

**Abschätzung der
Lebensdauer von
Isolatorwerkstoffen auf
Polymerbasis unter
Strahlungs- und
Temperatureinfluss
(A.L.I.S.e)**

Abschätzung der Lebensdauer von Isolatorwerkstoffen auf Polymerbasis unter Strahlungs- und Temperatureinfluss (A.L.I.S.e)

Christian Korn
Vasily Fedorov

März 2026

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Eigenforschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) unter dem Förderkennzeichen 4722R01220 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUKN übereinstimmen.

Deskriptoren

Arrhenius-Modell, Grenzen der Anwendbarkeit, Kabelalterung, materialspezifische Sondereffekte, Potenzgesetz, radiologisch, Rechenmodelle, Superpositionsverfahren, thermisch, Verifikation der Rechenmodelle

Kurzfassung

Der vorliegende Bericht umfasst Ergebnisse, die im Rahmen des vom Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) geförderten Eigenforschungsvorhabens „Abschätzung der Lebensdauer von Isolatorwerkstoffen auf Polymerbasis unter Strahlungs- und Temperatureinfluss (A.L.I.S.e)“ (Förderkennzeichen 4722R01220) erarbeitet wurden. Die Zielsetzung dieses Vorhabens war es, ein grundsätzlich in der Praxis einsetzbares Werkzeug in Form von Rechenmodellen zu entwickeln, mit dem die Lebensdauer von Isolierwerkstoffen von Kabeln unter Temperatur- und Strahleneinfluss bestimmt werden kann. Dies geschah basierend auf verschiedenen mathematischen Verfahren aus ausgewählten Regelwerken und Normen.

Es wurden Rechenmodelle zur Ermittlung der Lebensdauer von Kabelisolierwerkstoffen bei rein thermischer Alterung, rein radiologischer Alterung, sowie bei kombinierter thermischer und radiologischer Alterung umgesetzt. Alle Rechenmodelle wurden in Form von Notebooks mit dem Programm Wolfram Mathematica 11.2 umgesetzt. Über die Notebooks können die erforderlichen Messdaten aus Excel-Dateien eingelesen und verarbeitet werden. Das Ergebnis für die ermittelte Lebensdauer wird sowohl graphisch als auch in Form von Zahlenwerten ausgegeben. Um eine konservative Abschätzung der Lebensdauer von Isolierwerkstoffen von Kabeln sicherzustellen, wurden diverse Sicherheitszuschläge festgelegt, die mögliche Unsicherheiten der Modellparameter und die Fehlerfortpflanzung aufgrund von Messunsicherheiten berücksichtigen. Darüber hinaus wurden noch Sicherheitszuschläge definiert, die aus synergetischen Effekten bei der kombinierten thermischen und radiologischen Alterung resultieren, die bei der Verifikation der Rechenmodelle beobachtet und bei einer Literaturrecherche ermittelt wurden. Alle entwickelten Rechenmodelle konnten mithilfe von Messdaten und Modelldaten einer anderen unabhängigen Forschungseinrichtung erfolgreich verifiziert werden. Die in den Normen und Regelwerken dargestellten Rechenmethoden sind materialunabhängig formuliert. Daher wurde eine Literaturrecherche zu den Materialien Polyvinylchlorid (PVC) und Ethylen-Propylen-Copolymeren (EPR) durchgeführt, um materialspezifische Sondereffekte zu ermitteln, die in den Rechenmodellen berücksichtigt werden müssen bzw. unter denen die Rechenmodelle nicht mehr anwendbar sind. Für die Materialien Vernetztes Polyethylen (VPE) und Silikonkautschuk (Silicon Rubber SIR) sind die entsprechenden Materialrecherchen bereits durch GRS-interne Vorarbeiten erfolgt.

Abstract

This report presents results obtained within the framework of the research project “Estimation of the service life of polymer-based insulating materials under the influence of radiation and temperature (A.L.I.S.e)” (funded by the Federal Ministry for the Environment, Climate Action, Nature Conservation and Nuclear Safety under funding code 4722R01220). The objective of this project was to develop a practically applicable tool in the form of computational models for determining the service life of cable insulating materials under the influence of temperature and radiation. This was achieved based on various mathematical methods from selected regulations and standards.

Computational models were implemented to determine the service life of cable insulation materials under purely thermal aging, purely radiological aging, and combined thermal and radiological aging. All models were implemented as notebooks using the Wolfram Mathematica 11.2 software. The necessary measurement data from Excel files can be imported and processed via these notebooks. The resulting service life is displayed both graphically and numerically. To ensure a conservative estimation of the service life of cable insulation materials, various safety margins were defined to account for potential uncertainties in the model parameters and error propagation due to measurement uncertainties. Furthermore, additional safety margins were defined to account for synergistic effects observed during combined thermal and radiological aging, which were identified during the verification of the models and determined through a literature review. All developed computational models were successfully verified using measurement and model data from another independent research institution. The calculation methods described in the standards and regulations are formulated to be material-independent. Therefore, a literature review was conducted on the materials Polyvinyl Chloride (PVC) and Ethylene-Propylene Copolymers (EPR) to identify material-specific effects that must be considered in the computational models or under which the computational models are no longer applicable. For the materials Cross-linked Polyethylene (XLPE) and Silicone Rubber (SIR), the corresponding material reviews have already been carried out through preliminary work within GRS.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
1 Einleitung	1
2 Stand von Wissenschaft und Technik	3
3 Rechenmodelle zur Kabelalterung	5
3.1 Thermische Alterung nach dem Arrhenius-Modell.....	5
3.2 Radiologische Alterung nach dem Potenzgesetz	11
3.3 Kombinierte thermische und radiologische Alterung nach dem Superpositionsverfahren	15
3.3.1 Superposition I-Verfahren	19
3.3.2 Superposition II-Verfahren	22
3.3.3 Grenzen der Anwendbarkeit der beiden Rechenverfahren.....	26
4 Umsetzung der Rechenmodelle in Mathematica	27
4.1 Umsetzung des Arrhenius-Modells für thermische Alterung	27
4.2 Umsetzung des Potenzgesetzes für radiologische Alterung.....	33
4.3 Umsetzung des Superpositionsverfahrens für kombinierte thermische und radiologische Alterung	39
4.3.1 Umsetzung Superposition I-Verfahren	40
4.3.2 Umsetzung Superposition II-Verfahren	50
5 Verifikation der Rechenmodelle	57
5.1 Verifikation des Arrhenius-Modells für die thermische Alterung.....	58
5.1.1 Überprüfung der Lebensdauer anhand gemessener Daten	62
5.1.2 Überprüfung der Lebensdauer unter Verwendung von Modelldaten aus dem Sandia-Bericht	64
5.2 Verifikation des Potenzgesetzes für die radiologische Alterung	66
5.2.1 Verwendung von Messdaten zum Polymer Brandrex CLPO	66

5.2.2	Verwendung von Modelldaten des Sandia-Berichts zum Polymer Rockbestos Neopren	74
5.3	Verifikation des Superpositionsverfahrens für die kombinierte thermische und radiologische Alterung	80
5.3.1	Überprüfung der Lebensdauer anhand von Messdaten	85
5.3.2	Überprüfung der Lebensdauer anhand von Modelldaten aus dem Sandia-Bericht	90
5.4	Fazit zu den Modell-Verifikationen	95
6	Materialspezifische Eigenschaften und Sondereffekte	97
6.1	Materialspezifische Einführung zu PVC	97
6.2	Materialspezifische Einführung zu EPR	103
6.3	Das Alterungsverhalten von ausgewählten Polymeren (PVC und EPR) unter dem Einfluss von Stressoren	107
6.3.1	Beständigkeit gegen atmosphärische Einflüsse	109
6.3.2	Temperatur	110
6.3.3	Strahlung	113
6.3.4	Synergetische Effekte bei gleichzeitiger thermischer und radiologischer Alterung	117
7	Sicherheitszuschläge aus synergetischen Effekten	121
8	Zusammenfassung	123
	Literaturverzeichnis	127
	Abbildungsverzeichnis	133
	Tabellenverzeichnis	139
	Abkürzungsverzeichnis	141
	Formelsymbolverzeichnis	143
A	Anhang	145

A.1	Datensätze der zeitabhängigen Änderung der Reißdehnung (Elongation at Break EAB) für das Polymer FR-XLPE aus /JNE 03/	145
A.2	Superposition I-Verfahren: Berechnung des Parameters k in Abhängigkeit vom Parameter x	148
A.3	Superposition II-Verfahren: Berechnung der Parameter tm und k in Abhängigkeit vom Parameter x	149

1 **Einleitung**

Um sicherzustellen, dass elektro- und leittechnische Komponenten ihre sicherheitstechnischen Aufgaben über die gesamte Lebenszeit erfüllen, wird im Rahmen eines Qualifikationsprozesses für kerntechnische Anlagen eine maximale zulässige Einsatzdauer (Lebensdauer) ermittelt. Die Komponenten werden dabei verschiedenen Belastungen unterworfen, welche die Umgebungsbedingungen während des normalen Betriebs und bei Anforderungen während eines Kühlmittelverluststörfalls repräsentieren sollen. Hierbei ergeben sich inhärente Unsicherheiten bezüglich der qualifizierten Lebensdauer, da für den Qualifikationsprozess u. a. nur eine begrenzte Zeitdauer zur Verfügung steht, die deutlich kleiner als die tatsächliche Betriebsdauer ist. Die Belastungen müssen daher in einem zeitlich gerafften Verfahren durchgeführt werden. Die Übertragung auf die tatsächlichen Bedingungen vor Ort erfolgt dann unter Anwendung verschiedener mathematischer Verfahren. Für polymerbasierte Isolatorwerkstoffe in Kabeln sind als Stressoren in einem kerntechnischen Umfeld besonders Temperatur und Strahlendosis von Relevanz, die bei der Übertragung auf die tatsächlichen Bedingungen vor Ort bei den mathematischen Verfahren berücksichtigt werden müssen.

Die GRS besaß zu Beginn dieses Eigenforschungsvorhabens keine Verfahren, um die Lebensdauer von Isolatorwerkstoffen abhängig von den Umgebungsbedingungen zu quantifizieren. Im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens wurde daher basierend auf verschiedenen mathematischen Verfahren aus ausgewählten Regelwerken und Normen ein grundsätzlich in der Praxis einsetzbares Werkzeug in Form von Rechenmodellen zur Bestimmung der Lebensdauer von Isolatorwerkstoffen von Kabeln unter Temperatur- und Strahleneinfluss erstellt. Die zugehörigen Rechenmodelle wurden im Zuge des hier vorgestellten Eigenforschungsvorhabens in der GRS durch die Entwicklung entsprechender Mathematica-Notebooks realisiert, die eine Mindestlebensdauer aus durch den Nutzer einzugebenden thermischen und/oder radiologischen Belastungen im Anwendungsfall und unter Verwendung gegebenenfalls zu recherchierender Materialparameter berechnen.

Das Eigenforschungsvorhaben diene dazu, Kompetenzen zu Fragen der Komponentenqualifizierung und -requalifizierung in der GRS aufzubauen.

Durch das Eigenforschungsvorhaben wurde die GRS in die Lage versetzt, analytische Lebens- oder Qualifikationsdauerabschätzungen für Kabel und andere Komponenten, bei denen die elektrische Isolationsfähigkeit eines Polymers die Lebensdauer der Komponente begrenzt, nachzuvollziehen oder bei Vorliegen entsprechender Materialdaten selbst vorzunehmen. Derartige Lebensdauerabschätzungen sind wegen der grundsätzlich gleichen Alterungsvorgänge auch für Forschungsreaktoren und während des Nachbetriebs anwendbar und notwendig, da auch in diesen Anlagen Alterungsmanagement betrieben werden muss. Darüber hinaus dient das Forschungsvorhaben auch dem Kompetenzerhalt innerhalb der GRS zu typischen Problemstellungen und Aufgaben während der Qualifizierung von Komponenten

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden die folgenden Einzelziele verfolgt:

- Realisierung eines Rechenverfahrens zur Ermittlung der thermischen Alterung von polymerbasierten Isolatorwerkstoffen.
- Realisierung eines Rechenverfahrens zur Ermittlung der radiologischen Alterung von polymerbasierten Isolatorwerkstoffen.
- Realisierung von Rechenverfahren zur Bestimmung der kombinierten thermischen und radiologischen Alterung von polymerbasierten Isolatorwerkstoffen.
- Erarbeitung von Vorgaben für Sicherheitsaufschläge zur Berücksichtigung von Unsicherheiten und Synergieeffekten bei der Kombination der Rechenverfahren.
- Durchführung von Proberechnungen für ausgewählte Beispiele und Vergleich mit den Ergebnissen anderer Vorhaben.
- Literaturrecherche zu alterungsrelevanten Sondereffekten bei den Materialien Polyvinylchlorid (PVC) und Ethylen-Propylen-Copolymeren (EPR).

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Kabel sind in Kernkraftwerken und anderen kerntechnischen Einrichtungen an vielfältigen Positionen und in großem Umfang im Einsatz und dienen entweder als Leistungskabel der Energieübertragung oder als Leittechnikabel der Signalübertragung. Das Alterungsverhalten von Kabeln ist daher Gegenstand umfangreicher nationaler und internationaler Untersuchungen. Der die Einsatzdauer begrenzende Bestandteil ist in der Regel der Polymer-Isolator des Kabels, welcher unter dem Einfluss von Temperatur und Strahlung altert. Die zugrundeliegenden Alterungsprozesse sind allerdings auch auf andere Polymer-Komponenten übertragbar.

Anforderungen an die Qualifizierung und Requalifizierung von Komponenten sind in den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ und in den sicherheitstechnischen Regeln des kerntechnischen Ausschusses (/KTA 17A/, /KTA 17B/, /KTA 18/) festgelegt. Nach KTA 3706 /KTA 17A/ wird ein Nachweis für den Erhalt der Störfallfestigkeit von elektro- und leittechnischen Komponenten, z. B. mittels eines dort als analytischer Ansatz aufgeführten Vorgehens, gefordert. Um einen solchen Nachweis erbringen zu können, wurden in den vergangenen Jahren von den Betreibern deutscher Kernkraftwerke entsprechende Verfahren eingeführt. Mit diesen können, abhängig von den vorherrschenden radiologischen und thermischen Bedingungen, die Lebensdauern von verschiedenen Komponenten berechnet werden. Dazu sind umfangreiche Vorrecherchen notwendig, um die für diese Abschätzung relevanten Materialparameter zu bestimmen. Unter Anwendung verschiedener stressorspezifischer Rechenverfahren können dann Lebensdauercurven berechnet werden, aus denen abhängig von der lokalen Situation eine Mindestlebensdauer abgelesen werden kann. Mit dem hier vorgestellten Eigenforschungsvorhaben soll die GRS in die Lage versetzt werden ähnliche Rechnungen durchführen zu können.

Die GRS hat im Rahmen eines internen Forschungsvorhabens eine generische Untersuchung zum Alterungsverhalten der Isolatorwerkstoffe vernetztes Polyethylen (VPE) und Silikonkautschuk (SIR) durchgeführt. Diese umfasste erstens eine Literaturrecherche, welches mikroskopische und makroskopische Alterungsverhalten bei den betrachteten Isolatorwerkstoffen, unter ausgewählten potenziell im kerntechnischen Kontext relevanten Stressoren, zu erwarten ist. Zweitens wurde eine Literaturrecherche im einschlägigen Regel- und Normenwerk durchgeführt, welche Verfahren in den Regeln und Normen für eine Lebensdauerabschätzung insbesondere in Bezug auf die Stressoren

ren Temperatur und Strahlung aufgeführt werden und welche Unsicherheitsfaktoren typischerweise verbleiben. Die Rechercheergebnisse zu den Normenwerken sind die Grundlage für das in diesem Dokument behandelte Vorhaben.

Ein weiteres Projekt zur Abschätzung der Lebensdauer von Kabeln ist das „Team Cables“ Projekt mit dem Ziel entsprechende Informationen für die Betreiber von Kernkraftwerken bereitzustellen. Dazu wurden Algorithmen für die Modellierung der Kabelalterung generiert, die auch chemische Variationen durch die Verwendung von Harzen, Füllstoffen, Additiven etc. berücksichtigen. Zusätzlich wurden Methoden für zerstörungsfreie Testtechniken und die dafür relevanten Kriterien entwickelt. Schließlich wurde ein neues numerisches Werkzeug erstellt, das alle entwickelten Modelle beinhaltet und die Restlebensdauer von Kabeln berechnet, indem es zerstörungsfreie Messungen, Vorhersagemodelle und Kenntnisse über die Stressoren, denen die Kabel ausgesetzt sind, miteinander verbindet. Das Projekt begann am 1. September 2017 und wurde am 28. Februar 2022 abgeschlossen. /TEC 25/

Ein weiteres internationales Projekt, welches sich unter anderem mit Kabelalterung beschäftigt, ist das IAEA-Projekt International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL), an dem die GRS teilnimmt. IGALL beschäftigt sich grundsätzlich mit allen Aspekten des Alterungsmanagements. Kabelalterung ist ein Unterpunkt von vielen. /IAE 24/

3 Rechenmodelle zur Kabelalterung

In diesem Kapitel werden die Rechenmodelle zur Kabelalterung vorgestellt und erläutert, auf denen die im Zuge dieses Eigenforschungsvorhabens entwickelten Mathematica-Notebooks beruhen. Zunächst wird in Abschnitt 3.1 die thermische Alterung von Polymeren behandelt, welche auf dem Arrhenius-Modell beruht. In Abschnitt 3.2 wird das Modell der radiologischen Alterung unter Strahlungseinfluss auf Basis des Potenzgesetzes erläutert. Schließlich befasst sich Abschnitt 3.3 mit dem Superpositionsverfahren, das die Kombination von thermischer und radiologischer Alterung berücksichtigt. Dabei wird gezeigt werden, dass das Superpositionsverfahren ohne Strahlung in das Arrhenius-Modell der thermischen Alterung und bei konstanter Temperatur und gleichzeitigem Strahlungseinfluss in das Potenzgesetz der radiologischen Alterung übergeht. Leicht variierende Zusammensetzungen der Isolator-Werkstoffe können schon innerhalb eines Kabels zu ortsabhängig variierenden Schwankungen der Geschwindigkeit der Alterungsreaktionen führen. Bemerkbar macht sich das zum Beispiel bei der durch thermische Alterung bedingten Verfärbung von Isolator-Werkstoffen, bei der oftmals eine Streifenbildung zu beobachten ist. In den Rechenmodellen können solche Schwankungen abgefangen werden, indem man als Sicherheitszuschlag ausreichend hohe bzw. geeignete Fehler für die Modellparameter ansetzt, so dass die Lebensdauer nicht zu optimistisch, sondern konservativ abgeschätzt wird. Hierbei helfen entsprechende Erfahrungswerte.

3.1 Thermische Alterung nach dem Arrhenius-Modell

Die in diesem Abschnitt diskutierten Zusammenhänge beschreiben die Alterung von Polymeren unter Temperatureinfluss und beruhen auf der Norm DIN 60216-7-1 /DIN 15/. Für den Ablauf von chemischen Alterungsreaktionen wird eine gewisse Aktivierungsenergie E_a in Elektronenvolt (eV) benötigt. Die Wahrscheinlichkeit $P(E_a, T)$, dass diese Energie bei gegebener Temperatur T in Kelvin (K) erreicht wird, ist durch die Boltzmann-Verteilung gegeben:

$$P(E_a, T) = P_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{k_B \cdot T}}. \quad (3.1)$$

Darin ist P_0 eine Konstante und k_B ist die Boltzmann-Konstante, deren Wert durch $k_B = 8,6173 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ gegeben ist /NIST 24/. Die Reaktionsgeschwindigkeit $v(T)$ sei

die bei den chemischen Alterungsreaktionen umgesetzte Stoffmenge des Polymers/Isolatorwerkstoffs pro Zeiteinheit. Bei höherer Temperatur T steht mehr thermische Energie für diese Reaktionen zur Verfügung und sie laufen schneller ab. Entsprechend ist $v(T)$ eine Funktion der Temperatur T . Dies lässt sich damit ausdrücken, dass $v(T)$ proportional zur Wahrscheinlichkeit $P(E_a, T)$ sein muss, dass bei gegebener Temperatur T die für die Reaktionen erforderliche Aktivierungsenergie E_a vorliegt. Der entsprechende Zusammenhang wird über das so genannte Arrhenius-Modell beschrieben:

$$v(T) = v_{ref} \cdot \frac{P(E_a, T)}{P(E_a, T_{ref})}. \quad (3.2)$$

In dieser Gleichung ist v_{ref} die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Referenztemperatur T_{ref} . Setzt man hier die Formel (3.1) der Boltzmann-Verteilung ein, so erhält man:

$$v(T) = v_{ref} \cdot e^{\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}. \quad (3.3)$$

Die Lebensdauer eines Kabelisolatorwerkstoffs wird durch die für den jeweiligen Anwendungsfall und die gegebenen Einsatzbedingungen relevante alterungssensitive Eigenschaft (z. B. Reißdehnung, engl. Elongation at Break EAB) eingeschränkt. Dazu wird ein Akzeptanzkriterium (z. B. EAB bei 50% des Initialwerts) festgelegt, bei dessen Erreichen das Kabel nicht mehr die benötigten Anforderungen erfüllt. In diesem Fall hat das Kabel dann seine qualifizierte Lebensdauer t_E erreicht. Um das Akzeptanzkriterium zu erreichen, muss beim Alterungsprozess während der qualifizierten Lebensdauer t_E und bei der Einsatztemperatur T_E eine gewisse Stoffmenge ξ des Isolatormaterials umgesetzt werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Umgebungsbedingungen unverändert bleiben. Somit wird T_E als zeitlich konstant betrachtet. Folglich ist auch die zugehörige Reaktionsgeschwindigkeit $v(T_E)$ zeitlich konstant. Da die Reaktionsgeschwindigkeit die umgesetzte Stoffmenge pro Zeit angibt, gilt entsprechend:

$$\xi = v(T_E) \cdot t_E. \quad (3.4)$$

Für die Berechnung der qualifizierten Lebensdauer t_E ist dieser Ausdruck jedoch ungeeignet, da die umgesetzte Stoffmenge ξ in der Regel nicht bekannt ist. Es wird daher noch ein Referenzwert benötigt, der sogenannte Temperaturindex (t_I, T_I) , welcher messtechnisch ermittelt wird. Dabei handelt es sich um ein Wertepaar aus Zeit- (t_I) und Temperaturangabe (T_I), bei dem das gleiche Akzeptanzkriterium erreicht wird.

Üblicherweise wird bei den Referenzmessungen eine Temperatur T_I gewählt, die deutlich höher ist als die Temperatur unter Einsatzbedingungen T_E , um den Alterungsprozess zu beschleunigen. Dabei wird T_I in der Regel so gewählt, dass die Zeit t_I bis zum Erreichen des Akzeptanzkriteriums 20 000 Stunden beträgt. Weicht t_I von diesem Wert ab, so ist das explizit anzugeben. Das Erreichen des Akzeptanzkriteriums bedeutet, dass die gleiche Stoffmenge ξ umgesetzt wurde. Entsprechend gilt in Verbindung mit Gleichung (3.4):

$$\xi = v(T_E) \cdot t_E = v(T_I) \cdot t_I. \quad (3.5)$$

Dieser Ausdruck lässt sich nach der qualifizierten Lebensdauer t_E umstellen:

$$t_E = \frac{v(T_I)}{v(T_E)} \cdot t_I. \quad (3.6)$$

Man erkennt, dass die nicht bekannte umgesetzte Stoffmenge ξ in dieser Formel für t_E nicht mehr benötigt wird. Setzt man hier die Formel (3.3) für die Reaktionsgeschwindigkeit $v(T)$ ein, dann erhält man die Berechnungsvorschrift für die qualifizierte Lebensdauer t_E bei gegebener Einsatztemperatur T_E :

$$t_E = e^{\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_I} \right)} \cdot t_I \quad (3.7)$$

Um die Berechnungsformel anwenden zu können, muss die Aktivierungsenergie E_a bekannt sein, z. B. anhand entsprechender Angaben in einem Datenblatt zum betreffenden Polymer, oder sie muss noch durch Messungen ermittelt werden. Dazu ist (3.7) zu logarithmieren:

$$\ln(t_E) = \frac{1}{1000} \cdot \frac{E_a}{k_B} \cdot \frac{1000}{T_E} + \ln(t_I) - \frac{E_a}{k_B} \cdot \frac{1}{T_I}. \quad (3.8)$$

Dabei ist zu beachten, dass die Erweiterung um den Faktor 1000 nur der besseren Darstellung von Messpunkten dient, die den Logarithmus der Lebensdauer $\ln(t_E)$ in Abhängigkeit vom reziproken Temperaturwert $1000/T_E$ angeben und die über die Gleichung (3.8) beschrieben werden. In diesem Zusammenhang, mit $1000/T_E$ als x -Wert und $\ln(t_E)$ als y -Wert, beschreibt (3.8) die sogenannte Arrhenius-Gerade. Für verschiedene Temperaturen T_E ist die Dauer t_E bis zum Erreichen des Akzeptanzkriteriums zu messen. Danach sind die Zeit-Logarithmen $\ln(t_E)$ über die reziproken Temperaturwerte $1000/T_E$

aufzutragen. Die Daten sind mit der Geradengleichung (3.8) zu fitten. Abb. 3.1 zeigt das entsprechende Ergebnis, die Arrhenius-Geraden für die beiden Polymere Ethylen-Vinylacetat-Copolymere (EVA) und Polyolefin (POE). Die Aktivierungsenergie E_a für den jeweiligen Kunststoff lässt sich dann gemäß (3.8) aus der Steigung der zugehörigen Arrhenius-Geraden berechnen. Denn nach Gleichung (3.8) in Verbindung mit Abb. 3.1 gilt für die Steigung m der Arrhenius-Geraden:

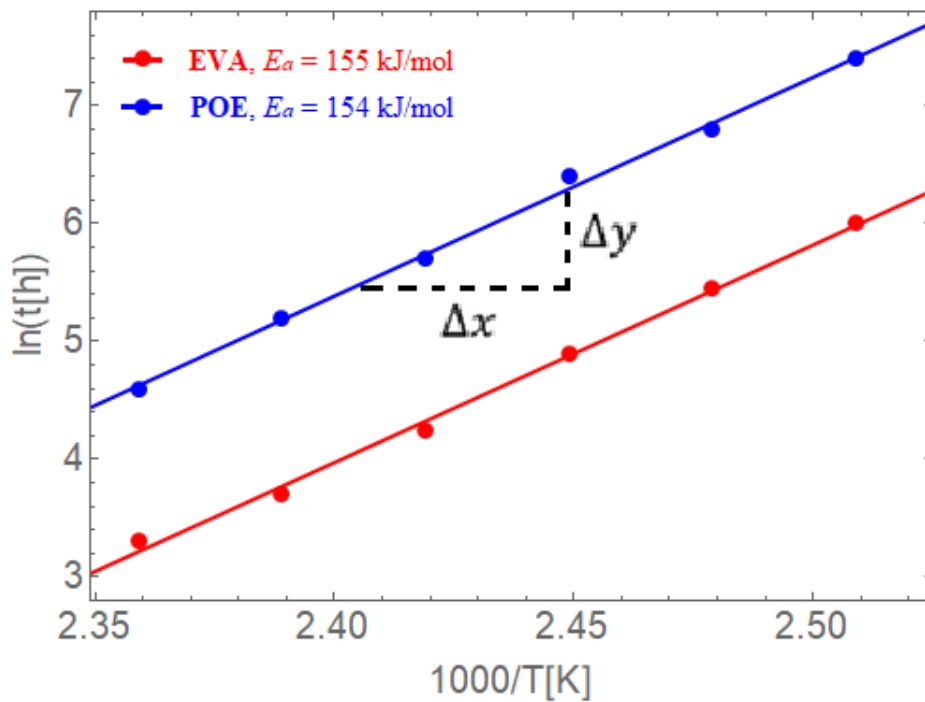


Abb. 3.1 Die Arrhenius-Geraden der beiden Polymere Ethylen-Vinylacetat-Copolymere (EVA) und Polyolefin (POE). Die Aktivierungsenergien E_a sind hier jeweils in kJ pro Mol angegeben. Abbildung in Anlehnung an Figur 4 aus /POL 22/.

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{1}{1000} \cdot \frac{E_a}{k_B} \quad (3.9)$$

Dieser Ausdruck lässt sich nach der Aktivierungsenergie E_a in eV umstellen:

$$E_a = 1000 \cdot k_B \cdot m. \quad (3.10)$$

Mithilfe der Gaußschen Fehlerfortpflanzung und dem beim Fit bestimmten Fehler der Steigung Δm , folgt daraus auch der Fehler der Aktivierungsenergie ΔE_a :

$$\Delta E_a = 1000 \cdot k_B \cdot \Delta m. \quad (3.11)$$

Für die Berechnung der qualifizierten Lebensdauer t_E sind noch entsprechende Sicherheitszuschläge zu definieren, die eine schlechte Datenlage bezüglich des verwendeten Polymers und eine durch Messungenauigkeiten bedingte Abweichung des berechneten Werts t_E von der tatsächlichen Lebensdauer abfangen. Mittelt man über eine große Anzahl von Polymeren, so erhält man nach [IAE 12, KUN 17] für die Aktivierungsenergie E_a einen Mittelwert $\bar{E}_a$ von:

$$\bar{E}_a = (0,9 \pm 0,25) \text{ eV}. \quad (3.12)$$

Dabei entspricht der Fehler 0,25 eV der maximalen Schwankung für Kabelisolierungen. Wenn für das vorliegende Polymer weder eine Arrhenius-Gerade noch ein Datenblatt mit den Werten für E_a und ΔE_a vorliegen, dann kann zumindest eine erste konservative Abschätzung der qualifizierten Lebensdauer t_E nach den folgenden Kriterien getroffen werden:

- Wenn für das verwendete Polymer die Werte E_a und ΔE_a nur von einem anderen Hersteller bekannt sind und die Bedingung $E_a + \Delta E_a < (0,9 - 0,25) \text{ eV}$ erfüllt ist, dann sind die Werte dieses Herstellers für die Berechnung der qualifizierten Lebensdauer t_E zu verwenden. Dabei wurde der Umstand berücksichtigt, dass bei kleinerer Aktivierungsenergie E_a die thermischen Alterungsreaktionen schneller ablaufen, was zu einem niedrigeren Wert für t_E und somit zu einer konservativen Abschätzung führt.
- Andernfalls sind die Werte $E_a = 0,9 \text{ eV}$ und $\Delta E_a = 0,25 \text{ eV}$ für die Berechnung von t_E zu verwenden.

Es ist ausdrücklich zu betonen, dass diese Vorgehensweise bei unzureichender Datenlage bezüglich des verwendeten Polymers nur eine erste konservative Abschätzung für die qualifizierte Lebensdauer t_E darstellt. Daher müssen in jedem Fall die Arrhenius-Gerade oder die Datenblattwerte von E_a und ΔE_a für das betreffende Polymer beschafft werden und die Berechnung von t_E ist mit diesen exakten Werten zu wiederholen. Die qualifizierte Lebensdauer t_E ist mit der Formel (3.7) und ihr Fehler Δt_E ist mithilfe der Gaußschen Fehlerfortpflanzung aus den Parameterfehlern (ΔE_a , ΔT_E , ΔT_l und Δt_l) zu berechnen. Um zu verhindern, dass die Lebensdauer aufgrund der Parameterfehler zu optimistisch eingeschätzt wird, wird ein in der Praxis aufgrund von Erfahrungswerten verbreiteter Sicherheitsabschlag von 20 % angesetzt. Dabei wird für die Lebensdauer nicht die berechnete qualifizierte Lebensdauer t_E verwendet, sondern die tatsächlich

nutzbare Lebensdauer t_N , die nach den folgenden Kriterien aus t_E und Δt_E bestimmt wird:

- $t_E - \Delta t_E > 75$ Jahre: nutzbare Lebensdauer $t_N = 80\%$ von 75 Jahre = 60 Jahre
- $t_E - \Delta t_E \leq 75$ Jahre: nutzbare Lebensdauer $t_N = 80\%$ von $t_E - \Delta t_E$

Das bedeutet, dass die nutzbare Lebensdauer t_N niemals die vorgegebene Obergrenze von 60 Jahren überschreitet. Zudem ist zu beachten, dass das hier vorgestellte Rechenmodell nicht uneingeschränkt anwendbar ist. Die Fälle, in denen das Modell gemäß GRS-Expertise nicht angewendet werden kann, werden nachstehend aufgelistet:

- Wenn sich die Daten zur Bestimmung der Aktivierungsenergie E_a und ihres Fehlers ΔE_a nicht durch die Geradengleichung (3.8) fiten lassen, dann ist das ein Hinweis darauf, dass das Modell aufgrund komplexerer Alterungsmechanismen nicht anwendbar ist.
- Das Modell ist nur anwendbar, wenn bei der Referenztemperatur des Temperaturindex die gleiche die Alterung bestimmende Reaktion auftritt wie bei der Einsatztemperatur. Es darf zu keinen konkurrierenden Alterungsmechanismen kommen.
- Das Modell darf nicht bei Phasenübergängen des Polymers angewendet werden, wie sie z. B. in teilkristallinen Materialien wie VPE vorkommen (z. B. Berücksichtigung des Schmelzpunkts)

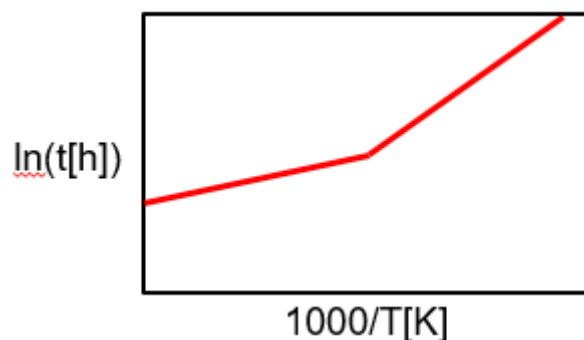


Abb. 3.2 Das Rechenmodell ist nicht anwendbar, wenn die Arrhenius-Gerade einen Knick aufweist, was hier symbolisch dargestellt ist.

Vor allem die letzten beiden Punkte führen zu einem Knick in der Arrhenius-Geraden (siehe Abb. 3.2), da sie bei einer spezifischen Temperatur zu einer Änderung der Aktivierungsenergie E_a und somit nach (3.9) auch zu einer Änderung der Steigung in der Arrhenius-Geraden führen.

Somit liefert auch der Plot der Arrhenius-Geraden einen Hinweis darauf, ob das Rechenmodell anwendbar ist oder nicht.

3.2 Radiologische Alterung nach dem Potenzgesetz

Dieser Abschnitt behandelt das Rechenmodell für die rein radiologische Alterung von Polymeren, wie es gemäß der Norm DIN 61244-2 /DIN 16/ beschrieben wird. Zunächst werden, wie bei der im letzten Abschnitt beschriebenen thermischen Alterung, eine passende alterungssensitive Eigenschaft (z. B. Reißdehnung, engl. Elongation at Break EAB) und ein die Lebensdauer begrenzendes Akzeptanzkriterium (z. B. EAB bei 50% des Initialwerts) definiert. In Versuchen werden Proben des betroffenen Polymers dann Strahlung mit unterschiedlicher Dosisleistung $\dot{D}$ (Strahlendosis D pro Zeiteinheit) ausgesetzt. Dabei werden die Dosiswerte D bestimmt, bei denen das Akzeptanzkriterium und somit die Lebensdauer des Kabels erreicht wird. Diese Dosiswerte werden als Schädigungsdosis, engl. Dose Equivalent Damage (DED) bezeichnet. Empirisch wurde der folgende mathematische Zusammenhang zwischen der Schädigungsdosis DED und der Dosisleistung $\dot{D}$ beobachtet, das sogenannte Potenzgesetz:

$$DED = K \cdot \dot{D}^n. \quad (3.13)$$

Darin ist K eine Proportionalitätskonstante und n ist der sogenannte Dosisleistungseffektexponent, bei dem es sich ebenfalls um einen konstanten Parameter handelt. Der Dosisleistungseffektexponent n ist für das betrachtete Polymer entweder bereits aus einem Datenblatt bekannt, oder er muss noch anhand von Messungen bestimmt werden. Dazu ist die Gleichung (3.13) zu logarithmieren:

$$\lg(DED) = n \cdot \lg(\dot{D}) + \lg(K). \quad (3.14)$$

In diesem Zusammenhang, mit $\lg(\dot{D})$ als x -Wert und $\lg(DED)$ als y -Wert, stellt (3.14) eine Geradengleichung dar. Für verschiedene Dosisleistungen $\dot{D}$ ist die Schädigungsdosis DED , bei der das Akzeptanzkriterium erreicht wird, zu messen. Danach sind die Logarithmen der Schädigungsdosis $\lg(DED)$ über die Logarithmen der Dosisleistung $\lg(\dot{D})$ aufzutragen. Die Daten sind mit der Geradengleichung (3.14) zu fitten. Abb. 3.3 zeigt beispielhaft das entsprechende Ergebnis, die linearen Graphen für zwei verschiedene Kunststoffe. Der Dosisleistungseffektexponent n für den jeweiligen Kunststoff ist dann gemäß (3.14) durch die Steigung des zugehörigen linearen Graphen gegeben.

Denn nach Gleichung (3.14) in Verbindung mit Abb. 3.3 gilt für die Steigung der linearen Fitgraphen:

$$n = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (3.15)$$

Der Fehler des Dosisleistungseffektexponenten Δn ist dann identisch mit dem Fehler der Steigung des Fitgraphen. Es wird davon ausgegangen, dass die Umgebungsbedingungen beim Einsatz des Kabels unverändert bleiben. Somit kann die Dosisleistung am Einsatzort $\dot{D}_E$ als konstant betrachtet werden. Da die Dosisleistung die aufgenommene Dosis pro Zeiteinheit angibt, erhält man die die Schädigungsdosis DED folglich, indem man

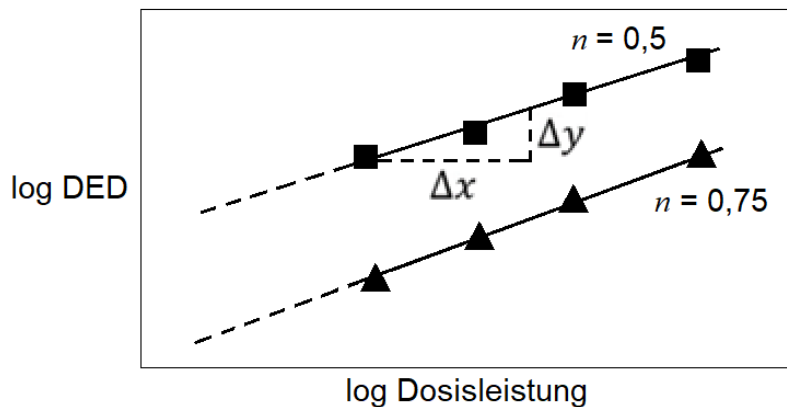


Abb. 3.3 Beispielhafte Darstellung der Geraden zweier, verschiedener Polymere zur Bestimmung deren Dosisleistungseffektexponenten $n = 0,5$ und $n = 0,75$. Abbildung auf Basis von Bild 2 aus /DIN 16/.

