



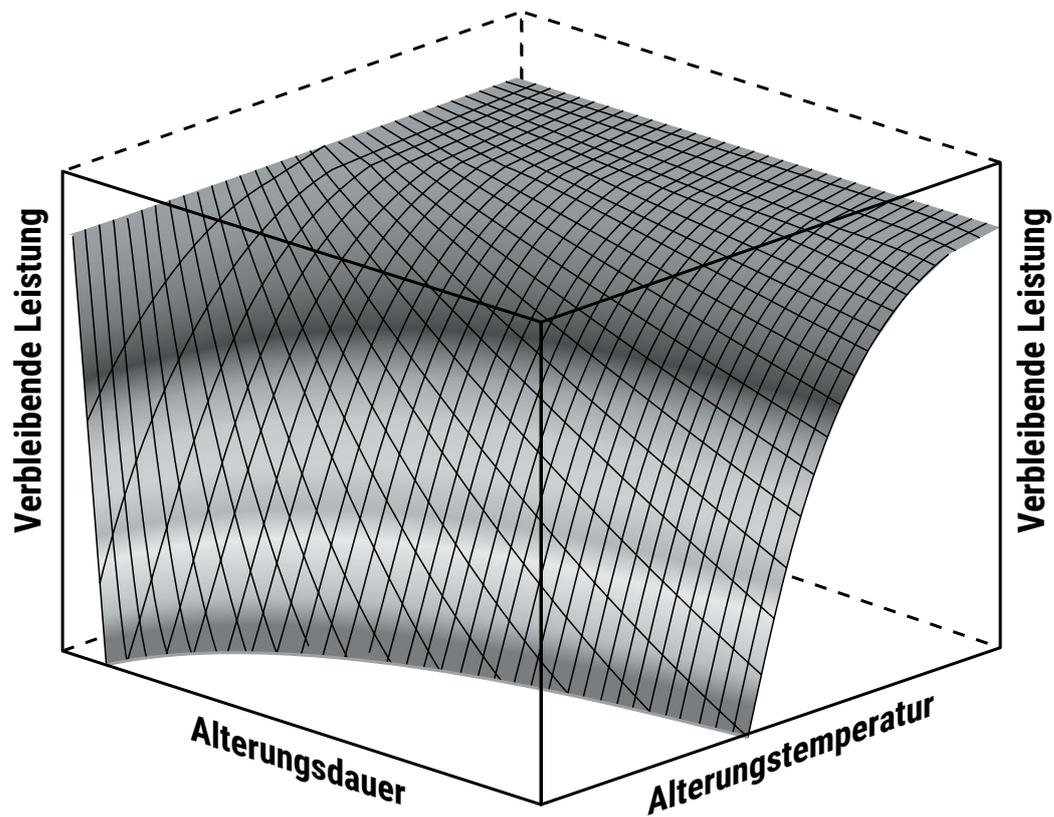
BERECHNUNG DER LEBENSDAUER VON SELBSTREGELNDEN POLYMER-HEIZBÄNDERN


nvent

RAYCHEM

Berechnung der Lebensdauer von selbstregelnden Polymer-Heizbändern

3D-Arrhenius-Modell



von
James P. Gemperle
Ronald W. Buckley

EINLEITUNG

Leitfähige Polymere finden zunehmend Einsatz in elektrischen Heizbändern, insbesondere dann, wenn sie so formuliert wurden, dass sie einen positiven Temperaturkoeffizienten des spezifischen Widerstands (PTC-R) aufweisen. Ein bekannter Aufbau dieser Heizbänder ist das in Abb. 1 gezeigte Heizband. Bei dieser Version eines leitfähigen Polymer-Heizelementes dienen zwei Kupferdrähte als parallele Elektroden. Zwischen den beiden Elektroden befindet sich das leitfähige Polymer-Heizelement, das – ein Spannungspotential zwischen den Elektroden vorausgesetzt – Strom leitet. Die durch die Stromzufuhr im Widerstandselement (das leitfähige Polymersegment) erzeugte Wärme wird im Allgemeinen als „Watt pro Meter“ des Heizbands ausgedrückt.

Eine wichtige Eigenschaft von Heizbändern und anderen, auf PTC-R basierenden leitfähigen Polymeren ist, dass die Wärmeerzeugung stärker begrenzt wird, je höher die Umgebungstemperatur ist. Dies bedeutet, dass das Heizband aufgrund ihrer eigenen Wärmeerzeugung nicht überhitzen können.

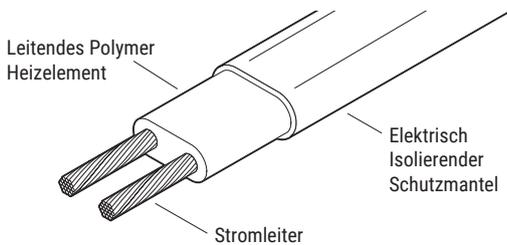


Abb. 1. Typischer Aufbau eines grundlegenden selbstregelnden Heizbandes

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen jeweils die Eigenschaften „Spezifischer Widerstand-gegen-Temperatur“ und „Leistungsabgabe-gegen-Temperatur“ von PTC-R-Heizbändern. Da die Leistungsabgabe bei steigender Temperatur deutlich abnimmt, werden diese Heizbänder häufig auch als „selbstregelnd“ bezeichnet.

