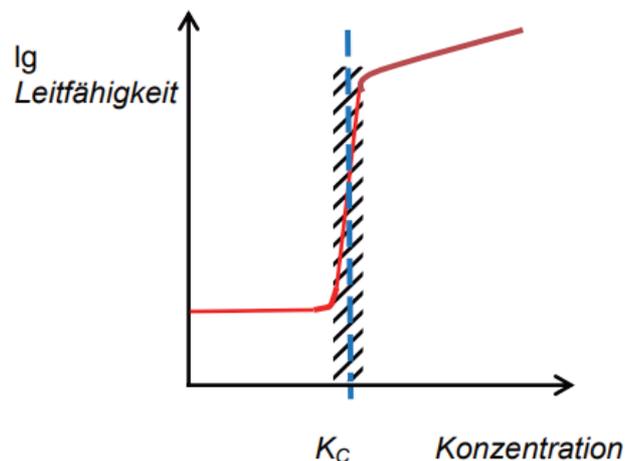


Abbildung 2: Logarithmische Darstellung des Verlaufs der Leitfähigkeit als Funktion der Additiv-Konzentration (Leute, 2015)

## 3. Motivation und Zielsetzung

Der Hintergrund der hier dargestellten Untersuchungen war es, ein tiefergehendes Verständnis über die Einflussgrößen auf den elektrischen Widerstand verschiedener thermoplastischer Kunststoffe zu gewinnen. Dieses Forschungsthema ergab sich im Rahmen der Bearbeitung eines Forschungsprojekts, bei dem ein Kunststoffgleitlager mit aus leitfähigen Kunststoffen bestehender Sensorik entwickelt wurde. Im Kapitel 7 wird ein noch umfassenderer Blick auf den Hintergrund der hier vorgenommenen Untersuchungen geliefert. Ziel war es, mithilfe einer Klimakammer unterschiedliche Umgebungsbedingungen auf verschiedene leitfähige Kunststoffe zu applizieren und dabei die Änderung des Widerstands zu detektieren. Am Ende sollten daraus Schlüsse über die Eignung der getesteten Werkstoffe als Sensormaterial gezogen werden.

#### 4. Methodik

Die methodische Vorgehensweise zur Untersuchung der Leitfähigkeitseigenschaften der thermoplastischen Kunststoffe untergliedert sich zunächst in drei wesentliche Arbeitsschritte: Versuchsplanung, Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung.

Bei der Versuchsplanung wurden zunächst verschiedene Messregime für die Klimaprüfungen festgelegt. Für den Temperaturwechseltest (TWT) wurden zu Beginn die minimale und maximale Prüftemperatur, die Halte- und Anstiegszeiten, die Feuchtigkeit und die Zyklenzahl festgelegt (Tabelle 1). Weiterhin wurden für die Feuchtigkeitstests (FT) verschiedene Messparameter festgelegt (Tabelle 1). Die gewählten Parameter orientierten sich dabei an realistischen Umgebungsbedingungen für einen geplanten Anwendungsfall der Sensorik (siehe auch Kapitel 7).

Messregime	Temperaturbereich [°C]		Wechsel-/Haltezeit [min]	Prüfzyklen	Rel. Feuchte [%]
TWT 1	20	90	30/30	10	Ohne Regelung
TWT 2	20	90	30/30	10	50
TWT 3	20	90	30/30	10	10
TWT 4	20	90	30/30	10	90
TWT 5	20	90	120/120	10	50
FT 1	20	20	120/120	10	10 – 90
FT 2	20	20	30/30	10	10 – 90
FT 3	90	90	120/120	10	10 – 90

Tabelle 1: Auszug aus dem Versuchsplan

Untersuchungsgegenstand waren vier verschiedene leitfähige Kunststoffe: Thermoplastisches Polyurethan (TPU), Polyamid 66 (PA 66), Polybutylenterephthalat (PBT) und Polyphenylsulfid (PPS). Die Materialien lagen in kleinen Proben mit den Abmessungen 20x4x2 mm vor. Die geringe Probengröße bietet den Vorteil einer schnellen thermischen Durchwärmung während der Temperaturwechseltests.

Damit der elektrische Widerstand der Proben über den gesamten Versuchszeitraum hinweg gemessen werden konnte, mussten die Proben verkabelt werden. Dazu wurden diese mit den Anschlussdrähten verschweißt. In Abbildung 3 ist eine verschweißte Probe dargestellt. Als Schweißtemperatur wurde eine geringfügig höhere Temperatur als die Schmelztemperatur der Probewerkstoffe gewählt. Damit konnten die besten Ergebnisse hinsichtlich der Robustheit der Verkabelung mit den Proben gewonnen werden. Die Schweißtemperaturen je Probenmaterial sind in Tabelle 2 dargestellt.