$\dot{D}_E$ mit der qualifizierten Lebensdauer t_E multipliziert: $DED = \dot{D}_E \cdot t_E$. Zusätzlich muss Gleichung (3.13) erfüllt sein, so dass man insgesamt den folgenden Ausdruck erhält:

$$DED = t_E \cdot \dot{D}_E = K \cdot \dot{D}_E^n. \quad (3.16)$$

Da die Konstante K in der Regel nicht bekannt ist, ist diese Gleichung noch nicht geeignet, um daraus die qualifizierte Lebensdauer t_E zu berechnen. Dazu wird noch eine Referenzmessung benötigt, die im Zuge eines sogenannten Qualifikationsprozesses (Index Q) ermittelt wurde. Die Dosisleistung während des Qualifikationsprozesses muss konstant sein. Sie werde mit $\dot{D}_Q$ bezeichnet und es wird bis zum Erreichen des Akzeptanzkriteriums bestrahlt.

Dann ist die während des Qualifikationsprozesses aufgenommene Dosis D_Q identisch mit der Schädigungsdosis DED , so dass Gleichung (3.13) erfüllt ist:

$$DED = D_Q = K \cdot \dot{D}_Q^n. \quad (3.17)$$

Dies lässt sich nach der Konstanten K umstellen:

$$K = \frac{D_Q}{\dot{D}_Q^n}. \quad (3.18)$$

In den Ausdruck (3.16) eingesetzt, erhält man damit:

$$t_E \cdot \dot{D}_E = \left(\frac{\dot{D}_E}{\dot{D}_Q} \right)^n \cdot D_Q. \quad (3.19)$$

Durch Umstellen folgt daraus die Formel zur Berechnung der qualifizierten Lebensdauer t_E :

$$t_E = \left(\frac{\dot{D}_E}{\dot{D}_Q} \right)^n \cdot \frac{D_Q}{\dot{D}_E} \quad (3.20)$$

Für die Dosisleistung $\dot{D}_Q$ und die Dosis D_Q aus dem Qualifikationsprozess sowie ihre Fehler $\Delta \dot{D}_Q$ und ΔD_Q können entsprechende Wertepaare aus der Messkurve zur Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n verwendet werden.

Für die Berechnung der qualifizierten Lebensdauer t_E sind noch entsprechende Sicherheitszuschläge zu definieren, die eine schlechte Datenlage bezüglich des verwendeten Polymers und eine durch Messungenauigkeiten bedingte Abweichung des berechneten Werts t_E von der tatsächlichen Lebensdauer abfangen. Messungen an einer großen Anzahl von Polymeren ergeben nach /IAE 12/, dass sich der Dosisleistungseffektexponent n in folgendem Wertebereich bewegt:

$$0 \leq n \leq 0,3. \quad (3.21)$$

Für die konservative Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n werden die folgenden Sicherheitszuschläge festgelegt:

- Der Dosisleistungseffektexponent n und sein Fehler Δn sind aus einem Datensatz mittels Fit wie in Abb. 3.3 unter Verwendung von Gleichung (3.14) zu bestimmen oder aus einem Datenblatt zu entnehmen, wobei für den Fehler Δn eine Einheit der letzten Nachkommastelle von n angesetzt wird, sollte Δn nicht explizit angegeben werden.
- Ist der Dosisleistungseffektexponent n nicht bekannt, dann ist der konservative Wert $n = 0,3$ ohne Fehler $\Delta n = 0$ zu verwenden.

Es ist ausdrücklich zu betonen, dass die im letzten Punkt beschriebene Vorgehensweise bei unzureichender Datenlage bezüglich des verwendeten Polymers nur für eine erste konservative Abschätzung der qualifizierten Lebensdauer t_E zu verwenden ist. Daher müssen in jedem Fall die Datenblattwerte von n und Δn oder die erforderlichen Fit-Daten zur Bestimmung von n und Δn für das betreffende Polymer beschafft werden und die Berechnung von t_E ist mit diesen exakten Werten zu wiederholen. Die qualifizierte Lebensdauer t_E ist mit der Formel (3.20) und ihr Fehler Δt_E ist mithilfe der Gaußschen Fehlerfortpflanzung aus den Parameterfehlern (Δn , ΔD_Q , $\Delta \dot{D}_Q$ und $\Delta \dot{D}_E$) zu berechnen. Um zu verhindern, dass die Lebensdauer aufgrund der Parameterfehler zu optimistisch eingeschätzt wird, wird ein in der Praxis aufgrund von Erfahrungswerten verbreiteter Sicherheitsabschlag von 20 % angesetzt. Dabei wird für die Lebensdauer nicht die berechnete qualifizierte Lebensdauer t_E verwendet, sondern die tatsächlich nutzbare Lebensdauer t_N , die nach den folgenden Kriterien aus t_E und Δt_E bestimmt wird:

- $t_E - \Delta t_E > 75$ Jahre: nutzbare Lebensdauer $t_N = 80$ % von 75 Jahre = 60 Jahre
- $t_E - \Delta t_E \leq 75$ Jahre: nutzbare Lebensdauer $t_N = 80$ % von $t_E - \Delta t_E$

Das bedeutet, dass die nutzbare Lebensdauer t_N niemals die vorgegebene Obergrenze von 60 Jahren überschreitet. Zudem ist zu beachten, dass das hier vorgestellte Rechenmodell nicht uneingeschränkt anwendbar ist. Die Fälle, in denen das Modell gemäß GRS-Expertise nicht angewendet werden kann, werden nachstehend aufgelistet:

- Wenn sich die Daten zur Bestimmung von n und des Fehlers Δn nicht durch die Geradengleichung (3.14) fitten lassen, dann ist das ein Hinweis darauf, dass das Modell aufgrund komplexer Alterungsmechanismen nicht anwendbar ist.

- In den betrachteten Polymeren sollten keine miteinander konkurrierenden Alterungseffekte auftreten. Bei thermischen Phasenübergängen im Material können sich Änderungen im Alterungsverhalten ergeben. Diese werden durch das Modell nicht vorhergesagt.
- Bei künstlich beschleunigter Alterung, wie sie im Rahmen von Qualifizierungsprojekten durchgeführt wird, können bei zu hoch gewählter Dosisleistung $\dot{D}_Q$ strahlenbedingte Reaktionen schneller ablaufen als Luftsauerstoff in die Werkstoffe eindiffundiert. Dadurch kann es zu einer Nachalterung nach Beendigung des Qualifikationsprozesses infolge noch andauernder Oxidationsprozesse kommen. Somit ergeben die Testergebnisse im Rahmen künstlich beschleunigter Alterung ein zu optimistisches Bild des Alterungszustands. Um dies zu verhindern, wird in der Norm DIN IEC/TS 61244-1 beschrieben, nach welchen Kriterien die Dosisleistung $\dot{D}_Q$ zu wählen ist.

Vor allem die ersten beiden Punkte führen zu einem Knick in der Geraden, die zur Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n verwendet wird, da sie bei einer spezifischen Dosisleistung zu einer Änderung des Dosisleistungseffektexponenten n und somit nach (3.14) auch zu einer Änderung der Steigung in der Geraden führen. Somit liefert auch der Plot der Geraden zur Bestimmung von n einen Hinweis darauf, ob das Rechenmodell anwendbar ist oder nicht.

3.3 Kombinierte thermische und radiologische Alterung nach dem Superpositionsverfahren

In diesem Abschnitt wird das Rechenmodell für die kombinierte thermische und radiologische Alterung von Polymeren behandelt, wie es gemäß der Norm DIN 61244-2 /DIN 16/ beschrieben wird. Es wird als Superpositionsverfahren bezeichnet. Bei sehr niedrigen Dosisleistungen $\dot{D} \rightarrow 0$ hat die Strahlung keinen wirklichen Alterungseffekt auf das Material und die Lebensdauer, für die wir an dieser Stelle das Symbol t_m verwenden, kann hinsichtlich der Strahlung als konstant angenommen werden. Aber es ist zu beachten, dass t_m immer noch temperaturabhängig ist. Die Dosisleistung $\dot{D}$ wird als konstant angenommen. Da sie die aufgenommene Dosis D pro Zeiteinheit angibt, erhält man die Schädigungsdosis DED , indem man die Dosisleistung $\dot{D}$ mit der Lebensdauer t_m multipliziert:

$$DED = t_m \cdot \dot{D} \quad \text{für} \quad \dot{D} \rightarrow 0 \quad (3.22)$$

Da t_m bezüglich Strahlung konstant ist, bedeutet das, dass DED bei niedrigen Dosisleistungen $\dot{D} \rightarrow 0$ linear mit $\dot{D}$ ansteigt. Bei hohen Dosisleistungen ist dies nicht der Fall, da dann das Potenzgesetz erfüllt sein muss:

$$DED = K \cdot \dot{D}^n \quad \text{für} \quad \dot{D} \gg 1 \quad (3.23)$$

Die Gleichungen (3.22) und (3.23) müssen kombiniert werden, um eine Gleichung für DED zu erhalten, die für alle möglichen Dosisleistungen $\dot{D}$ gültig ist. Dabei wird folgende Annahme getroffen:

$$DED = \frac{t_m \cdot \dot{D}}{\alpha(T, \dot{D})} \quad \text{für alle} \quad \dot{D} \quad (3.24)$$

Darin ist $\alpha(T, \dot{D})$ der sogenannte Verschiebungsfaktor, der semiempirisch wie folgt bestimmt wurde:

$$\alpha(T, \dot{D}) = e^{-\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \cdot \left(1 + k \cdot e^{x \cdot \frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \cdot \dot{D}^x \right) \quad (3.25)$$

Der Grund für diese Benennung wird weiter unten im nächsten Teilabschnitt 3.3.1 erläutert. t_m ist in (3.24) eine Konstante, in (3.25) ist T_{ref} eine Referenztemperatur und k und x sind zwei zusätzliche Parameter. Es wird eine konstante Dosisleistung $\dot{D}$ betrachtet. Dann ergibt sich die Schädigungsdosis DED durch Multiplikation der Dosisleistung $\dot{D}$ mit der Lebensdauer, für die an dieser Stelle das Symbol t_L verwendet wird:

$$DED = \dot{D} \cdot t_L. \quad (3.26)$$

Dieser Ausdruck ist mit (3.24) gleichzusetzen:

$$\dot{D} \cdot t_L = \frac{t_m \cdot \dot{D}}{\alpha(T, \dot{D})}. \quad (3.27)$$

Das kann wiederum umgestellt werden, um einen Ausdruck für die Zeitkonstante t_m zu erhalten:

$$t_m = \alpha(T, \dot{D}) \cdot t_L. \quad (3.28)$$

Unter Einsatzbedingungen (Index E) ist t_L gegeben durch t_E und unter Qualifizierungsbedingungen (Index Q) ist t_L gegeben durch t_Q . Da t_m eine Konstante ist, erhält man:

$$t_m = \alpha(T_E, \dot{D}_E) \cdot t_E = \alpha(T_Q, \dot{D}_Q) \cdot t_Q. \quad (3.29)$$

Mit der letzten Gleichung kann die qualifizierte Lebensdauer unter Einsatzbedingungen t_E anhand der Daten aus dem Qualifikationsprozess und den Umgebungsbedingungen berechnet werden:

$$t_E = \frac{\alpha(T_Q, \dot{D}_Q)}{\alpha(T_E, \dot{D}_E)} \cdot t_Q \quad (3.30)$$

Im Folgenden wird gezeigt, dass diese Berechnungsformel für die rein thermische Alterung in das Arrhenius-Modell und für die rein radiologische Alterung in das Potenzgesetz übergeht. Ohne Dosisleistung ($\dot{D} = 0$) folgt aus der Formel (3.25) für den Verschiebungsfaktor:

$$\alpha(T, 0) = e^{-\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)}. \quad (3.31)$$

Dies ist in die Formel (3.30) zur Berechnung der qualifizierten Lebensdauer t_E einzusetzen:

$$t_E = \frac{\alpha(T_Q, 0)}{\alpha(T_E, 0)} \cdot t_Q = e^{\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_Q} \right)} \cdot t_Q. \quad (3.32)$$

Identifiziert man t_Q als den Zeitwert t_I und T_Q als den Temperaturwert T_I des Temperaturindex (t_I, T_I) , dann entspricht (3.32) der Berechnung (3.7) der qualifizierten Lebensdauer t_E nach dem Arrhenius-Modell der rein thermischen Alterung. Bei konstanter Temperatur ($T_E = T_Q = T_{ref}$) folgt aus der Formel (3.25) für den Verschiebungsfaktor:

$$\alpha(T_{ref}, \dot{D}) = 1 + k \cdot \dot{D}^x. \quad (3.33)$$

Bei hoher Strahlungsleistung ($\dot{D} \gg 1$) lässt sich dies weiter vereinfachen:

$$\alpha(T_{ref}, \dot{D}) = k \cdot \dot{D}^x. \quad (3.34)$$

Dies ist in die Formel (3.30) zur Berechnung der qualifizierten Lebensdauer t_E einzusetzen:

$$t_E = \frac{\alpha(T_{ref}, \dot{D}_Q)}{\alpha(T_{ref}, \dot{D}_E)} \cdot t_Q = \left(\frac{\dot{D}_Q}{\dot{D}_E} \right)^x \cdot t_Q. \quad (3.35)$$

Die Dosisleistung während des Qualifikationsprozesses $\dot{D}_Q$ wird als konstant betrachtet und ergibt sich daher aus der während des Qualifikationsprozesses aufgenommenen Dosis D_Q pro vergangener Zeit t_Q . Daraus folgt für t_Q :

$$t_Q = \frac{D_Q}{\dot{D}_Q}. \quad (3.36)$$

Dies ist in (3.35) einzusetzen:

$$t_E = \left(\frac{\dot{D}_Q}{\dot{D}_E} \right)^{x-1} \cdot \frac{D_Q}{\dot{D}_E}. \quad (3.37)$$

Setzt man schließlich über $x := 1 - n$ den Parameter x mit dem Dosisleistungseffektexponenten n in Verbindung, so erhält man aus (3.37) die Berechnungsformel für die qualifizierte Lebensdauer t_E nach dem Potenzgesetz der rein radiologischen Alterung:

$$t_E = \left(\frac{\dot{D}_E}{\dot{D}_Q} \right)^n \cdot \frac{D_Q}{\dot{D}_E}. \quad (3.38)$$

Die qualifizierte Lebensdauer t_E ist für die kombinierte thermische und radiologische Alterung mit der Formel (3.30) und ihr Fehler Δt_E ist mithilfe der Gaußschen Fehlerfortpflanzung aus den Parameterfehlern ($\Delta T_{ref}, \Delta E_a, \Delta k, \Delta x, \Delta t_Q, \Delta T_Q, \Delta T_E, \Delta \dot{D}_Q$ und $\Delta \dot{D}_E$) zu berechnen. Um zu verhindern, dass die Lebensdauer aufgrund der Parameterfehler zu optimistisch eingeschätzt wird, wird ein in der Praxis aufgrund von Erfahrungswerten verbreiteter Sicherheitsabschlag von 20 % angesetzt. Dabei wird für die Lebensdauer nicht die berechnete qualifizierte Lebensdauer t_E verwendet, sondern die tatsächlich nutzbare Lebensdauer t_N , die nach den folgenden Kriterien aus t_E und Δt_E bestimmt wird:

- $t_E - \Delta t_E > 75$ Jahre: nutzbare Lebensdauer $t_N = 80$ % von 75 Jahre = 60 Jahre
- $t_E - \Delta t_E \leq 75$ Jahre: nutzbare Lebensdauer $t_N = 80$ % von $t_E - \Delta t_E$

Das bedeutet, dass die nutzbare Lebensdauer t_N niemals die vorgegebene Obergrenze von 60 Jahren überschreitet. Um die Parameter E_a , k und x des Verschiebungsfaktors $\alpha(T, \dot{D})$ zu ermitteln, der zur Berechnung der Lebensdauer t_E erforderlich ist, gibt es zwei Möglichkeiten. Diese heißen Superposition I- und Superposition II-Verfahren. Das Superposition I-Verfahren verwendet zeitabhängige Messdaten zur Bestimmung der unbekannten Parameter.

Dagegen nutzt das Superposition II-Verfahren die gemessenen DED -Werte, die von der Dosisleistung $\dot{D}$ abhängen, zur Bestimmung der unbekannten Parameter. Sollte eine der beiden Methoden auf die erfassten Messdaten nicht anwendbar sein, kann evtl. trotzdem die andere Methode verwendet werden. Im folgenden Unterabschnitt wird zuerst die Vorgehensweise beim Superposition I-Verfahren beschrieben.

3.3.1 Superposition I-Verfahren

Die alterungssensitive physikalische Größe, die die Lebensdauer begrenzt, werde mit dem Buchstaben G bezeichnet. Sie wird über die Zeit t gemessen. G_C soll der Wert von G sein, wenn das Akzeptanzkriterium erreicht ist. Aufgrund von Gleichung (3.29) und da das Akzeptanzkriterium für den Qualifikationsprozess (Index Q) und die Einsatzbedingungen (Index E) gleich sein muss, gilt die folgende Gleichung:

$$G_C = G(\alpha(T_E, \dot{D}_E) \cdot t_E) = G(\alpha(T_Q, \dot{D}_Q) \cdot t_Q). \quad (3.39)$$

Dann erhält man $\alpha(T_E, \dot{D}_E) \cdot t_E = \alpha(T_Q, \dot{D}_Q) \cdot t_Q$, was direkt zur gesuchten Gleichung (3.29) führt. Das bedeutet G muss eine Funktion des Produkts $\alpha(T, \dot{D}) \cdot t$ sein:

$$G(t) = G(\alpha(T, \dot{D}) \cdot t). \quad (3.40)$$

In der Regel werden die Daten für $G(t)$ doppelt logarithmisch dargestellt. Es ist:

$$\lg G(t) = \lg G(\alpha(T, \dot{D}) \cdot t) = \lg G(10^{\lg(\alpha(T, \dot{D}) \cdot t)}) = \lg G(10^{\lg t + \lg(\alpha(T, \dot{D}))}). \quad (3.41)$$

Das bedeutet, wenn man in einer doppelt logarithmischen Darstellung $\lg G$ über $\lg t$ aufträgt, dann werden die Graphen je nach Temperatur T und Dosisleistung $\dot{D}$ um den Wert $\lg(\alpha(T, \dot{D}))$ verschoben. Aus diesem Grund wird $\alpha(T, \dot{D})$ als Verschiebungsfaktor bezeichnet. Bei der Referenztemperatur T_{ref} und ohne Strahlung ($\dot{D} = 0$) gilt nach (3.25)

$\alpha(T_{ref}, 0) = 1$ und somit $\lg(\alpha(T_{ref}, 0)) = \lg(1) = 0$. Dass bedeutet, dass der Graph bei der Referenztemperatur und ohne Strahlung keine Verschiebung aufweist und dass alle übrigen Graphen um $\lg(\alpha(T, \dot{D}))$ gegenüber diesem verschoben sind. Abb. 3.4 zeigt beispielhaft die Verschiebung der Graphen. Üblicherweise wird die niedrigste Temperatur als Referenztemperatur T_{ref} definiert. Dann können die Verschiebungen $\lg(\alpha(T, \dot{D}))$ über die Fits der $\lg G$ - $\lg t$ -Datensätze bestimmt werden, vorausgesetzt dass die Funktion $G(t)$ bekannt ist und daher zum Fit der Messdaten verwendet werden kann.

Dies kann nun dazu genutzt werden, um die Aktivierungsenergie E_a und ihren Fehler ΔE_a zu bestimmen. Dazu wird eine Reihe von Messungen durchgeführt, bei denen G über der Zeit t in doppelt logarithmischer Weise ($\lg G$ über $\lg t$) für mindestens drei verschiedene Temperaturen T und ohne Strahlung ($\dot{D} = 0$) aufgetragen wird.

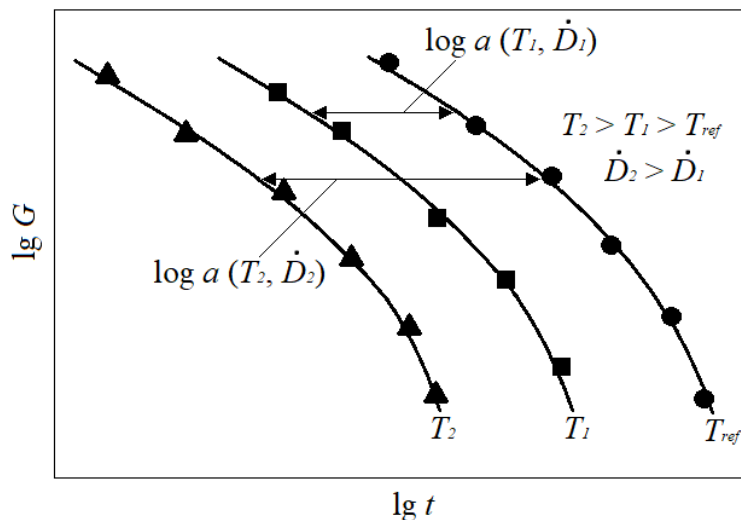


Abb. 3.4 Beispielhafte Darstellung der Verschiebung der Funktionsgraphen $\lg(G(\lg t))$ um die von der Temperatur T und der Dosisleistung $\dot{D}$ abhängigen Werte $\lg(\alpha(T, \dot{D}))$.

In der Regel wird die niedrigste Temperatur als Referenztemperatur T_{ref} gewählt. Abbildung auf Basis von Bild 4 aus /DIN 16/.

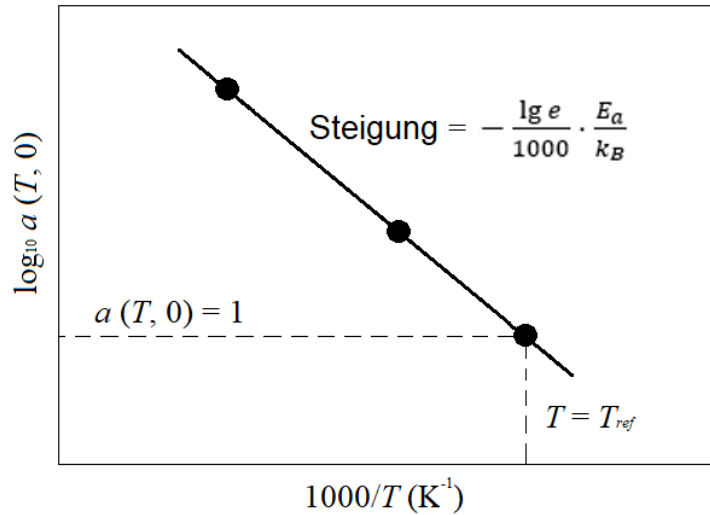


Abb. 3.5 Fit zur Bestimmung der Aktivierungsenergie E_a und ihres Fehlers ΔE_a

Hier unter Verwendung der Verschiebungen $\lg(\alpha(T, 0))$ bei nicht vorhandener Strahlung ($\dot{D} = 0$). Abbildung auf Basis von Bild 6 aus /DIN 16/

Bei einem der Temperaturwerte muss es sich um die Referenztemperatur T_{ref} handeln. Die Verschiebungen $\lg(\alpha(T, 0))$ werden durch Fits bestimmt und im nächsten Schritt über den reziproken Temperaturwerten $1000/T$ mit der Temperatur T in Kelvin K aufgetragen, was in Abb. 3.5 beispielhaft dargestellt ist. Der so erhaltene Datensatz muss der folgenden Gleichung genügen, die aus (3.31) folgt:

$$\lg(\alpha(T, 0)) = -\frac{\lg e}{1000} \cdot \frac{E_a}{k_B} \cdot \frac{1000}{T} + \lg e \cdot \frac{E_a}{k_B \cdot T_{ref}}. \quad (3.42)$$

Mit $\lg(\alpha(T, 0))$ als y -Wert und $1000/T$ als x -Wert beschreibt (3.42) eine Geradengleichung mit negativer Steigung m , wobei gilt:

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = -\frac{\lg e}{1000} \cdot \frac{E_a}{k_B}. \quad (3.43)$$

Fittet man also, wie in Abb. 3.5 gezeigt, den Datensatz mit Gleichung (3.42), dann können daraus die Steigung m und ihr Fehler Δm ermittelt werden. Die Aktivierungsenergie E_a ist dann mit (3.43) zu berechnen und ihr Fehler ΔE_a ergibt sich aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung. Wenn die Daten nicht richtig gefittet werden können, dann ist das ein Hinweis darauf, dass das Superposition I-Verfahren nicht anwendbar ist. Schließlich sind noch die Parameter k und x , sowie ihre Fehler Δk und Δx , zu bestimmen.

Dazu wird eine Reihe von Messungen durchgeführt, bei denen G über der Zeit t doppelt logarithmisch für verschiedene Temperaturen T und verschiedenen Dosisleistungen $\dot{D}$ aufgetragen wird. Bei einem der Temperaturwerte, muss es sich um die Referenztemperatur T_{ref} handeln. Die Verschiebungen $\lg(\alpha(T, \dot{D}))$ der einzelnen Graphen werden durch Fits ermittelt und anschließend in einem weiteren Schritt für alle Temperaturen T jeweils über den Logarithmus der Dosisleistung $\lg \dot{D}$ aufgetragen. Dies wird in Abb. 3.6 beispielhaft dargestellt. Gleichung (3.25) kann dann genutzt werden, um die so erzeugten Datensätze, wie in Abb. 3.6 gezeigt, zu fitten, wobei die Parameter k und x als Fitparameter eingehen. Auf diese Weise können k und x , sowie ihre Fehler Δk und Δx bestimmt werden. Damit sind alle erforderlichen Parameter T_{ref} , E_a , k und x ermittelt worden und können in Gleichung (3.30) eingesetzt werden, um die qualifizierte Lebensdauer t_E zu berechnen.

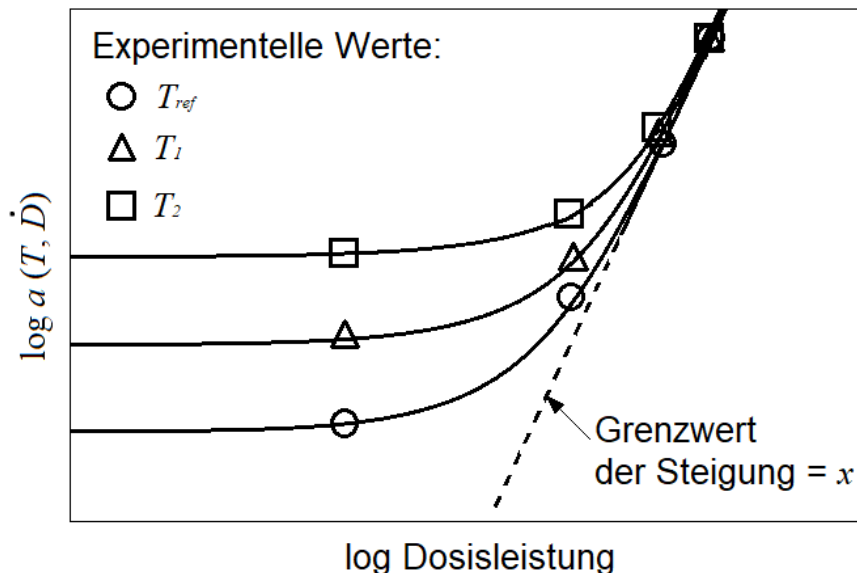


Abb. 3.6 Fit der Verschiebungen $\lg(\alpha(T, \dot{D}))$ zur Bestimmung der Parameter k und x sowie ihrer Fehler Δk und Δx

Abbildung auf Basis von Bild 8 aus /DIN 16/

3.3.2 Superposition II-Verfahren

Es wird ein weiterer Verschiebungsfaktor $\alpha'(T)$ definiert, der nur von der Temperatur T abhängt und der durch den temperaturabhängigen Anteil von $\alpha(T, \dot{D})$ gegeben ist:

$$\alpha'(T) := e^{-\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)}. \quad (3.44)$$

Somit kann der ursprüngliche Verschiebungsfaktor $\alpha(T, \dot{D})$ mithilfe von Gleichung (3.25) als eine Funktion von $\alpha'(T)$ geschrieben werden:

$$\alpha(T, \dot{D}) = \alpha'(T) \cdot \left(1 + k \cdot \left(\frac{\dot{D}}{\alpha'(T)} \right)^x \right). \quad (3.45)$$

Dies ist in Gleichung (3.24) einzusetzen:

$$DED = \frac{t_m \cdot \frac{\dot{D}}{\alpha'(T)}}{1 + k \cdot \left(\frac{\dot{D}}{\alpha'(T)} \right)^x}. \quad (3.46)$$

Im Folgenden werden nicht zeitabhängige, sondern DED -Daten gefittet, um die unbekannten Modellparameter zu bestimmen. In der Regel werden die DED -Daten doppelt logarithmisch dargestellt, indem die logarithmierten Werte $\lg DED$ über den Logarithmus der Dosisleistung $\lg \dot{D}$ aufgetragen werden. Um dies mathematisch beschreiben zu können, ist Gleichung (3.46) entsprechend umzuformen:

$$\lg DED = \lg \left(\frac{t_m \cdot \frac{\dot{D}}{\alpha'(T)}}{1 + k \cdot \left(\frac{\dot{D}}{\alpha'(T)} \right)^x} \right) = \lg \left(t_m \cdot \frac{\dot{D}}{\alpha'(T)} \right) - \lg \left(1 + k \cdot \left(\frac{\dot{D}}{\alpha'(T)} \right)^x \right). \quad (3.47)$$

$$\Rightarrow \lg DED = \lg t_m + \lg \dot{D} - \lg(\alpha'(T)) - \lg \left(1 + k \cdot \left(10^{\lg \dot{D} - \lg(\alpha'(T))} \right)^x \right). \quad (3.48)$$

Der letzte Ausdruck verdeutlicht, dass in einem doppelt logarithmischen Plot von $\lg DED$ über $\lg \dot{D}$ die Graphen je nach Temperatur T um $\lg(\alpha'(T))$ verschoben werden. Aus diesem Grund wird $\alpha'(T)$ ebenfalls als Verschiebungsfaktor bezeichnet. Bei der Referenztemperatur T_{ref} gilt nach (3.44) $\alpha'(T_{ref}) = 1$ und somit $\lg(\alpha'(T_{ref})) = \lg(1) = 0$. Dass bedeutet, dass der Graph bei der Referenztemperatur keine Verschiebung aufweist und dass alle übrigen Graphen um $\lg(\alpha'(T))$ gegenüber diesem verschoben sind. Abb. 3.7 zeigt beispielhaft die Verschiebung der Graphen. Normalerweise wird die niedrigste Temperatur als Referenztemperatur T_{ref} definiert. Dann können die Verschiebungen $\lg(\alpha'(T))$ über die Fits der $\lg DED$ - $\lg \dot{D}$ -Datensätze mit der Funktion (3.48) ermittelt werden. Dieser Umstand kann nun dazu genutzt werden, um die Aktivierungsenergie E_a und ihren Fehler ΔE_a zu bestimmen.

Dazu wird eine Reihe von Messungen durchgeführt, bei denen die DED -Werte über die Dosisleistung $\dot{D}$ in doppelt logarithmischer Weise ($\lg DED$ über $\lg \dot{D}$) für mindestens drei verschiedene Temperaturen T aufgetragen werden. Bei einem der Temperaturwerte, muss es sich um die Referenztemperatur T_{ref} handeln. Die Verschiebungen $\lg(\alpha'(T))$ werden durch Fits mit der Funktion (3.48) bestimmt und im nächsten Schritt über den reziproken Temperaturwerten $1000/T$ mit der Temperatur T in Kelvin K, analog zu Abb. 3.5 aus dem Superposition I-Verfahren, aufgetragen. Der so erhaltene Datensatz muss der folgenden Gleichung genügen, die aus (3.44) folgt:

$$\lg(\alpha'(T)) = -\frac{\lg e}{1000} \cdot \frac{E_a}{k_B} \cdot \frac{1000}{T} + \lg e \cdot \frac{E_a}{k_B \cdot T_{ref}}. \quad (3.49)$$

Mit $\lg(\alpha'(T))$ als y -Wert und $1000/T$ als x -Wert beschreibt (3.49) eine Geradengleichung mit negativer Steigung m , wobei gilt:

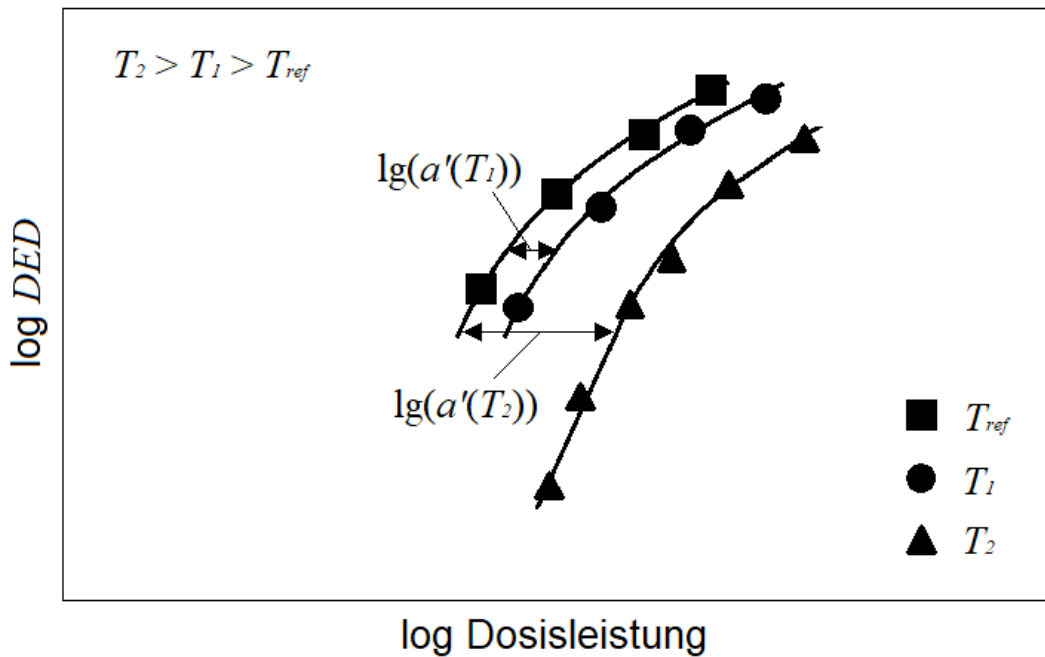


Abb. 3.7 Beispielhafte Darstellung der Verschiebung der Funktionsgraphen $\lg DED$ um die von der Temperatur T abhängigen Werte $\lg(\alpha'(T))$.

In der Regel wird die niedrigste Temperatur als Referenztemperatur T_{ref} gewählt. Abbildung auf Basis von Bild 10 aus /DIN 16/

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = -\frac{\lg e}{1000} \cdot \frac{E_a}{k_B}. \quad (3.50)$$

Fittet man also den Datensatz mit Gleichung (3.49), dann können daraus die Steigung m und ihr Fehler Δm ermittelt werden. Die Aktivierungsenergie E_a ist dann mit (3.50) zu berechnen und ihr Fehler ΔE_a ergibt sich aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung. Wenn die Daten nicht richtig gefittet werden können, dann ist das ein Hinweis darauf, dass das Superposition II-Verfahren nicht anwendbar ist. Schließlich sind noch die Parameter k und x , sowie ihre Fehler Δk und Δx , zu bestimmen. Die ermittelten Verschiebungen $\lg(\alpha'(T))$ werden aus denjenigen Datensätzen entfernt, deren Temperatur T von der Referenztemperatur T_{ref} abweicht. Dadurch werden diese Datensätze in Datensätze mit der Temperatur T_{ref} umgewandelt und können mit dem Originaldatensatz von T_{ref} kombiniert werden. Das bedeutet, dass man nun einen deutlich umfangreicheren Datensatz für T_{ref} erhält, mit dem die Parameter k und x sehr genau bestimmt werden können.

Dies wird in Abb. 3.8 beispielhaft dargestellt. Die Parameter t_m , k und x werden ermittelt, indem der Datensatz mit Gleichung (3.48) gefittet wird, wobei die Verschiebung $\lg(\alpha'(T))$ auf null gesetzt wird.

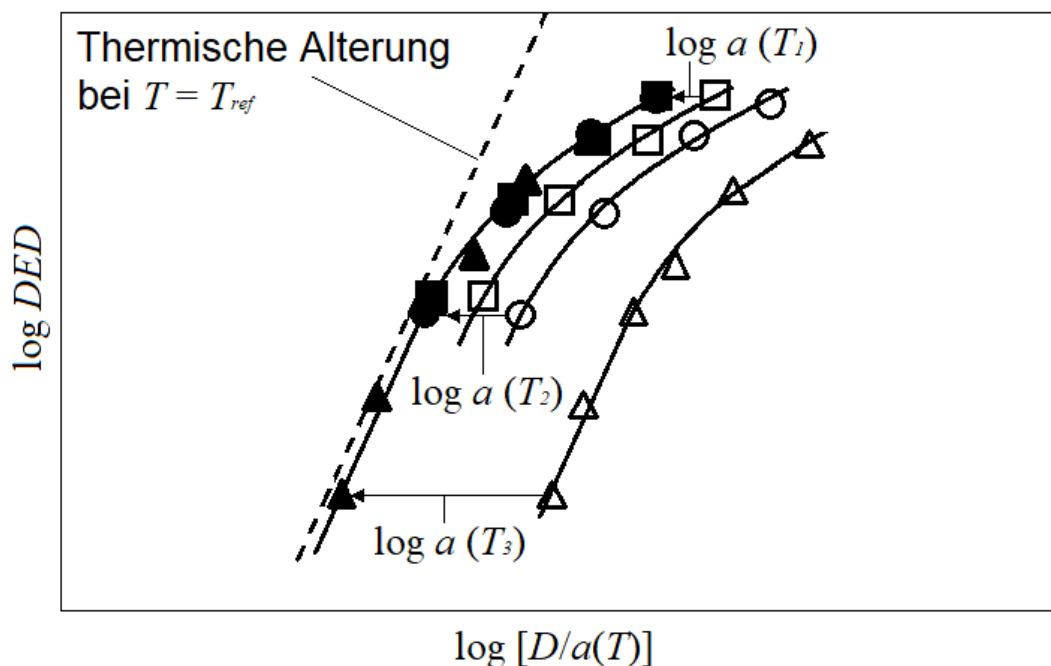


Abb. 3.8 Beispielhafte Darstellung der Überlagerung / Superposition der **DED**-Daten zu einem einheitlichen Datensatz bei der Referenztemperatur T_{ref}

Hier werden die Verschiebungen $\lg(\alpha'(T))$ entfernt. Abbildung auf Basis von Bild 11 aus /DIN 16/.