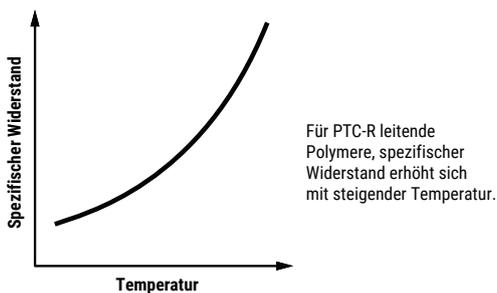


Abb. 2. Spezifischer Widerstand gegen Temperatur

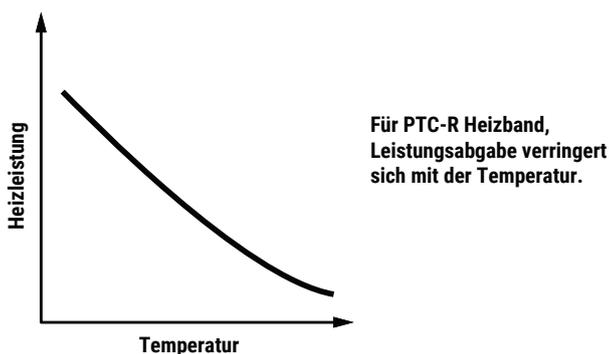


Abb. 3. Leistungsabgabe gegen Temperatur

Selbstregelnde Heizbänder sind in vielen Branchen weit verbreitet. Da die Heizbänder häufig für einen erfolgreichen Betrieb und einen reibungslosen Prozessstart oder Umschaltvorgang entscheidend sind und die Kosten und der Aufwand bei Reparaturen oder einem Austausch von fehlerhaftem Heizmaterial erheblich sein können, ist die langfristige Zuverlässigkeit und Funktionalität dieser Heizbänder ein besonders wichtiger Aspekt.

Konventionelle Techniken zur Bewertung von Polymermaterialien sind nur dann für PTC-R-Heizbänder anwendbar, wenn die besondere Art der Heizbandkonstruktion und der Betriebsmodus die Verwendung des Auswertungsprogramms und eine Interpretation der Ergebnisse zulässt. In diesem Papier beschreiben wir diese besonderen Aspekte der selbstregelnden Polymer-Heizbänder und einen neuen Ansatz, die Lebensdauer von Heizbändern vorherzusagen. Hierzu gehört auch die Bestimmung der Heizband-Betriebstemperatur und ein dreidimensionaler Ansatz zum Durchführen der Arrhenius-Prognosen.

ALLGEMEINE TECHNIKEN ZUR VORHERSAGE DER LEBENSDAUER

Öffentliche Standards, die Ansätze zur Schätzung der langfristigen Leistung bei Betriebstemperaturen bieten, existieren schon seit einiger Zeit. Diese können in verschiedenen Veröffentlichungen von Normierungseinrichtungen nachgelesen werden, so beispielsweise in UL746B, IEC216 und den IEEE-Normen 1, 98 und 99.

Die Verfahren basieren auf der Tatsache, dass chemische Reaktionen für Polymermaterialien bei höheren Temperaturen schneller auftreten. Die Bewertungsverfahren verlangen die Aussetzung von Produktproben gegenüber Temperaturen oberhalb der normalen Betriebstemperatur. In der Regel werden mehrere verschiedene erhöhte Temperaturen verwendet, die so ausgewählt sind, dass sie über einen Zeitraum von weniger als 100 Stunden bis hin zu 10.000 Stunden und mehr Änderungen in den Materialeigenschaften verursachen.

Während dieses beschleunigten Alterungsprogramms wird mindestens eine Materialeigenschaft überwacht. In vielen Fällen bezieht sich die ausgewählte Eigenschaft direkt auf ein tatsächliches Leistungsattribut des Produkts. Wenn beispielsweise ein Polymer getestet wird, dessen Verwendung verlangt, dass ein gewisses Maß an Flexibilität erhalten bleibt, so wird in diesem Fall wahrscheinlich die Zugdehnung während des Alterungsprogramms überwacht. Wenn sich die oxidative Alterung des Produkts direkt auf die gewünschten Parameter auswirkt, kann auch diese Technik geeignet sein. Das Vorhandensein dieses Effekts bzw. die Beziehung zwischen der oxidativen Alterung (eine chemische Reaktion) und die Eigenschaft ermöglichen die Verwendung der Arrhenius-Gleichung, um das Langzeitverhalten bei niedrigeren Temperaturen vorherzusagen.

Abbildung 4 zeigt repräsentative Diagramme, die aus der Messung der Dehnung nach verschiedenen Aussetzungszeiten bei fünf verschiedenen Temperaturen unter Verwendung dieser traditionellen Techniken resultieren könnten. Es gibt zahlreiche Informationen, die das Beibehalten dieser Eigenschaft (Beibehaltung der Dehnung) mit der oxidativen Alterung des Materials verbinden. In diesem Beispiel wurde ein Ausfallkriterium einer 50 %igen Beibehaltung der ursprünglichen Dehnung ausgewählt. Die Linie „Ausfall“ in Abbildung 4 zeigt die tatsächliche Zeit, in der dies für die gealterten Proben auftrat. Ein typischer Plot würde viele Datenpunkte für jede Temperatur enthalten. Um die Präsentation dieser Technik deutlicher zu machen, wurde nur die mittlere „Kennlinie“ für jede Temperatur in Abbildung 4 dargestellt.