Probe	TPU	PA 66	PBT	PPS
Schweißtemperatur [°C]	245	320	270	350

Tabelle 2: Schweißtemperaturen

Bei der Durchführung der Versuche wurden regelmäßig die Widerstandswerte der Proben überprüft, um zu gewährleisten, dass die Proben keine bleibenden Materialeigenschaftsänderungen während der Versuche erfuhren. Außerdem wurden pro Messregime

acht Proben gleichzeitig innerhalb der Klimakammer untersucht. Als Temperaturreferenz wurde die Solltemperatur des Temperaturwechselprofils der Klimakammer herangezogen.

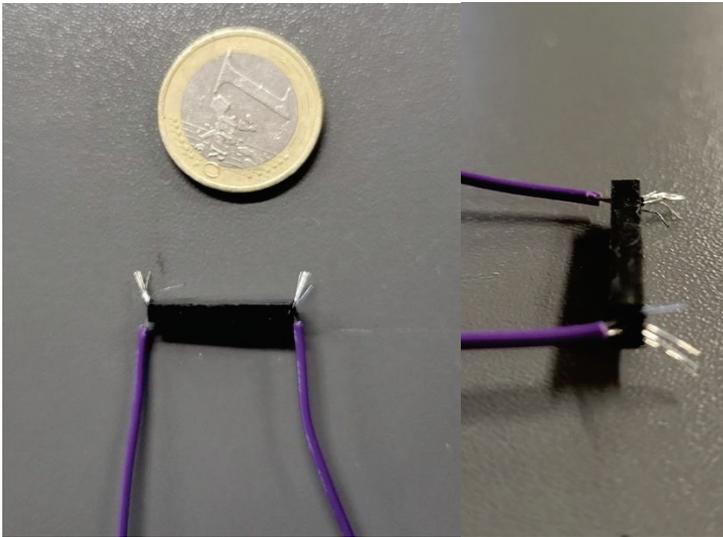


Abbildung 3: Kontaktierung des Anschlussdrahtes an die Materialproben mittels einer Schweißverbindung

## 5. Ergebnisse und Diskussion

Aus Gründen der Übersichtlichkeit und des eingeschränkten Umfangs dieses Beitrags werden in diesem Kapitel nur ausgewählte Untersuchungsergebnisse dargestellt. Zu Beginn ist in Abbildung 4 das Messregime TWT 1 dargestellt. Neben den vier Kunststoffproben ist auch die Solltemperatur des TWT-Profiles auf der Sekundärachse dargestellt. Als Messgröße wurde hier die Spannung ausgewertet und im Diagramm aufgetragen, welche ebenfalls mit dem Widerstand korrespondiert.