Zwar wird der Parameter t_m nicht zur Berechnung der Lebensdauer benötigt, er ist jedoch für die erfolgreiche Durchführung des Fits erforderlich. Die Parameterfehler Δk und Δx werden ebenfalls durch den Fit bestimmt. Damit sind alle erforderlichen Parameter T_{ref} , E_a , k und x ermittelt worden und können in Gleichung (3.30) eingesetzt werden, um die qualifizierte Lebensdauer t_E zu berechnen.

3.3.3 Grenzen der Anwendbarkeit der beiden Rechenverfahren

Wenn die Daten zur Bestimmung der Aktivierungsenergie E_a und ihres Fehlers ΔE_a nicht durch die linearen Gleichungen (3.42) bzw. (3.49) gefittet werden können, ist dies ein Hinweis darauf, dass die Modelle aufgrund komplexer Alterungsmechanismen nicht anwendbar sind. Die Modelle sind nur anwendbar, wenn bei der Referenztemperatur die gleiche alterungsbestimmende Reaktion vorliegt wie bei der Betriebstemperatur. Es dürfen keine konkurrierenden Alterungsmechanismen (siehe Kapitel 6.3) auftreten.

Die Modelle dürfen nicht bei Phasenübergängen angewendet werden, wie sie z. B. in teilkristallinen Materialien wie VPE vorkommen (z. B. Berücksichtigung des Schmelzpunkts). Bei künstlich beschleunigter Alterung, wie sie im Rahmen von Qualifizierungsprojekten durchgeführt wird, können bei zu hoch gewählter Dosisleistung $\dot{D}_Q$ strahlenbedingte Reaktionen schneller ablaufen als Luftsauerstoff in die Werkstoffe eindiffundiert. Dadurch kann es zu einer Nachalterung nach Beendigung des Qualifikationsprozesses /IAE 12, IEE 03, IEE 23/ infolge noch andauernder Oxidationsprozesse kommen.

Somit ergeben die Testergebnisse im Rahmen künstlich beschleunigter Alterung ein zu optimistisches Bild des Alterungszustands. Um dies zu verhindern, wird in der Norm DIN IEC/TS 61244-1 beschrieben, nach welchen Kriterien die Dosisleistung $\dot{D}_Q$ zu wählen ist. /DIN 16/

4 Umsetzung der Rechenmodelle in Mathematica

Die Funktionsweise der von der GRS entwickelten Mathematica-Notebooks, welche die in Kapitel 3 beschriebenen Rechenmodelle realisieren, wird in den folgenden Abschnitten beschrieben. Anhand der Abb. 4.1, 4.6, 4.10 und 4.16 wird der strukturelle Aufbau jedes Notebooks schematisch dargestellt. Zu erkennen ist, dass die ersten beiden Blöcke in jedem Notebook die Anleitung für den Anwender und die Definition innerhalb des Notebooks verwendeter Funktionen enthalten. Daten werden aus Excel-Dateien über die *Import*-Funktion von Mathematica eingelesen.

4.1 Umsetzung des Arrhenius-Modells für thermische Alterung

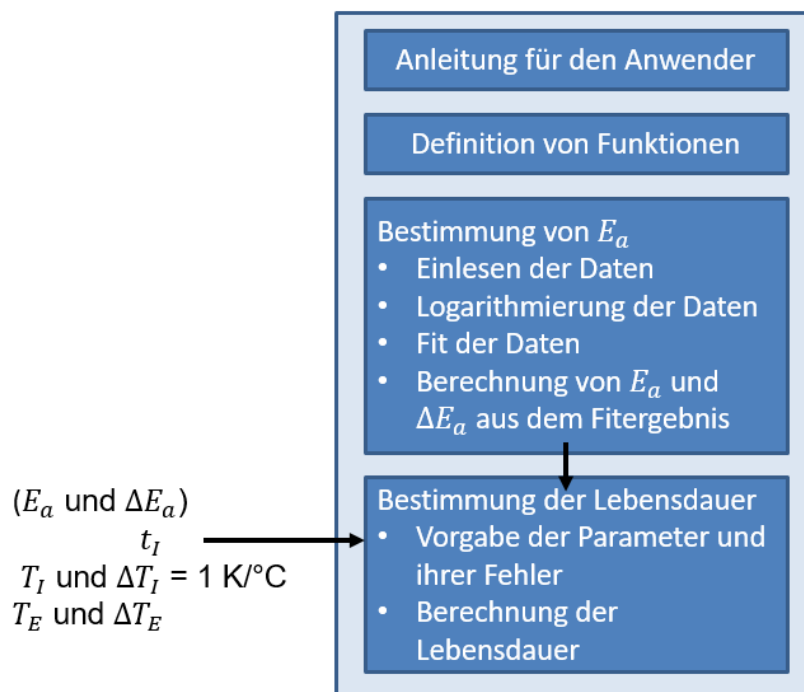


Abb. 4.1 Struktureller Aufbau des Mathematica-Notebooks zur Berechnung der Lebensdauer von Kabeln

Hier unter thermischer Alterung nach dem Arrhenius-Modell

Die obige Abbildung zeigt, wie das Mathematica-Notebook zur Berechnung der Lebensdauer von Kabeln unter thermischer Alterung, beschrieben durch das Arrhenius-Modell, strukturell aufgebaut ist. Es setzt die Berechnung der Lebensdauer, wie sie in Kapitel 3.1 beschrieben wird um.

Unterhalb der für jedes der vier Notebooks üblichen Blöcke, welche die Anleitung für den Anwender und die Definition der innerhalb des Notebooks verwendeten Funktionen enthalten, befindet sich der Block zur Bestimmung der Aktivierungsenergie E_a und ihres Fehlers ΔE_a . Dieser Block ist optional und muss nur ausgeführt werden, wenn E_a und ΔE_a für das vorliegende Polymer, aus dem die Kabelisolierung besteht, nicht bereits über ein Datenblatt gegeben sind und beide Werte erst über den Fit eines Datensatzes in Form einer Arrhenius-Geraden ermittelt werden müssen. Zum Einlesen der betreffenden Daten, muss der Variablen "dateiname" der Name der Datei in Form einer Zeichenkette (String) übergeben werden (inklusive Dateiendung), welche die Daten zur Bestimmung der Aktivierungsenergie enthält. Dabei handelt es sich um eine Excel-Datei mit der Dateiendung ".xlsx". In der Datei befindet sich eine Tabelle mit zwei Spalten. Die erste Spalte gibt die Prüftemperatur in Kelvin K (T_E) an und die zweite Spalte die Prüfdauer bis zum Erreichen des Akzeptanzkriteriums in Stunden h (t_E). Es werden mindestens drei Wertepaare benötigt. Alle Zahlenwerte sind ganzzahlig und ohne Fehler in der Tabelle zu hinterlegen. Die erste Zeile der Tabelle dient ausschließlich zur Beschriftung der Spalten.

	A	B
1	Prüftemperatur in Kelvin [K]	Prüfdauer in [h]
2	303	146129000
3	313	21856300
4	323	3612820
5	333	568070
6	345	98716
7	355	22027

Abb. 4.2 Beispiel-Datensatz zur Bestimmung der Aktivierungsenergie für ein generisches Polymer aus einer Excel-Datei.

Abb. 4.2 zeigt beispielhaft den Datensatz zur Bestimmung der Aktivierungsenergie für ein generisches Polymer. Die eingelesenen Daten werden anschließend in den Datensatz einer Arrhenius-Geraden umgerechnet mit $1000/T_E$ als x -Wert und $\ln(t_E)$ als y -Wert und dann mit einer Geradengleichung $y = a_0 \cdot x + a_1$ gefittet. Darin sind a_0 und a_1 die zu bestimmenden Fitparameter, wobei a_0 die Steigung und a_1 den y -AchsenAbschnitt der Arrhenius-Geraden angeben. Abb. 4.3 zeigt den Fit der Arrhenius-Geraden für das generische Polymer. Der minimale x -Wert "xmin" und der maximale x -Wert "xmax", sowie der minimale y -Wert "ymin" und der maximale y -Wert "ymax", welche den Plotbereich eingrenzen, sind für den Fit des Arrhenius-Diagramms festzulegen.

Dabei kann man sich an dem Datensatz, der für den Fit verwendet wird, orientieren. Lassen sich die Daten nicht durch eine Gerade fitten, dann ist das Rechenmodell nicht anwendbar.

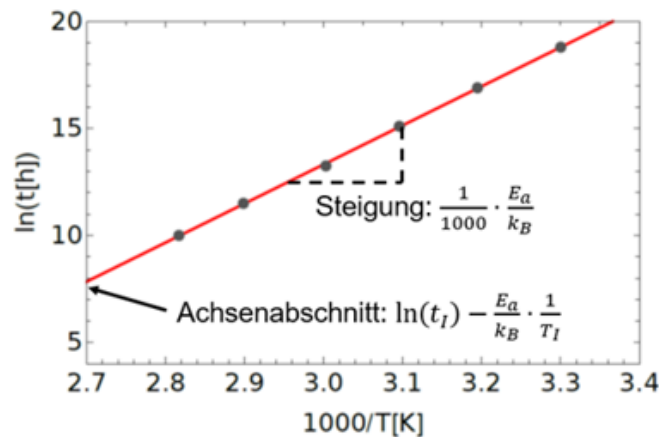


Abb. 4.3 Beispiel für den Fit der Arrhenius-Geraden für ein generisches Polymer.

Da der Fitparameter a_0 die Steigung der Arrhenius-Geraden repräsentiert, ist er mit m aus (3.10) gleichzusetzen. Mit (3.10) kann dann die Aktivierungsenergie E_a berechnet werden. Ihr Fehler ΔE_a ergibt sich über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung aus Gleichung (3.11) durch den ebenfalls beim Fit bestimmten Parameterfehler $\Delta a_0 = \Delta m$. Für das generische Polymer erhält man die folgenden Werte:

$$a_0 = 18,253 \pm 0,166 \quad \text{und daraus} \quad E_a = (1,573 \pm 0,014)eV.$$

Der Block zur Bestimmung der Lebensdauer in Jahren (siehe Abb. 4.1) ist immer auszuführen. Dabei werden zunächst die Parameter festgelegt, die in die Formel (3.7) zur Berechnung der qualifizierten Lebensdauer t_E des Kabels eingesetzt werden müssen. Die Parameter lauten wie folgt:

- Aktivierungsenergie in eV: E_a
- Zeitwert aus dem Temperaturindex in Stunden: t_I
- Temperaturwert aus dem Temperaturindex in °C: $\vartheta_I = T_I - 273,15$ (mit T_I in K)
- Einsatztemperatur in °C: $\vartheta_E = T_E - 273,15$ (mit T_E in K)

Wurden die Aktivierungsenergie E_a und ihr Fehler ΔE_a aus einem Arrhenius-Diagramm im Block zur Ermittlung der Aktivierungsenergie bestimmt, so müssen diese beiden Werte für die Berechnung von t_E und des Fehlers Δt_E verwendet werden.

Ist die Aktivierungsenergie für das betrachtete Polymer dagegen aus einem Datenblatt bekannt, so sind diese Werte für die Berechnung zu verwenden. Wenn der Fehler ΔE_a im Datenblatt nicht explizit angegeben wird, dann ist dieser mit der Einheit der letzten Nachkommastelle von E_a gleichzusetzen. Falls keine Angaben oder Datensätze für die Bestimmung der Aktivierungsenergie des betreffenden Polymers vorhanden sind, so kann nur eine erste konservative Abschätzung der qualifizierten Lebensdauer t_E vorgenommen werden. Dabei sind die Werte für E_a und ΔE_a gemäß den Vorgaben in Kapitel 3.1 festzulegen. Der Zeitwert aus dem Temperaturindex t_I beträgt üblicherweise 20 000 Stunden. Da eine solch große Zeitspanne in der Regel ohne Probleme eingehalten werden kann, wird der Parameter t_I als fehlerlos betrachtet ($\Delta t_I = 0$). Selbst eine Abweichung von einer Stunde ist verglichen mit 20 000 Stunden vernachlässigbar klein. Da Temperaturen ebenfalls sehr genau gemessen werden können, wird der Fehler des Temperaturwerts aus dem Temperaturindex auf 1 °C festgelegt ($\Delta \vartheta_I = 1\text{ °C}$). Die Einsatztemperatur ϑ_E und ihr Fehler $\Delta \vartheta_E$ sind entsprechend der Einsatzbedingungen zu wählen.

Mithilfe der bestimmten Parameter, wird nun durch Einsetzen in Gleichung (3.7) die qualifizierte Lebensdauer t_E berechnet. Ihr Fehler Δt_E ergibt sich dann aus den Parameterfehlern (ΔE_a , $\Delta t_I = 0$, $\Delta \vartheta_I = 1\text{ °C}$ und $\Delta \vartheta_E$) und der Gaußschen Fehlerfortpflanzung. Das Resultat wird in einem Ergebnis-Plot ausgegeben, welcher beispielhaft für das generische Polymer bei einer Index-Temperatur von $\vartheta_I = 123\text{ °C}$ in Abb. 4.4 dargestellt ist. In diesem Plot wird die Lebensdauer in Jahren ($t [a]$) über die Temperatur in °C ($\vartheta [°C]$) aufgetragen. Der blaue Graph repräsentiert die qualifizierte Lebensdauer t_E , wie sie anhand von Gleichung (3.7) berechnet wurde. Er ist mittig in eine rote Fläche eingebettet, die als Fehlerband bezeichnet wird. Dabei entspricht der obere Rand der Fläche dem maximalen Wert der qualifizierten Lebensdauer ($t_E + \Delta t_E$) und der untere Rand dem minimalen Wert ($t_E - \Delta t_E$). Um zu verhindern, dass die Lebensdauer für das Kabel zu optimistisch eingeschätzt wird, sind noch entsprechende Abschläge vorzunehmen, wie sie in Kapitel 3.1 beschrieben werden. Das bedeutet es wird nicht der Wert t_E für die Lebensdauer des Kabels angesetzt, sondern die tatsächlich nutzbare Lebensdauer, die wir mit t_N bezeichnen. Gemäß den Vorgaben in Kapitel 3.1 ist diese wie folgt zu berechnen:

$$t_N = \begin{cases} 0,8 \cdot (t_E - \Delta t_E) & \text{für } (t_E - \Delta t_E) \leq 75\text{ a} \\ 60\text{ a} & \text{für } (t_E - \Delta t_E) > 75\text{ a} \end{cases} \quad (4.1)$$

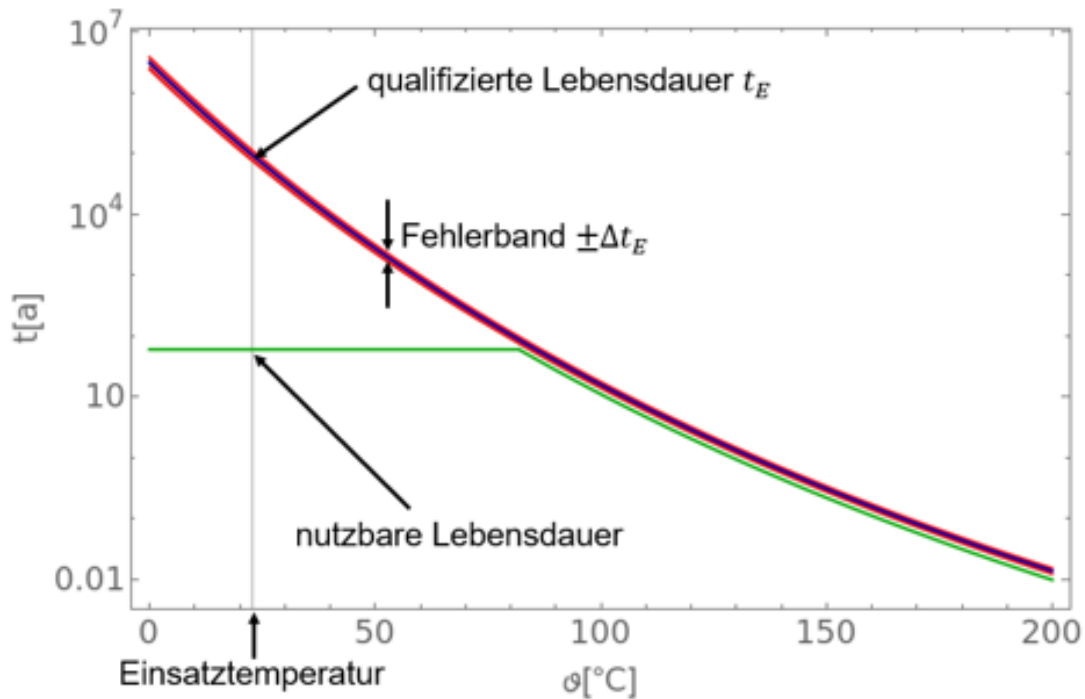


Abb. 4.4 Ergebnis-Plot für die Temperaturabhängigkeit der Lebensdauer am Beispiel eines generischen Polymers

Dabei wird die Lebensdauer in Jahren a über die Temperatur in $^{\circ}\text{C}$ aufgetragen.

Die nutzbare Lebensdauer t_N ist in Abb. 4.4 als grüner Graph dargestellt. Dieser verläuft stets unterhalb der unteren Kante des Fehlerbands, um eine konservative Einschätzung der Lebensdauer sicherzustellen. Gemäß Gleichung (4.1) kann die nutzbare Lebensdauer t_N niemals 60 Jahre überschreiten, was in Abb. 4.4 am waagrechten Verlauf des grünen Graphen unterhalb einer Temperatur von etwa 85°C zu erkennen ist. Die senkrechte graue Linie markiert den Wert, der für die Einsatztemperatur ϑ_E eingestellt wurde. Im vorliegenden Beispiel beträgt diese 23°C ($\vartheta_E = 23^{\circ}\text{C}$) mit einem Fehler von 1°C ($\Delta\vartheta_E = 1^{\circ}\text{C}$). Die Werte für t_E , Δt_E und t_N sind an den Schnittpunkten der senkrechten, grauen Linie mit dem jeweiligen Funktionsgraphen abzulesen. Sie werden innerhalb des Mathematica-Notebooks zusätzlich als Zahlenwerte unterhalb des Ergebnis-Plots ausgegeben. Im vorliegenden Fall betragen die Werte: $t_E = 1,305 \cdot 10^7 a$, $\Delta t_E = 3,62 \cdot 10^6 a$ und $t_N = 60 a$.

Schließlich wurde noch eine Berechnung der Lebensdauer durchgeführt, bei der für die Aktivierungsenergie E_a und ihren Fehler ΔE_a die über eine große Anzahl von Polymeren gemittelten Werte $\bar{E}_a = 0,9 \text{ eV}$ und $\Delta \bar{E}_a = 0,25 \text{ eV}$ verwendet wurden. Dabei wurden die übrigen Parameter unverändert gelassen.

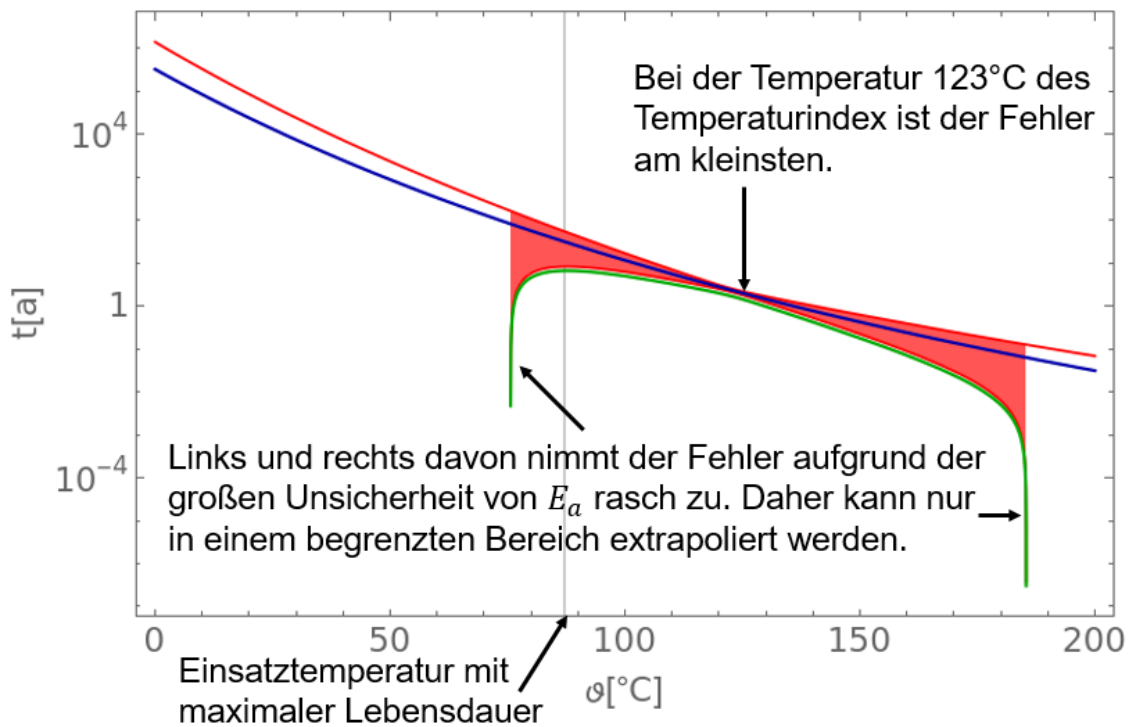


Abb. 4.5 Ergebnis-Plot

Hier wurden für die Aktivierungsenergie E_a und ihren Fehler ΔE_a die über eine große Anzahl von Polymeren gemittelten Werte $\bar{E}_a = 0,9 \text{ eV}$ und $\Delta \bar{E}_a = 0,25 \text{ eV}$ verwendet.

Der entsprechende Ergebnis-Plot ist in Abb. 4.5 zu sehen. Da der Fehler $\Delta \bar{E}_a$ verglichen mit $\bar{E}_a$ sehr groß ist, divergiert das Fehlerband links und rechts von der Index-Temperatur $\vartheta_I = 123 \text{ }^{\circ}\text{C}$ der Referenzmessung sehr schnell, so dass nur in einem begrenzten Bereich um ϑ_I herum extrapoliert werden kann.

Bei niedrigeren und höheren Temperaturen ist das Rechenmodell daher nicht mehr anwendbar. Das Beispiel zeigt, dass die Berücksichtigung des Fehlerbands in der Berechnung der nutzbaren Lebensdauer t_N (grüner Graph) von entscheidender Bedeutung ist, um t_N realistisch einzuschätzen. Die qualifizierte Lebensdauer t_E (blauer Graph) für sich genommen, würde keine Auskunft über den Gültigkeitsbereich des Rechenmodells geben und zudem einen zu optimistischen Wert für die Lebensdauer liefern. Nach Abb. 4.5 kann eine maximale nutzbare Lebensdauer t_N nur bei einer Einsatztemperatur ϑ_E von etwa $87 \text{ }^{\circ}\text{C}$ gesichert angegeben werden (siehe senkrechte graue Linie). Die Werte betragen: $t_E = 31,844 \text{ a}$, $\Delta t_E = 23,547 \text{ a}$ und $t_N = 6,638 \text{ a}$.

4.2

Umsetzung des Potenzgesetzes für radiologische Alterung

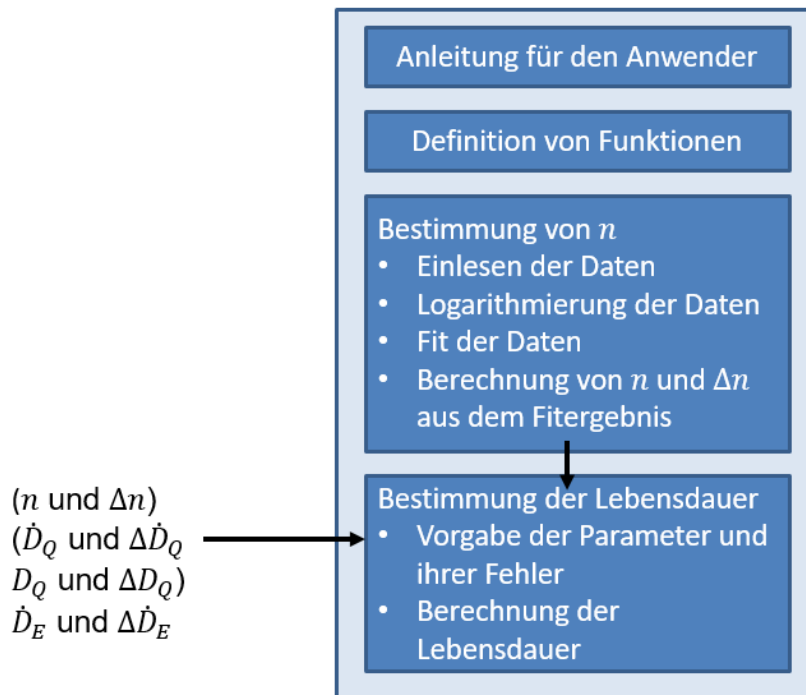


Abb. 4.6 Struktureller Aufbau des Mathematica-Notebooks zur Berechnung der Lebensdauer von Kabeln

Hier unter radiologischer Alterung nach dem Potenzgesetz

Die obige Abbildung zeigt, wie das Mathematica-Notebook zur Berechnung der Lebensdauer von Kabeln unter radiologischer Alterung, beschrieben durch das Potenzgesetz, strukturell aufgebaut ist. Es setzt die Berechnung der Lebensdauer, wie sie in Kapitel 3.2 beschrieben wird um. Unterhalb der für jedes der vier Notebooks üblichen Blöcke, die die Anleitung für den Anwender und die Definition der innerhalb des Notebooks verwendeten Funktionen enthalten, befindet sich der Block zur Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n und seines Fehlers Δn . Dieser Block ist optional und muss nur ausgeführt werden, wenn n und Δn für das vorliegende Polymer, aus dem die Kabelisolierung besteht, nicht bereits über ein Datenblatt gegeben sind und beide Werte erst über den Fit eines Datensatzes in Form einer doppelt logarithmischen Messkurve ermittelt werden müssen. Zum Einlesen der betreffenden Daten, muss der Variablen "dateiname" der Name der Datei in Form einer Zeichenkette (String) übergeben werden (inklusive Dateierweiterung), die die Daten zur Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten enthält. Dabei handelt es sich um eine Excel-Datei mit der Dateierweiterung ".xlsx". In der Datei befindet sich eine Tabelle, die minimal zwei Spalten und maximal vier Spalten beinhaltet.

Liegen zwei Spalten vor, so gibt die erste Spalte die Dosisrate $\dot{D}$ in Gray pro Stunde Gy/h an und die zweite Spalte die Schädigungsdosis DED in Gray Gy. Besteht die Tabelle aus drei Spalten, so enthält die erste Spalte die Dosisrate $\dot{D}$ in Gray pro Stunde Gy/h, die zweite Spalte die Schädigungsdosis DED in Gray Gy und die dritte Spalte den Fehler ΔDED ebenfalls in Gray Gy. Befinden sich in der Tabelle vier Spalten, dann gibt die erste Spalte die Dosisrate $\dot{D}$ in Gray pro Stunde Gy/h, die zweite Spalte den Fehler der Dosisrate $\Delta \dot{D}$ in Gray pro Stunde Gy/h, die dritte Spalte die Schädigungsdosis DED in Gray Gy und die vierte Spalte den entsprechenden Fehler ΔDED in Gray Gy an. Dadurch wird berücksichtigt, dass die Messungen von Dosisraten $\dot{D}$ und Dosiswerten D zum Teil starke Schwankungen aufweisen können, was weiter unten in Abb. 4.8 zu sehen ist. Dies muss bei der Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n berücksichtigt werden können, um sicherzugehen, dass der Fehler Δn im Verhältnis zu n nicht zu groß ist. Andernfalls kann eine realistische Berechnung der Lebensdauer nicht gewährleistet werden. In der Tabelle werden mindestens drei Zeilen mit Messwerten benötigt. Die erste Zeile der Tabelle dient ausschließlich zur Beschriftung der Spalten.

a)

	A	B
1	Dosisrate [Gy/h]	Schädigungsdosis DED [Gy]
2	0.11	70000
3	0.2	120000
4	0.3	200000
5	0.7	100000
6	1.5	150000
7	2.5	170000
8	5	155000
9	10.05	240000

b)

	A	B	C
1	Dosisrate [Gy/h]	Schädigungsdosis DED [Gy]	Fehler Schädigungsdosis [Gy]
2	9.5	270	5
3	25	350	25
4	50	405	60
5	72.5	440	30
6	180	500	20
7	505	590	50
8	2300	940	120

Abb. 4.7 Zwei Beispiel-Datensätze zur Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n und seines Fehlers Δn

Teil a): Datensatz des Polymers SIR (Styrol-Isopren-Kautschuk) ohne Fehlerangaben, entnommen aus /JNE 03/. Teil b): Datensatz des Polymers XLPE (vernetztes Polyethylen, Crosslinked Polyethylene) mit Fehlerangaben ΔDED der Schädigungsdosis, entnommen aus /IAE 12/

Abb. 4.7 zeigt beispielhaft zwei Datensätze zur Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n und seines Fehlers Δn . Abbildungsteil a) zeigt einen Datensatz für das Polymer SIR (Styrol-Isopren-Kautschuk), wobei die Messwerte für die Dosisrate $\dot{D}$ und die Schädigungsdosis DED als fehlerlos betrachtet werden. In Abbildungsteil b) ist dagegen ein Datensatz für XLPE (vernetztes Polyethylen, Crosslinked Polyethylene) zu sehen, in dem die Schädigungsdosis DED (zweite Spalte) einen Fehler ΔDED (dritte Spalte) besitzt.

Die eingelesenen Daten werden anschließend jeweils in den Datensatz einer doppelt logarithmischen Messkurve umgerechnet, wie sie durch Gleichung (3.14) beschrieben wird. Mit $\lg(\dot{D})$ als x -Wert und $\lg(DED)$ als y -Wert beschreiben die Messdaten dann gemäß Gleichung (3.14) eine Gerade. Folglich werden die Daten anschließend mit der Geradengleichung $y = a_0 \cdot x + a_1$ gefittet. Darin sind a_0 und a_1 die zu bestimmenden Fitparameter, wobei a_0 die Steigung und a_1 den y -AchsenAbschnitt der doppelt logarithmischen Messkurve angeben. Dazu wurde die für die Arrhenius-Gerade aus dem vorherigen Abschnitt entwickelte Fit-Funktion derart abgewandelt, dass sie mögliche Fehlerangaben in den Messwerten automatisch berücksichtigt. Dies wird dadurch realisiert, dass die Messfehler anhand der oben beschriebenen Konvention der Spaltenanzahl und -aufteilung der Messwerttabellen eindeutig zugeordnet und bestimmt werden können. Abb. 4.8 zeigt die Fits der doppelt logarithmischen Messkurve für die beiden Datensätze aus Abb. 4.7, wobei der Abbildungsteil 4.8 a) den Fit für das Polymer SIR ohne Fehlerangabe zeigt und der Abbildungsteil 4.8 b) den Fit für das Polymer XLPE unter Berücksichtigung des Fehlers der Schädigungsdosis ΔDED , zu erkennen an den eingezeichneten Fehlerbalken. Der minimale x -Wert "xmin" und der maximale x -Wert "xmax", sowie der minimale y -Wert "ymin" und der maximale y -Wert "ymax", welche den Plotbereich eingrenzen, sind für den Fit der Messkurve festzulegen. Dabei kann man sich an dem Datensatz, der für den Fit verwendet wird, orientieren. Lassen sich die Daten nicht durch eine Gerade fitten, dann ist das Rechenmodell nicht anwendbar.

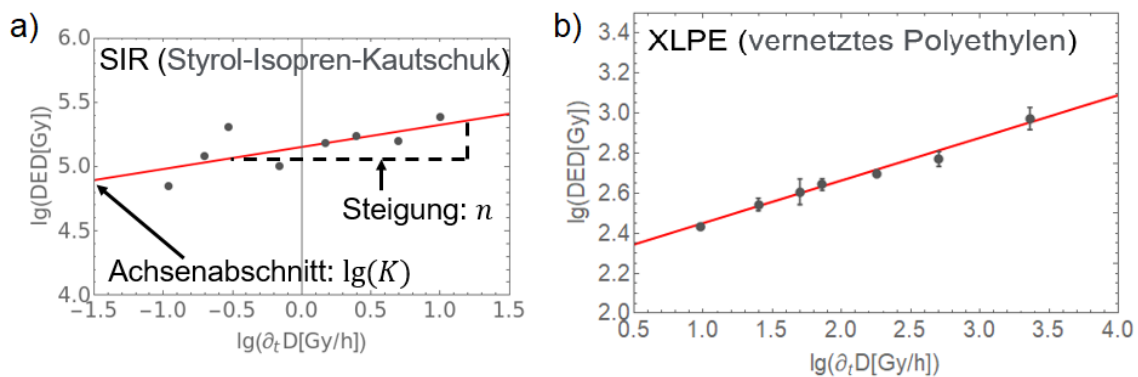


Abb. 4.8 Beispiele für den Fit der doppelt logarithmischen Messkurve zur Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n und seines Fehlers Δn

Teil a): Fit der Messkurve für SIR (Styrol-Isopren-Kautschuk) ohne Fehlerangaben. Teil b) Fit der Messkurve für XLPE (vernetztes Polyethylen) mit Berücksichtigung des Fehlers ΔDED der Schädigungsdosis DED .

Da der Fitparameter a_0 die Steigung der doppelt logarithmischen Messkurve repräsentiert, ist er mit dem Dosisleistungseffektexponenten n aus Gleichung (3.14) gleichzusetzen ($n = a_0$). Der Fehler Δn des Dosisleistungseffektexponenten ist dann durch den Parameterfehler Δa_0 gegeben ($\Delta n = \Delta a_0$). Für das Polymer SIR erhält man aus Abb. 4.8 a) die folgenden Werte:

$$n = a_0 = 0,172 \pm 0,072.$$

Nach Abb. 4.8 b) gilt für das Polymer XLPE:

$$n = a_0 = 0,213 \pm 2,716.$$

Man erkennt, dass für XLPE der Fehler Δn größer ist als der Wert von n selbst. Dieser Effekt kann auftreten, wenn der Datensatz der doppelt logarithmischen Messkurve, welcher für die Bestimmung des Parameters n verwendet wird, zu hohe Messunsicherheiten aufweist. Diese Unsicherheiten können sich in Form einer starken Streuung der Datenpunkte oder durch verhältnismäßig große Fehlerbalken bemerkbar machen. Letzteres ist in Abb. 4.8 b) der Fall. Daher kann dieses Ergebnis für die Berechnung der Lebensdauer nicht verwendet werden. Im Folgenden wird die Berechnung der Lebensdauer somit nur am Beispiel des Polymers SIR behandelt. Führen Fehlerangaben im Datensatz (drei oder vier Spalten in der Messwerttabelle) dazu, dass der Fehler Δn des Dosisleistungseffektexponenten am Ende größer ist als der Dosisleistungseffektexponent n selbst, so sind die entsprechenden Tabellen-Spalten mit Fehlerangaben aus dem Datensatz zu streichen und der Fit ist zu wiederholen, oder es ist ein geeigneterer Datensatz zu verwenden.

Der Block zur Bestimmung der Lebensdauer in Jahren (siehe Abb. 4.6) ist immer auszuführen. Dabei werden zunächst die Parameter festgelegt, die in die Formel (3.20) zur Berechnung der qualifizierten Lebensdauer t_E des Kabels eingesetzt werden müssen. Die Parameter lauten wie folgt:

- Dosisleistungseffektexponent (einheitenlos): n
- Qualifikationsdosisrate in Gy/h : $\dot{D}_Q$
- Qualifikationsdosis in Gy: D_Q
- Einsatzdosisrate in Gy/h: $\dot{D}_E$

Wurden der Dosisleistungseffektexponent n und sein Fehler Δn aus einem Fit der doppelt logarithmischen Messkurve im Block zur Ermittlung des Dosisleistungseffektexponenten bestimmt, so müssen diese beiden Werte für die Berechnung von t_E und des Fehlers Δt_E verwendet werden. Sind der Dosisleistungseffektexponent und sein Fehler für das betrachtete Polymer dagegen aus einem Datenblatt bekannt, so sind diese Werte für die Berechnung zu verwenden. Wenn der Fehler Δn im Datenblatt nicht explizit angegeben wird, dann ist dieser mit der Einheit der letzten Nachkommastelle von n gleichzusetzen. Falls keine Angaben oder Datensätze für die Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten des betreffenden Polymers vorhanden sind, so kann nur eine erste konservative Abschätzung der qualifizierten Lebensdauer t_E vorgenommen werden. Dabei sind die Werte für n und Δn gemäß den Vorgaben in Kapitel 3.2 festzulegen. Wurden der Dosisleistungseffektexponent n und sein Fehler Δn aus einem Fit der doppelt logarithmischen Messkurve im Block zur Ermittlung des Dosisleistungseffektexponenten bestimmt, so kann einer der Messwerte für die Dosisrate $\dot{D}$ aus dem dabei verwendeten Datensatz als Qualifikationsdosisrate $\dot{D}_Q$ festgelegt werden. Das Notebook wählt dabei automatisch einen Wert aus der Mitte der vorhandenen Messungen der Dosisrate aus. Der Fehler der Qualifikationsdosisrate $\Delta \dot{D}_Q$ ist dann durch den zugehörigen Messfehler gegeben. Enthält der Datensatz keinen Messfehler für $\dot{D}_Q$, so wird automatisch $\Delta \dot{D}_Q = 0$ gesetzt. Um die Schwankungen in den Messwerten für die Dosis zu unterdrücken und einen möglichst genauen Wert zu erhalten, wird die zu $\dot{D}_Q$ gehörige Qualifikationsdosis D_Q mithilfe von Gleichung (3.17) durch Einsetzen der Parameter $\dot{D}_Q$, n und K berechnet. Logarithmiert man Gleichung (3.17) auf beiden Seiten, so erhält man:

$$\lg(D_Q) = n \cdot \lg(\dot{D}_Q) + \lg(K). \quad (4.2)$$

Wenn dies mit der Geradengleichung $y = a_0 \cdot x + a_1$ aus dem Fit der doppelt logarithmischen Messkurve verglichen und berücksichtigt wird, dass gemäß des dabei verwendeten Datensatzes $x = \lg(\dot{D}_Q)$ und $y = \lg(D_Q)$ gilt, dann erhält man aus (4.2) für n und K :

$$n = a_0 \quad \text{und} \quad \lg(K) = a_1 \quad \Rightarrow \quad K = 10^{a_1}. \quad (4.3)$$

Die Beziehung $n = a_0$ ist bereits bekannt, aber der Wert für K kann nun über den Wert für den Fitparameter a_1 berechnet werden. Dies ermöglicht schließlich die Berechnung der Qualifikationsdosis D_Q über Gleichung (3.17). Ihr Fehler ΔD_Q ergibt sich dann über

die Gaußsche Fehlerfortpflanzung aus den Parameterfehlern $\Delta\dot{D}_Q$, Δa_0 und Δa_1 . Wurde der Dosisleistungseffektexponent n für das verwendete Polymer aus einem Datenblatt entnommen und ist somit kein Datensatz für eine doppelt logarithmische Messkurve vorhanden, dann müssen $\dot{D}_Q$ und D_Q , sowie ihre Fehler $\Delta\dot{D}_Q$ und ΔD_Q aus einem Qualifikationsprozess bekannt sein und für die Berechnungen der Lebensdauer verwendet werden. Die Einsatzdosisrate $\dot{D}_E$ und ihr Fehler $\Delta\dot{D}_E$ sind entsprechend der Einsatzbedingungen zu wählen.