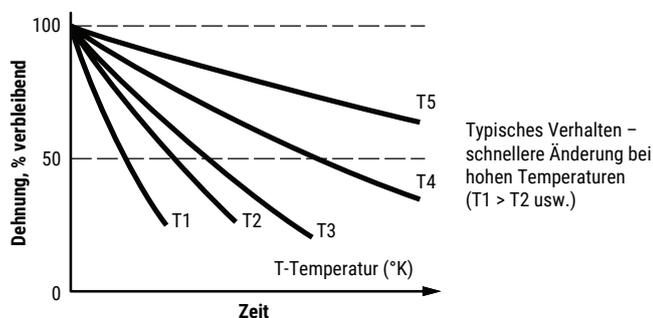


Abb. 4. Zugdehnung gegen Zeit und Temperatur

Der nächste Schritt besteht darin, die Auswirkungen der Temperatur auf die Änderungsrate der gewünschten Eigenschaft festzustellen. Das Ziel ist, das langfristige Verhalten der Eigenschaft bei niedrigeren Temperaturen vorherzusagen. In dem aufgeführten Beispiel ist das gewählte Ausfallkriterium „50 % Beibehaltung der Dehnung“. Die Fehlerpunkte für die Dehnung (siehe Abb. 4) bei höheren Temperaturen (T1 bis T4) können verwendet werden, um die „Zeit bis zum Ausfall“ bei einer niedrigeren Temperatur (T5) zu vorherzusagen. Bei vielen Materialien ist eine Eigenschaft eine Funktion der Temperatur, der das Material ausgesetzt wird, und der Dauer der Aussetzung. Diese Art der Alterung kann als die Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion beschrieben werden. Die Arrhenius-Gleichung wiederum kann zur Charakterisierung dieses Verhaltens verwendet werden.

Die Arrhenius-Gleichung für eine chemische Reaktion ist gegeben durch:

$$K = A \exp(-E/RT) \quad (1)$$

Dabei gilt:

K = Spezifische Reaktionsgeschwindigkeit

A = Konstant

E = Aktivierungsenergie der Reaktion

R = Gaskonstante

T = Absolute Temperatur

Da das Ziel darin besteht, die „Lebensdauer“ oder die „Zeit bis zum Ausfall“ vorherzusagen, wird die Gleichung 1 algebraisch zu der Form modifiziert, die in der 2. Gleichung gezeigt ist. Die 2. Gleichung kann auf seine Grundkomponenten vereinfacht werden, die 3. Gleichung.

$$\text{Log (Lebensdauer)} = \text{Konstante} + (1 / 2,303) * (E / RT) \quad (2)$$

oder

$$\text{Log (Lebensdauer)} = a + b / T \quad (3)$$

Man erkennt, dass die 3. Gleichung eine lineare algebraische Form aufweist. Die Versuchsdaten können als log (Lebensdauer) gegen den Kehrwert der absoluten Alterungstemperatur aufgetragen werden.

In Abbildung 5 ist die „Zeit bis zum Ausfall“ gegen 1/Temperatur in K aufgetragen. Der Plot sollte linear für T1 bis T4 erscheinen, wenn dies eine Reaktionsgeschwindigkeit-basierte Eigenschaftsänderung ist. Anschließend kann, durch Erweitern der lineare Kennlinie bis zur gewünschten Temperatur, T5, die Zeit bis zum Ausfall vorhergesagt werden.

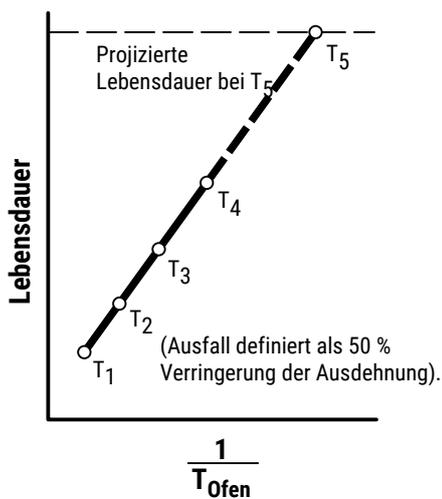


Abb. 5. Beispiel eines Arrhenius-Diagramm, Zugdehnung

Die gleiche klassische Technik kann zur Bewertung der erwarteten Lebensdauer von selbstregelnden Heizbändern verwendet werden. Dabei wurde die Genauigkeit und Sicherheit von Projektionen mit der Arrhenius-Gleichung durch moderne statistische Ansätze erhöht. Es gibt jedoch eine Reihe von Ausfallarten, die nicht auf das temperaturabhängige (oder oxidative) Altern des Produkts zurückzuführen sind. Bevor wir die Möglichkeit der Nutzung der Arrhenius-Technik zum Vorhersagen der Lebensdauer von selbstregelnden Heizbändern ansprechen, müssen wir uns mit diesen zusätzlichen Ausfallarten beschäftigen. Viele dieser zusätzlichen Ausfallarten erzeugen eine ungleichmäßige Erwärmung im Heizband und können daher nicht in Arrhenius-Schätzungen verwendet werden. Das Verwenden von Proben, die einer oder mehreren dieser zusätzlichen Ausfallarten ausgesetzt sind, in einer Arrhenius-Schätzung wird zu ungültigen Lebensdauer-Prognosen führen.