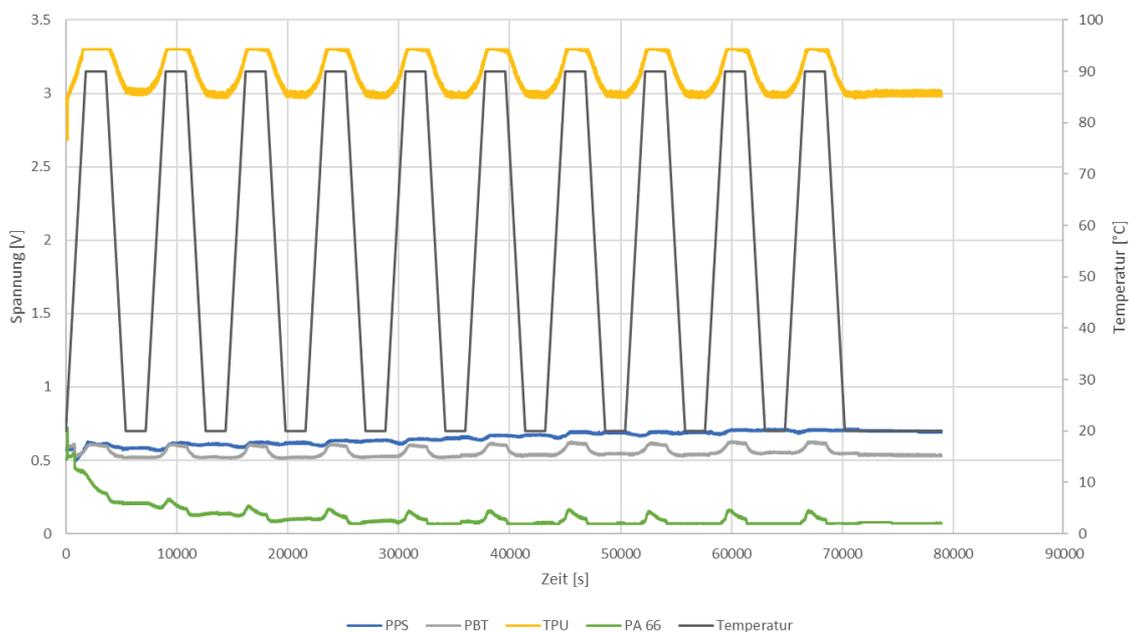


Abbildung 4: Spannungsänderung der vier untersuchten Kunststoffproben im Temperaturwechseltest

Es zeigt sich, dass vor allem das TPU dem Temperaturwechselprofil sehr gut folgt. Ebenfalls spricht das PBT sehr gut auf die Temperaturänderungen an, auch wenn die Amplituden hier deutlich kleiner sind. Dies ist allerdings auch in der Tatsache begründet, dass die elektrische Leitfähigkeit des modifizierten PBTs deutlich besser als die des TPUs ist. Weiterhin zeigt sich, dass das PA 66 zwar ebenfalls auf die Temperaturänderung reagiert, aber die Spannung schon bei der Phase der Haltetemperatur wieder abfällt. Außerdem ist erkennbar, dass das PPS nahezu keinerlei Änderungen in seiner elektrischen Leitfähigkeit aufweist. Es wird daher bereits jetzt deutlich, dass sich für ein Sensormaterial, welches bspw. die Temperatur messen soll, nur das TPU oder das PBT in Frage kommen kann. Unterstreicht wird dies, wenn man die Korrelationskoeffizienten berechnet, in dem man die gemessenen Spannungen den Solltemperaturen gegenüberstellt (Abbildung 5). Der Pearson-Korrelationskoeffizient beträgt in diesem Fall  $r = 0,96$  und deutet damit auf einen sehr starken Zusammenhang zwischen Temperatur und Spannung bzw. Widerstand hin. Im Falle des PBTs wurde ein Pearson-Korrelationskoeffizient von  $r = 0,80$  berechnet. Ähnliche Effekte wurden bereits von Horibe et al. (2005) und Traina et al. (2007) für HDPE (Hart-Polyethylen) aufgezeigt. Es ist davon auszugehen, dass die Korrelationen noch höher ausfallen könnten, wenn statt der Solltemperatur der Klimakammer, die realen Proben temperaturen gemessen und gegenübergestellt worden wären. Dies begründet sich in der Tatsache, dass die Proben temperaturen immer etwas den Solltemperaturen der Klimakammer nachlaufen und die Durchwärmung der Proben, trotz ihrer geringen Größe, eine gewisse Zeit benötigt. Außerdem ist davon auszugehen, dass das Temperaturfeld in der Klimakammer nicht vollständig homogen ist, was wiederum weitere Messungenauigkeiten begünstigt.