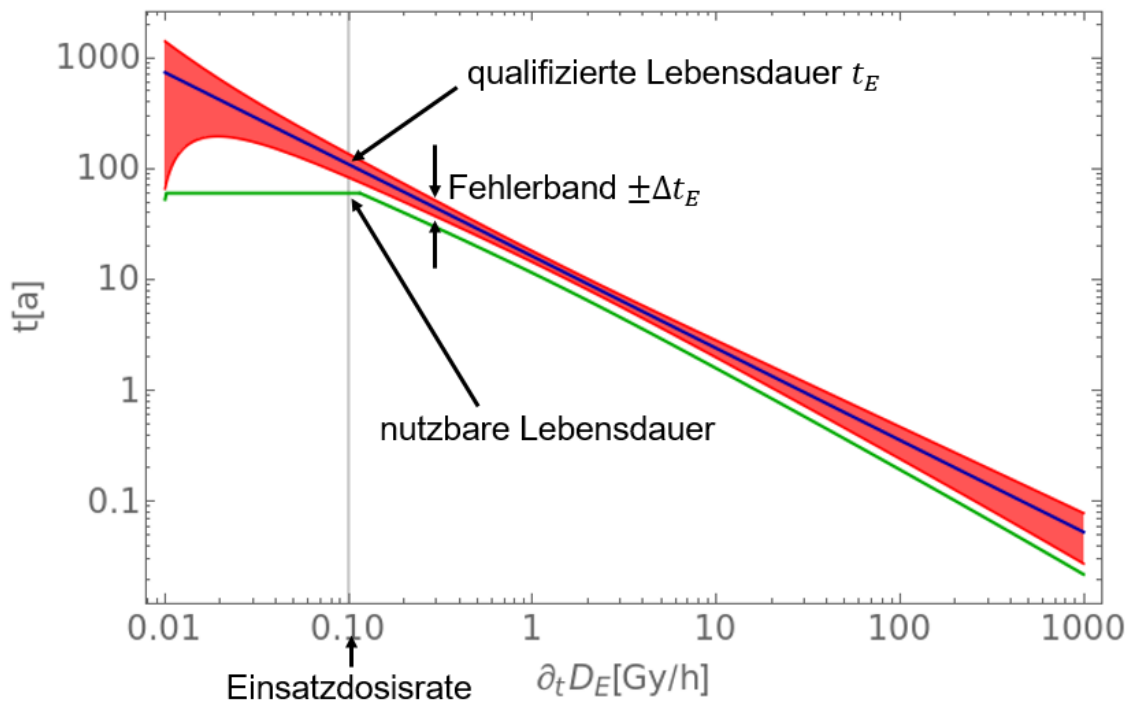


Abb. 4.9 Ergebnis-Plot für die radiologisch bedingte Reduzierung der Lebensdauer

Hier am Beispiel des Polymers SIR (Styrol-Isopren-Kautschuk). Dabei wird die Lebensdauer in Jahren a über die Dosisrate in Gy/h aufgetragen.

Mithilfe der bestimmten Parameter, wird nun durch Einsetzen in Gleichung (3.20) die qualifizierte Lebensdauer t_E berechnet. Ihr Fehler Δt_E ergibt sich dann aus den Parameterfehlern (Δn , $\Delta\dot{D}_Q$, ΔD_Q und $\Delta\dot{D}_E$) und der Gaußschen Fehlerfortpflanzung. Das Resultat wird in einem Ergebnis-Plot ausgegeben, welcher beispielhaft für das Polymer SIR bei einer Qualifikationsdosisrate von $\dot{D}_Q = 1,5 Gy/h$ und einer Qualifikationsdosis von $D_Q = 151\,995 Gy$ in Abb. 4.9 dargestellt ist. In diesem Plot wird die Lebensdauer in Jahren ($t [a]$) über die Dosisrate in Gray pro Stunde ($\dot{D} [Gy/h]$) aufgetragen.

Der blaue Graph repräsentiert die qualifizierte Lebensdauer t_E , wie sie anhand von Gleichung (3.20) berechnet wurde. Er ist mittig in eine rote Fläche eingebettet, die als Fehlerband bezeichnet wird. Dabei entspricht der obere Rand der Fläche dem maximalen Wert der qualifizierten Lebensdauer ($t_E + \Delta t_E$) und der untere Rand dem minimalen Wert ($t_E - \Delta t_E$). Um zu verhindern, dass die Lebensdauer für das Kabel zu optimistisch eingeschätzt wird, sind noch entsprechende Abschläge vorzunehmen, wie sie in Kapitel 3.2 beschrieben werden. Das bedeutet es wird nicht der Wert t_E für die Lebensdauer des Kabels angesetzt, sondern die tatsächlich nutzbare Lebensdauer, die wir hier mit t_N bezeichnen. Gemäß den Vorgaben in Kapitel 3.2 ist diese nach Gleichung (4.1) zu berechnen. Die nutzbare Lebensdauer t_N ist in Abb. 4.9 als grüner Graph dargestellt. Dieser verläuft stets unterhalb der unteren Kante des Fehlerbands, um eine konservative Einschätzung der Lebensdauer sicherzustellen. Gemäß Gleichung (4.1) kann die nutzbare Lebensdauer t_N niemals 60 Jahre überschreiten, was in Abb. 4.9 am waagrechten Verlauf des grünen Graphen unterhalb einer Dosisrate von etwa 0,11 Gy/h zu erkennen ist. Die senkrechte graue Linie markiert den Wert, der für die Einsatzdosisrate $\dot{D}_E$ eingestellt wurde. Im vorliegenden Beispiel beträgt diese 0,1 Gy/h ($\dot{D}_E = 0,1 \text{ Gy/h}$) mit einem Fehler von 0,01 Gy/h ($\Delta \dot{D}_E = 0,01 \text{ Gy/h}$). Die Werte für t_E , Δt_E und t_N sind an den Schnittpunkten der senkrechten, grauen Linie mit dem jeweiligen Funktionsgraphen abzulesen. Sie werden innerhalb des Mathematica-Notebooks zusätzlich als Zahlenwerte unterhalb des Ergebnis-Plots ausgegeben. Im vorliegenden Fall betragen die Werte: $t_E = 108,984 \text{ a}$, $\Delta t_E = 26,088 \text{ a}$ und $t_N = 60 \text{ a}$.

4.3 Umsetzung des Superpositionsverfahrens für kombinierte thermische und radiologische Alterung

Das Superpositionsverfahren befasst sich mit der Berechnung der Lebensdauer von Kabelisolationsmaterialien unter kombinierten thermischen und radiologischen Alterungseinflüssen. Dabei erfolgt die Berechnung der Lebensdauer immer nach demselben Formalismus wie er über die Gleichungen (3.25) und (3.30) gegeben ist.

Allerdings können die dafür erforderlichen Modellparameter (Aktivierungsenergie E_a , k , und x) über zwei unterschiedliche Vorgehensweisen bestimmt werden, dem Superposition I-Verfahren und dem Superposition II-Verfahren. Ersteres verwendet zeitabhängige Daten, bei denen die zeitliche Änderung der das Akzeptanzkriterium bestimmenden, alterungssensitiven physikalischen Größe messtechnisch erfasst wird.

Letzteres verwendet dagegen *DED*-Daten, also Datensätze, bei denen die Schädigungsdosis *DED* (vom Kabelisolationsmaterial aufgenommene Dosis bis zum Erreichen des Akzeptanzkriteriums) in Abhängigkeit von der Dosisleistung $\dot{D}$ ermittelt wird. Beide Vorgehensweisen werden in den folgenden Unterabschnitten beschrieben.

4.3.1 Umsetzung Superposition I-Verfahren

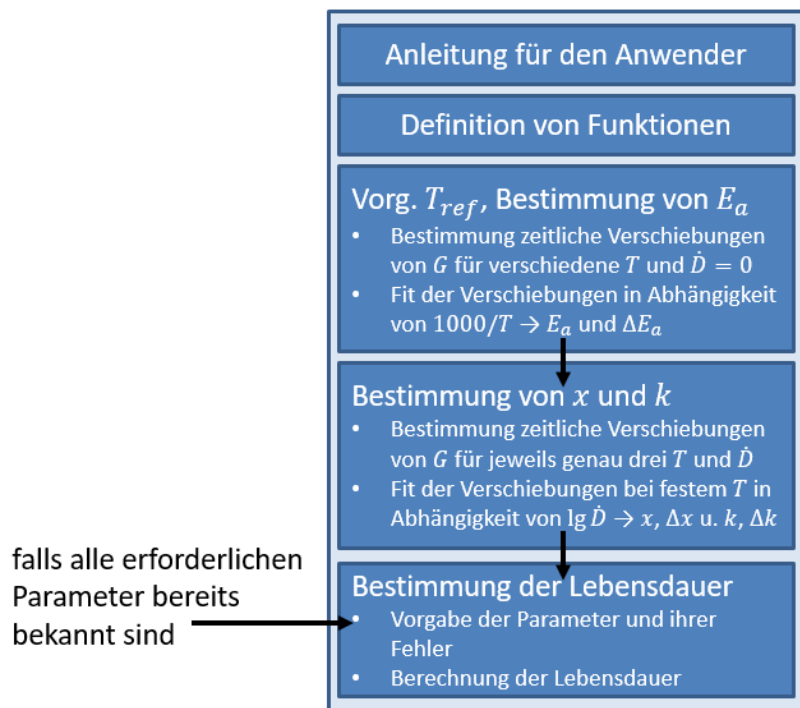


Abb. 4.10 Struktureller Aufbau des Mathematica-Notebooks zur Berechnung der Lebensdauer von Kabeln

Hier unter kombinierter thermischer und radiologischer Alterung nach dem Superposition I-Verfahren.

Die obige Abbildung zeigt, wie das Mathematica-Notebook zur Berechnung der Lebensdauer von Kabeln unter kombinierter thermischer und radiologischer Alterung, beschrieben durch das Superposition I-Verfahren, strukturell aufgebaut ist. Es setzt die Berechnung der Lebensdauer, wie sie in Kapitel 3.3 beschrieben wird um.

Unterhalb der für jedes der vier Notebooks üblichen Blöcke, die die Anleitung für den Anwender und die Definition der innerhalb des Notebooks verwendeten Funktionen enthalten, befindet sich der Block zur Festlegung der Referenztemperatur ϑ_{ref} in °C (dagegen steht T_{ref} für die Referenztemperatur in Kelvin K) sowie zur Bestimmung der Aktivierungsenergie E_a und ihres Fehlers ΔE_a in eV.

Der Ordner, aus dem die entsprechenden Messdaten eingelesen werden sollen, muss den Namen "Daten zur Bestimmung der Aktivierungsenergie" besitzen.

Innerhalb des Ordners werden Messdaten für mindestens drei verschiedene Temperaturen und ohne radiologische Bestrahlung ($\dot{D} = 0$) benötigt, die jeweils in einer eigenen Excel-Datei gespeichert sind. Die Dateinamen müssen die folgende Form haben: "*Temperatur*InGradCelsiusus_Zeit-Daten.xlsx" (z. B. "100_Zeit-Daten.xlsx" für einen Datensatz der bei einer Temperatur von 100 °C aufgenommen wurde). Innerhalb der Dateien befinden sich zwei Spalten, von denen die erste die Zeit t in Stunden und die zweite die alterationssensitive physikalische Größe $G(t)$ jeweils ohne Fehler angeben. Die erste Zeile dient lediglich zur Spaltenbeschriftung.

a)

	A	B
1	Zeit in Stunden	alterungssensitive physikalische Größe
2	100	560
3	1000	560
4	10000	540
5	13000	500
6	20000	400
7	23000	300
8	28000	200
9	31000	100
10	100000	10

b)

	A	B
1	Zeit in Stunden	alterungssensitive physikalische Größe
2	100	560
3	1000	560
4	10000	540
5	10100	500
6	11000	400
7	12000	300
8	13000	200
9	17000	100
10	30000	10
11	100000	10

c)

	A	B
1	Zeit in Stunden	alterungssensitive physikalische Größe
2	100	560
3	1000	560
4	5000	500
5	6000	400
6	6400	300
7	7000	200
8	8300	100
9	10000	60
10	20000	10
11	100000	10

Abb. 4.11 Beispieldatensätze zur Bestimmung der Aktivierungsenergie E_a und ihres Fehlers ΔE_a für das Polymer FR-XLPE

Die alterationssensitive physikalische Größe G ist hier die Reißdehnung, engl. Elongation at Break (EAB) in %. Die Daten wurden ohne Strahlung ($\dot{D} = 0$) für drei verschiedene Temperaturen erfasst (a) 100 °C, b) 110 °C und c) 120 °C) und stammen aus der Quelle /JNE 03/.

Abb. 4.11 zeigt Beispieldatensätze für das Polymer FR-XLPE. Die alterationssensitive physikalische Größe G ist die Reißdehnung, engl. Elongation at Break (EAB) in %. Die Daten wurden ohne Strahlung ($\dot{D} = 0$) für drei verschiedene Temperaturen (a) 100 °C, b) 110 °C und c) 120 °C) ermittelt. Um die Datensätze auswerten zu können, muss die

Funktion $G(t)$ bekannt sein. Während der Entwicklung des Notebooks hat sich bei Tests an den Beispieldatensätzen gezeigt, dass die folgende Funktion für $G(t)$ geeignet ist:

$$G(t) = G_0 + (G_\infty - G_0) \cdot \left(1 - e^{-\left(\alpha(T, \dot{D}) \cdot \frac{t}{t_0}\right)^m}\right). \quad (4.4)$$

Dabei ist zu beachten, dass dieser Ausdruck nicht zwangsläufig das Alterungsverhalten für jede alterungssensitive physikalische Größe G korrekt beschreibt. Es ist möglich, dass für unterschiedliche Größen verschiedene funktionale Zusammenhänge $G(t)$ gelten. Die Gleichung (4.4) ist dann entsprechend anzupassen. In (4.4) ist G_0 der Wert der alterungssensitiven physikalischen Größe zu Beginn des Alterungsprozesses ($t = 0$). Dagegen steht G_∞ für den Wert, gegen den die Größe bei unendlicher Alterungsdauer ($t \rightarrow \infty$) strebt. Der Verschiebungsfaktor $\alpha(T, \dot{D})$ entspricht dem Ausdruck in Gleichung (3.25) und t_0 steht für eine Zeitkonstante. Die Größe m beschreibt einen zusätzlichen Exponenten. Somit erfüllt (4.4) die Bedingung, dass $G(t)$ eine Funktion des Produkts $\alpha(T, \dot{D}) \cdot t$ sein muss. Logarithmiert man Gleichung (4.4) auf beiden Seiten, so erhält man:

$$\lg G(t) = \lg \left(G_0 + (G_\infty - G_0) \cdot \left(1 - \exp \left(- \left(10^{\lg t + \lg(\alpha(T, \dot{D})) - \lg t_0} \right)^m \right) \right) \right). \quad (4.5)$$

Darin gibt $\lg(\alpha(T, \dot{D}))$ die Verschiebung des Funktionsgraphen $\lg G(t)$ in Abhängigkeit von der Temperatur T und der Dosisrate $\dot{D}$ an. Um den Ausdruck (4.5) auf die Datensätze anwenden zu können, werden diese zunächst in doppelt logarithmische Datensätze ($\lg G - \lg t$) umgerechnet. Nun wird die niedrigste Temperatur, bei der Daten aufgenommen wurden, als Referenztemperatur ϑ_{ref} festgelegt, so dass im vorliegenden Fall $\vartheta_{ref} = 100^\circ\text{C}$ gilt. Dies entspricht in Kelvin einer Referenztemperatur von $T_{ref} = \vartheta_{ref} + 273,15\text{ K} = 373,15\text{ K}$. Bei der Referenztemperatur T_{ref} und ohne Strahlung ($\dot{D} = 0$) gilt für die Verschiebung nach Gleichung (3.25): $\lg(\alpha(T_{ref}, 0)) = \lg(1) = 0$. Damit folgt aus (4.5):

$$\lg G(t) = \lg \left(G_0 + (G_\infty - G_0) \cdot \left(1 - \exp \left(- \left(10^{\lg t - \lg t_0} \right)^m \right) \right) \right). \quad (4.6)$$

Der Datensatz, der bei der Referenztemperatur $\vartheta_{ref} = 100^\circ\text{C}$ aufgenommen wurde, weist folglich keine Verschiebung auf und kann über die Funktion (4.6) beschrieben werden.

So können die Parameter G_0 , G_∞ , m und $\lg t_0$ über einen Fit des Datensatzes mit der Funktion (4.6) bestimmt werden. Da die Parameter nicht von der Temperatur T und der Dosisrate $\dot{D}$ abhängen, können sie als konstant betrachtet und in Gleichung (4.5) verwendet werden. Der Fit ist in Abb. 4.12 dargestellt.

Dabei erhält man die folgenden Werte: $G_0 = (548,825 \pm 21,009)\%$, $G_\infty = (9,991 \pm 0,692)\%$, $m = 3,849 \pm 0,403$ und $\lg t_0 = (4,43 \pm 0,008) \lg h$.

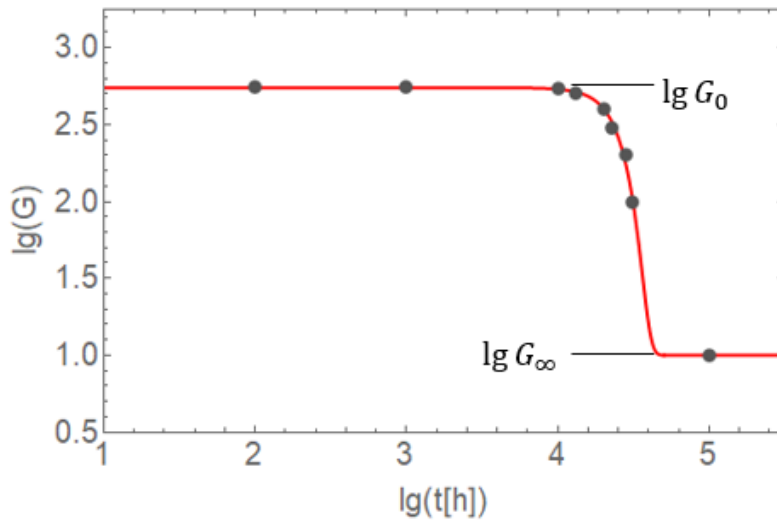


Abb. 4.12 Fit zur Bestimmung der konstanten Parameter G_0 , G_∞ , m und $\lg t_0$ in der Funktion $\lg G(t)$ aus Gleichung (4.5)

Anschließend werden die übrigen Datensätze, die bei Temperaturen von 110 °C und 120 °C aufgenommen wurden, mit der Funktion (4.5) unter Verwendung der erhaltenen Parameter gefittet. Dabei werden die Werte $\lg(\alpha(T, \dot{D} = 0))$ bestimmt, um die die Fitgraphen gegenüber dem Graphen bei der Referenztemperatur von 100 °C verschoben sind. Es gilt $\dot{D} = 0$, da die Datensätze ohne Strahleneinfluss erfasst wurden.

Die Fitgraphen sind in Abb. 4.13 a) dargestellt, wobei zusätzlich der Graph bei der Referenztemperatur $\vartheta_{ref} = 100\text{ °C}$ zum Vergleich eingezeichnet wurde. Trägt man die Verschiebungen $\lg(\alpha(T, 0))$ anschließend über den reziproken Temperaturwert $1000/T$ auf, so erhält man eine Gerade mit negativer Steigung, die mit der Geradengleichung $y = -a_0 \cdot x + a_1$ zu fitten ist. Darin sind a_0 und a_1 die Fitparameter, wobei a_0 den Betrag der Steigung m ($a_0 = -m$) und a_1 den y -AchsenAbschnitt angeben.

Der Fitgraph ist in Abb. 4.13 b) zu sehen. Wenn die Daten nicht richtig gefittet werden können, dann ist das ein Hinweis darauf, dass das Superposition I-Verfahren nicht anwendbar ist. Durch Einsetzen von $m = -a_0$ in Gleichung (3.43) kann schließlich die Aktivierungsenergie E_a berechnet werden. Ihr Fehler ΔE_a ergibt sich aus dem Parameterfehler Δa_0 und der Gaußschen Fehlerfortpflanzung. Man erhält im vorliegenden Fall für das Polymer FR-XLPE die folgenden Werte:

$$a_0 = 4,003 \pm 0,067 \quad \text{und daraus} \quad E_a = (0,794 \pm 0,013) \text{ eV}.$$

Nun sind noch die Modellparameter k und x zu bestimmen.

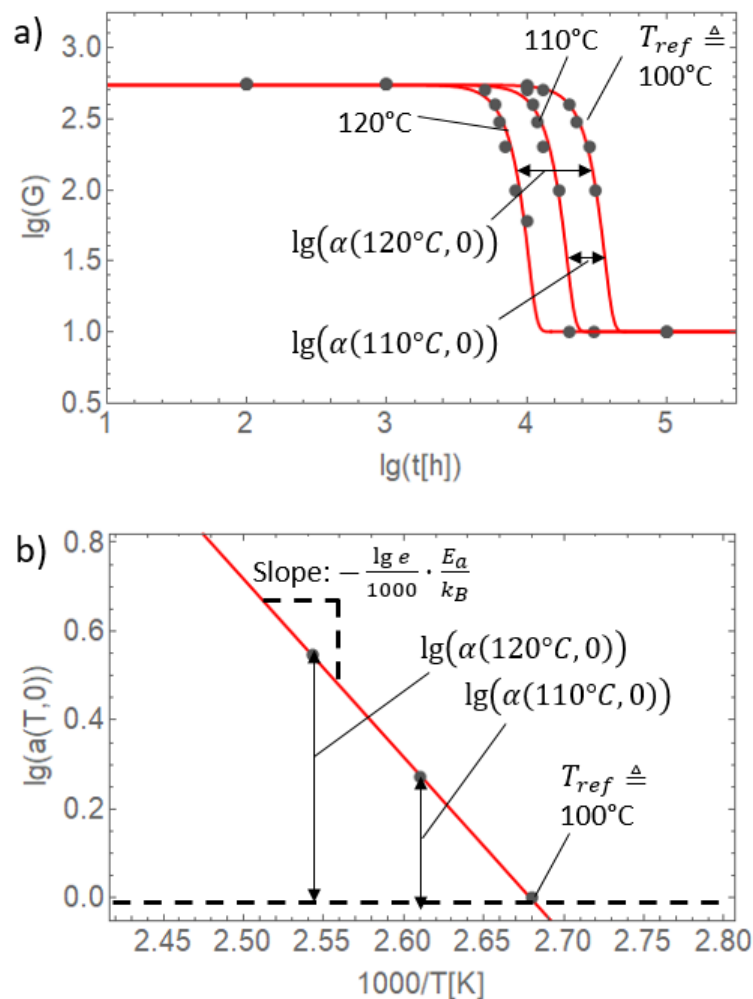


Abb. 4.13 Bestimmung der Aktivierungsenergie E_a :

Teil a) zeigt die Bestimmung der Verschiebungen $\lg(\alpha(T, \dot{D} = 0))$ durch Fits. In Teil b) werden die Verschiebungen über den reziproken Temperaturwert $1000/T$ aufgetragen. Dabei erhält man eine Gerade, aus deren Steigung E_a berechnet werden kann.

Der Ordner, aus dem die Messdaten zur Bestimmung der Parameter eingelesen werden sollen, muss den Namen "Daten zur Bestimmung der Parameter k und x " besitzen. Innerhalb des Ordners werden Messdaten der alterungssensitiven Größe G in Abhängigkeit von der Zeit t für genau drei verschiedene Temperaturen T zu je genau drei verschiedenen Dosisraten $\dot{D}$ benötigt, die jeweils in einer Excel-Datei gespeichert sind. Die Dateinamen müssen die folgende Form haben: "*TemperaturInGradCelsius_DosisrateInGrayProStunde_Zeit-Daten.xlsx*" (z. B. "80_0p99_Zeit-Daten.xlsx").

Dabei steht p für den angelsächsischen Dezimalpunkt (0p99 = 0.99). Innerhalb der Dateien befinden sich zwei Spalten, von denen die erste die Zeit t in Stunden und die zweite die alterungssensitive physikalische Größe $G(t)$ angeben. Die erste Zeile dient lediglich zur Spaltenbeschriftung.

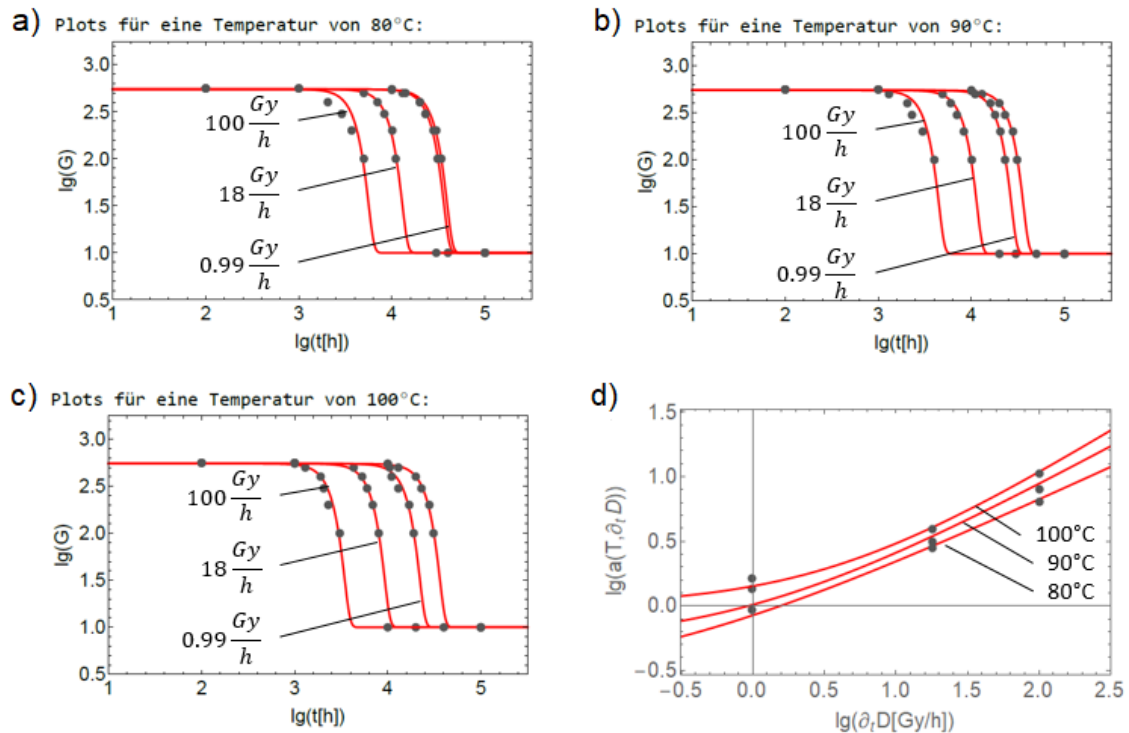


Abb. 4.14 Bestimmung der Parameter k und x :

Die Abbildungsteile a) – c) zeigen die Bestimmung der Verschiebungen $\lg(\alpha(T, \dot{D}))$ durch Fits von $\lg G$ - $\lg t$ -Datensätzen, welche bei verschiedenen Temperaturen T und Dosisraten $\dot{D}$ aufgenommen wurden. Teil d) zeigt für jede Temperatur die Verschiebungen $\lg(\alpha(T, \dot{D}))$ aufgetragen über den Logarithmus der Dosisrate $\lg \dot{D}$ und die zugehörigen Fits zur Bestimmung der Parameter k und x .

Die entsprechenden Datensätze für das Polymer FR-XLPE befinden sich im Anhang A.1.

Die Datensätze werden in doppelt logarithmische Datensätze umgerechnet ($\lg G$ - $\lg t$) und anschließend mit der Funktion (4.5) gefittet, um die von der jeweiligen Temperatur T und Dosisrate $\dot{D}$ abhängigen Verschiebungen $\lg(\alpha(T, \dot{D}))$ der Fitgraphen zu ermitteln. Die Fitgraphen sind in Abb. 4.14 Teil a) bis c) dargestellt. Zum Vergleich ist jeweils auch der Graph bei der Referenztemperatur T_{ref} und ohne Bestrahlung ($\dot{D} = 0$) eingezeichnet, welcher keine Verschiebung aufweist und nicht beschriftet ist. Anschließend werden die bestimmten Verschiebungen $\lg(\alpha(T, \dot{D}))$ für jede Temperatur über den Logarithmus der Dosisrate $\lg \dot{D}$ aufgetragen, was in Abb. 4.14 d) zu sehen ist.

Fittet man die so erzeugten Datensätze jeweils mithilfe der Funktion (3.25), wobei die Parameter k und x als Fitparameter eingehen, so können diese und ihre Fehler Δk und Δx bestimmt werden. Dabei ergibt sich jedoch ein Problem: Die Datensätze bestehen gemäß Abb. 4.14 d) für jede Temperatur nur aus drei Datenpunkten. Dies ist gerade die Mindestzahl an Datenpunkten, um zwei unbekannt Parameter zu bestimmen, was zu unrealistisch hohen Fehlern Δk und Δx führen kann. Um dieses Problem zu umgehen, wurde die Parameteranzahl auf einen Parameter reduziert, indem der Parameter k in Abhängigkeit vom Parameter x ausgedrückt wurde, was über die folgende Gleichung erfolgt:

$$k = e^{x \cdot \frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \cdot \frac{10^{\lg \alpha_2} - 10^{\lg \alpha_1}}{10^{\lg \alpha_1 + x \cdot \lg \dot{D}_2} - 10^{\lg \alpha_2 + x \cdot \lg \dot{D}_1}}. \quad (4.7)$$

Dieser Ausdruck wird in Anhang A.2 explizit hergeleitet. Die Temperatur T geht hier für jeden Datensatz als konstanter Parameter ein, während $\lg \alpha_1$ der erste Wert und $\lg \alpha_2$ der zweite Wert der Verschiebungen aus dem Datensatz sind und $\lg \dot{D}_1$ und $\lg \dot{D}_2$ sind die zugehörigen Logarithmen der Dosisrate. Die Fits aus Abb. 4.14 d) ergeben somit nur die Werte für x , einen für jede Temperatur. Die entsprechenden Werte für k wurden dann aus den x -Werten jeweils mit Gleichung (4.7) berechnet. Die endgültigen Werte für k und x wurden dann durch Mittelwertbildung bestimmt. Ihre Fehler Δk und Δx ergeben sich aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung. Für das hier vorliegende Polymer FR-XLPE erhält man schließlich die Werte $k = 0,757 \pm 0,052$ und $x = 0,603 \pm 0,004$.

Der Block zur Bestimmung der Lebensdauer in Jahren (siehe Abb. 4.10) ist immer auszuführen. Dabei werden zunächst die Parameter festgelegt, die in die Formel (3.30) zur Berechnung der qualifizierten Lebensdauer t_E des Kabels eingesetzt werden müssen.

Die Parameter lauten wie folgt:

- Referenztemperatur in °C: $\vartheta_{ref} = T_{ref} - 273,15$ (mit T_{ref} in K)
- Aktivierungsenergie in eV: E_a
- k-Modellparameter: k
- x-Modellparameter: x
- Temperaturwert aus dem Qualifikationsprozess in °C: $\vartheta_Q = T_Q - 273,15$ (mit T_Q in K)
- Qualifikationsdosisrate in Gy/h : $\dot{D}_Q$
- Qualifikationsdosis in Gy: D_Q
- Einsatztemperatur in °C: $\vartheta_E = T_E - 273,15$ (mit T_E in K)
- Einsatzdosisrate in Gy/h : $\dot{D}_E$

Entweder die Parameter ϑ_{ref} , E_a , k und x sowie ihre Fehler $\Delta\vartheta_{ref}$, ΔE_a , Δk und Δx sind für das betrachtete Polymer bereits bekannt, oder sie müssen zuerst auf die oben geschilderte Weise bestimmt werden. Die übrigen Parameter ϑ_Q , $\dot{D}_Q$, D_Q , ϑ_E und $\dot{D}_E$ sowie ihre Fehler $\Delta\vartheta_Q$, $\Delta\dot{D}_Q$, ΔD_Q , $\Delta\vartheta_E$ und $\Delta\dot{D}_E$ müssen unabhängig vom Superposition I-Verfahren bekannt sein, da sie nicht im Zuge des Verfahrens bestimmt werden können.

Die Qualifikationsdauer t_Q , die in die Formel (3.30) einzusetzen ist, kann dann durch $t_Q = D_Q/\dot{D}_Q$ berechnet werden. Setzt man alle Parameter in die Formel (3.30) ein, so erhält man als Ergebnis die qualifizierte Lebensdauer t_E des Kabels. Ihr Fehler Δt_E ergibt sich über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung aus den Parameterfehlern.

Das Resultat wird in drei Ergebnis-Plots ausgegeben, welche beispielhaft für das Polymer FR-XLPE unter den oben bestimmten Werten für ϑ_{ref} , E_a , k und x sowie deren Fehlern $\Delta\vartheta_{ref}$, ΔE_a , Δk und Δx bei den Parameterwerten $\vartheta_Q = 90\text{ °C}$, $\dot{D}_Q = 18\text{ Gy/h}$, $D_Q = 165240\text{ Gy}$, $\vartheta_E = 23\text{ °C}$ und $\dot{D}_E = 0,1\text{ Gy/h}$ sowie den Parameterfehlern $\Delta\vartheta_Q = 1\text{ °C}$, $\Delta\dot{D}_Q = 0\text{ Gy/h}$, $\Delta D_Q = 26414\text{ Gy}$, $\Delta\vartheta_E = 1\text{ °C}$ und $\Delta\dot{D}_E = 0,01\text{ Gy/h}$ in Abb. 4.15 dargestellt sind. Der Abbildungsteil a) zeigt eine farbcodierte qualifizierte Lebensdauer t_E , welche über die Temperatur ϑ in °C und den Logarithmus der Dosisrate $\lg \dot{D}$ in $\lg\text{ Gy/h}$ aufgetragen ist.

Dabei steht die Farbe Rot für die höchste Lebensdauer und die Farbe Violett für die geringste Lebensdauer. Das Fadenkreuz markiert die aktuelle Position (Einsatztemperatur ϑ_E und Logarithmus der Einsatzdosisrate $\lg \dot{D}_E$).

Dieser Plot gibt einen ersten Eindruck wie stark die qualifizierte Lebensdauer t_E bei Änderungen der Einsatztemperatur ϑ_E und der Einsatzdosisrate $\dot{D}_E$ variiert. Im Abbildungsteil b) wird die Lebensdauer in Jahren (t [a]) über die Temperatur in °C (ϑ [°C]) bei der konstanten Dosisrate $\dot{D}_E = 0,1 \text{ Gy/h}$ aufgetragen. Damit handelt es sich um den Plot der Lebensdauer entlang der waagrechten Linie des Fadenkreuzes. Der blaue Graph repräsentiert die qualifizierte Lebensdauer t_E , wie sie anhand von Gleichung (3.30) berechnet wurde. Er ist mittig in die rote Fläche des Fehlerbands eingebettet.

Dabei entspricht der obere Rand der Fläche dem maximalen Wert der qualifizierten Lebensdauer ($t_E + \Delta t_E$) und der untere Rand dem minimalen Wert ($t_E - \Delta t_E$). Um zu verhindern, dass die Lebensdauer für das Kabel zu optimistisch eingeschätzt wird, sind noch entsprechende Abschlüsse vorzunehmen, wie sie in Kapitel 3.3 beschrieben werden. Das bedeutet es wird nicht der Wert t_E für die Lebensdauer des Kabels angesetzt, sondern die tatsächlich nutzbare Lebensdauer, die wir mit t_N bezeichnen. Gemäß den Vorgaben in Kapitel 3.3 ist diese nach Gleichung (4.1) zu berechnen. Die nutzbare Lebensdauer t_N ist im Abbildungsteil b) als grüner Graph dargestellt. Dieser verläuft stets unterhalb der unteren Kante des Fehlerbands, um eine konservative Einschätzung der Lebensdauer sicherzustellen.

Gemäß Gleichung (4.1) kann die nutzbare Lebensdauer t_N niemals 60 Jahre überschreiten, was im Abbildungsteil b) am waagrechten Verlauf des grünen Graphen unterhalb einer Temperatur von etwa 45 °C zu erkennen ist. Die senkrechte graue Linie markiert den Wert, der für die Einsatztemperatur ϑ_E eingestellt wurde. Im Plot in Abbildungsteil c) wird die Lebensdauer in Jahren (t [a]) über die Dosisrate in Gray pro Stunde ($\dot{D}$ [Gy/h]) bei der konstanten Temperatur $\vartheta_E = 23 \text{ °C}$ aufgetragen. Damit handelt es sich um den Plot der Lebensdauer entlang der senkrechten Linie des Fadenkreuzes. Darin hat die Farbgebung der einzelnen Funktionsgraphen die gleiche Bedeutung wie im Abbildungsteil b). Die Werte für t_E , Δt_E und t_N sind an den Schnittpunkten der senkrechten, grauen Linien mit dem jeweiligen Funktionsgraphen aus b) und c) abzulesen. Sie werden innerhalb des Mathematica-Notebooks zusätzlich als Zahlenwerte unterhalb der Ergebnis-Plots ausgegeben.

Im vorliegenden Fall betragen die Werte: $t_E = 243,795 \text{ a}$, $\Delta t_E = 44,846 \text{ a}$ und $t_N = 60 \text{ a}$.