FRÜHE AUSFALLARTEN

Auch wenn die zur Herstellung von selbstregelnden Heizbändern ausgewählten Materialien geeignet sind, kann ein frühzeitiger Betriebsausfall auftreten, wenn einzelne Verarbeitungsschritte für diesen Zweck unangemessen sind. Dies kann zu Produkten mit lokalisierten inneren Heizelementtemperaturen führen. Diese lokalisierten hohen Temperaturen können durch die Verwendung eines Infrarot-Temperaturfühlers quantifiziert werden, um die Oberflächentemperatur des Heizelements durch ein offenes Fenster in der Wärmeisolierung zu bestimmen. Dies wird in Abb. 6 gezeigt. Unter Verwendung dieser Technik wird eine Probe des Produkts an einem Substrat mit konstanter Temperatur befestigt, beispielsweise einem Metallrohr. Dann wird eine eng anliegende Rohrisolierung installiert. Ein sehr kleines Fenster in der Isolierung wird frei gelassen. Das Fenster sollte nur so groß sein, dass es einen Infrarot-Temperatursensor aufnehmen kann (wie in der Abbildung gezeigt).

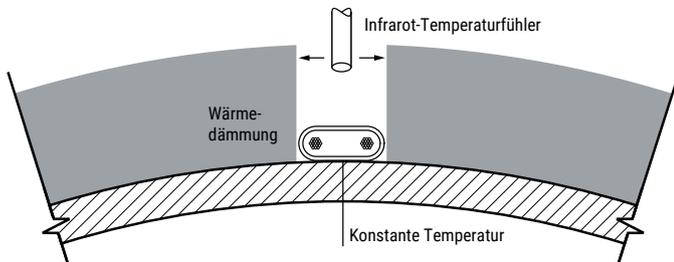


Abb. 6. Test zur Feststellung der Temperaturgleichmäßigkeit im Heizbandelement

Wenn das Heizband bestromt und das Substrat bei einer konstanten Temperatur gehalten wird, erzeugt dieses das Wärmeprofil. Durch Bewegen des Infrarot-Temperaturfühlers von einer Seite zur anderen wird die Temperaturgleichmäßigkeit über das Heizelement beschrieben. Dann wird ein Temperaturprofil erzeugt. Diese Profile helfen festzustellen, ob das hergestellte Produkt einen der unten beschriebenen frühen Ausfallarten aufweist. Auch mithilfe von modernen elektrischen Tests ist es möglich, einige dieser frühen Ausfallarten zu ermitteln.

Zwei Quellen für solch hoch lokalisierten Temperaturen sind ein ungleichmäßiger spezifischer Widerstand und der elektrische Kontaktwiderstand an der Schnittstelle zwischen dem Bus-Leiter und dem Polymer.

Ein ungleichmäßiger spezifischer Widerstand in der Polymermatrix kann von einer unzureichenden Durchmischung des leitfähigen Kohlenstoffes im Polymer oder auch aufgrund von anderen Ursachen entstehen. Das sich ergebende spezifische Widerstandsprofil wäre ungleichmäßig, wie in Abb. 7 gezeigt. Im erregten Zustand ist die Temperatur an den Punkten mit einem höheren Widerstand höher, da an diesen Stellen proportional mehr Wärme erzeugt wird. Dies ist primär auf einen höheren Spannungsabfall an dieser Stelle im Heizband zurückzuführen. Abbildung 7 zeigt die Widerstands- und Temperaturprofile, die von einer ungleichmäßigen Vermischung des polymeren Heizelementmaterials während der Verarbeitung herrühren kann.

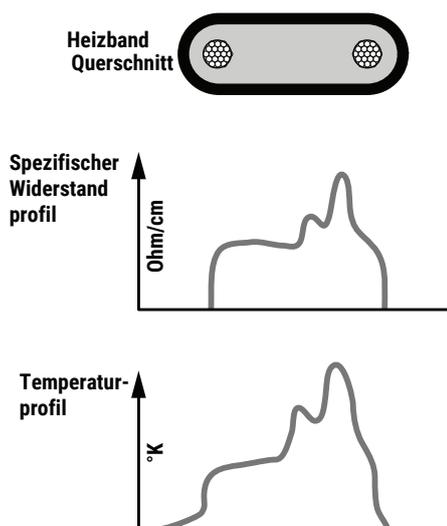


Abb. 7. Auswirkung eines ungleichmäßigen spezifischen Widerstands auf die Innentemperatur

Temperatur-Ungleichmäßigkeit entsteht dann, wenn eine elektrischer Kontaktwiderstand an der Schnittstelle zwischen dem Bus-Leiter und dem Polymer vorhanden ist. Die gesamte elektrische Strom fließt durch diese Schnittstelle. Wenn nicht die korrekten Verarbeitungstechniken verwendet werden, kann der Widerstand um die Bus-Leiter relativ hoch sein. Die daraus resultierenden lokalen hohen Temperaturen (siehe Abbildung 8) führen an diesen Stellen zu einem beschleunigten Abbau. Die höhere Leistung entsteht, wie schon zuvor, durch den höheren Spannungsabfall über diesen Hochwiderstandsbereich.