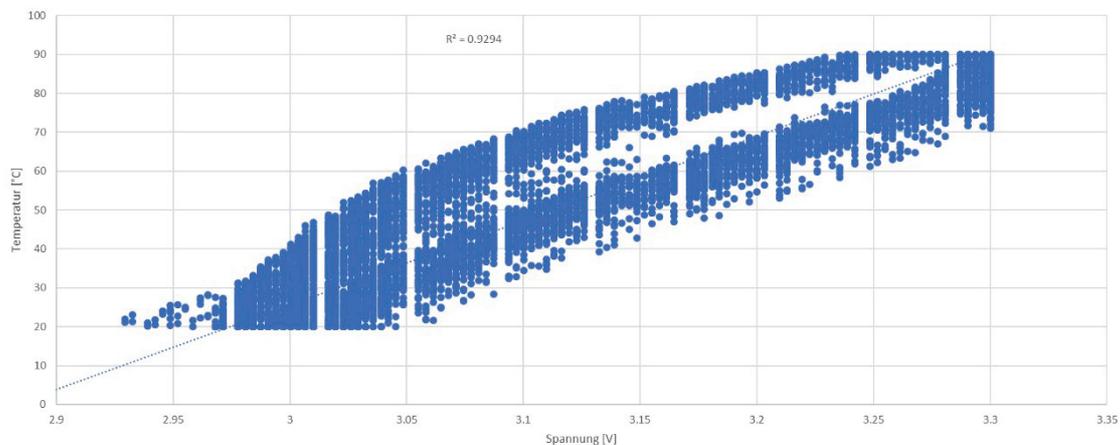


Abbildung 5: Korrelation zwischen Spannung und Temperatur am Beispiel des TPUs

Hinsichtlich der Feuchtigkeitstests zeigt sich, dass nur das TPU und der PA 66 auf die Feuchtigkeitsänderungen reagieren (Abbildung 6). Als Ursache dafür wird die wesentlich höhere Wasseraufnahme von TPU (0,8 %) und PA 66 (2,8 %) im Vergleich zu PPS (0,01 %) und PBT (0,25 %) herangezogen. Auffällig ist auch, dass das PA 66 am stärksten auf die Änderung der Feuchtigkeit reagiert. Dieses Verhalten steht in Einklang mit der hohen Wasseraufnahme des Materials PA 66.

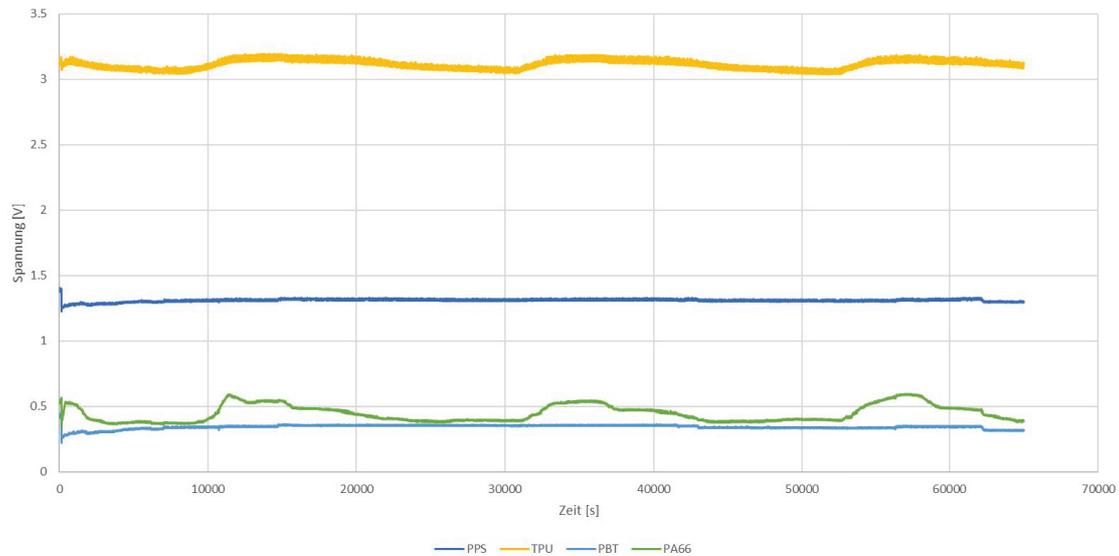


Abbildung 6: Spannungsänderung der vier untersuchten Kunststoffproben bei Feuchtigkeitsänderung

## 6. Anwendungsbeispiel

Als ein mögliches Anwendungsbeispiel für eine Sensorik aus leitfähigen thermoplastischen Kunststoffen wurde bereits in der Einleitung in Abbildung 1 ein Kunststoffgleitlager mit intelligenter Verschleißüberwachung vorgestellt. Der Grundgedanke hierbei ist, dass zwei Kunststoffe im Spritzgussverfahren miteinander gefügt werden, von denen einer der beiden elektrisch leitfähig ist und als Sensormaterial dient (Abbildung 7). Bei noch intakter Verschleißschicht kann das Sensorelement nun zunächst als Temperatursensor genutzt werden, da wie bereits im vorangegangenen Kapitel gezeigt, einige leitfähige Thermoplaste Temperaturänderungen gut anhand ihrer Widerstandsänderung abbilden können. Sobald das Lager verschlissen ist, tritt die Welle mit den Sensorelementen in Kontakt und sorgt dadurch für einen Kurzschluss zwischen zwei oder mehr Sensorelementen. Der so induzierte Spannungsabfall kann messtechnisch erfasst werden und liefert dem Anwender einen Hinweis darauf, dass das Lager verschlissen und zeitnah ausgetauscht werden muss. (Katzner et al., 2020)