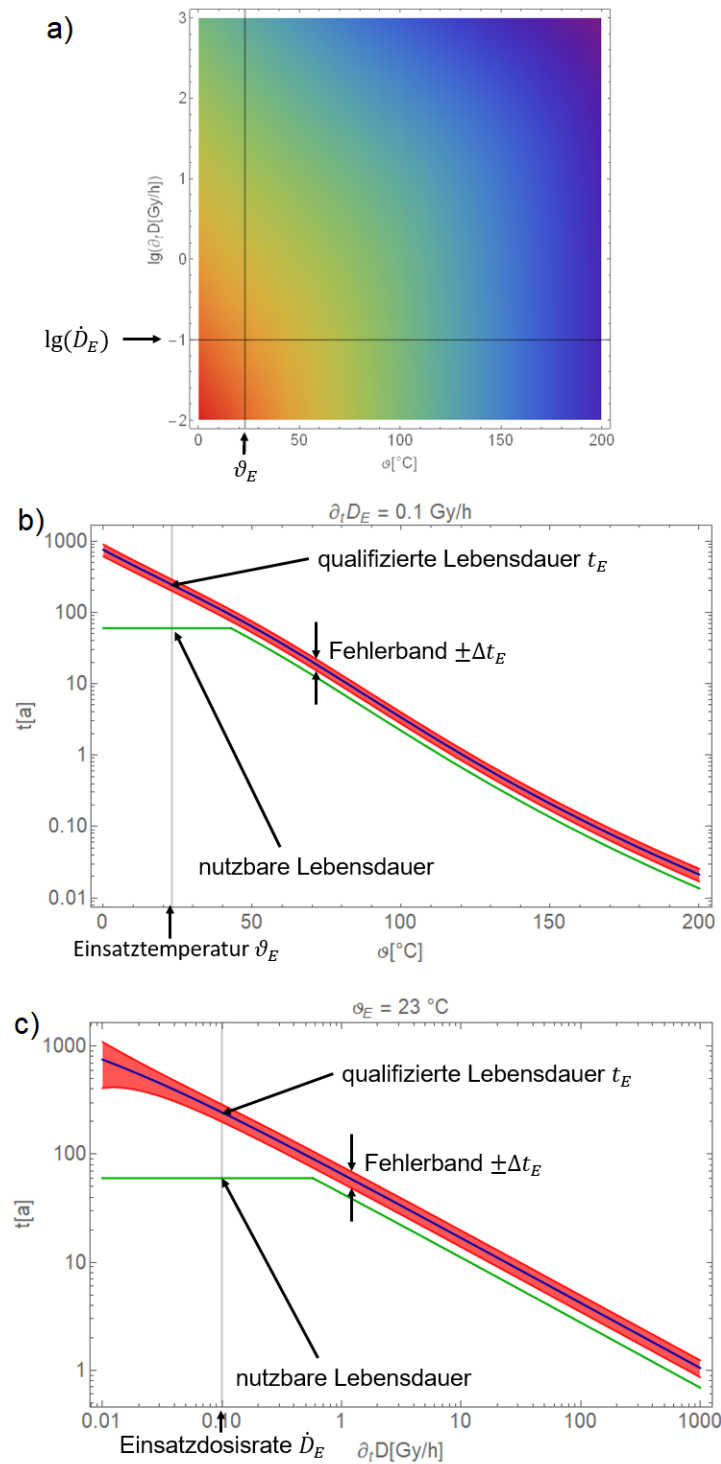


Abb. 4.15 Ergebnis-Plots:

Teil a): farbcodierte qualifizierte Lebensdauer t_E aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C und $\lg \dot{D}$ in $\lg \text{Gy/h}$ (rot = höchste Lebensdauer, violett = geringste Lebensdauer). Das Fadenkreuz markiert die aktuelle Position. Teil b): Ergebnis-Plot wie im Arrhenius-Modell bei konstanter Dosisrate. Teil c): Ergebnis-Plot wie beim Potenzgesetz bei konstanter Temperatur.

4.3.2 Umsetzung Superposition II-Verfahren

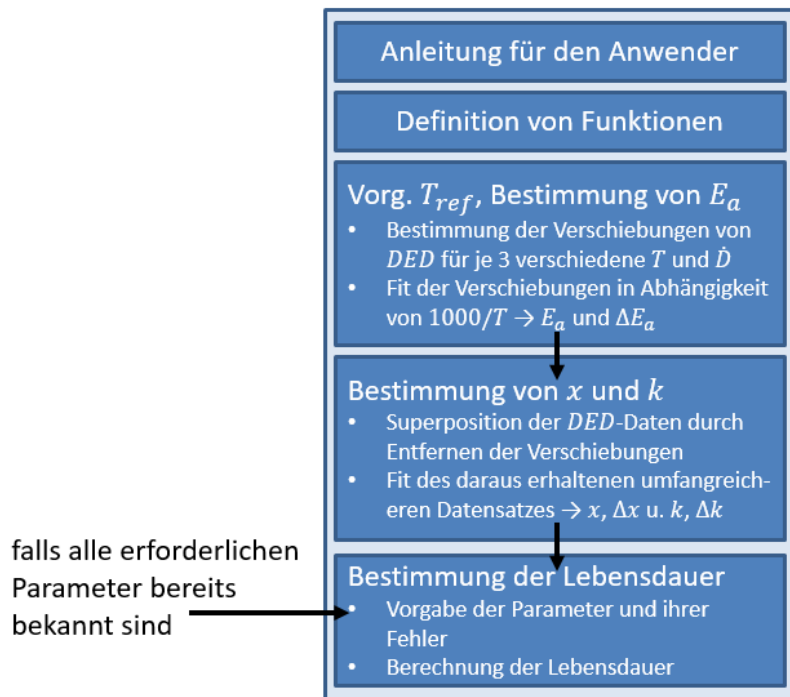


Abb. 4.16 Struktureller Aufbau des Mathematica-Notebooks zur Berechnung der Lebensdauer von Kabeln

Hier unter kombinierter thermischer und radiologischer Alterung nach dem Superposition II-Verfahren

Die obige Abbildung zeigt, wie das Mathematica-Notebook zur Berechnung der Lebensdauer von Kabeln unter kombinierter thermischer und radiologischer Alterung, beschrieben durch das Superposition II-Verfahren, strukturell aufgebaut ist. Es setzt die Berechnung der Lebensdauer, wie sie in Kapitel 3.3 beschrieben wird um.

Unterhalb der für jedes der vier Notebooks üblichen Blöcke, die die Anleitung für den Anwender und die Definition der innerhalb des Notebooks verwendeten Funktionen enthalten, befindet sich der Block zur Festlegung der Referenztemperatur ϑ_{ref} in °C (dagegen steht T_{ref} für die Referenztemperatur in Kelvin K) sowie zur Bestimmung der Aktivierungsenergie E_a und ihres Fehlers ΔE_a in eV.

a)	<table> <tr> <th></th><th>A</th><th>B</th></tr> <tr> <td>1</td><td>Dosisrate [Gy/h]</td><td>Schädigungsdosis DED [kGy]</td></tr> <tr> <td>2</td><td>3</td><td>50</td></tr> <tr> <td>3</td><td>18</td><td>205</td></tr> <tr> <td>4</td><td>100</td><td>510</td></tr> </table>		A	B	1	Dosisrate [Gy/h]	Schädigungsdosis DED [kGy]	2	3	50	3	18	205	4	100	510	<table> <tr> <th></th><th>A</th><th>B</th></tr> <tr> <td>1</td><td>Dosisrate [Gy/h]</td><td>Schädigungsdosis DED [kGy]</td></tr> <tr> <td>2</td><td>3</td><td>36</td></tr> <tr> <td>3</td><td>18</td><td>180</td></tr> <tr> <td>4</td><td>100</td><td>405</td></tr> </table>		A	B	1	Dosisrate [Gy/h]	Schädigungsdosis DED [kGy]	2	3	36	3	18	180	4	100	405
	A	B																														
1	Dosisrate [Gy/h]	Schädigungsdosis DED [kGy]																														
2	3	50																														
3	18	205																														
4	100	510																														
	A	B																														
1	Dosisrate [Gy/h]	Schädigungsdosis DED [kGy]																														
2	3	36																														
3	18	180																														
4	100	405																														
c)	<table> <tr> <th></th><th>A</th><th>B</th></tr> <tr> <td>1</td><td>Dosisrate [Gy/h]</td><td>Schädigungsdosis DED [kGy]</td></tr> <tr> <td>2</td><td>3</td><td>26</td></tr> <tr> <td>3</td><td>18</td><td>130</td></tr> <tr> <td>4</td><td>100</td><td>300</td></tr> </table>		A	B	1	Dosisrate [Gy/h]	Schädigungsdosis DED [kGy]	2	3	26	3	18	130	4	100	300																
	A	B																														
1	Dosisrate [Gy/h]	Schädigungsdosis DED [kGy]																														
2	3	26																														
3	18	130																														
4	100	300																														

Abb. 4.17 Beispieldatensätze für das Polymer FR-XLPE mit dem **DED**-Wert der Schädigungsdosis in kGy in Abhängigkeit von der Dosisrate $\dot{D}$ in Gy/h

Die Daten wurden für drei verschiedene Temperaturen erfasst:

(a) 80 °C, b) 90 °C und c) 100 °C) Quelle /JNE 03/

Es werden Datensätze zu mindestens drei gemessenen Temperaturen benötigt. Jeder Datensatz ist in einer Excel-Datei mit Dateieindung ".xlsx" abgespeichert. Abb. 4.17 zeigt beispielhaft drei solcher Datensätze für das Polymer FR-XLPE. Die Daten wurden für drei verschiedene Temperaturen erfasst (a) 80 °C, b) 90 °C und c) 100 °C). Der Dateiname jedes Datensatzes beginnt mit dem Zahlenwert der jeweiligen Temperatur in °C, welcher ganzzahlig sein muss und ist durch einen Unterstrich vom nachfolgenden Rest des Dateinamens getrennt (z. B. „80_DED-Daten.xlsx“ für einen Datensatz, der bei einer Temperatur von 80 °C aufgenommen wurde).

Wie Abb. 4.17 zeigt, befindet sich innerhalb jeder Datei eine Excel-Tabelle mit zwei Spalten, wobei die erste Spalte die Dosisrate $\dot{D}$ in Gray pro Stunde Gy/h angibt und die zweite Spalte die Schädigungsdosis *DED* in Kilo-Gray kGy. Die Tabelle besteht aus vier Zeilen. Die erste Zeile dient lediglich zur Spaltenbeschriftung, während die übrigen Zeilen genau drei Wertepaare der Dosisrate $\dot{D}$ und der Schädigungsdosis *DED* enthalten müssen.

Dabei muss das erste Wertepaar im Bereich niedriger Dosisraten liegen, bei denen die thermische Alterung dominiert und die zwei anderen Wertepaare müssen im Bereich hoher Dosisraten liegen, in dem die radiologische Alterung die dominante Rolle spielt. Andernfalls ist die korrekte Bestimmung aller Modell-Parameter nicht möglich. Werden die Datensätze so gewählt, dann kann das Superposition II-Verfahren bei minimalem Messaufwand angewendet werden.

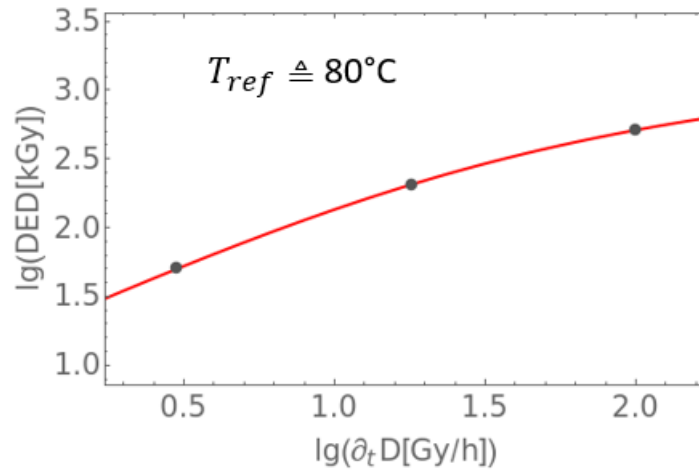


Abb. 4.18 Fit zur Bestimmung der konstanten Parameter t_m , k und x in der Funktion zur Berechnung des **lg DED**-Werts aus Gleichung (3.48)

Die Datensätze werden sodann in doppelt logarithmische Datensätze umgerechnet ($\lg DED - \lg \dot{D}$), welche durch die Funktion (3.48) beschrieben werden. Nun wird die niedrigste Temperatur, bei der Daten aufgenommen wurden, als Referenztemperatur ϑ_{ref} festgelegt, so dass im vorliegenden Fall $\vartheta_{ref} = 80^\circ\text{C}$ gilt. Dies entspricht in Kelvin einer Referenztemperatur von $T_{ref} = \vartheta_{ref} + 273,15\text{ K} = 353,15\text{ K}$. Bei der Referenztemperatur T_{ref} gilt für die Verschiebung $\lg \alpha'(T)$ in der Funktion (3.48) nach Gleichung (3.44): $\lg(\alpha'(T_{ref})) = \lg(1) = 0$. Damit folgt aus (3.48):

$$\lg DED = \lg t_m + \lg \dot{D} - \lg \left(1 + k \cdot (10^{\lg \dot{D}})^x \right). \quad (4.8)$$

Der Datensatz, der bei der Referenztemperatur $\vartheta_{ref} = 80^\circ\text{C}$ aufgenommen wurde, weist folglich keine Verschiebung auf und kann über die Funktion (4.8) beschrieben werden, so dass die Parameter t_m , k und x über einen Fit des Datensatzes mit der Funktion (4.8) zu bestimmen sind. Da die Parameter nicht von der Temperatur T abhängen, können sie als konstant betrachtet und später in Gleichung (3.48) verwendet werden. Der Fit ist in Abb. 4.18 dargestellt. Es fällt auf, dass nur drei Datenpunkte vorhanden sind, um die drei Parameter t_m , k und x zu ermitteln. Dies reicht nicht aus, weshalb die Parameteranzahl zu reduzieren ist, indem die Parameter t_m und k über den Parameter x ausgedrückt werden. Dabei erhält man für den Parameter t_m die folgende Gleichung:

$$t_m = \frac{DED_1}{\dot{D}_1} + DED_1 \cdot \dot{D}_1^{x-1} \cdot \frac{\dot{D}_2 \cdot DED_1 - \dot{D}_1 \cdot DED_2}{\dot{D}_1 \cdot \dot{D}_2^x \cdot DED_2 - \dot{D}_2 \cdot \dot{D}_1^x \cdot DED_1}. \quad (4.9)$$

Und für den Parameter k :

$$k = \frac{\dot{D}_2 \cdot DED_1 - \dot{D}_1 \cdot DED_2}{\dot{D}_1 \cdot \dot{D}_2^x \cdot DED_2 - \dot{D}_2 \cdot \dot{D}_1^x \cdot DED_1}. \quad (4.10)$$

Die Herleitung der Gleichungen (4.9) und (4.10) befindet sich im Anhang A.3. Darin sind DED_1 der erste und DED_2 der zweite DED -Wert aus dem Datensatz, während $\dot{D}_1$ und $\dot{D}_2$ die zugehörigen Dosisraten sind. Aus dem Fit ergibt sich für x der folgende Wert: $x = 0,804$. Durch Einsetzen in die Gleichungen (4.9) und (4.10) erhält man daraus: $t_m = 19,462 \text{ h}$ und $k = 0,069$.

Sollte sich der Datensatz nicht richtig fitten lassen (z. B. wenn man für den Zeit-Parameter t_m einen negativen Wert erhält), dann wurden entweder ungeeignete Datensätze verwendet, oder das Superposition II-Verfahren ist auf das Alterungsverhalten des zu untersuchenden Materials nicht anwendbar.

Anschließend werden die übrigen Datensätze, die bei Temperaturen von 90 °C und 100 °C aufgenommen wurden, mit der Funktion (3.48) unter Verwendung der erhaltenen Parameter gefittet. Dabei werden die Werte $\lg(\alpha'(T))$ bestimmt, um die die Fitgraphen gegenüber dem Graphen bei der Referenztemperatur von 80 °C verschoben sind. Die Fitgraphen sind in Abb. 4.19 a) dargestellt, wobei zusätzlich der Graph bei der Referenztemperatur $\vartheta_{ref} = 80 \text{ °C}$ zum Vergleich eingezeichnet wurde.

Trägt man die Verschiebungen $\lg(\alpha'(T))$ anschließend über den reziproken Temperaturwert $1000/T$ auf, so erhält man eine Gerade mit negativer Steigung, die mit der Geradengleichung $y = -a_0 \cdot x + a_1$ zu fitten ist. Darin sind a_0 und a_1 die Fitparameter, wobei a_0 den Betrag der Steigung m ($a_0 = -m$) und a_1 den y -AchsenAbschnitt angeben. Der Fitgraph ist in Abb. 4.19 b) zu sehen. Wenn die Daten nicht richtig gefittet werden können, dann ist das ein Hinweis darauf, dass das Superposition II-Verfahren nicht anwendbar ist.

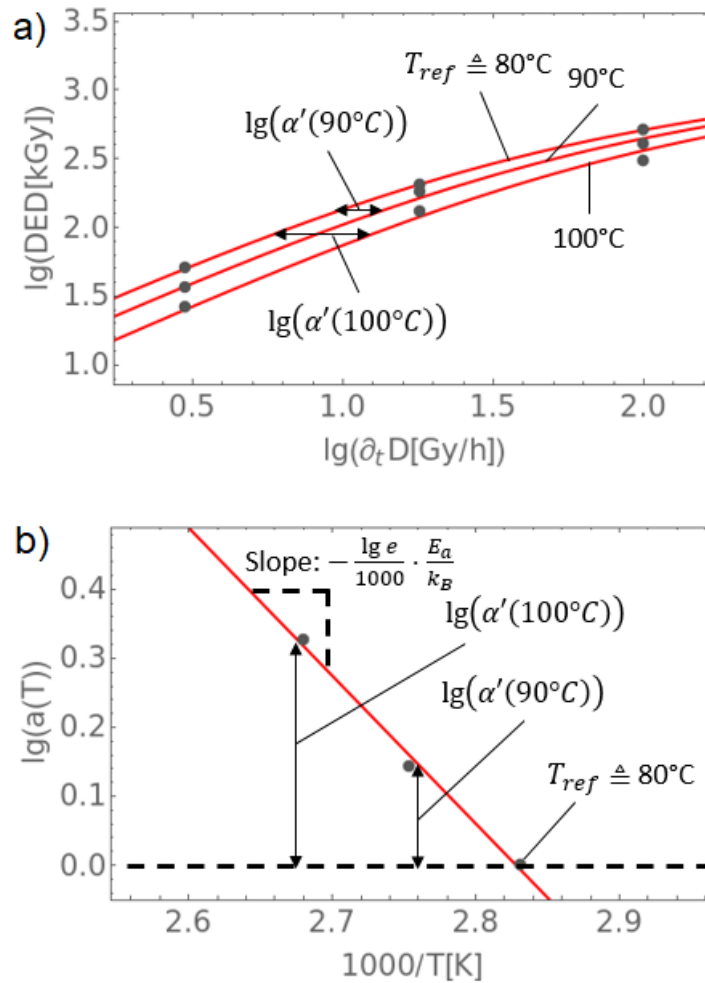


Abb. 4.19 Bestimmung der Aktivierungsenergie E_a :

Teil a) zeigt die Bestimmung der Verschiebungen $\lg(\alpha'(T))$ durch Fits. In Teil b) werden die Verschiebungen über den reziproken Temperaturwert $1000/T$ aufgetragen. Dabei erhält man eine Gerade, aus deren Steigung E_a berechnet werden kann.

Durch Einsetzen von $m = -a_0$ in Gleichung (3.50) kann schließlich die Aktivierungsenergie E_a berechnet werden. Ihr Fehler ΔE_a ergibt sich aus dem Parameterfehler Δa_0 und der Gaußschen Fehlerfortpflanzung. Man erhält im vorliegenden Fall für das Polymer FR-XLPE die folgenden Werte:

$$a_0 = 2,147 \pm 0,186 \quad \text{und daraus} \quad E_a = (0,426 \pm 0,037) \text{eV}.$$

Die zuvor bestimmten Verschiebungen $\lg(\alpha'(T))$ können nun aus den Datensätzen bei 90°C und 100°C entfernt werden.

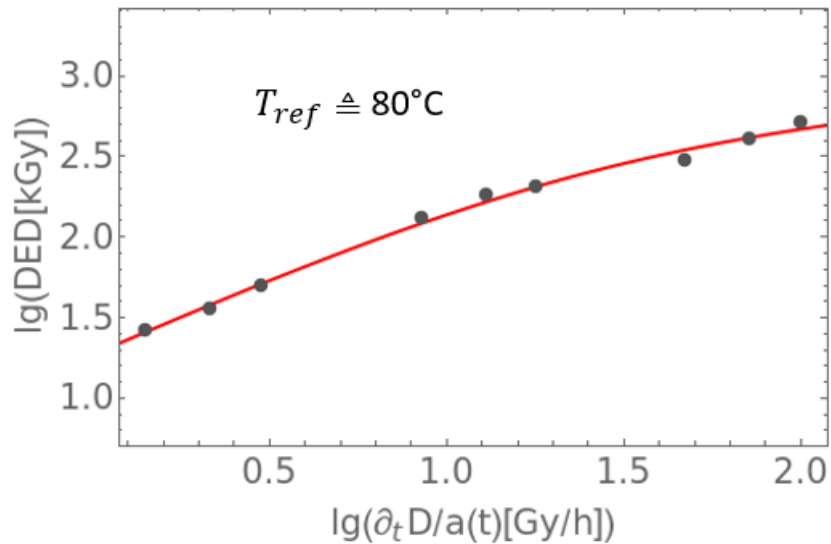


Abb. 4.20 Bestimmung der Parameter k und x durch Überlagerung der **DED**-Daten, indem die Verschiebungen entfernt werden und anschließendem Fit.

Dadurch erhält man zwei Datensätze, die jeweils einem Datensatz bei der Referenztemperatur $\vartheta_{ref} = 80^\circ\text{C}$ entsprechen. Sie können daher mit dem Datensatz, der ursprünglich bei der Referenztemperatur aufgenommen worden war, zu einem deutlich umfangreicheren Datensatz kombiniert werden, der aus $3 \times 3 = 9$ Datenpunkten besteht.

Dieses Vorgehen wird als Überlagerung oder Superposition bezeichnet. Der Datensatz ist in Abb. 4.20 zu sehen. Er ermöglicht es alle drei Parameter t_m , k und x direkt über einen Fit mit der Funktion (4.8) zu bestimmen, wodurch man deutlich genauere Ergebnisse erhält. Für das hier vorliegende Polymer FR-XLPE ergeben sich schließlich die Werte $t_m = (19,622 \pm 1,891)h$, $k = 0,057 \pm 0,004$ und $x = 0,874 \pm 0,140$. Für die Berechnung der Lebensdauer werden nur die Parameter k und x benötigt.

Der Parameter t_m ist jedoch für die erfolgreiche Durchführung des Fits erforderlich. Die Berechnung der Lebensdauer, die Bestimmung der dazu erforderlichen Parameter und die Darstellung der Ergebnisse erfolgt auf die gleiche Weise wie das für das Superposition I-Verfahren im letzten Abschnitt beschrieben wurde. Dieser Teil wird daher hier nicht wiederholt.

5 Verifikation der Rechenmodelle

In Kapitel 4 wurde gezeigt, wie die Rechenmodelle zur Bestimmung der Lebensdauer von Kabeln über Mathematica-Notebooks realisiert wurden. Dabei bleibt jedoch unklar, ob die dabei erhaltenen Ergebnisse für die Lebensdauer realistisch sind. Um die Umsetzung der Modelle abschließend zu verifizieren, werden Daten aus Experimenten benötigt. Bezüglich der Ergebnisse des Projekts „Team Cables“ (siehe Kapitel 2) hat sich gezeigt, dass kein freier Internetzugang zum Rechenmodell besteht, sondern dass dieser käuflich erworben werden muss. Die öffentlich zugänglichen Dokumente des IAEA-Projekts International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL) (siehe Kapitel 2) zum Alterungsmanagement von Komponenten in kerntechnischen Anlagen sind zu allgemein gehalten. Für die vollständige Verifikation der Rechenmodelle, konnten jedoch die Daten aus dem Bericht SAND 2010-7266 /SAN 10/ der Sandia National Laboratories der USA verwendet werden.

Diese Daten betreffen die Polymere Okonit-Neopren, Brandrex Cross-linked Polyolefin (CLPO) und Rockbestos Neopren. Da der Bericht /SAN 10/ Daten zur thermischen, radiologischen, sowie zur kombinierten thermischen und radiologischen Alterung enthält, reicht er aus, um die Rechenmodelle vollständig zu verifizieren. Im Sandia-Bericht wird die qualifizierte Lebensdauer von Kabeln nicht nur anhand von Messwerten ermittelt, sondern es werden auch die Ergebnisse eines Alterungsmodells vorgestellt, das von den Sandia National Laboratories entwickelt wurde. Dies bietet die Möglichkeit die Rechenmodelle sowohl über Messdaten zu testen als auch mit den Ergebnissen eines anderen, unabhängigen Alterungsmodells zu vergleichen.

Da der Bericht /SAN 10/ andere Ziele verfolgt als das hier beschriebene Kabelalterungsprojekt, lagen die Daten in /SAN 10/ nicht immer in der Weise vor, für die die Mathematica-Notebooks konzipiert wurden. Die Datenauswertung musste daher an die vorliegenden Daten in /SAN 10/ angepasst werden.

5.1

Verifikation des Arrhenius-Modells für die thermische Alterung

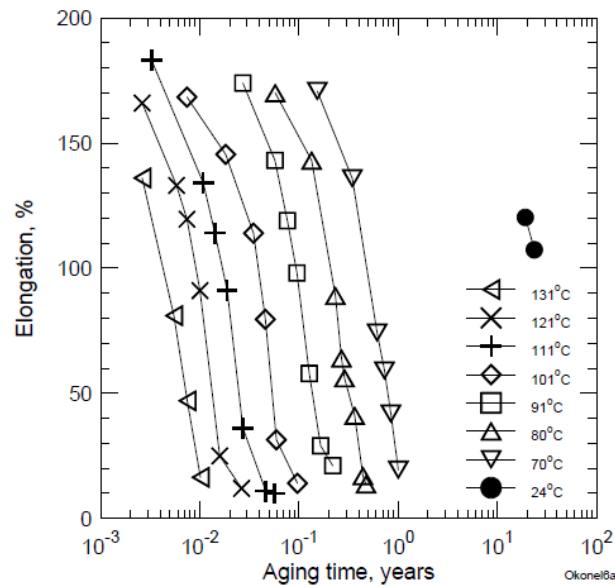


Abb. 5.1 Reißdehnung über die Alterungszeit aufgetragen für das Polymer Okenit-Neopren.

Übernommen von Figur 1 aus /SAN 10/

Zur Überprüfung des Modells wurden die im Sandia-Bericht angegebenen Daten für das Material Okenit-Neopren verwendet. Im Bericht wird auf Seite 11 das in Abb. 5.1 dargestellte Diagramm angegeben, in dem die Reißdehnung (engl. Elongation at Break EAB) über die Alterungszeit bei verschiedenen Temperaturen (siehe Legende) aufgetragen ist. Für die Bestimmung der Aktivierungsenergie E_a werden drei Datensätze aus Abb. 5.1 verwendet, die für die folgenden drei Temperaturen gemessen wurden: 91 °C, 101 °C und 111 °C. Die anderen Datensätze für 70 °C, 80 °C, 121 °C und 131 °C werden verwendet, um zu überprüfen, ob das Rechenmodell ordnungsgemäß funktioniert. Die Daten bei 24 °C sind für den Validierungsprozess nicht verwendbar, da nicht genügend Datenpunkte vorhanden sind. Als Akzeptanzkriterium wurde EAB = 50 % festgelegt. Davon ausgehend und mithilfe der Daten aus Abb. 5.1 wurde die Lebensdauer in Abhängigkeit von der Temperatur extrahiert, was in Abb. 5.2 zu sehen ist. Der entsprechende Datensatz wird in Tab. 5.1 angegeben.

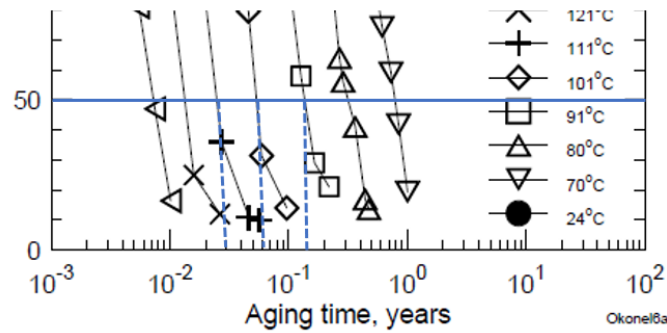


Abb. 5.2 Bestimmung der Lebensdauer anhand des Akzeptanzkriteriums von EAB = 50 %.

Übernommen von Figur 1 aus /SAN 10/ und angepasst

Tab. 5.1 Datensatz für die Abhängigkeit der Lebensdauer t_E in Jahren a von der Temperatur in °C bei einem Akzeptanzkriterium von EAB = 50 %.

Temperatur (°C)	t_E (a)
91	0,15
101	0,06
111	0,03

Mithilfe der Datenpunkte ist es nun möglich den Logarithmus der Zeit $\lg t_E$ über dem reziproken Temperaturwert $1000/T_E$ aufzutragen und so die Arrhenius-Gerade darzustellen. Im Sandia-Bericht /SAN 10/ befindet sich ein Plot, der die Datenpunkte der Arrhenius-Geraden von Okenit-Neopren zusammen mit denen anderer Polymere enthält. Der Plot ist in Abb. 5.3 Teil a) zu sehen. Dabei fällt auf, dass die Zeit t_E nicht in Jahren a angegeben wird, wie das in Abb. 5.2 der Fall ist, sondern in Tagen d. Dies musste bei der Berechnung der Zeitlogarithmen aus den Zeitangaben aus Tab. 5.1 berücksichtigt werden. Um den logarithmischen Wert der Zeit in Tagen aus der Zeit in Jahren zu bestimmen, wurden die folgenden Gleichungen verwendet:

$$t[a] = t \left[\frac{d}{365} \right] \Rightarrow \lg(t[a]) = \lg \left(t \left[\frac{d}{365} \right] \right) \Rightarrow \lg(t[a]) = \lg(t[d]) - \lg(365).$$

Durch Umstellen erhält man daraus schließlich die Berechnung der Zeitlogarithmen in Tagen:

$$\lg(t[d]) = \lg(t[a]) + \lg(365).$$

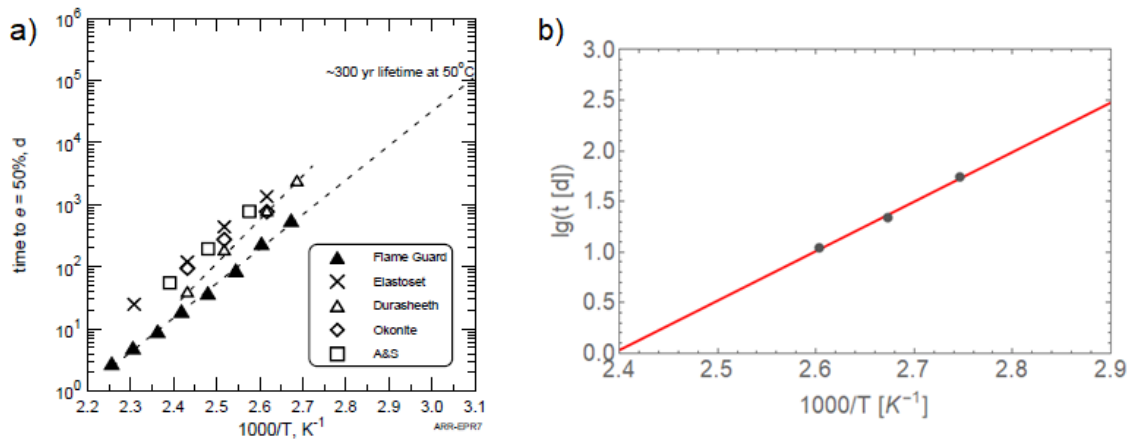


Abb. 5.3 Arrhenius-Diagramme:

a) für verschiedene Polymere, darunter Okenit-Neopren, übernommen von Figur 29 aus /SAN 10/. b) Fit der Arrhenius-Geraden für Okenit-Neopren mithilfe der Daten, die aus Abb. 5.2 Bestimmung der Lebensdauer anhand des Akzeptanzkriteriums von EAB = 50 % gewonnen wurden.

Um den reziproken Temperaturwert mit der Temperatur in Kelvin K zu bestimmen, wurde die folgende Gleichung verwendet: $\frac{1000}{\vartheta_E + 273.15 K}$. Darin ist ϑ_E die gegebene Temperatur in °C. Nachdem die Daten transformiert worden sind, wurden sie mit der Geradengleichung $\lg(t) = a_1 + a_0 \cdot 1000/T$ gefittet. In dieser Gleichung sind a_0 und a_1 die zu bestimmenden Fitparameter. Der Fitgraph ist in Abb. 5.3 Teil b) zu sehen.

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a_0	4.89376	0.315829	15.495	0.0410287
a_1	-11.7132	0.844727	-13.8662	0.0458323

Abb. 5.4 Ergebnisse für die Fitparameter aus dem Fit in Abb. 5.3 b)

Die Ergebnisse für die Fitparameter a_0 und a_1 sind in Abb. 5.4 zu sehen. Dabei ist a_0 die Steigung der Arrhenius-Geraden. Mithilfe von Gleichung (3.10) (wobei zu beachten ist, dass in Abb. 5.3 $\lg(t_E)$ anstelle des natürlichen Logarithmus $\ln(t_E)$ verwendet wird und daher Gleichung (3.10) zusätzlich durch $\lg(e)$ geteilt werden muss) und Abb. 5.4 können nun die Aktivierungsenergie E_a und ihren Fehler ΔE_a bestimmt werden. Die Boltzmann-Konstante ist durch $k_B = 0.000086173$ eV/K gegeben:

$$E_a = \frac{4.89376 \cdot 1000 \cdot 0.000086173}{\lg(e)} \text{ eV} = 0.971023 \text{ eV}$$

$$\Delta E_a = \frac{0.315829 \cdot 1000 \cdot 0.000086173}{\lg(e)} \text{ eV} = 0.062667 \text{ eV}$$

Nun können E_a und ΔE_a von eV in kJ/mol umgerechnet werden, um sie mit den Daten aus dem Sandia-Bericht zu vergleichen:

$$E_a = 0.971023 \cdot 96.485307 \text{ kJ/mol} = 93.6894 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta E_a = 0.062667 \cdot 96.485307 \text{ kJ/mol} = 6.0644 \text{ kJ/mol}$$

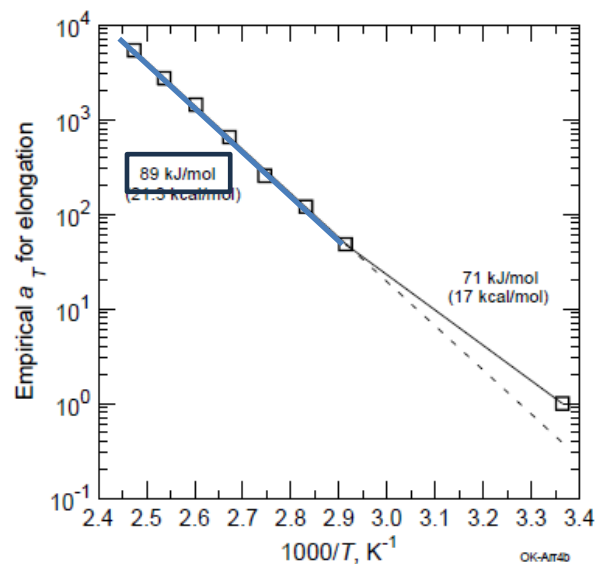


Abb. 5.5 Plot der temperaturabhängigen Verschiebungen ohne Strahlung für Okenit-Neopren aus dem Superpositionsverfahren

Abbildung übernommen von Figur 3 aus /SAN 10/ und angepasst

Es ist also $E_a = (93.6894 \pm 6.0644) \text{ kJ/mol}$. Im Sandia-Bericht /SAN 10/ findet sich eine Grafik, die in Abb. 5.5 zu sehen ist und die die temperaturabhängigen Verschiebungen ohne Strahlung für Okenit-Neopren aus dem Superpositionsverfahren angibt. Zusätzlich ist der Wert der Aktivierungsenergie von 89 kJ/mol angegeben, der über das Superpositionsverfahren und nicht über die hier diskutierte Methode ermittelt wurde.

Dennoch korreliert die oben ermittelte Aktivierungsenergie mit diesem Wert und liegt innerhalb des Fehlerbereichs. Dieses Ergebnis bestätigt die Methode zur Bestimmung der Aktivierungsenergie im Rahmen des thermischen Alterungsmodells.

5.1.1 Überprüfung der Lebensdauer anhand gemessener Daten

Da der Wert für die Aktivierungsenergie korrekt berechnet wurde, wurde im Folgenden das Ergebnis für die Lebensdauer, aufgetragen über die Einsatztemperatur, überprüft. Dazu wurde die Gleichung (3.7) verwendet, um die Modellvorhersage aufzutragen, was in Abb. 5.6 zu sehen ist. Um diese zu überprüfen, wurden alle in Abb. 5.2 zur Verfügung stehenden Datenpunkte verwendet. Alle Messdaten (außer bei einer Temperatur von 24 °C) wurden extrahiert und sind in Tab. 5.2 angegeben. Sie wurden in Abb. 5.6 als schwarze Datenpunkte eingetragen, um die Genauigkeit des Rechenmodells zu überprüfen.

Um die Lebensdauer in Mathematica berechnen und auftragen zu können, mussten in das Rechenmodell mehrere feste Parameter eingegeben werden. Ausgenommen davon ist die Einsatztemperatur T_E , die als Funktionsvariable in die Berechnungen eingeht. Das Modell ist so aufgebaut, dass es die Temperatur T_E , den Temperaturindex als ein Zeit-Temperatur-Wertepaar, bei dem das Akzeptanzkriterium erreicht (t_I, T_I) und die Aktivierungsenergie E_a benötigt wird. Das Modell stellt die Lebensdauer über der Temperatur graphisch dar (siehe Abb. 5.6).