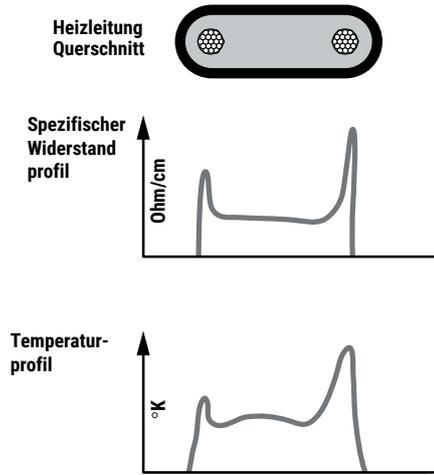


Abb. 8. Auswirkung des elektrischen Kontaktwiderstands an der Schnittstelle der leitfähigen Polymer-Elektrode

Während die vorherigen zwei Beispiele für einen potentiellen Ausfall auf den selbst erzeugten hohen Temperaturen beruhen, zeigt Abbildung 9 die höheren Temperaturen, die durch einen schlechten Wärmeübergang entstehen. Beachten Sie auch, dass bei leitfähigen PTC-R-Polymer-Heizbändern die Leistungsabgabe reduziert wird, wenn das Heizelement selbst eine höheren Temperatur aufweist. Dies kann zunächst zu einer niedriger als erforderlichen Leistungsabgabe und zu einem schnelleren Abbau aufgrund der höheren Heizelementtemperatur führen.

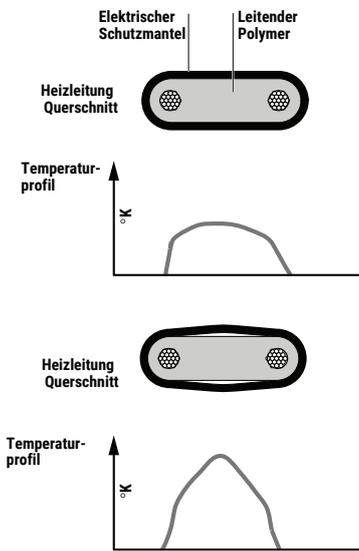


Abb. 9. Auswirkung einer schlechten Wärmeübertragung auf das Temperaturprofil

ARRHENIUS-TECHNIKEN ZUR VORHERSAGE DER LEBENSDAUER VON SELBSTREGELNDEN HEIZBÄNDERN

Für Alterungsstudien verwendete Produkte werden zufällig aus dem Inventar des Herstellers ausgewählt. Produkte mit den oben beschriebenen Eigenschaften zeigen Symptome eines frühen Ausfallmodus. Diese Symptome zeigen, dass Design und Fertigung von minderer Qualität sind; solche frühzeitigen Ausfälle machen die Verwendung der Arrhenius-Techniken zur Vorhersage der Lebensdauer unmöglich.

Da es jedoch notwendig ist, die Änderungen in der gemessenen Eigenschaft in eine Beziehung zur tatsächlichen Polymer-Alterungstemperatur zu setzen, muss die Heizelementtemperatur mit einem hohen Maß an Zuverlässigkeit bekannt sein. Aus diesem Grund muss die Alterung der Heizbänder in Öfen erfolgen, ohne dass die Heizbänder bestromt werden. Die Messung der Temperatur von bestromten Heizbändern in Alterungsöfen ist aus zwei Gründen nicht praktikabel: (1) die Betriebstemperatur von bestromten Heizbändern ändert sich aufgrund der sinkenden Leistungsabgabe mit zunehmendem Alter kontinuierlich, und (2) die Logistik zur Handhabung einer großen Anzahl von Proben und die Überwachung der Heizelementtemperatur jeder Probe würde die Kosten für diesen Test in unakzeptable Höhen treiben. Da jedoch bestromte Heizbänder bei einer höheren Temperatur als das Rohr oder das Substrat arbeiten, ist eine Beschreibung des in Betrieb befindlichen Heizelements erforderlich. Darüber hinaus erfolgt die Bewertung der Produkttemperatur aus Kundensicht am besten anhand der aufrecht zu erhaltenden Temperatur und nicht anhand der Heizelementtemperatur selbst. Man kann die Betriebstemperatur des Produkts bestimmen und diese als eine Funktion der Ausgangsleistung beschreiben. Diese Beschreibung der Heizelementtemperatur kann mithilfe exemplarischer Proben exakt bestimmt werden.