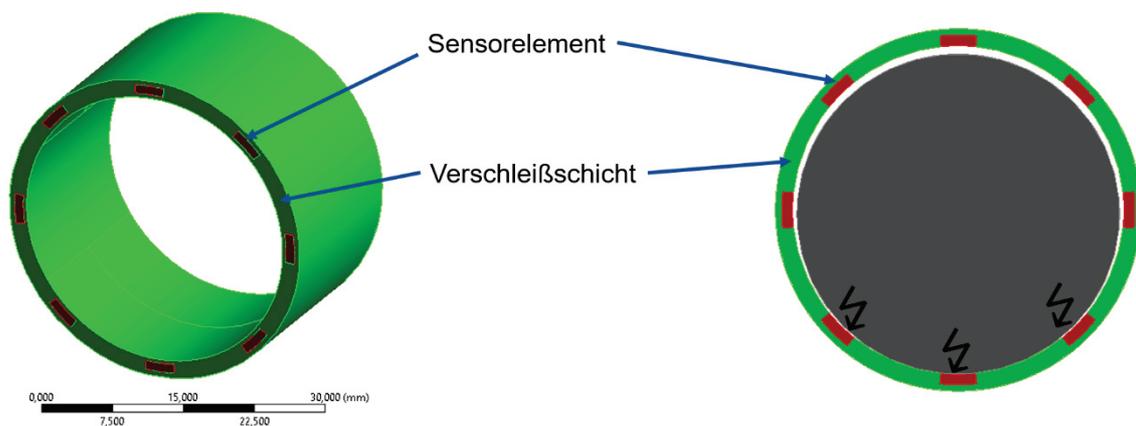


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Kunststoffgleitlagers mit intelligenter Verschleißüberwachung im unverschlissenen (links) und verschlissenen (rechts) Zustand (modifiziert aus Katzner et al., 2020)

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellten Ergebnisse lieferten wesentliche Erkenntnisse über die Einflüsse von Temperatur und Feuchtigkeit auf unterschiedliche leitfähige thermoplastische Kunststoffe. Mithilfe der messtechnischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sowohl das Material TPU als auch das PBT sehr gut in der Lage sind, Temperaturänderungen abzubilden. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit bereits veröffentlichten Forschungsarbeiten (Horibe et al., 2005; Traina et al., 2007). Weiterhin konnte gezeigt werden, dass das PPS und das PA 66 nicht für eine Anwendung als Sensorelement in Frage kommen, da sie entweder nicht oder nicht nachvollziehbar auf die Änderung der Temperatur reagieren. Hierbei wird beim PA 66 die hohe Wasseraufnahme als Ursache vermutet.

In weiteren Untersuchungen könnten noch bessere Zusammenhänge zwischen Temperatur und Widerstand des TPUs und des PBTs gefunden werden, wenn statt der Solltemperatur der Klimakammer, die Temperaturen mithilfe einzelner Thermolemente direkt an den Proben abgegriffen werden. Außerdem könnten Langzeituntersuchungen einen Aufschluss darüber geben, ob Alterungserscheinungen der Kunststoffmaterialien die Korrelationen verschlechtern. Die genauen werkstoffphysikalischen Ursachen, können in weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen betrachtet werden.

## 8. Danksagung

Die ZIM-Vorhaben ZF 4516707LP9 und KK 5169407KU1 wurden im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Wir danken den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel.

## Quellen

Dispan, J. (2013). Kunststoffverarbeitung in Deutschland: Branchenreport 2013: „Branchenanalyse Kunststoffverarbeitung“ zum Forschungsprojekt Nr. S-2013-620-1].

Ebeling, F., Richter, F. & Schwarz, O. (2015). Kunststoffkunde.

Ehrenstein, G. W. (2011). Polymer-Werkstoffe: Struktur - Eigenschaften - Anwendung.

Horibe, H., Kamimura, T. & Yoshida, K. (2005). Electrical Conductivity of Polymer Composites Filled with Carbon Black. *Japanese Journal of Applied Physics*, 44(4R), 2025. <https://doi.org/10.1143/jjap.44.2025>

Inzelt, G. (2008). *Conducting Polymers: A New Era in Electrochemistry*. Springer Science & Business Media.

Katzer, N., Bankwitz, H. & Hübler, J. (2020). Kunststoffgleitlager mit intelligenter Verschleißüberwachung. *innoTRAC journal*, 1, 140–148. <https://doi.org/10.14464/innotrac.v1i0.467>

Leute, U. (2015). *Elektrisch leitfähige Polymerwerkstoffe: Ein Überblick für Studierende und Praktiker*. Springer-Verlag.

Traina, M., Pegoretti, A. & Penati, A. (2007). Time–temperature dependence of the electrical resistivity of high-density polyethylene/carbon black composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 106(3), 2065–2074. <https://doi.org/10.1002/app.26444>