Tab. 5.2 Vollständiger Datensatz für die Abhängigkeit der Lebensdauer t_E in Jahren a von der Temperatur in °C

Hier bei einem Akzeptanzkriterium von EAB = 50%

Temperatur (°C)	t_E (a)
70	0,9
80	0,35
91	0,15
101	0,06
111	0,03
121	0,015
131	0,007

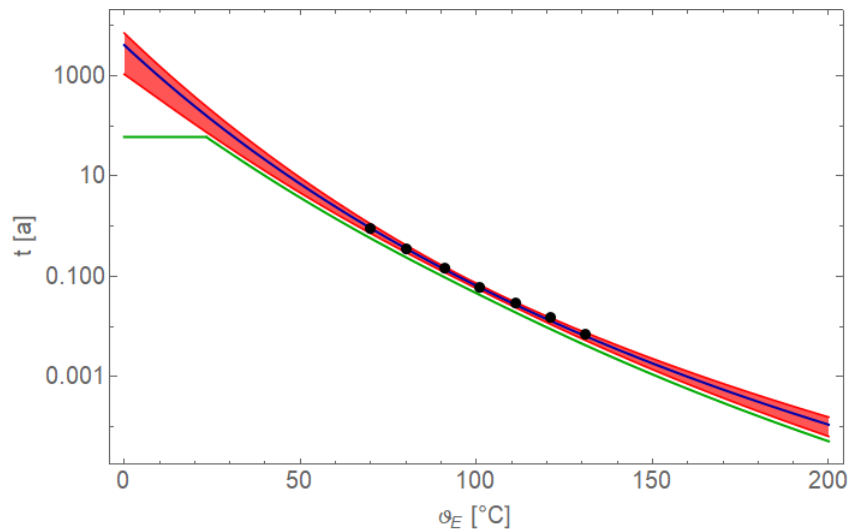


Abb. 5.6 Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in $^{\circ}\text{C}$

Die Graphen sind das Ergebnis aus dem hier vorgestellten Rechenmodell und die schwarzen Punkte sind die Messdaten aus dem Sandia-Bericht /SAN 10/

Für den Wert des Zeit-Temperatur-Index (t_I, T_I) wurde der mittlere der Datenpunkte (0,06 a, 101 $^{\circ}\text{C}$) verwendet. Die Vorhersage des Rechenmodells konnte überprüft werden, indem die anderen Datenpunkte, die auf beiden Seiten dieses Wertes liegen, direkt auf die aus dem Modell erhaltenen Ergebniskurven auftragen wurden. Indem der mittlere Datenpunkte als Referenz verwendet wurde, wurde sichergestellt, dass der Fehler des Modells, der durch die Gaußsche Fehlerfortpflanzung gegeben ist, an diesem Punkt am kleinsten ist. Der Fehler wird rechts und links von diesem Datenpunkt entsprechend größer (siehe rotes Fehlerband in Abb. 5.6). Wäre dagegen der äußerste, rechte Datenpunkt als Referenz verwendet worden, dann wäre der Fehler am äußersten linken Datenpunkt größer. Dies würde die Chance erhöhen, dass der äußerste linke Datenpunkt innerhalb des Fehlerbands liegt, was zu einem optimistischeren Ergebnis führen würde. Dasselbe gilt, wenn der äußerste linke Datenpunkt als Referenz verwendet worden wäre. Aus diesem Grund wurde der mittlere Datenpunkt als Referenz verwendet.

In Abb. 5.6 sind verschiedene Informationen dargestellt. Die blaue Kurve stellt die qualifizierte Lebensdauer t_E gemäß dem thermischen Alterungsmodell dar und wurde mit Gleichung (3.7) berechnet. Das rote Band stellt den mit diesem Modell verbundenen Fehler dar (Fehlerband). Er wird mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnet. Schließlich gibt die grüne Kurve die nutzbare Lebensdauer t_N wieder. Die Information, die aus Abb. 5.6 entnommen werden kann, ist, dass alle Messdaten (schwarze Punkte) perfekt zum Modell und seinem Fehlerband passen.

Tatsächlich liegen die meisten Datenpunkte direkt auf dem blauen Graphen und die anderen innerhalb des roten Fehlerbands. Somit liegen alle Datenpunkte über der grünen Kurve, die die Sicherheitsgrenze des Modells darstellt und unter die die Datenpunkte nicht fallen sollten.

5.1.2 Überprüfung der Lebensdauer unter Verwendung von Modelldaten aus dem Sandia-Bericht

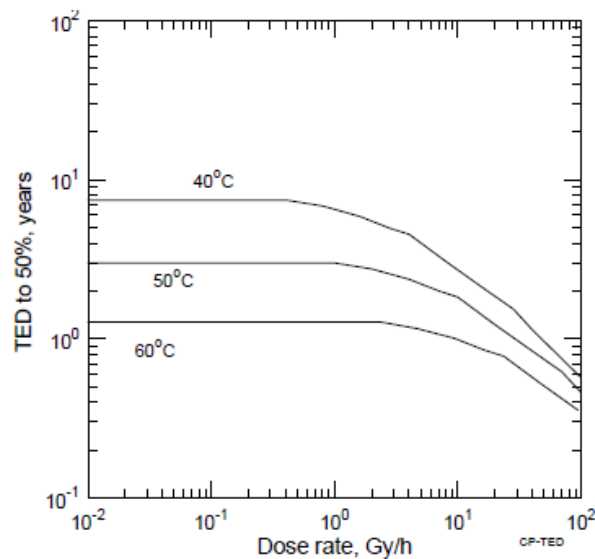


Abb. 5.7 Modellvorhersage des Sandia-Berichts für die Dauer ($TED = t_E$) bis zum Erreichen des Akzeptanzkriteriums (50% EAB)

Hier für Okenit-Neopren für verschiedene Temperaturen in °C über die Dosisrate Gy/h .
Übernommen von Figur 42 aus /SAN 10/

Um das hier entwickelte Rechenmodell mit dem im Sandia-Bericht verwendeten Modell zu vergleichen, wurde die Grafik auf Seite 45 des Sandia-Berichts verwendet, die in Abb. 5.7 dargestellt ist. Bei sehr niedrigen Dosisraten ist davon auszugehen, dass nur thermische Alterung stattfindet. An dieser Stelle wird die Hypothese aufgestellt, dass bei 10^{-2} Gy/h die Dosisleistung ausreichend niedrig ist und das Modell als rein thermisches Alterungsmodell betrachtet werden kann. Mithilfe dieser Hypothese wurden aus Abb. 5.7 die drei t_E -Werte bei 10^{-2} Gy/h für 40 °C, 50 °C und 60 °C abgelesen, die in Tab. 5.3 dargestellt sind.

Tab. 5.3 Datenpunkte des Modells des Sandia-Berichts aus Abb. 5.7 bei der festen, minimalen Dosisrate von 10^{-2} Gy/h .

Temperatur (°C)	t_E (a)
40	7,5
50	3
60	1,1

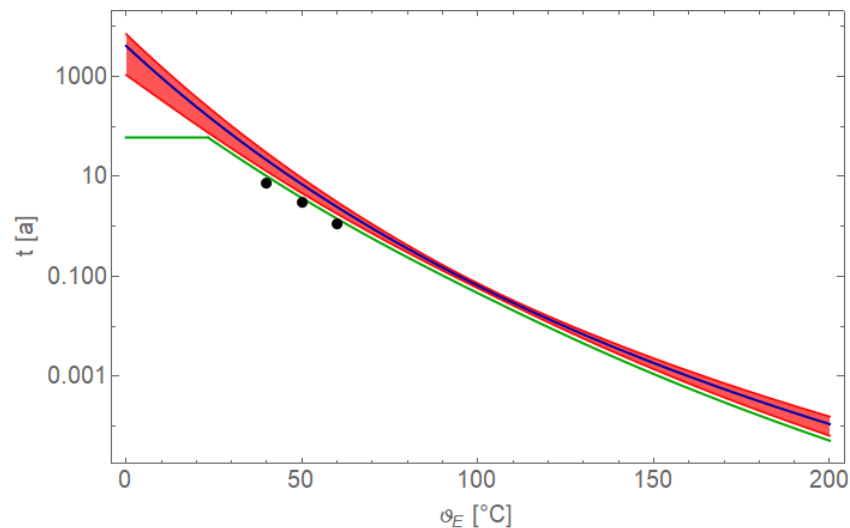


Abb. 5.8 Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C

Die Graphen sind das Ergebnis aus dem hier vorgestellten Rechenmodell und die schwarzen Punkte sind die Modelldaten aus dem Sandia-Bericht /SAN 10/

Um das hier entwickelte Rechenmodell mit dem Modell aus dem Sandia-Bericht zu vergleichen, wurden einfach die drei Datenpunkte aus Tab. 5.3 in den Ergebnis-Graphen des Rechenmodells eingetragen, was in Abb. 5.8 zu sehen ist (schwarze Punkte). Man erkennt, dass die Daten des Sandia-Modells nicht mit dem hier entwickelten Rechenmodell und dessen Grenzen übereinstimmen, da alle Datenpunkte unterhalb der grünen Kurve des Rechenmodells liegen. Der Grund dafür ist offenbar, dass die aufgestellte Hypothese falsch ist. Die Dosisrate von 10^{-2} Gy/h ist nicht klein genug, um das Modell nur als thermisches Alterungsmodell zu betrachten. Das bedeutet, dass es im Sandia-Modell immer noch radiologische Effekte gibt, die die Lebensdauer des Materials zusätzlich reduzieren. Folglich führt die Vorhersage der Lebensdauer des Modells aus dem Sandia-Bericht aufgrund der zusätzlichen radiologischen Alterungseffekte zu kleineren Werten.

Dies bedeutet jedoch nicht, dass das hier entwickelte Rechenmodell nicht ordnungsgemäß funktioniert.

Es bedeutet nur, dass mit den zur Verfügung stehenden Daten die Ergebnisse für die Lebensdauer in Abhängigkeit von der Temperatur zwischen dem Sandia-Modell und dem hier entwickelten Rechenmodell nicht direkt verglichen werden können. Dass das thermische Rechenmodell für die Kabelalterung korrekte Vorhersagen liefert, konnte im letzten UnterAbschnitt 5.1.1 anhand realer Messdaten verifiziert werden.

5.2 Verifikation des Potenzgesetzes für die radiologische Alterung

Zur Überprüfung des radiologischen Alterungsmodells mussten Daten zu zwei verschiedenen Materialien aus dem Sandia-Bericht verwendet werden. Zunächst wurden Messdaten des Materials Brandrex CLPO und anschließend Daten aus dem Sandia-Alterungsmodell zum Material Rockbestos Neopren verwendet.

5.2.1 Verwendung von Messdaten zum Polymer Brandrex CLPO

Im Sandia-Bericht /SAN 10/ finden sich verschiedene Informationen, mit denen das radiologische Alterungsmodell überprüft werden kann. Um den Dosisleistungseffektexponenten n zu bestimmen, müssen, wie oben in Kapitel 3.2 des radiologischen Alterungsmodells beschrieben, $DED-\dot{D}$ -Messdaten doppelt logarithmisch aufgezeichnet werden. Im Sandia-Bericht findet man dazu für das Material Brandrex CLPO die Grafik, die in Abb. 5.9 zu sehen ist. Diese Daten wurden dann auf eine Referenztemperatur von 50 °C verschoben, was wiederum in Abb. 5.10 dargestellt ist. Das Ziel in diesem ersten Teil besteht darin, aus den Informationen, die im Sandia-Bericht enthalten sind, ein ähnliches Ergebnis wie in Abb. 5.10 zu finden, indem das Superposition I-Verfahren für zeitabhängige Daten in Kombination mit Abb. 5.11 aus dem Sandia-Bericht verwendet wird. Die Abb. 5.11 zeigt die zeitabhängige Änderung der Reißdehnung (engl. Elongation at Break EAB) bei rein thermischer Alterung ($\dot{D} = 0$). Im Folgenden werden die Verschiebungen zwischen den Kurven in Abb. 5.11 bestimmt. Dazu muss zuerst die zeitabhängige Funktion $G(t)$ der alterungssensitiven, physikalischen Größe (EAB) bestimmt werden. Dazu wurden mehrere Datenpunkte des linearen Teils der Kurve bei 109 °C extrahiert. Diese Datenpunkte sind in Abb. 5.12 zu sehen. Man erkennt, dass die Datenpunkte eine Gerade beschreiben.

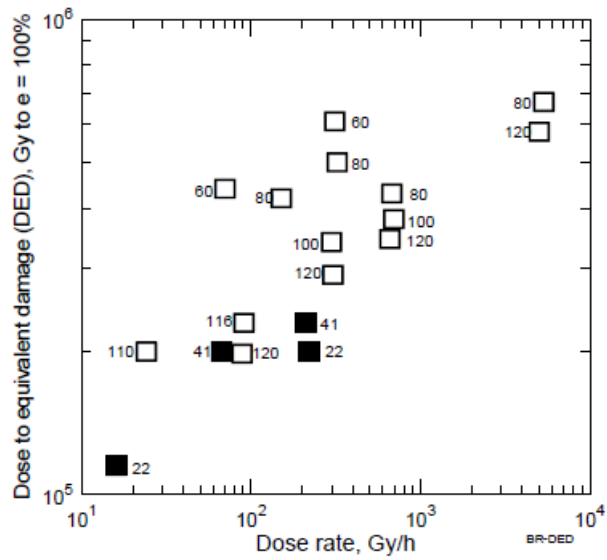


Abb. 5.9 *DED*-Messwerte in Gy aufgetragen über die Dosisrate in Gy/h für verschiedenen Temperaturen

Hier die neben den Datenpunkten stehende Zahlen in °C für Brandrex CLPO. Übernommen von Figur 56 aus /SAN 10/

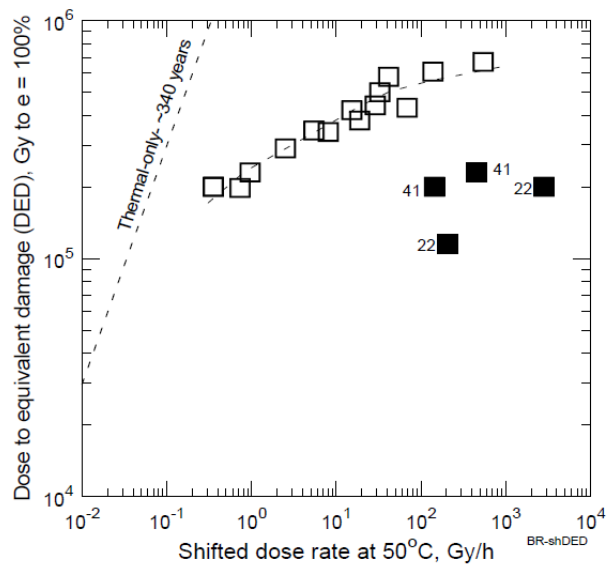


Abb. 5.10 Verschobene *DED*-Messwerte in Gy aufgetragen über die Dosisrate in Gy/h für eine Referenztemperatur von 50 °C

Hier für Brandrex CLPO. Übernommen von Figur 57 aus /SAN 10/

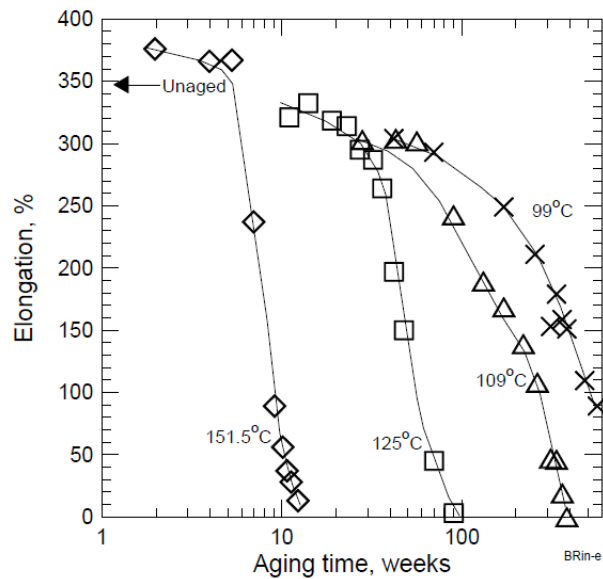


Abb. 5.11 Reißdehnung EAB über die Alterungszeit in Wochen

Hier: Aufgetragen für das Polymer Brandrex CLPO bei verschiedenen Temperaturen in °C.
Übernommen von Figur 31 aus /SAN 10/

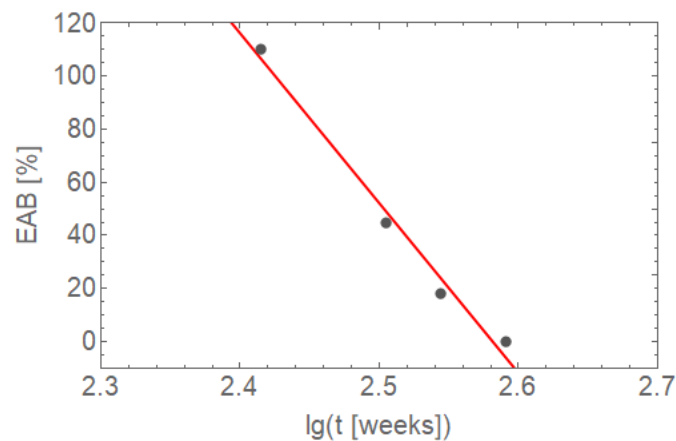


Abb. 5.12 EAB-Wert aufgetragen über den Logarithmus der Zeit in Wochen

Hier bei 109 °C mit zugehörigem Fit für das Polymer Brandrex CLPO

Daher ist zu schlussfolgern, dass die Funktion $G(t)$ die folgende Form annimmt:
 $G = a_0 - a_1 \cdot \lg t$. Darin sind a_0 und a_1 die über einen Fit der Datenpunkte zu bestimmenden Parameter. Der Fitgraph ist in Abb. 5.12 rot eingezeichnet.

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a_0	1652.78	138.046	11.9727	0.00690402
a_1	640.266	54.897	11.663	0.00727142

Abb. 5.13 Ergebnisse für die Fitparameter aus dem Fit in Abb. 5.12

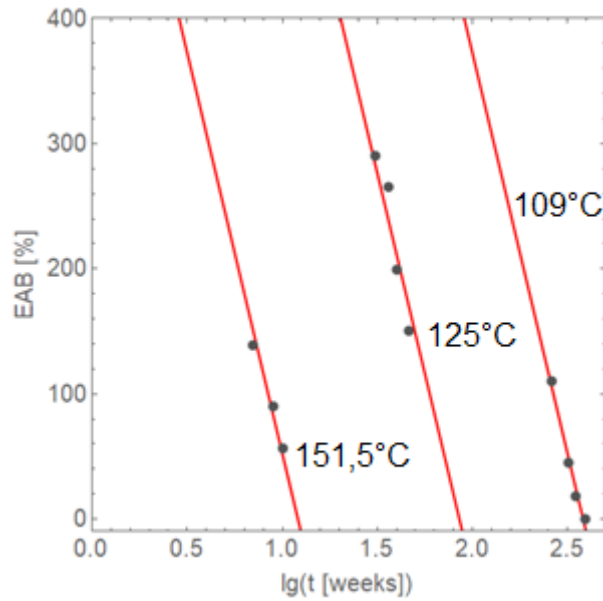


Abb. 5.14 EAB-Wert aufgetragen über den Logarithmus der Zeit in Wochen

Hier bei 109 °C, 125 °C und 151,5 °C jeweils mit zugehörigem Fit für das Polymer Brandrex CLPO

Mithilfe der Fit-Funktion von Mathematica konnten die Werte und Fehler der Parameter a_0 und a_1 bestimmt werden (siehe Abb. 5.13). Da die Parameter der Funktion $G(t)$ nun bekannt sind, können die Verschiebungen der verschiedenen Kurven in Abb. 5.11 gegenüber der Kurve bei der Referenztemperatur von 109 °C bestimmt werden. Wie bei der Kurve bei 109 °C, wurden auch einige Punkte des linearen Teils der Kurven bei 125 °C und 151,5 °C abgelesen (siehe Abb. 5.14). Gemäß des Superposition I-Verfahrens werden die Datenpunkte über die Funktion $G = a_0 - a_1 \cdot (\lg t + \lg (\alpha(T, \dot{D} = 0)))$ beschrieben mit der Verschiebung $\lg (\alpha(T, \dot{D} = 0))$ des jeweiligen Graphen bei gegebener Temperatur T . Es gilt $\dot{D} = 0$, da die Messungen ohne Bestrahlung vorgenommen wurden. Mithilfe der gefitteten Datensätze, welche in Abb. 5.14 als rote Graphen dargestellt sind, war es dann möglich die Verschiebungen $\lg (\alpha(T, \dot{D} = 0))$ zu bestimmen. Diese wurden anschließend über den Kehrwert der Temperatur $1000/T$ aufgetragen (siehe Abb. 5.15 und beschreiben eine Gerade mit negativer Steigung m . Die Steigung m und ihr Fehler Δm wurden wiederum über einen Fit bestimmt, man erhält: $m = -5,701 \pm 0,21$. Mithilfe der Gleichung (3.43) kann dann die Aktivierungsenergie E_a wie folgt berechnet werden:

$$E_a = - \frac{m \cdot 1000 \cdot k_B}{\lg(e)} = - \frac{-5,701 \cdot 1000 \cdot 0,000086173}{\lg(e)} eV = 1,131 eV.$$

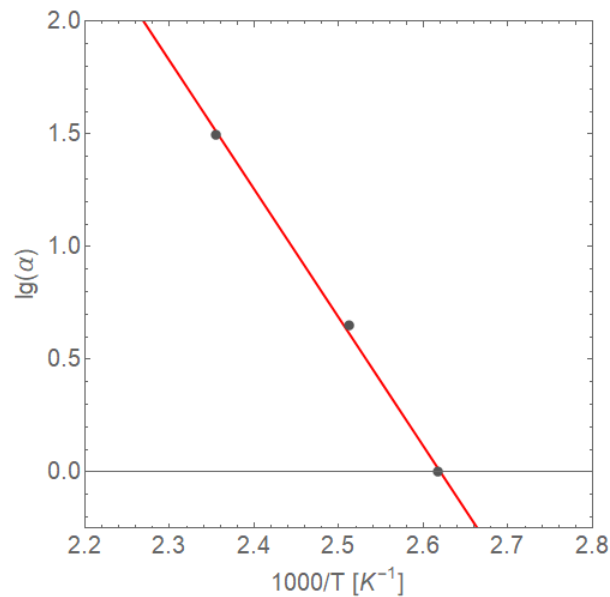


Abb. 5.15 Verschiebungen $\lg \alpha$ aufgetragen über den reziproken Temperaturwert $1000/T$ für Brandrex CLPO

Ihr Fehler ergibt sich aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung:

$$\Delta E_a = \frac{\Delta m \cdot 1000 \cdot k_B}{\lg(e)} = \frac{0,21 \cdot 1000 \cdot 0,000086173}{\lg(e)} eV = 0,042 eV.$$

Um die Aktivierungsenergie in kJ/mol zu erhalten, muss die folgende Umrechnung durchgeführt werden:

$$E_a = 1,131 \cdot 96,485 kJ/mol = 109,15 kJ/mol$$

$$\Delta E_a = 0,042 \cdot 96,485 kJ/mol = 4,021 kJ/mol.$$

Man erhält somit für die Aktivierungsenergie: $E_a = (109,15 \pm 4,02) kJ/mol$. Damit können die Daten in Abb. 5.9 auf eine Temperatur von 50 °C verschoben werden. Dazu ist der Umstand zu nutzen, dass in Bezug auf die Gleichungen (3.25) und (3.44) ohne Strahlung ($\dot{D} = 0$) die Verschiebungsfaktoren $\alpha(T, \dot{D})$ und $\alpha'(T)$ gleich sind: $\alpha(T, \dot{D} = 0) = \alpha'(T)$. Das bedeutet, dass auch die entsprechenden Verschiebungen gleich sind $\lg(\alpha(T, \dot{D} = 0)) = \lg(\alpha'(T))$, da sie dieselbe Aktivierungsenergie E_a als Parameter besitzen. Dies ermöglicht, vom Superposition I-Verfahren zum Superposition II-Verfahren zu wechseln, indem der Verschiebungsfaktor $\alpha'(T)$ für die Verschiebung der Daten auf 50 °C mithilfe der oben bestimmten Aktivierungsenergie E_a berechnet wird.

Mit dem Ergebnis für $\alpha'(T)$ werden anschließend die Logarithmen der Dosisrate $\lg \dot{D}$ in den Messdaten aus Abb. 5.9 entsprechend umgerechnet:

$\lg(\dot{D}_{T_{ref}}) = \lg(\dot{D}) + \lg(\alpha'(T))$. Dabei steht T_{ref} für die Referenztemperatur, die hier auf 50°C festgelegt wird, T steht für die Temperatur, bei der der jeweilige Datenpunkt aufgenommen wurde und $\dot{D}_{T_{ref}}$ ist die Dosisrate bei der angestrebten Referenztemperatur. Durch Verschieben aller Daten in Abb. 5.9 auf 50 °C erhält man die Abb. 5.16, die direkt mit dem Ergebnis aus dem Sandia-Bericht in Abb. 5.10 zu vergleichen ist.

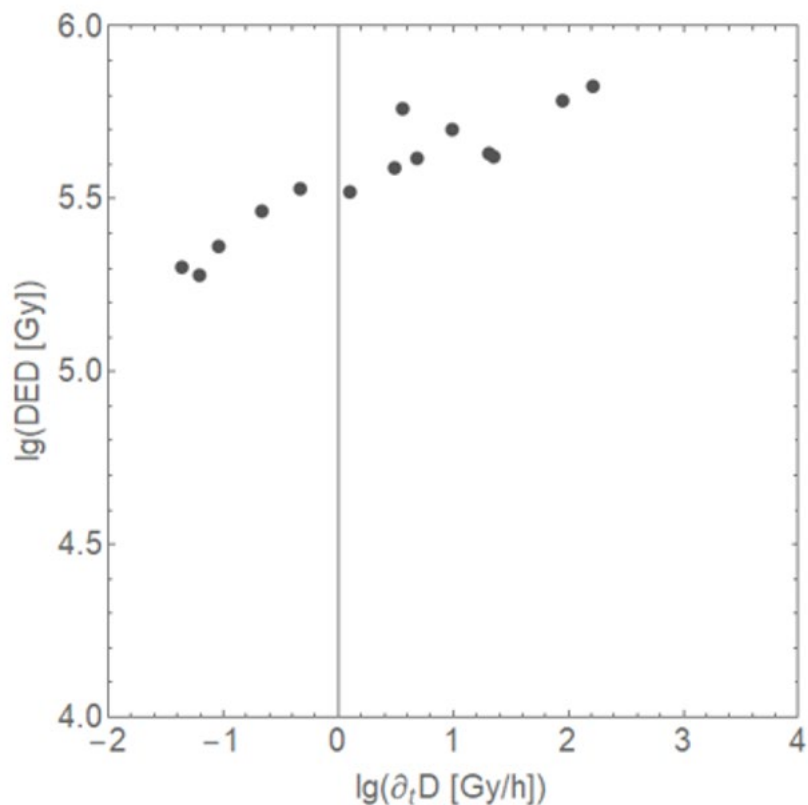


Abb. 5.16 Verschobene *DED*-Messwerte in Gy

Hier aufgetragen über die Dosisrate in Gy/h für eine Referenztemperatur von 50 °C für Brandrex CLPO gemäß der von uns durchgeführten Berechnungen.

Wenn man die beiden Abbildungen vergleicht, dann stellt man fest, dass sie eine große Ähnlichkeit besitzen. Die Datenpunkte in Abb. 5.16 sind stärker in Richtung negativer Werte für den Logarithmus der Dosisleistung $\lg(\dot{D})$ verschoben als in Abb. 5.10. Der Grund für diesen Unterschied liegt darin, dass die für die Verschiebung verwendeten Aktivierungsenergien nicht gleich ist. Tatsächlich wurde hier eine Aktivierungsenergie

von $E_a = 109 \text{ kJ/mol}$ berechnet, während sie laut Sandia-Bericht $E_a = 72 \text{ kJ/mol}$ beträgt. Trotz dieses Unterschieds stimmen die Steigungen der von den Datenpunkten beschriebenen Geraden in beiden Abbildungen miteinander überein. Und nur die Steigung m ist für die Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n nach Gleichung (3.15) relevant. Zur Überprüfung des Rechenmodells werden nur die drei mittleren Datenpunkte aus Abb. 5.16 verwendet, um den Dosisleistungseffektexponenten n zu bestimmen. Auf diese Weise ist es möglich zu überprüfen, ob die übrigen Datenpunkte, die nicht für die Berechnung von n verwendet wurden, zum radiologischen Alterungsmodell passen.

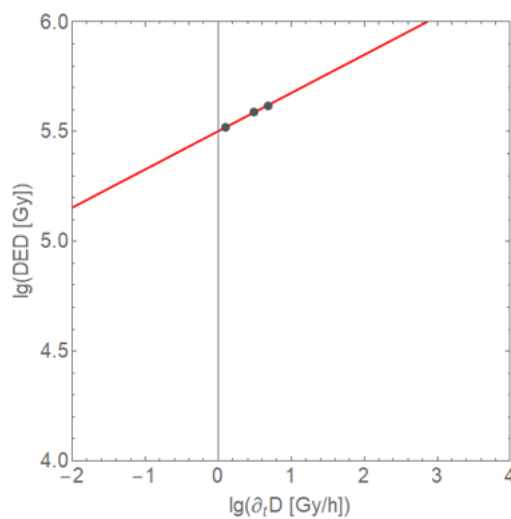


Abb. 5.17 Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n für Brandrex CLPO

Mithilfe der linearen Funktion in Gleichung (3.14) und Mathematica konnten die drei Datenpunkte in Abb. 5.17 gefittet werden. Die Steigung m der linearen Funktion repräsentiert direkt den Dosisleistungseffektexponenten n . Aus dem Fit der Datenpunkte wurden der Dosisleistungseffektexponent zu $n = 0,174$ und dessen Fehler zu $\Delta n = 0,011$ bestimmt.

Dank dieser Informationen ist man nun in der Lage die Lebensdauer in Abhängigkeit von der Einsatzdosisrate $\dot{D}_E$ bei konstanter Temperatur zu berechnen und anhand der Messdaten zu überprüfen. Für die Ermittlung der qualifizierten Lebensdauer t_E wird die Gleichung (3.20) verwendet. Wie man an dieser erkennen kann, werden die Werte des Qualifizierungsprozesses benötigt, die durch den Index Q angegeben sind. Es wurden dafür die Werte des mittleren Datenpunkts der verschobenen Messwerte bei 50°C aus Abb. 5.10 verwendet. Sie mussten aber zuerst delogarithmiert werden.

So erhält man $\dot{D}_Q = 3,611 \text{ Gy/h}$, $D_Q = 397\,807 \text{ Gy}$ und den zugehörigen Fehler $\Delta D_Q = 7407 \text{ Gy}$, der über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung bestimmt wurde. Der einzige freie Parameter für den Plot von t_E ist die Dosisleistung unter Einsatzbedingungen $\dot{D}_E$. Darüber hinaus enthält der Sandia-Bericht keine Informationen über den Fehler der Dosisleistungen unter Qualifizierungs- oder Einsatzbedingungen, weshalb diese Fehler auf null gesetzt wurden, was zu einer minimalen Fehlerangabe des Rechenmodells führt.

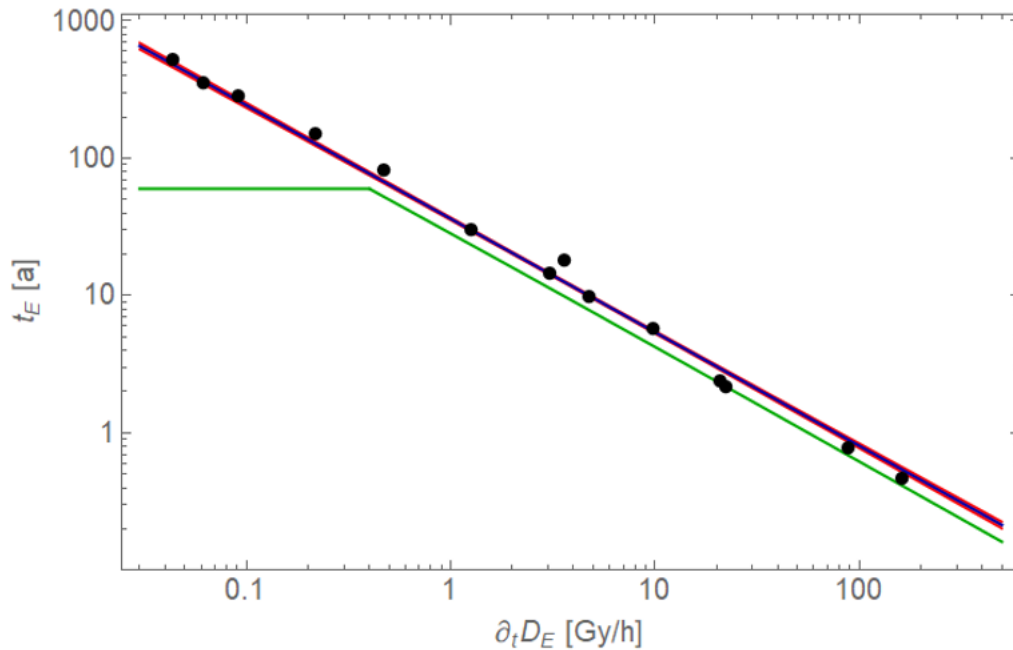


Abb. 5.18 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über der Einsatzdosisleistung $\dot{D}_E$ bei einer konstanten Temperatur von 50 °C

Um auch die Messdaten in eine Lebensdauer umrechnen und mit dem Modell vergleichen zu können, sind die DED -Werte mit den zugehörigen Dosisraten $\dot{D}$ aus Abb. 5.10 zu verwenden. Daraus ist die Lebensdauer mit $t_E = \frac{DED}{\dot{D}} = 10^{\lg(DED) - \lg(\dot{D})}$ zu berechnen.

In Abb. 5.18 sind für die Lebensdauer das Ergebnis des Rechenmodells als farbige Funktionsgraphen und die Messwerte als schwarze Punkte zu sehen. Dabei wird die Lebensdauer in Jahren a über die einsatzdosisrate $\dot{D}_E$ in Gy/h bei der konstanten Temperatur von 50 °C aufgetragen. Die blaue Kurve stellt die qualifizierte Lebensdauer t_E gemäß dem radiologischen Alterungsmodell dar und wurde mit Gleichung (3.20) berechnet. Das rote Band stellt den mit diesem Modell verbundenen Fehler dar (Fehlerband). Er wird mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnet. Schließlich gibt die grüne

Kurve die nutzbare Lebensdauer t_N wieder. Man erkennt, dass die meisten Datenpunkte (schwarze Punkte) gut zum Ergebnis des Rechenmodells passen. Einige von ihnen liegen knapp über oder unterhalb des Fehlerbands. Dennoch liegen alle Datenpunkte über der grünen Kurve t_N , die als Sicherheitsgrenze nicht unterschritten werden darf. Darüber hinaus wird diese Kurve gemäß Gleichung (4.1) in Abhängigkeit von der unteren Grenze des Fehlerbands berechnet.

Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der Annahme, dass die Qualifikations- und die Einsatzdosisrate keine Fehler besitzen, die breite des Fehlerbands minimal ist. Dadurch ist ebenfalls der Abstand zwischen der grünen Kurve und dem blauen Graphen der qualifizierten Lebensdauer t_E minimal. Alle Messdatenpunkte liegen dennoch über der grünen Kurve, sodass die Lebensdauer konservativ und nicht zu optimistisch abgeschätzt wird.

5.2.2 Verwendung von Modelldaten des Sandia-Berichts zum Polymer Rockbestos Neopren

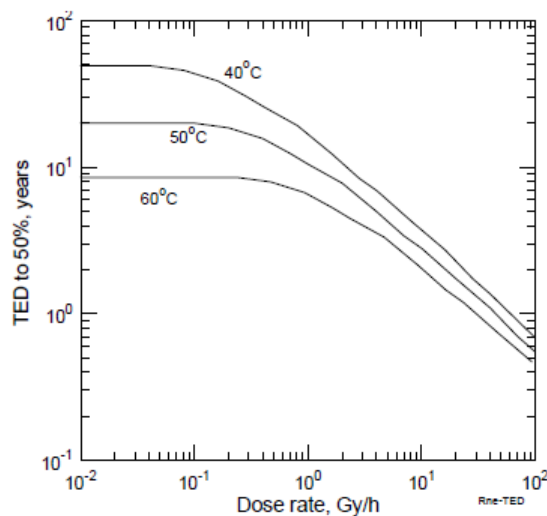


Abb. 5.19 Modellvorhersage des Sandia-Berichts für die Dauer ($TED = t_E$) bis zum Erreichen des Akzeptanzkriteriums (50 % EAB)

Hier: Für Rockbestos Neopren für verschiedene Temperaturen in °C über die Dosisrate **Gy/h**. Übernommen von Figur 46 aus /SAN 10/

Für diesen Teil der Verifikation werden die Daten zum Polymer Rockbestos Neopren aus dem Sandia-Bericht verwendet. In diesem befindet sich auf Seite 49 die Grafik in Abb. 5.19. Darauf basierend wird das radiologische Alterungsmodell mit den Daten in der Abbildung überprüft. Im Sandia-Bericht wird die Aktivierungsenergie E_a von

Rockbestos Neopren angegeben, welche 76 kJ/mol beträgt. Mithilfe dieser Information konnten nun die Daten in Abb. 5.20, die die *DED*-Daten über der Dosisrate $\dot{D}$ aufgetragen darstellen, auf die verschiedenen Temperaturen der Ergebnisse des Sandia-Modells in Abb. 5.19 verschoben werden, nämlich 40 °C, 50 °C und 60 °C. Dazu wurden zunächst die Datenpunkte aus Abb. 5.20 extrahiert. Sie befinden sich in Tab. 5.4 .

Tab. 5.4 Werte der Messdatenpunkte, extrahiert aus Abb. 5.20

Temperatur (°C)	Dose rate (Gy/h)	DED (Gy, EAB=50%)
50	130	500000
60	45	290000
70	900	580000
80	42	140000

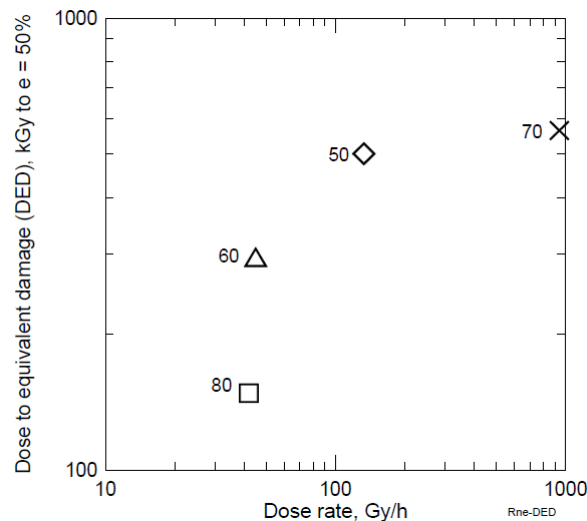


Abb. 5.20 *DED*-Messwerte in Gy aufgetragen über die Dosisrate in Gy/h

Hier für verschieden Temperaturen (neben den Datenpunkten stehende Zahlen) in °C für Rockbestos Neopren. Übernommen von Figur 44 aus /SAN 10/

Die Messdaten in Tab. 5.4 wurden auf dieselbe Weise verschoben wie sie im letzten Unterkapitel 5.2.1 beschrieben wurde, unter Verwendung der folgenden Gleichung: $\lg(\dot{D}_{T_{ref}}) = \lg(\dot{D}) + \lg(\alpha'(T))$. Dabei steht T_{ref} für die jeweilige Referenztemperatur, die nach den Graphen des Sandia-Modells in Abb. 5.19 die Werte 40 °C, 50 °C und 60 °C annimmt, T steht für die Temperatur, bei der der jeweilige Datenpunkt aufgenommen wurde, $\lg(\alpha'(T))$ gibt die zugehörige Verschiebung an, die mit Gleichung (3.44) zu berechnen ist und $\dot{D}_{T_{ref}}$ ist die Dosisrate bei der angestrebten Referenztemperatur. Mit

den für eine Temperatur von 40°C verschobenen Messdaten kann der Dosisleistungseffektexponent n bestimmt werden. Dies ist in Abb. 5.21 zu sehen. Mithilfe der linearen Funktion in Gleichung (3.14) und Mathematica konnten die Datenpunkte in Abb. 5.21 gefittet werden. Die Steigung m der linearen Funktion repräsentiert direkt den Dosisleistungseffektexponenten n . Aus dem Fit der Datenpunkte wurden der Dosisleistungseffektexponent zu $n = 0,358$ und dessen Fehler zu $\Delta n = 0,027$ bestimmt.