Zur Beschreibung der Heizelementtemperatur können Proben wie in Abb. 10 gezeigt installiert werden. Ein Heizband wird sorgfältig mit 36 AWG oder kleineren Thermoelementen instrumentiert, die auf jeder Seite des Heizbandes unter dem elektrisch isolierenden Mantel befestigt werden. Die Thermoelemente befinden sich in direktem Kontakt mit der Oberfläche des Polymer-Heizelement und sind als $T_{\text{Oberfläche1}}$ und $T_{\text{Oberfläche2}}$ bezeichnet. Das Heizband wird dann auf einem Kühlkörper – beispielsweise ein Metallrohr oder ein anderes Metallsubstrat – installiert, dessen Temperatur konstant gehalten werden kann. Die gesamte Installation wird dann isoliert, das Rohr oder Substrat wird auf die vom Hersteller empfohlene maximale Verwendungstemperatur eingestellt und das Heizband bestromt. Sobald das Gleichgewicht erreicht ist, werden die Temperaturen an der Ober- und Unterseite des Heizelements aufgezeichnet. Dieser Test wird an dem ausgewählten Produkt bei verschiedenen Leistungsstufen durchgeführt. Typischerweise erstreckt sich der erforderliche Leistungsabgabebereich für Produkte mit der gleichen Polymermatrix und dem gleichen physischen Aufbau von den höchsten bis zu den niedrigsten Leistungspegeln.

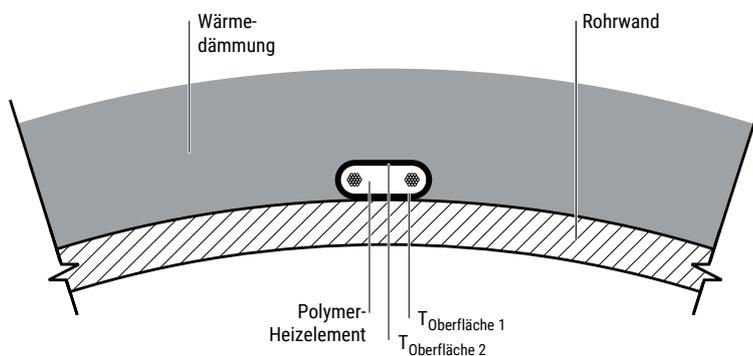


Abb. 10. Heizband, installiert und instrumentiert für eine Bestimmung der Heizelementtemperatur

Abbildung 11 zeigt die typische Ergebnisse bei der Bestimmung der Betriebstemperatur eines Heizbandes. Man erkennt, dass die Oberflächentemperatur des Heizelements, $T_{\text{Oberfläche2}}$ (vom Rohr abgewandt) wesentlich höher ist als $T_{\text{Oberfläche1}}$ (an der Seite des Heizelements, dem Rohr zugewandt). In der Praxis können durch Variieren der gesteuerten Rohr- bzw. Substrattemperatur zahlreiche unterschiedliche Betriebstemperaturen getestet werden, um eine Kennlinienfamilie für ein Produkt zu erhalten. Nutzungsmöglichkeiten für diese Informationen werden zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht.

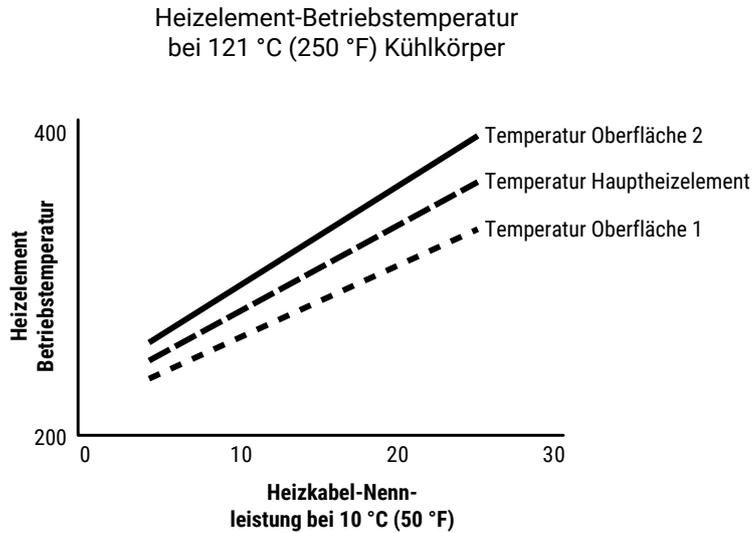


Abb. 11. Heizelementtemperatur (typisch) gegen Kühlkörpertemperatur

Bei der Festlegung eines Testplans für die beschleunigte Alterung sind mindestens vier Testtemperaturen erforderlich; fünf Temperaturen werden bevorzugt. Die Abstände zwischen jeder Temperatur müssen 14 °C (25 °F) oder höher sein. Um eine signifikante Alterung zu erreichen, müssen alle Temperaturen über der angegebenen maximalen Betriebstemperatur liegen.

Auch die maximale Alterungstemperatur kann begrenzt werden. Phasenänderungen in den Polymeren und die Schwellenwerte für chemische Reaktionen, die durch die maximale Alterungstemperatur überschritten werden könnten, müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Die Anwendung von Temperaturen über diesem Niveau bedeutet, dass der Test selbst Produktveränderungen hervorruft, die zu anderen Ausfallarten führen könnten, die im Feldeinsatz nicht zu erwarten sind.

Für jedes untersuchte Produkt sollten nicht weniger als acht Proben für die höchste Alterungstemperatur ausgewählt werden. Dies ermöglicht eine hohe Zuverlässigkeit bei den Ergebnissen für die am schnellsten alternden Proben. Für jede nachfolgende, niedrigere Temperatur muss die Anzahl der Proben auf diesem Niveau um acht erhöht werden. Die zunehmende Anzahl von Proben bei niedrigeren Temperaturen liefert eine größere Datenmenge zur Beschreibung des Verhaltens bei diesen niedrigeren Temperaturen. Eine typische Probenzahl pro Temperatur wäre wie folgt:

- Höchste Alterungstemperatur 8
- Nächst niedrigere Alterungstemperatur 16
- Nächst niedrigere Alterungstemperatur 24
- Nächst niedrigere Alterungstemperatur 32
- Niedrigste Alterungstemperatur 48

Die Proben werden in regelmäßigen Abständen aus dem Alterungssofen entfernt, und ihre Ausgangsleistung wird gemessen, nachdem sie an einem Metallrohr oder einem anderen Metallsubstrat befestigt wurden, dessen Temperatur konstant bei 10 °C (50 °F) gehalten wird. Jede Messung liefert ein Datenpunkt der aufrecht erhaltenen Leistung, und alle Datenpunkte werden in der endgültigen Arrhenius-Regression verwendet.

Bei einem typischen Alterungsversuch kann jede Probe bis zu 10 mal gemessen werden. Bei der oben beschriebenen Probengröße würden bis zu 1.280 Datenpunkte in den Regressionsdatensatz aufgenommen werden.

Die allgemeine Form der Gleichung für die Arrhenius-Regression in drei Dimensionen lautet: ¹

$$P_n = 10^a (a - t * b * \exp(-c/K))$$

- P_n = Normalisierte aufrecht erhaltene Leistung (% aufrecht erhalten/100)
- a = Eine konstante Eigenschaft des Produkts
- b * exp(-c/K) = Die Reaktionsrate des Abbauprozesses
- t = Zeit
- c = Aktivierungsenergie für die Reaktion/Boltzmann-Konstante

¹ Die Gleichung ist eine Abwandlung der Arrhenius-Gleichung. Eine ausführlichere Abhandlung dieser Ableitung finden Sie in **Accelerated Testing** von Wayne Nelson, ISBN 0-471-52277-5, Seiten 524-530.

Die Regression wird dann mit einer geeigneten dreidimensionalen Regressionssoftware durchgeführt. Eine typische dreidimensionale Ausgabe ist in Abbildung 12 gezeigt.

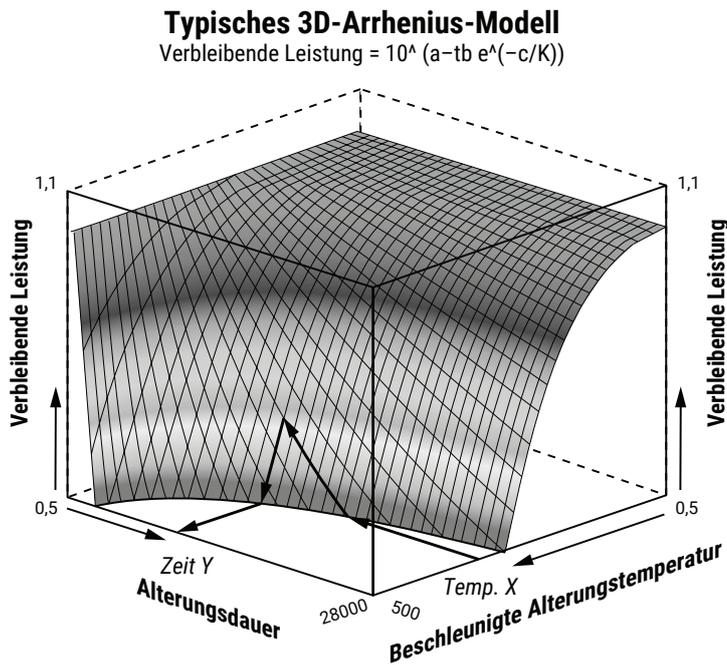


Abb. 12. Typisches dreidimensionales Arrhenius-Modell

Häufig ist der Kunde besonders an der voraussichtlichen Lebensdauer eines Produkts bei einer bestimmten Rohrtemperatur interessiert. Für eine konservative Schätzung kann man davon ausgehen, dass das Heizband zu 100 % der Zeit bestromt wird. Jede Zeit in einem nicht bestromten Zustand würde die geschätzte Lebensdauer erheblich verlängern. Eine weitere konservative Annahme ist, die maximale Heizelementtemperatur aus Abbildung 11 bzw. T_{Oberfläche} zu verwenden. Jedoch führt auch die Verwendung der durchschnittlichen Heizelementtemperatur zu einer vernünftigen Schätzung. Nachdem eine Heizelementtemperatur gewählt wurde, um die Produktlebensdauer (Zeit Y) für diesen Betriebszustand zu bestimmen, gibt man die dreidimensionale Arrhenius-Kennlinie (wie in Abb. 12 gezeigt) bei dieser Temperatur (Temp X) ein, bewegt sich auf den definierten Ausfallkennlinie nach oben und dann nach außen zur Zeitachse der Projektion.