Dank dieser Informationen ist man nun in der Lage die Lebensdauer in Abhängigkeit von der Einsatzdosisrate $\dot{D}_E$ bei konstanter Temperatur zu berechnen und anhand der Sandia-Modelldaten zu überprüfen.

Für die Ermittlung der qualifizierten Lebensdauer t_E wird die Gleichung (3.20) verwendet. Wie man an dieser erkennen kann, werden die Werte des Qualifizierungsprozesses benötigt, die durch den Index Q angegeben sind. Es wurden dafür die Werte des zweiten Datenpunkts der verschobenen Messwerte bei 40 °C aus Abb. 5.21 verwendet. Sie mussten aber zuerst delogarithmiert werden.

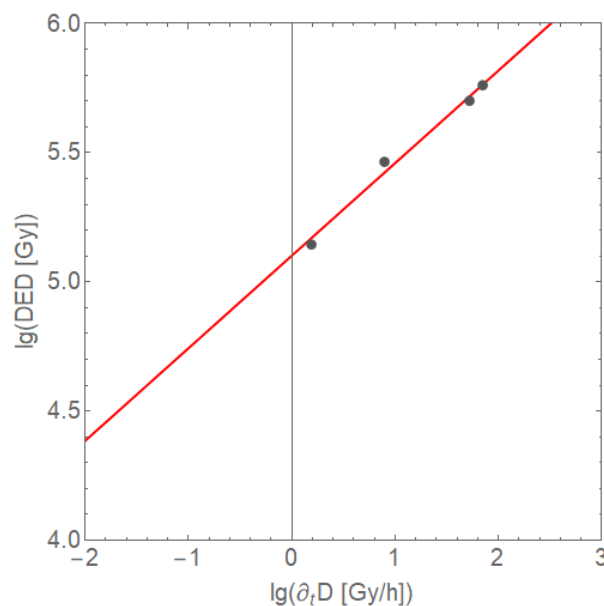


Abb. 5.21 Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n für Rockbestos Neopren

So erhält man $\dot{D}_Q = 52,681 \text{ Gy/h}$, $D_Q = 522\,909 \text{ Gy}$ und den zugehörigen Fehler $\Delta D_Q = 70\,330 \text{ Gy}$, der über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung bestimmt wurde. Der einzige freie Parameter für den Plot von t_E ist die Dosisleistung unter Einsatzbedingungen $\dot{D}_E$. Dar-

über hinaus enthält der Sandia-Bericht keine Informationen über den Fehler der Dosisleistungen unter Qualifizierungs- oder Einsatzbedingungen, weshalb diese Fehler auf null gesetzt wurden.

In Abb. 5.22 sind für die Lebensdauer das Ergebnis des Rechenmodells als farbige Funktionsgraphen und die Datenpunkte des Sandia-Modells als schwarze Punkte zu sehen. Dabei wird die Lebensdauer in Jahren a über die einsatzdosisrate $\dot{D}_E$ in Gy/h bei der konstanten Temperatur von 40 °C aufgetragen.

Die blaue Kurve stellt die qualifizierte Lebensdauer t_E gemäß dem radiologischen Alterungsmodell dar und wurde mit Gleichung (3.20) berechnet. Das rote Band stellt den mit diesem Modell verbundenen Fehler dar (Fehlerband). Er wird mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnet.

Schließlich gibt die grüne Kurve die nutzbare Lebensdauer t_N wieder, die als Sicherheitsgrenze nicht unterschritten werden darf. Das hier beschriebene Vorgehen wurde für die beiden anderen Temperaturen von 50 °C und 60 °C aus den Sandia-Modelldaten in Abb. 5.19 wiederholt. Die Ergebnisse werden in den Abb. 5.23 und Abb. 5.24 angegeben.

Wie in Abb. 5.22 zu sehen ist, liegen bei einer Temperatur von 40 °C alle Datenpunkte des Sandia-Modells (schwarze Punkte) über der grünen Kurve, so dass die Lebensdauer vom radiologischen Rechenmodell konservativ abgeschätzt wird. Darüber hinaus passen fast alle Datenpunkte bis auf den ersten in das Fehlerband bei kleinstmöglicher Fehlerannahme. In Abb. 5.23, bei einer Temperatur von 50 °C und in Abb. 5.24, bei einer Temperatur von 60 °C, passen alle Punkte des Sandia-Modells perfekt zum Ergebnis des Rechenmodells und liegen innerhalb des Fehlerbands. Der Hauptgrund für den Unterschied zwischen diesen Ergebnissen und dem Ergebnis in Abb. 5.22 ist, dass der Fehler ΔD_Q der Dosis aus dem Qualifizierungsprozess bei 50 °C und 60 °C höher ist als bei 40 °C. Dadurch wird die Breite des Fehlerbands vergrößert. Die Datenpunkte liegen in den Abb. 5.23 und Abb. 5.24 alle oberhalb der grünen Kurve. Final kann man festhalten, dass die Vorhersagen des hier vorgestellten radiologischen Rechenmodells mit den Vorhersagen des Sandia-Modells übereinstimmen.

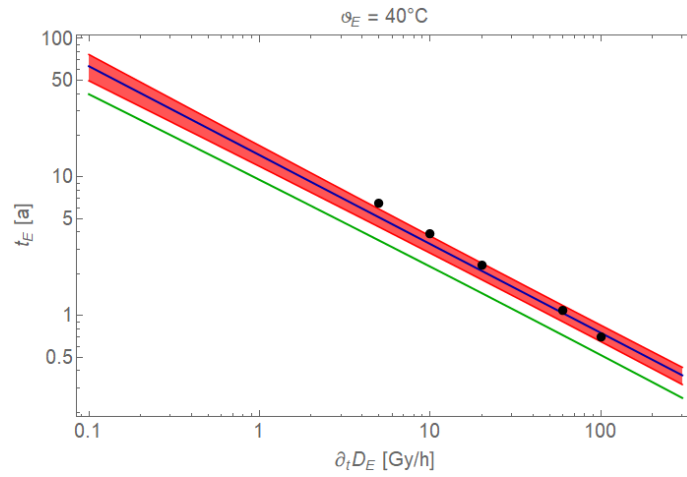


Abb. 5.22 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über der Einsatzdosisleistung $\dot{D}_E$ bei einer konstanten Temperatur von 40 °C

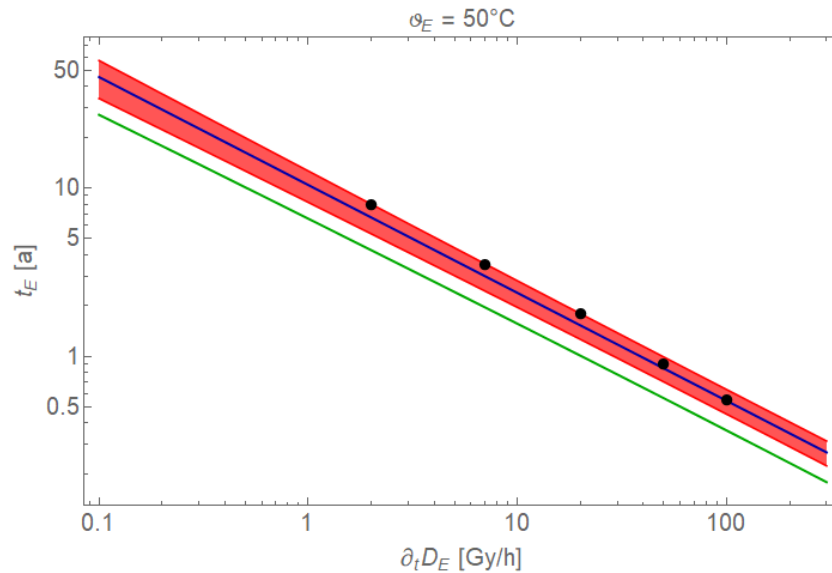


Abb. 5.23 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über der Einsatzdosisleistung $\dot{D}_E$ bei einer konstanten Temperatur von 50 °C.

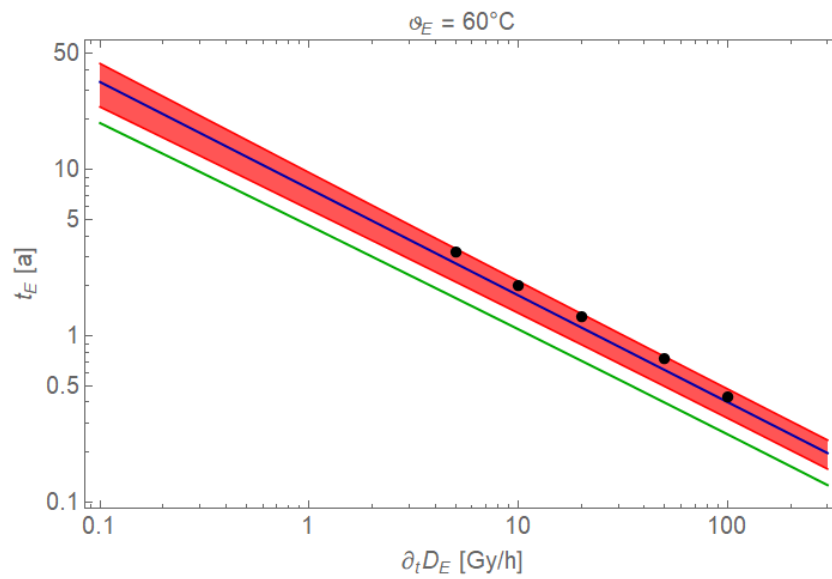


Abb. 5.24 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über der Einsatzdosisleistung $\dot{D}_E$ bei einer konstanten Temperatur von 60 °C.

5.3 Verifikation des Superpositionsverfahrens für die kombinierte thermische und radiologische Alterung

Wie für das thermische Alterungsmodell, wurden zur Verifikation des Superpositionsverfahrens aus dem Sandia-Bericht die Daten des Okenit-Neopren-Materials verwendet, die in Abb. 5.1 zu sehen sind. Die Daten zeigen, dass zunächst die Superposition I-Methode bei deren Auswertung verwendet werden muss, da die physikalische alterungs-sensitive Größe G , hier die Reißdehnung (engl. Elongation at Break EAB), über die Alterungszeit aufgetragen wird. Im Folgenden wurden für jede Temperatur nur die Messpunkte verwendet, die auf einer Geraden mit negativer Steigung liegen. Die niedrigste Temperatur, bei der brauchbare Datenpunkte aufgenommen wurden, beträgt 70 °C. Entsprechend wurde die Referenztemperatur T_{ref} auf diesen Wert festgelegt. Die zugehörigen Messdaten lassen sich durch folgende Geradengleichung beschreiben:

$G = a_0 - a_1 \cdot \lg t$. Darin sind a_0 und a_1 die aus einem Fit zu bestimmenden Parameter. Auf diese Weise wurde auch bei der Verifizierung des thermischen Alterungsmodells vorgegangen, die auf demselben Datensatz basierte. Um den Fit durchzuführen, wurden die Datenpunkte bei 70 °C aus Abb. 5.13 extrahiert, die in Tab. 5.5 angegeben sind.

Tab. 5.5 Datenpunkte bei einer Temperatur von 70 °C, extrahiert aus Abb. 5.1

Zeit in Jahren	Reißdehnung EAB
0,3	135
0,6	75
0,7	60
0,9	45
1	20

Diese Datenpunkte wurden anschließend mit der Funktion $G = a_0 - a_1 \cdot \lg t$ gefittet, wobei der Fitgraph in Abb. 5.25 dargestellt ist. Als Ergebnis erhält man für die Fitparameter die Werte $a_0 = 27,796 \pm 4,106$ und $a_1 = 207,345 \pm 15,548$.

Anschließend wurden die Verschiebungen $\lg(\alpha(T, \dot{D} = 0))$ der Messdaten, welche ohne Strahlung aufgenommen worden waren (daher $\dot{D} = 0$), für jede Temperatur zwischen 70 °C und 131 °C ermittelt, indem die entsprechenden Datensätze mit der Funktion $G = a_0 - a_1 \cdot (\lg t + \lg(\alpha(T, \dot{D} = 0)))$ gefittet wurden. Die Ergebnisse sind in Abb. 5.26 EAB-Wert aufgetragen über den Logarithmus der Zeit in Jahren dargestellt.

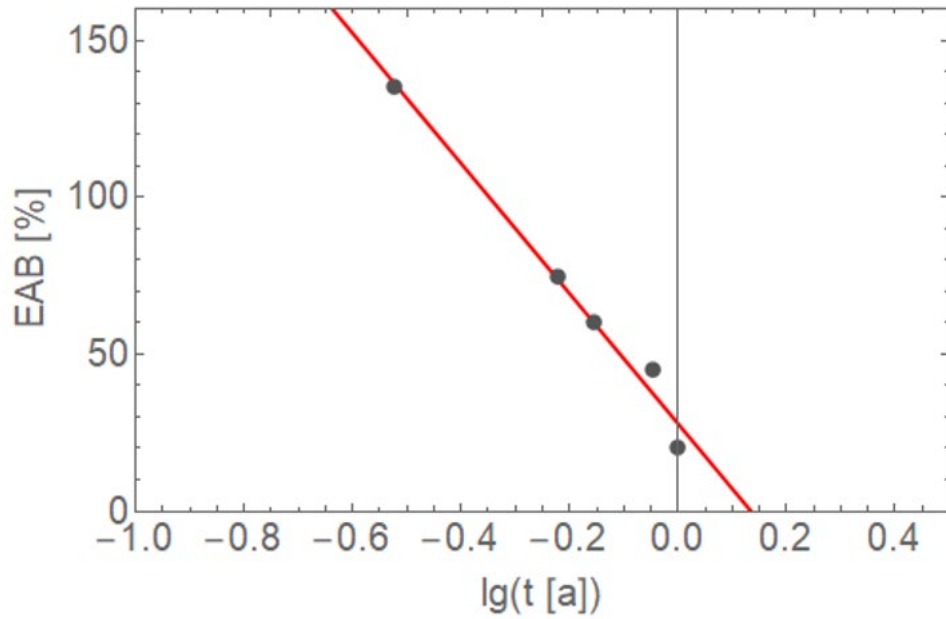


Abb. 5.25 EAB-Wert aufgetragen über den Logarithmus der Zeit in Jahren a bei 70 °C mit zugehörigem Fit für das Polymer Okenit-Neopren

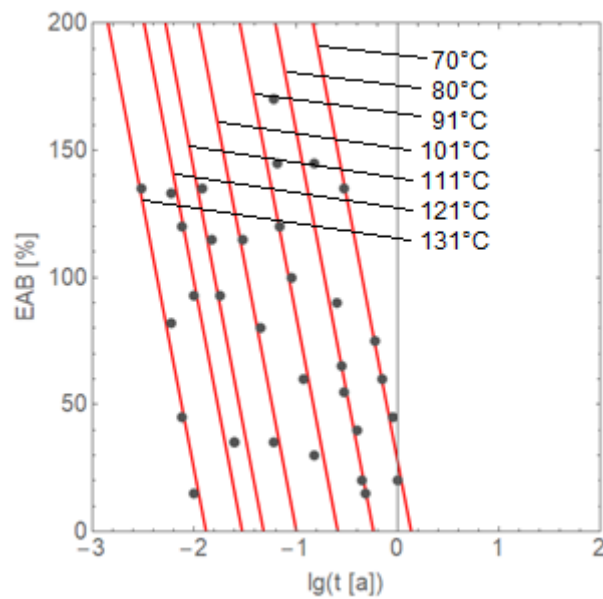


Abb. 5.26 EAB-Wert aufgetragen über den Logarithmus der Zeit in Jahren

Hier a) bei 70 °C, 80 °C, 91 °C, 101 °C, 111 °C, 121 °C und 131 °C jeweils mit zugehörigem Fit für das Polymer Okenit-Neopren

Anschließend wurden die ermittelten Verschiebungen $\lg(\alpha(T, \dot{D} = 0))$ über dem Kehrwert der Temperatur $1000/T$ aufgetragen (siehe Abb. 5.27).

Der Abbildungsteil Abb. 5.27 a) zeigt das Ergebnis aus dem Sandia-Bericht /SAN 10/ und der Teil b) das hier berechnete Ergebnis mit Fit. Man erkennt, dass beide Abbildungen sehr gut übereinstimmen.

Dazu musste aber zu den hier bestimmten Verschiebungen $\lg(\alpha(T, \dot{D} = 0))$ zuerst der Wert $\lg(50)$ addiert werden, da die hier verwendete Referenztemperatur von 70 °C von der im Sandia-Bericht verwendeten Referenztemperatur abweicht.

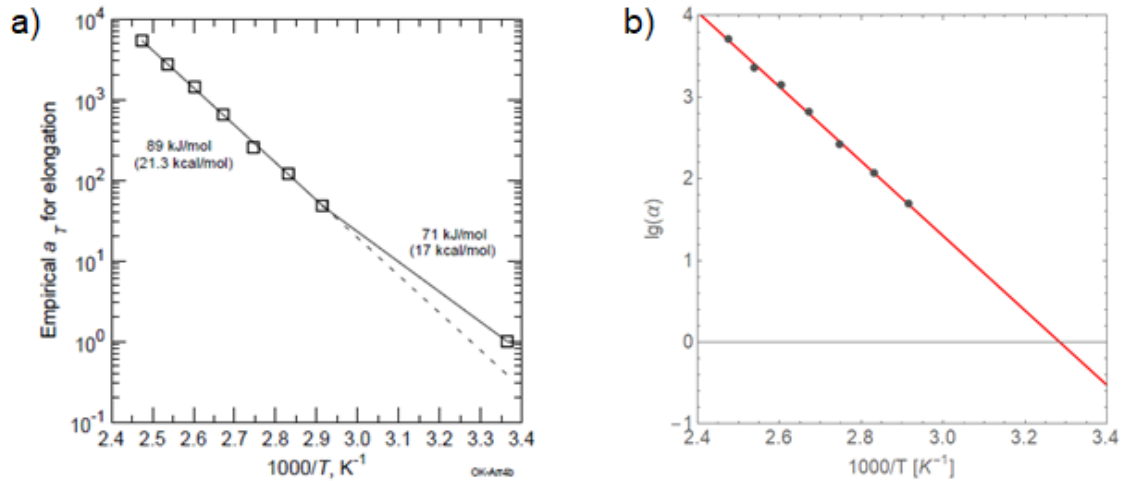


Abb. 5.27 Verschiebungen $\lg \alpha$ ohne Strahlung ($\dot{D} = 0$) aufgetragen über den reziproken Temperaturwert $1000/T$ für Okenit-Neopren

Hier a) Ergebnis aus dem Sandia-Bericht, übernommen von Figur 3 aus /SAN 10/ b) Ergebnis aus Abb. 5.26

Mithilfe von Gleichung (3.43) kann die Aktivierungsenergie E_a mit der Steigung m des Fitgraphen in Abb. 5.27 b) berechnet werden. Ihr Fehler ΔE_a ergibt sich dann über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung aus dem Fehler der Steigung Δm . Man erhält die folgenden Werte:

$$E_a = - \frac{m \cdot 1000 \cdot k_B}{\lg(e)} = - \frac{-4,564 \cdot 1000 \cdot 0,000086173}{\lg(e)} eV = 0,906 eV$$

$$\Delta E_a = \frac{\Delta m \cdot 1000 \cdot k_B}{\lg(e)} = \frac{0,097 \cdot 1000 \cdot 0,000086173}{\lg(e)} eV = 0,019 eV.$$

Allerdings wird im Sandia-Bericht die Aktivierungsenergie E_a nicht in eV, sondern in kJ/mol angegeben.

Daher muss sie noch entsprechend umgerechnet werden:

$$E_a = 0,906 \cdot 96,485 \text{ kJ/mol} = 87,379 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta E_a = 0,019 \cdot 96,485 \text{ kJ/mol} = 1,858 \text{ kJ/mol}.$$

Man erhält also für die Aktivierungsenergie: $E_a = (87,379 \pm 1,858) \text{ kJ/mol}$. Abb. 5.27 a) zeigt, dass die Aktivierungsenergie im Sandia-Bericht zu 89 kJ/mol bestimmt worden ist. Das hier berechnete Ergebnis passt unter Berücksichtigung des Fehlers sehr gut zu dem Wert im Sandia-Bericht. Der nächste Schritt besteht darin, die Parameter x und k sowie ihre Fehler zu bestimmen.

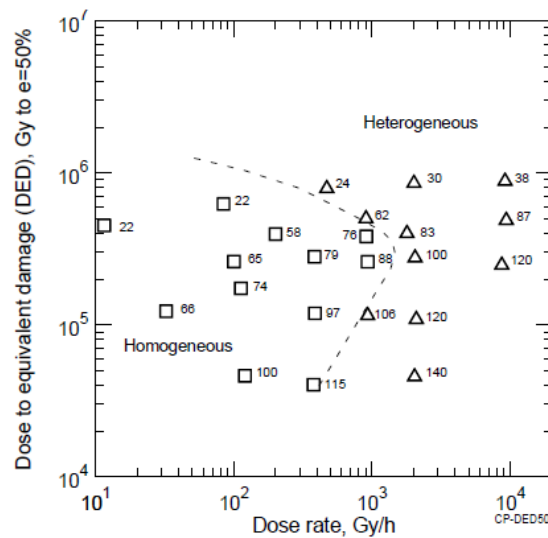


Abb. 5.28 Schädigungsdosis DED in Gy aufgetragen über der Dosisrate $\dot{D}$ in Gy/h bei unterschiedlichen Temperaturen

Hier: (Temperaturangaben neben den Datenpunkten stehende Zahlen) in °C für das Polymer Okenit-Neopren. Übernommen von Figur 39 aus /SAN 10/.

Es gibt zwei Möglichkeiten, die Werte dieser Parameter zu ermitteln, die durch das Superposition I- und das Superposition II-Verfahren vorgegeben werden. Die Wahl zwischen den beiden Methoden hängt von den Daten ab, die im Sandia-Bericht zur Verfügung stehen. Im Bericht findet sich die in Abb. 5.28 dargestellte Graphik. Dabei handelt es sich um Daten für das Superposition II-Verfahren (DED -Daten aufgetragen über die Dosisrate $\dot{D}$), die für unterschiedliche Temperaturen aufgenommen wurden.

Aus diesem Grund wird das Superposition II-Verfahren verwendet, um die Parameter x und k zu bestimmen. Wie oben bei der Verifikation des radiologischen Rechenmodells gezeigt, sind der Verschiebungsfaktor $\alpha(T, \dot{D})$ aus dem Superposition I-Verfahren und der Verschiebungsfaktor $\alpha'(T)$ aus dem Superposition II-Verfahren ohne Strahlung ($\dot{D} = 0$) identisch, da sie die gleiche Aktivierungsenergie E_a verwenden. Folglich kann die oben über das Superposition I-Verfahren ermittelte Aktivierungsenergie in den Verschiebungsfaktor $\alpha'(T)$ des Superposition II-Verfahrens eingesetzt werden.

Das Ziel besteht zunächst darin, alle Datenpunkte in Abb. 5.28 auf eine zuvor definierte Referenztemperatur von 50 °C zu verschieben. Dazu wurde die folgende Gleichung verwendet: $\lg(\dot{D}_{T_{ref}}) = \lg(\dot{D}) + \lg(\alpha'(T))$. Dabei steht T_{ref} für die Referenztemperatur von 50 °C, T steht für die Temperatur, bei der der jeweilige Datenpunkt aufgenommen wurde, $\lg(\alpha'(T))$ gibt die zugehörige Verschiebung an, die mit Gleichung (3.44) zu berechnen ist und $\dot{D}_{T_{ref}}$ ist die Dosisrate bei der angestrebten Referenztemperatur. Das Ergebnis der Datenverschiebung aus dem Sandia-Bericht ist in Abb. 5.29 a) zu sehen und das hier berechnete Ergebnis befindet sich in Teil b). Man stellt fest, dass beide Ergebnisse sehr gut zueinander passen. Anschließend wurden die Daten in Teil b) mit Gleichung (3.48) gefittet (roter Graph), wobei die Verschiebung $\lg(\alpha'(T))$ wegen $T = T_{ref}$ auf null gesetzt wurde.

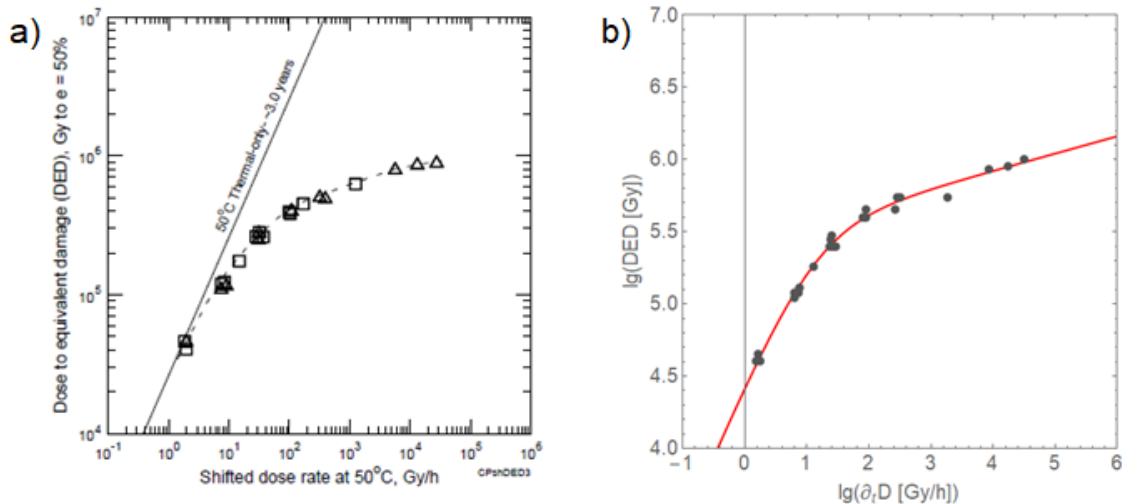


Abb. 5.29 Verschobene *DED*-Messwerte in Gy aufgetragen über die Dosisrate $\dot{D}$ in Gy/h für eine Referenztemperatur von 50 °C für Okenit-Neopren.

Hier: a) zeigt das Ergebnis aus Figur 40 des Sandia-Berichts /SAN 10/ und b) das hier berechnete Ergebnis

Daraus ergaben sich die folgenden Parameterwerte:

$$x = 0,88 \pm 0,012 \text{ und } k = 0,102 \pm 0,013.$$

5.3.1 Überprüfung der Lebensdauer anhand von Messdaten

Nachdem alle Parameter für das Superpositionsverfahren bestimmt wurden, nämlich E_a , x und k sowie die zugehörigen Fehler, kann das Rechenmodell des Superpositionsverfahrens überprüft werden, indem die Lebensdauer mithilfe von Gleichung (3.30) berechnet und mit den Messdaten bzw. Modelldaten für die Lebensdauer aus dem Sandia-Bericht /SAN 10/ verglichen wird. Es wurden Datenpunkte bei mehreren festen Dosisraten aus Abb. 5.28 extrahiert. Dabei sind jeweils mindestens drei verschiedene Datenpunkte ausgewählt worden, die alle bei der gleichen Dosisrate liegen. Die ausgewählten Dosisraten, bei denen dies der Fall ist, sind: 390 Gy/h, 900 Gy/h und 2000 Gy/h. Um die qualifizierte Lebensdauer t_E des Rechenmodells zu bestimmen, wurde die Gleichung (3.30) in Kombination mit Gleichung (3.25) verwendet.

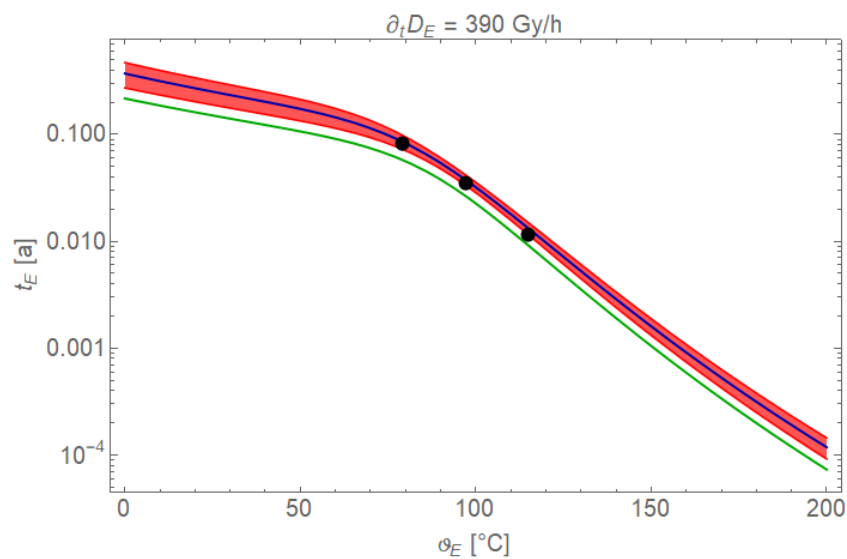


Abb. 5.30 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C bei einer konstanten Dosisrate von 390 Gy/h (Messdaten)

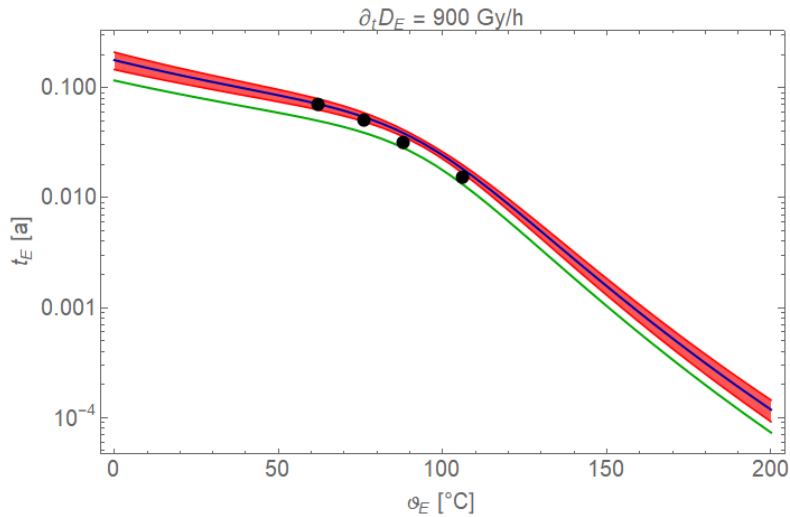


Abb. 5.31 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in $^{\circ}\text{C}$ bei einer konstanten Dosisrate von 900 Gy/h (Messdaten)

Die Referenztemperatur ist durch $\vartheta_{ref} = 50^{\circ}\text{C}$ gegeben. Parameter aus dem Qualifizierungsprozess werden durch den Index Q gekennzeichnet. Für sie wurden die Werte des mittleren Datenpunktes aus dem Datensatz in Abb. 5.29 b) verwendet. Da dieser einem Datensatz bei einer Temperatur von 50°C entspricht, gilt zudem $\vartheta_Q = \vartheta_{ref} = 50^{\circ}\text{C}$. Die Temperatur unter Einsatzbedingungen (Index E) ϑ_E sei zunächst die Funktionsvariable und die Einsatzdosisleistung $\dot{D}_E$ wird jeweils auf die oben gewählten Werte 390 Gy/h, 900 Gy/h und 2000 Gy/h festgelegt.

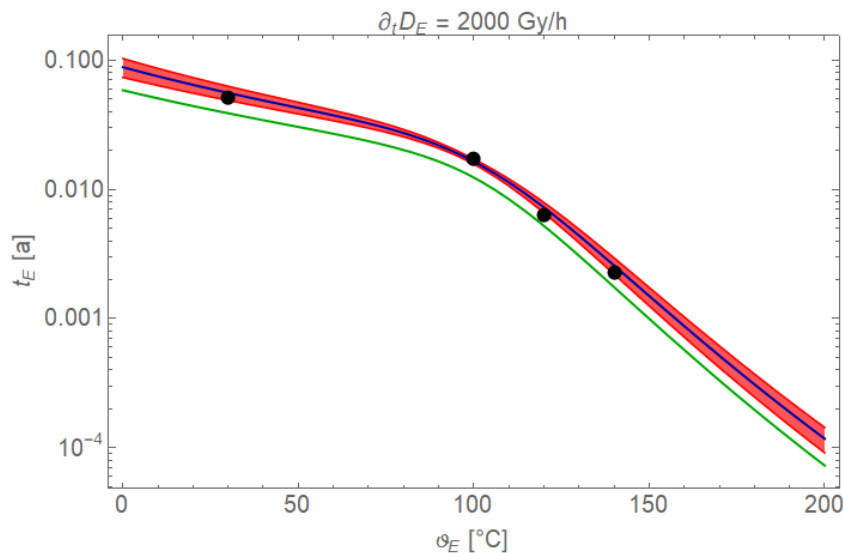


Abb. 5.32 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren

Hier Jahre (a) aufgetragen über die Temperatur ϑ in $^{\circ}\text{C}$ bei einer konstanten Dosisrate von 2000 Gy/h (Messdaten).

In den Abb. 5.30, Abb. 5.31 und Abb. 5.32 gibt der blaue Graph das Ergebnis des Rechenmodells für die qualifizierte Nutzungsdauer t_E an, das rote Band stellt das Fehlerband dar und der grüne Graph repräsentiert die nutzbare Lebensdauer t_N , die als Sicherheitsgrenze nicht unterschritten werden darf. Die schwarzen Datenpunkte geben die Messwerte für die Lebensdauer an. Dabei wurde die Lebensdauer t_E mithilfe der aus Abb. 5.28 ausgewählten Datenpunkte aus dem jeweiligen DED -Wert und der zugehörigen Dosisrate $\dot{D}$ wie folgt berechnet: $t_E = DED / \dot{D}$. Wie man an den Abbildungen sehen kann, liegen alle Datenpunkte über der grünen Kurve, so dass eine konservative Abschätzung der Lebensdauer gewährleistet ist. Dennoch ist in den Abb. 5.30 und Abb. 5.31 zu sehen, dass einige Datenpunkte nicht innerhalb des Fehlerbands liegen. Dieser Fehler könnte zum Teil dadurch erklärt werden, dass die Datenpunkte händisch aus dem doppelt-logarithmischen Diagramm in Abb. 5.28 extrahiert werden mussten. Darüber hinaus lagen keine Informationen über die Fehler für die Datenpunkte in Abb. 5.28 vor.

Daher wurden die Dosisraten und DED -Werte als fehlerlos angenommen. Wenn die Fehler dieser beiden Parameter bekannt wären, wäre das rote Fehlerband entsprechend breiter und würde möglicherweise die in Abb. 5.30 und Abb. 5.31 außerhalb befindlichen Datenpunkte beinhalten. Man stellt fest, dass die Graphen der Lebensdauer bei gleichzeitiger thermischer und radiologischer Alterung aus den Abb. 5.30, Abb. 5.31 und Abb. 5.32 bei niedrigen Temperaturen stark abflachen, im Gegensatz zum Graphen der Lebensdauer in Abb. 5.6 bei rein thermischer Alterung. Der Grund dafür ist, dass bei kombinierter thermischer und radiologischer Alterung und niedrigen Temperaturen, die radiologische Alterung dominiert und die Lebensdauer nach oben begrenzt. Da dieser Effekt bei der rein thermischen Alterung fehlt, steigt der Graph der Lebensdauer in Abb. 5.6 dagegen bei niedrigeren Temperaturen weiter an. Bei der Abflachung des Graphen der Lebensdauer in den Abb. 5.30, Abb. 5.31 und Abb. 5.32 handelt es sich also um einen synergetischen Effekt zwischen thermischer und radiologischer Alterung. Bei höheren Temperaturen dominiert dagegen die thermische Alterung und die Graphen der Lebensdauer verhalten sich wie der Graph in Abb. 5.6.

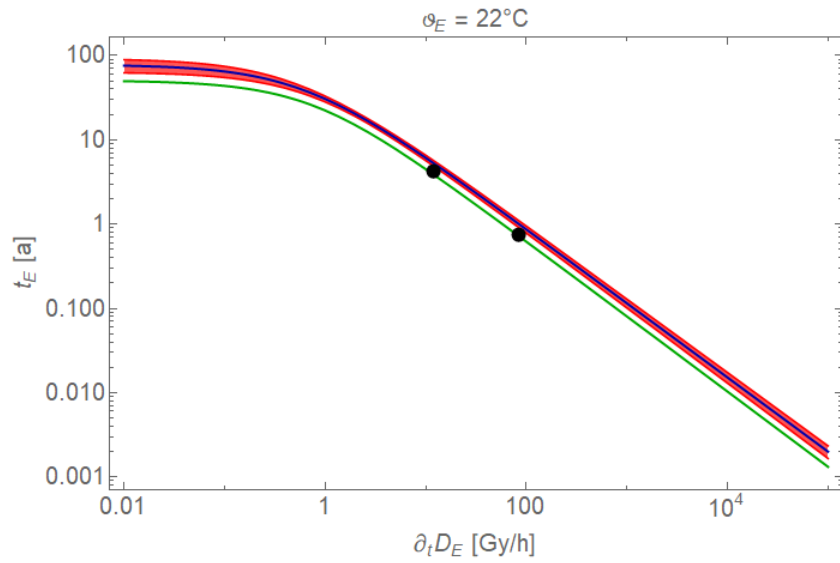


Abb. 5.33 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Dosisrate $\dot{D}$ in Gy/h bei einer konstanten Temperatur von 22 °C (Messdaten).