Man kann auch ein „traditionelles“ zweidimensionales Lebensdauerdiagramm für die gewünschte spezifische Temperatur erstellen. Dabei wird eine „Temperaturebene“ X erstellt, und die entsprechenden Leistungs- und Zeitdaten ausgewählt und angezeigt. Ein solches Modell einer vorgeschlagenen Auslegungsgrenztemperatur ist in Abbildung 13 gezeigt. Dieser Ansatz eignet sich insbesondere bei der Auswahl eines Heizbandes, dessen Anfangsleistung höher als notwendig ist und dessen verminderte Leistung ausreicht, um eine Nutzungsdauer bei einer gewünschten Temperatur sicherzustellen.

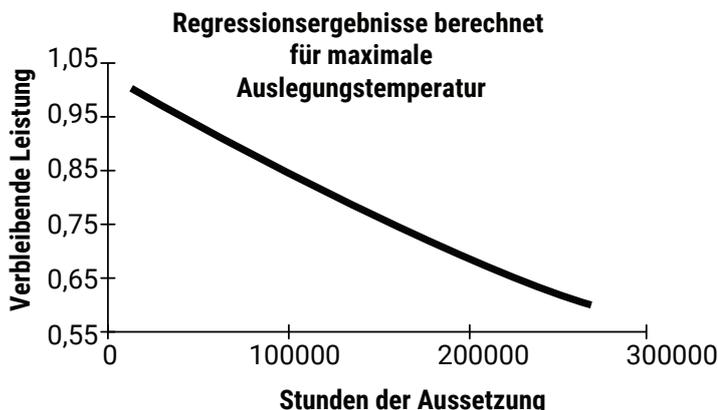


Abb. 13. Regressionsergebnisse berechnet für die maximale Auslegungstemperatur

Eine andere Möglichkeit zur Verwendung der dreidimensionalen Arrhenius-Informationen besteht darin, eine Betriebslebensdauer auszuwählen, beispielsweise 10 Jahre (87.660 Stunden), und die maximale Betriebstemperatur für ein System zu bestimmen, für das eine 25 %ige Leistungsabnahme erlaubt ist. Dieses Beispiel ist in Abbildung 14 dargestellt.

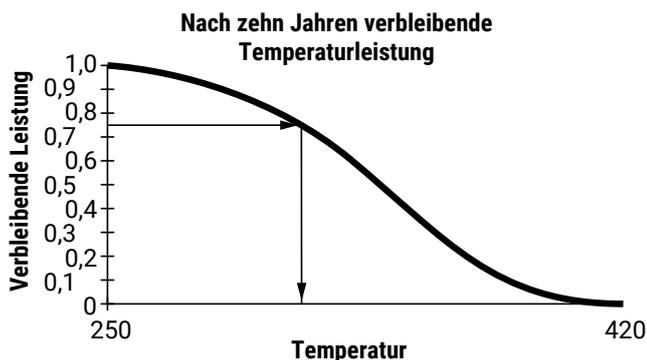


Abb. 14. Leistungskennlinie bei zehn Jahre aufrecht erhaltener Temperaturleistung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Schätzung für bestimmte Anwendungen mit zusätzlichen mathematischen Mitteln zu verbessern. Der Arbeitszyklus eines Produkts in einer Anwendung kann durch Bestimmen der Alterungstemperatur unter beiden Bedingungen und Berechnen der geschätzten Lebensdauer durch Gewichten der Ergebnisse basierend auf dem Arbeitszyklus erhalten werden. Man kann auch eine Absenkung der Alterungstemperatur explizit berücksichtigen, da das Heizelement mit der Zeit altert. Da die Leistung über die installierte Lebensdauer eines Produktes fällt, wird auch Heizelementtemperatur niedriger ausfallen. Dies neigt dazu, die geschätzte Lebensdauer des Produkts zu verlängern.

FAZIT

Dieses Papier hat einen neuen statischen Ansatz zur Nutzung der Daten aus Alterungsstudien vorgestellt. Es bietet dem Hersteller von Polymer-Heizbändern die Möglichkeit, die Produktleistung für den Kunden genauer vorherzusagen. Der Hersteller kann schneller auf Kundenanfragen zur Leistung reagieren, wenn das Heizband außerhalb der normalen Einsatzbedingungen betrieben wird. Die Leistungsstärke der dreidimensionalen Arrhenius-Regressionen liegt in der Fähigkeit, Datenpunkte direkt in die endgültige Regression einzusetzen, die nicht genau auf – oder nur auf Schätzungen – eines einzigen Ausfallkriteriums beruhen. Es ist möglich, schnell alternative Ausfallkriterien und Anwendungsbedingungen untersuchen, ohne die experimentellen Daten erneut zu analysieren.

North America

Tel +1.800.545.6258

Fax +1.800.527.5703

thermal.info@nvent.com

Europe, Middle East, Africa

Tel +32.16.213.511

Fax +32.16.213.604

thermal.info@nvent.com

Asia Pacific

Tel +86.21.2412.1688

Fax +86.21.5426.3167

cn.thermal.info@nvent.com

Latin America

Tel +1.713.868.4800

Fax +1.713.868.2333

thermal.info@nvent.com

Unser starkes Markenportfolio:

CADDY ERICO HOFFMAN RAYCHEM SCHROFF TRACER



[nVent.com/RAYCHEM](https://www.nvent.com/RAYCHEM)