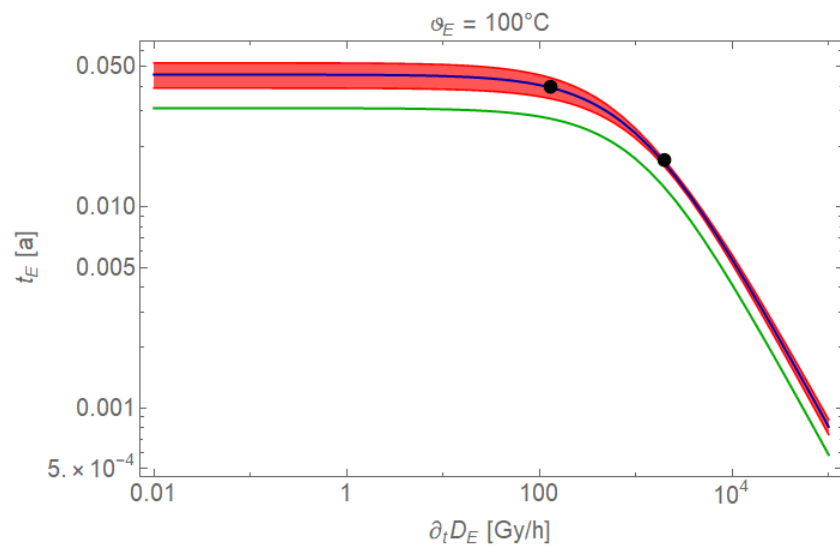


Abb. 5.34 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Dosisrate $\dot{D}$ in Gy/h bei einer konstanten Temperatur von 100 °C (Messdaten)

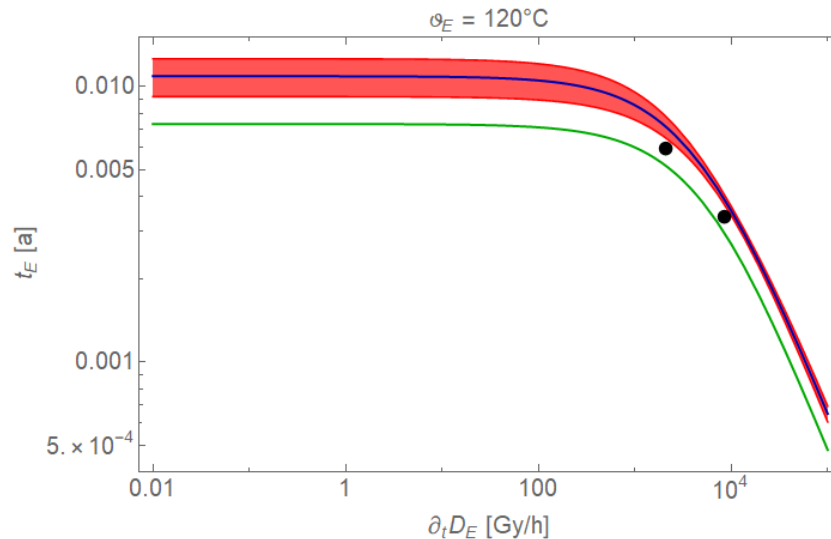


Abb. 5.35 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Dosisrate $\dot{D}$ in Gy/h bei einer konstanten Temperatur von 120°C (Messdaten)

Anschließend wurde das Ergebnis für die Lebensdauer bei fester Einsatztemperatur ϑ_E und variabler Einsatzdosisrate $\dot{D}_E$ überprüft. Dazu wurden mehrere Datenpunkte aus Abb. 5.28 ausgewählt, die bei den Temperaturen 22°C , 10°C und 120°C aufgenommen worden waren. Das restliche Vorgehen erfolgte analog zu der oben beschriebenen Überprüfung der Lebensdauer bei konstanter Einsatzdosisrate und variabler Einsatztemperatur. Die Ergebnisse sind in den Abb. 5.33, Abb. 5.34 und Abb. 5.35 zu sehen.

Man erkennt, dass alle aus Abb. 5.28 ausgewählten Datenpunkte (schwarze Punkte) über dem grünen Graphen liegen, was eine konservative Abschätzung der Lebensdauer sicherstellt. Die Datenpunkte in Abb. 5.34 liegen alle innerhalb des Fehlerbands, während die Datenpunkte in den Abb. 5.33 und Abb. 5.35 unterhalb des roten Fehlerbands angeordnet sind. Die Gründe sind dieselben wie zuvor im Abschnitt bei konstanter Dosisrate und variierender Temperatur beschrieben. Es ist festzuhalten, dass in beiden Fällen (Lebensdauer aufgetragen über die Temperatur bei konstanter Dosisrate und Lebensdauer aufgetragen über die Dosisrate bei konstanter Temperatur) die Messdaten das Modell bestätigen.

Man erkennt, dass die Graphen der Lebensdauer bei gleichzeitiger thermischer und radiologischer Alterung aus den Abb. 5.33, Abb. 5.34 und Abb. 5.35 bei niedrigen Dosisraten stark abflachen, im Gegensatz zum Graphen der Lebensdauer in Abb. 5.18 bei rein radiologischer Alterung.

Der Grund dafür ist, dass bei kombinierter thermischer und radiologischer Alterung und niedrigen Dosisraten, die thermische Alterung dominiert und die Lebensdauer nach oben begrenzt. Da dieser Effekt bei der rein radiologischen Alterung fehlt, steigt der Graph der Lebensdauer in Abb. 5.18 dagegen bei niedrigeren Dosisraten weiter an. Bei der Abflachung des Graphen der Lebensdauer in den Abb. 5.33, Abb. 5.34 und Abb. 5.35 handelt es sich also um einen synergetischen Effekt zwischen thermischer und radiologischer Alterung. Bei höheren Dosisraten dominiert dagegen die radiologische Alterung und die Graphen der Lebensdauer verhalten sich wie der Graph in Abb. 5.18.

5.3.2 Überprüfung der Lebensdauer anhand von Modelldaten aus dem Sandia-Bericht

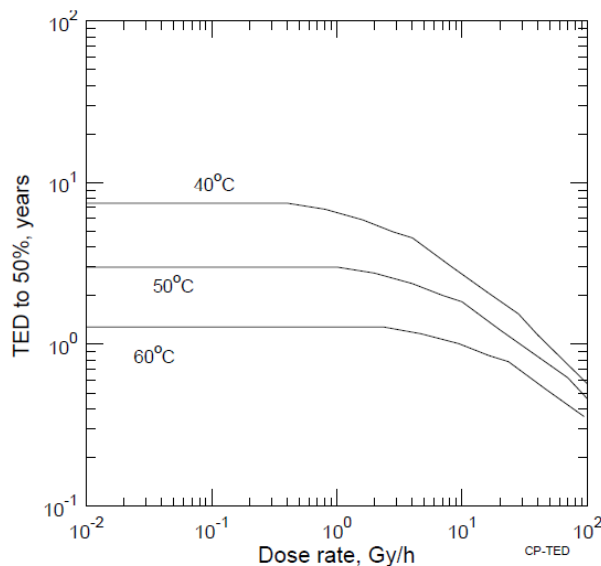


Abb. 5.36 Modellvorhersage

Entnommen aus Sandia-Bericht für die Dauer ($TED = t_E$) bis zum Erreichen des Akzeptanzkriteriums (50% EAB) für Okenit-Neopren für verschiedene Temperaturen in °C über die Dosisrate Gy/h. Übernommen von Figur 42 aus /SAN 10/.

In diesem Abschnitt werden Modelldaten aus dem Sandia-Bericht /SAN 10/ verwendet, um das Superpositions-Rechenmodell zu verifizieren. Die erforderlichen Datenpunkte wurden aus den Graphen in Abb. 5.36 extrahiert. Dabei wurde zunächst überprüft, ob die Datenpunkte in Abhängigkeit von der Temperatur und bei konstanter Dosisrate zu unseren Modellvorhersagen passen. Daher wurden aus Abb. 5.36 Datenpunkte für die Temperaturen 40 °C, 50 °C und 60 °C bei fünf verschiedenen Dosisraten extrahiert: 0,1 Gy/h, 1 Gy/h, 5 Gy/h, 20 Gy/h und 100 Gy/h.

Anschließend wurde die Gleichung (3.30) in Kombination mit Gleichung (3.25) verwendet, um die qualifizierte Lebensdauer t_E des Superpositions-Modells in Abhängigkeit von der Einsatztemperatur ϑ_E zu berechnen.

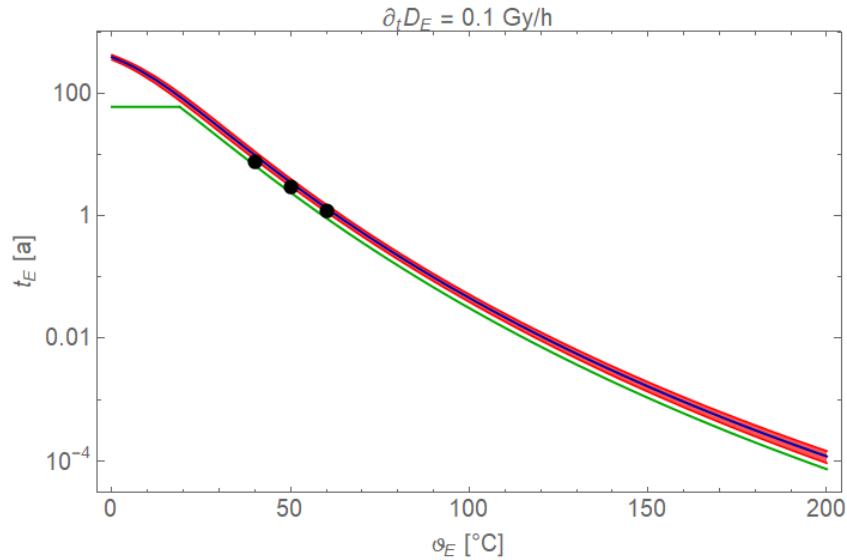


Abb. 5.37 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C bei einer konstanten Dosisrate von 0,1 Gy/h (Modelldaten)

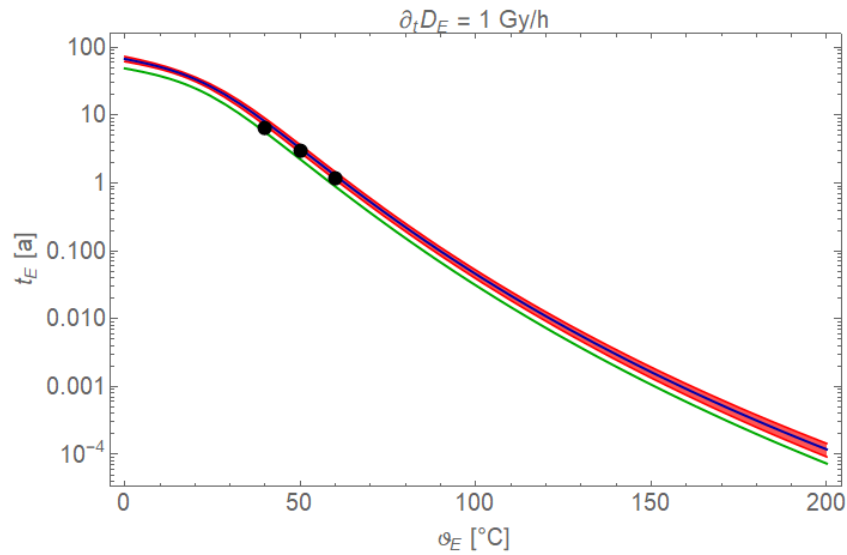


Abb. 5.38 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C bei einer konstanten Dosisrate von 1 Gy/h (Modelldaten)

Die Referenztemperatur wird wie zuvor auf $\vartheta_{ref} = 50 \text{ °C}$ festgelegt und die relevanten Modellparameter E_a , k und x sind oben bereits bestimmt worden.

Parameter aus dem Qualifizierungsprozess werden durch einen Index Q gekennzeichnet. Für sie wurden die Werte des mittleren Datenpunktes aus dem Datensatz in Abb. 5.29 b) verwendet.

Da dieser einem Datensatz bei einer Temperatur von 50°C entspricht, gilt zudem $\vartheta_Q = \vartheta_{ref} = 50\text{ °C}$.

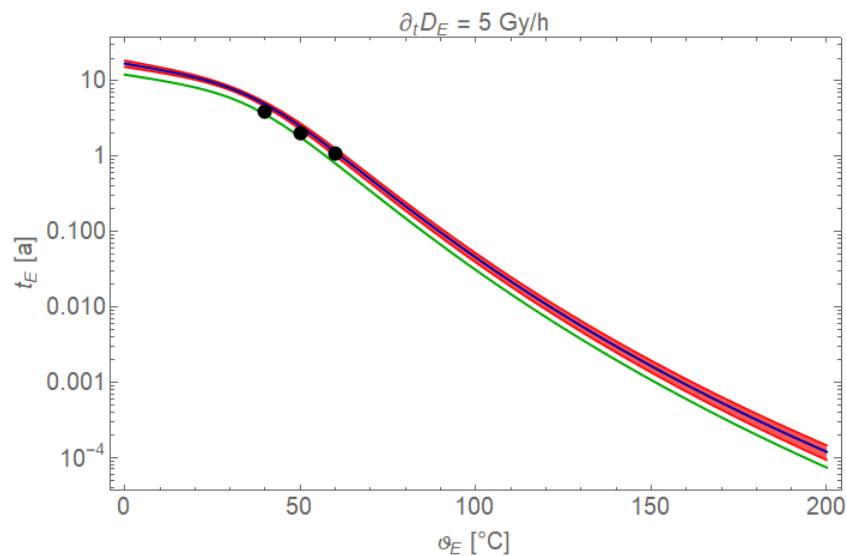


Abb. 5.39 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C bei einer konstanten Dosisrate von 5 Gy/h (Modelldaten)

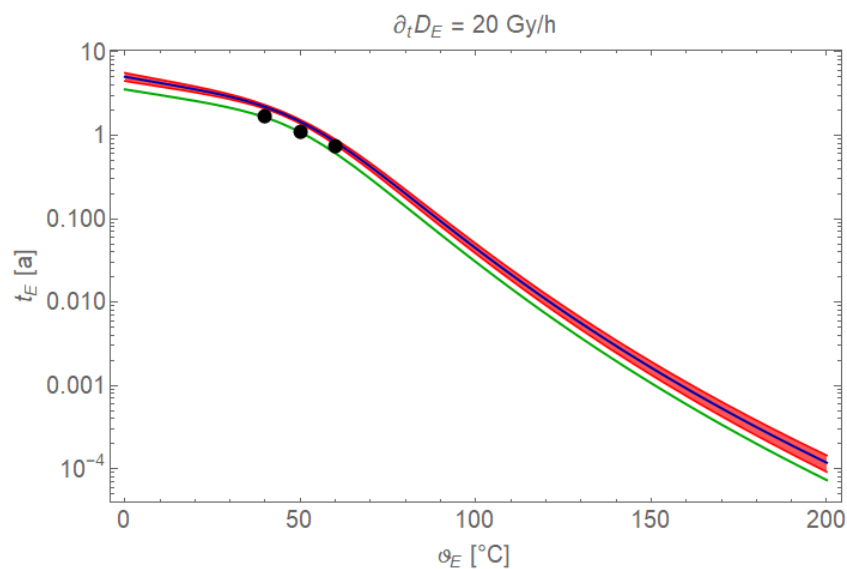


Abb. 5.40 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C bei einer konstanten Dosisrate von 20 Gy/h (Modelldaten)

Die Temperatur unter Einsatzbedingungen (Index E) ϑ_E ist die Funktionsvariable und die Einsatzdosisrate $\dot{D}_E$ wird jeweils auf die oben gewählten Werte 0,1 Gy/h, 1 Gy/h, 5 Gy/h, 20 Gy/h und 100 Gy/h festgelegt. Mit all diesen Informationen war es nun möglich die Lebensdauer zu berechnen und für die jeweilige Dosisrate über die Einsatztemperatur aufzutragen. Dabei wurden auch die zugehörigen, aus Abb. 5.36 extrahierten Datenpunkte in die Plots integriert. Sie werden als schwarze Punkte dargestellt.

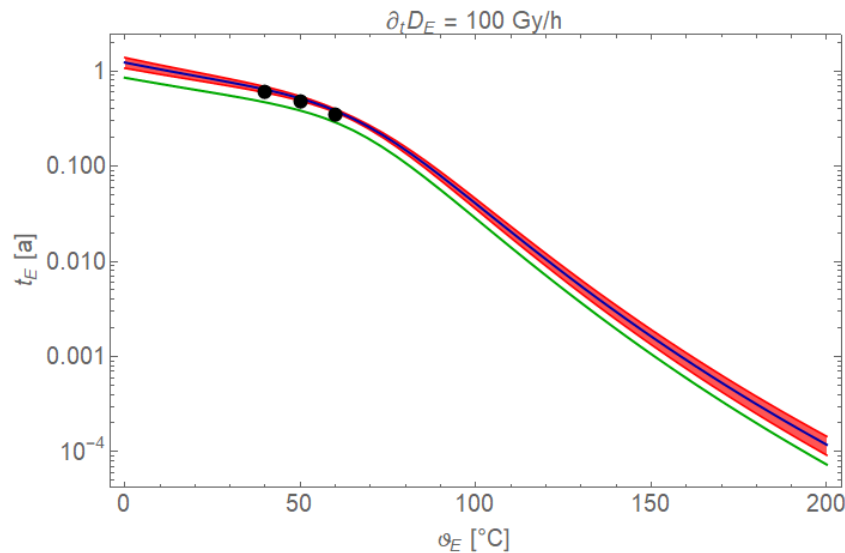


Abb. 5.41 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C bei einer konstanten Dosisrate von 100 Gy/h (Modelldaten).

Die Ergebnis-Graphen sind in den Abb. 5.37, Abb. 5.38, Abb. 5.39, Abb. 5.40 und Abb. 5.41 zu sehen. Dabei gibt der blaue Graph das Ergebnis unseres Rechenmodells für die qualifizierte Lebensdauer t_E an, das rote Band stellt das Fehlerband dar und der grüne Graph repräsentiert die nutzbare Lebensdauer t_N , die als Sicherheitsgrenze nicht unterschritten werden darf.

Man erkennt, dass alle Datenpunkte aus dem Sandia-Modell über der grünen Kurve liegen, so dass eine konservative Abschätzung der Lebensdauer gewährleistet ist. Einige Datenpunkte des Sandia-Modells liegen unterhalb des Fehlerbands. Der Grund dafür wurde bereits im Abschnitt 5.3.1 beschrieben. Anschließend wurde das Ergebnis für die Lebensdauer bei fester Einsatztemperatur ϑ_E und variabler Einsatzdosisrate $\dot{D}_E$ überprüft. Dazu wurden mehrere Datenpunkte aus den Graphen in Abb. 5.36 ausgewählt, welche bei den in der Abbildung angegebenen Einsatztemperaturen 40 °C, 50 °C und 60 °C über das Sandia-Modell berechnet worden waren.

Das restliche Vorgehen erfolgte analog zu der oben beschriebenen Überprüfung der Lebensdauer bei konstanter Einsatzdosisrate und variabler Einsatztemperatur. Die Ergebnisse sind in den Abb. 5.42, Abb. 5.43 und Abb. 5.44 zu sehen. Man erkennt, dass alle über Abb. 5.36 ermittelten Datenpunkte des Sandia-Modells (schwarze Punkte) über dem grünen Graphen liegen, was eine konservative Abschätzung der Lebensdauer sicherstellt.

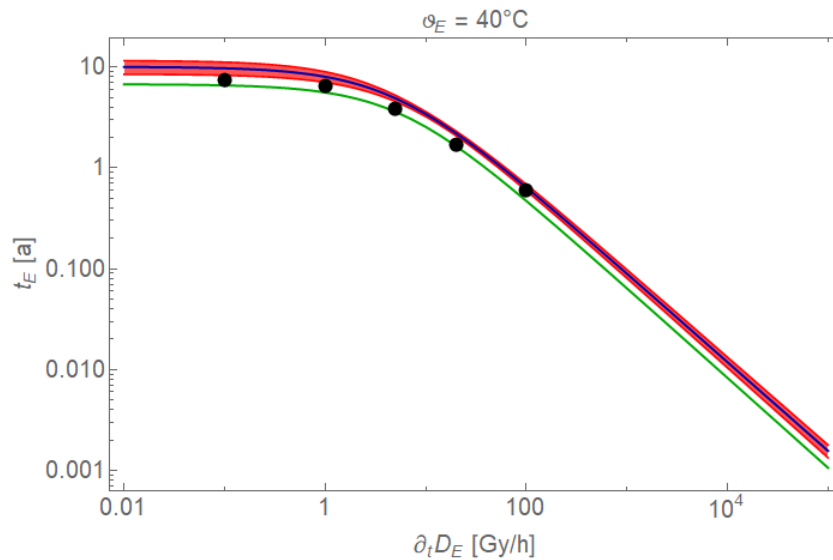


Abb. 5.42 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Dosisrate $\dot{D}$ in Gy/h bei einer konstanten Temperatur von 40°C (Modelldaten).

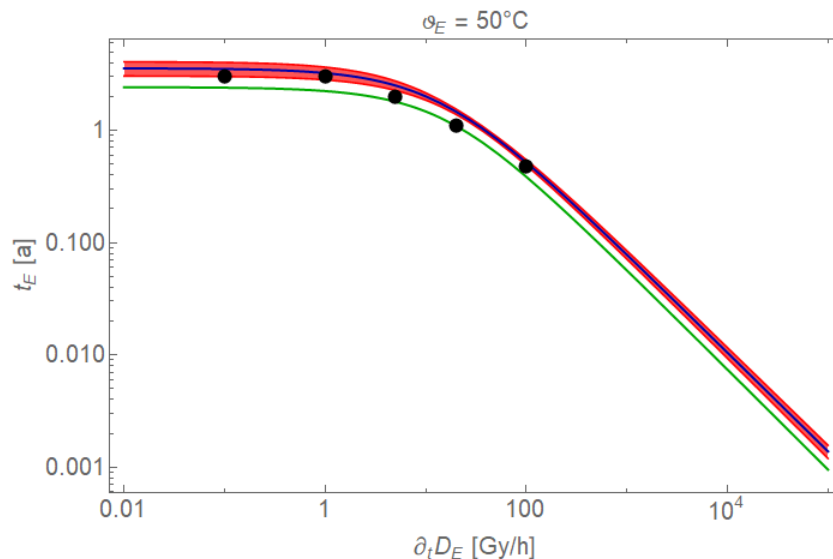


Abb. 5.43 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Dosisrate $\dot{D}$ in Gy/h bei einer konstanten Temperatur von 50°C (Modelldaten)

Einige der Datenpunkte liegen unterhalb des roten Fehlerbands. Die Gründe sind dieselben wie zuvor im Abschnitt 5.3.1 beschrieben. Es ist festzuhalten, dass in beiden Fällen (Lebensdauer aufgetragen über die Temperatur bei konstanter Dosisrate und Lebensdauer aufgetragen über die Dosisrate bei konstanter Temperatur) die Daten des Sandia-Modells unser Superpositions-Modell bestätigen.

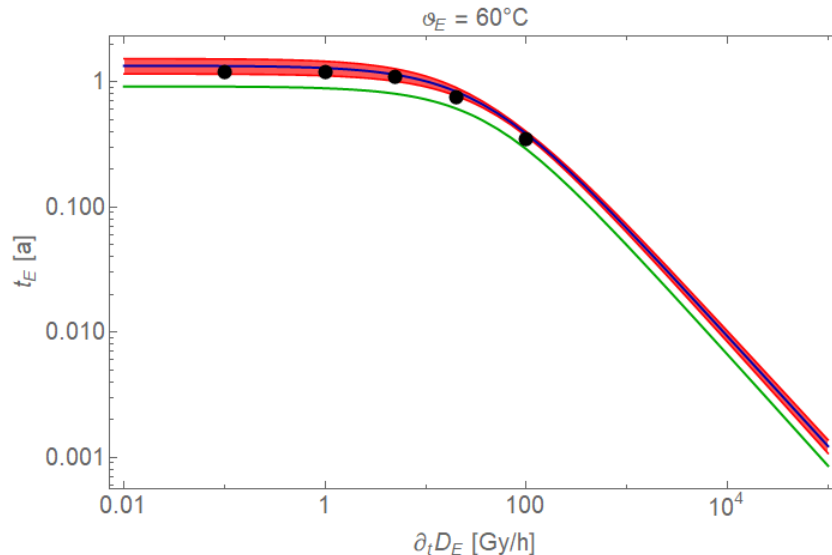


Abb. 5.44 Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Dosisrate $\dot{D}$ in Gy/h bei einer konstanten Temperatur von 60°C (Modelldaten).

5.4 Fazit zu den Modell-Verifikationen

Die Verifikation der Rechenmodelle hat gezeigt, dass die bei der Bestimmung der Modellparameter ermittelten Zwischenergebnisse überwiegend zu den Ergebnissen aus dem Sandia-Bericht /SAN 10/ passen. Dies betrifft sowohl Zahlenwerte, die innerhalb der bestimmten Fehlertoleranzen liegen, als auch die Umrechnung von Datensätzen mit den zugehörigen graphischen Darstellungen. Eine Ausnahme bildet der bei der Verifikation des Rechenmodells der radiologischen Alterung in Abschnitt 5.2.1 für die Aktivierungsenergie E_a von Brandrex CLPO ermittelte Wert, der mit $(109,15 \pm 4,02) \text{ kJ/mol}$ größer als der Wert von 72 kJ/mol aus dem Sandia-Bericht ist. Dies führt zu einer Abweichung des Graphen in Abb. 5.16, in dem die DED -Messwerte in Gy doppelt logarithmisch über die Dosisrate $\dot{D}$ in Gy/h aufgetragen wurden, gegenüber dem korrespondierenden Graphen aus dem Sandia-Bericht in Abb. 5.10. Die Datenpunkte in Abb. 5.16 sind stärker in Richtung negativer Werte für den Logarithmus der Dosisleistung $\lg(\dot{D})$ verschoben als in Abb. 5.10.

Diese Abweichung betrifft aber nicht die Steigungen der beiden Graphen, welche identisch sind und dem Dosisleistungseffektexponenten n entsprechen. Folglich war es mit dem ermittelten Datensatz dennoch möglich den korrekten Dosisleistungseffektexponenten $n = 0,174 \pm 0,011$ von Brandrex CLPO zu bestimmen, was durch die passende Modellvorhersage für die Lebensdauer in Abb. 5.18 untermauert wird.

Bei allen in diesem Eigenforschungsvorhaben entwickelten Rechenmodellen zur Vorhersage der Lebensdauer von Kabelisolierungen liegen die meisten der für die Lebensdauer ermittelten Datenpunkte aus dem Sandia-Bericht innerhalb des Fehlerbands und somit auch innerhalb der Fehlertoleranzen der Rechenmodelle. Dies betrifft sowohl die Datenpunkte der gemessenen Lebensdauer als auch die Datenpunkte, die mit dem Sandia-Alterungsmodell vorhergesagt wurden. Bei Anwendbarkeit der entwickelten Rechenmodelle besitzen alle außerhalb der Fehlertoleranz liegenden Datenpunkte einen Wert für die Lebensdauer, der stets größer ist als die minimale Abschätzung der Lebensdauer (grüner Funktionsgraph) der hier entwickelten Rechenmodelle.

Legt man die Bestimmung der Lebensdauer von Kabelisolierungen dieser minimalen Abschätzung zugrunde, so ist damit sichergestellt, dass die Lebensdauer von den Rechenmodellen realistisch und konservativ ermittelt wird. Die Rechenmodelle sind im Rahmen ihrer Anwendbarkeit somit für die Vorhersage der Lebensdauer von Kabelisolierungen geeignet.

6 Materialspezifische Eigenschaften und Sondereffekte

In diesem Kapitel werden die Rechercheergebnisse zu materialspezifischen Sondereffekten bei der thermischen und/oder radiologischen Alterung von Polymeren dargestellt. Weiterhin wird das Alterungsverhalten der Polymere unter dem Einfluss der typischen im Kernkraftwerksbetrieb relevanten Stressoren zusammengefasst.

6.1 Materialspezifische Einführung zu PVC

PVC (Polyvinylchlorid) ist ein amorpher thermoplastischer Kunststoff, dessen Eigenschaftsbild, im Gegensatz zu den meisten anderen Werkstoffen, durch die Zugabe von Additiven, Füllstoffen und Modifikatoren für die Anwendung maßgeschneidert werden kann. Die PVC-Kunststoffe werden in Hart-PVC (auch PVC-U, unplasticized) und Weich-PVC (auch PVC-P) unterteilt. PVC zeichnet sich durch gute Flammwidrigkeit und chemische Beständigkeit aus. /DOL 87, DOM 12/

Herstellungsverfahren

PVC wird durch radikalische Polymerisation von Vinylchlorid hergestellt. Das Polymerisationsverfahren beeinflusst die Materialeigenschaften des PVC erheblich. Es werden hauptsächlich drei Verfahren eingesetzt: /TRC 25/

- **Suspensionspolymerisation (S-PVC):** Liefert PVC mit relativ gleichmäßiger Molekulargewichtsverteilung und hoher Reinheit. Suspensions-PVC besitzt geringe Wasseraufnahmekapazität, gute dielektrische Eigenschaften sowie verbesserte Wärme- und Lichtstabilitätstranschem. Solches PVC wird bevorzugt für elektrische Anwendungen (z. B. Kabelmischungen) eingesetzt.
- **Emulsionspolymerisation (E-PVC, Paste-PVC):** Führt zu feinteiligem PVC mit breiter Molekulargewichtsverteilung und höherem Gehalt an Emulgator-Rückständen und Feuchtigkeit. Emulsions-PVC zeigt im Vergleich zu S-PVC eine **schlechtere dielektrische Eigenschaft** sowie geringere Wärme- und Lichtstabilität. Aufgrund dieser Nachteile wird für hochwertige Kabelisolierungen meist S-PVC verwendet.
- **Massenpolymerisation (M-PVC oder Bulk-Verfahren):** Ebenfalls möglich, aber technisch weniger gebräuchlich; liefert PVC mit eigenen Charakteristika.

Die Wahl des Polymerisationsverfahrens wirkt sich also auf die Qualität der PVC-Basis aus. Für Kabelisierungen in Kernkraftwerken wird typischerweise hochreines Suspension-PVC verwendet, um beste elektrische und thermische Ausgangseigenschaften zu erzielen

Struktur

Die Herstellungsverfahren (wie Emulsions-, Suspensions- und Massepolymerisation) beeinflussen vor allem das äußere Erscheinungsbild wie Korngröße, Kornform und gegebenenfalls die Weichmacheraufnahme. Nachhaltiger wirkt sich jedoch die chemische Natur bestimmter Zusatzstoffe wie Stabilisatoren, Gleitmittel, Füllstoffe, Pigmente, Treibmittel, Antistatika, Flammenschutzadditive, UV-Stabilisatoren, Fungizide u. a. auf die Eigenschaften des Endproduktes aus. /DOM 12, EHR 07/

Additive und Zuschlagstoffe (PVC)

PVC erreicht die heutige Anwendungsbreite und die Vielseitigkeit nur durch die Vielzahl von unterschiedlichen Additiven und Zuschlagstoffen, die das Eigenschaftsprofil des Grundwerkstoffes PVC sehr weitreichend verändern können. /DOM 12, EHR 07/

• Stabilisatoren und Costabilisatoren

In der thermoplastischen Verarbeitung von PVC wird das Polymer durch thermische Belastung und Friktion geschädigt. Die hohen Anforderungen an moderne PVC-Mischungen und die Vielzahl der verschiedenen Abbaumechanismen erfordern zunehmend sehr komplexe Stabilisatorsysteme. Die Funktion der Stabilisatorsysteme besteht darin, präventiv Chlorwasserstoff (HCl) zu binden, Initialstellen des PVC-Abbaus auszuschalten und die Autooxidation zu verhindern. Weiterhin wirken Stabilisatoren curativ, in dem sie sich an gebildete Polyensequenzen addieren oder in Oniumsalze umwandeln können. /DOM 12, EHR 07/

Für die Stabilisierung von PVC-Mischungen stehen heute Organozinn-Stabilisatoren, Barium-Zink- und Calcium-Zink-Stabilisatoren sowie Calciumorganische Stabilisatorsysteme zur Verfügung. /DOM 12, EHR 07/

Stabilisatoren haben einen wesentlichen Einfluss auf die Verarbeitungseigenschaften der PVC-Mischung und die Gebrauchseigenschaften eines Produktes. Es ist daher entscheidend, das Stabilisator-System auf die jeweilige Verarbeitung und Anwendung anzupassen. /DOM 12, EHR 07/

Typische Lieferformen sind vorgemischte Stabilisator-Compounds (auch als One-Packs bezeichnet) in Pulver- oder Granulatform, die bei der Herstellung des PVC-Dryblends zwischen 2 und 6 Prozent dem PVC zugesetzt werden. /DOM 12, EHR 07/

Eine nicht ausreichende Stabilisierung von PVC macht sich in einer Verfärbung des Materials und der Abspaltung von HCl bemerkbar. Die Wirksamkeit eines Stabilisators kann beispielsweise durch einen HCl-Test oder Mathis-Test nachgewiesen werden. /DOM 12, EHR 07/

- **Costabilisatoren**

Costabilisatoren nehmen in modernen komplexen Stabilisatorsystemen eine wichtige Rolle ein. Sie wirken häufig synergetisch mit dem Stabilisator, indem sie gezielt bestimmte Ketten von Abbaureaktionen unterbrechen, Defektstellen inertisieren oder auf die Zersetzung katalytisch wirkende Zwischenprodukte der Stabilisierungsreaktionen oder Abbaureaktionen auffangen. /DOM 12, EHR 07/

Costabilisatoren sind meist organische Substanzen wie Organo-Phosphite, Polyole, 1,3-Diketone, Epoxyverbindungen, Antioxidantien oder UV-Stabilisatoren. /DOM 12, EHR 07/

- **Säurefänger**

Säurefänger haben in PVC-Mischungen die Aufgabe, die durch die unvermeidlich ablaufenden Abbaureaktionen im PVC freiwerdenden Säuren (vorwiegend HCl) zu binden. Hierzu werden überwiegend Metallseifen eingesetzt, die auch eine leicht stabilisierende Wirkung aufweisen. /DOM 12, EHR 07/

- **Gleitmittel**

Um das rheologische Verhalten während der Verarbeitung einzustellen, werden PVC-Mischungen Gleitmittel zugesetzt. Nach ihrer Wirkung unterscheidet man zwischen inneren (internen), und äußeren (externen) Gleitmitteln. /DOM 12, EHR 07/

Innere Gleitmittel sind mit der Polymermatrix verträglich und reduzieren vorwiegend die Reibung im Inneren des Materials und damit die Schererwärmung. Um die hierfür notwendige Verträglichkeit mit dem polaren Basispolymer PVC zu erreichen, sind innere Gleitmittel meist polare Substanzen. /DOM 12, EHR 07/

Äußere Gleitmittel hingegen verringern vorwiegend die Reibung zwischen dem Polymer und der den Fließkanal begrenzenden Metalloberfläche. Sie sind mit dem Basispolymer weniger verträglich, sodass sie überwiegend an der Grenzfläche zum Metall wirken. Diese äußere Wirkung wird durch eine gezielt eingestellte Unverträglichkeit mit dem polaren Basispolymer erreicht. Äußere Gleitmittel sind daher vorwiegend chemisch unpolare. Marktgängige Gleitmittel sind in feinen Abstufungen zwischen rein äußerer und rein innerer Wirkung und damit auch in sehr unterschiedlicher Polarität erhältlich. /DOM 12, EHR 07/

Üblicherweise kommen als Gleitmittel höhere Alkohole, höhere Fettsäuren, gehärtete Fette und Ester zum Einsatz. Sie werden verarbeitungsfähigen Mischungen in Zugabemengen von 0,2 % bis 2 % zugesetzt. /DOM 12, EHR 07/

- **Füllstoffe**

Füllstoffe stellen in vielen PVC-Mischungen einen bedeutenden Mengenanteil dar. So werden in einzelnen Anwendungen Füllstoffgehalte von bis zu 60 Masse-% erreicht. Füllstoffe werden PVC-Mischungen sowohl aus technischen als auch aus wirtschaftlichen Gründen zugesetzt. Sie beeinflussen u. a. Dichte, Steifigkeit, Schlagzähigkeit, Oberflächenhärte, Schwindung und die thermischen Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität einer PVC-Mischung. /DOM 12, EHR 07/

Die Kabel- und Profilmischungen enthalten vor allem höhere Calciumcarbonatanteile. Bei Primärisolationen sind es 50 bis 70 Teile, bei Mantelmischungen 80 bis 100 Teile und bei den ausfüllenden Strängen im Kabel bis zu 350 Teile. PVC-P-Profile wie Sockelleisten und Keder enthalten bis zu 150 Teile, spritzgegossene Erzeugnisse 10 bis 15 Teile. Wie Plateout-Studien mit PVC-U und PVC-P ergaben, kann diese beim Kalandrieren und Extrudieren störende Erscheinung durch Verwenden feinteiliger, oberflächenbeschichteter Kreide wirkungsvoll verhindert werden. Die mit zunehmender Temperatur und Druckentspannung im PVC-System nicht mehr miteinander verträglichen Rezepturbestandteile werden problemlos vom Calciumcarbonat absorbiert.

Calciumcarbonat dient als idealer Absorber bei Säureabspaltung und verbessert so die Thermostabilität (ggf. Einsparen von Stabilisatoren). Calciumcarbonat erhöht die Formbeständigkeit in der Wärme und es werden bessere elektrische und dielektrische Eigenschaften erreicht. /DOM 12, EHR 07/

Das Kaolin wird vor allem in der Kabelindustrie verwendet, denn es erhöht den spezifischen Durchgangswiderstand der Kabelmassen. Kaolin weist eine hohe Weichmacheraufnahme auf. Silicate verringern das Plateout und das Blocking, sie dienen in der Kabelindustrie als Ionenfänger. /DOM 12, EHR 07/

Eigenschaften

Kennzeichnende Eigenschaften für Hart- PVC (PVC-U) sind: /DOM 12, EHR 07/

- hohe mechanische Festigkeit, Steifheit und Härte
- in nicht modifizierter Form schlagempfindlich in der Kälte
- ungefüllt durchscheinend bis transparent (je nach Herstellverfahren)
- gute elektrische Eigenschaften im Niederspannungs- und Niederfrequenzbereich
- hohe Beständigkeit gegen den Angriff durch Chemikalien
- selbstverlöschend nach Entfernen der Zündquelle

Weich-PVC zeichnet sich vor allem durch folgende Eigenschaften aus: /DOM 12, EHR 07/

- in weiten Grenzen einstellbare Flexibilität
- Zähigkeit je nach Weichmacherart, sehr temperaturabhängig
- durchscheinend bis transparent
- gute elektrische Eigenschaften im Niederspannungs- und Niederfrequenzbereich
- die Beständigkeit gegen Chemikalien ist rezept- und sehr temperaturabhängig

Die Glasübergangstemperatur¹ von Hart-PVC (PVC-U) beträgt ca. 75 – 80 °C. Sie kann durch Mischen mit einem wärmeformbeständigeren Material erhöht oder durch die Zugabe von Weichmachern gesenkt werden. /DOM 12, EHR 07/

PVC-U ist überwiegend amorph mit einem geringen kristallinen Anteil. Daraus ergibt sich ein breiter Aufschmelzbereich. Die Dauergebrauchstemperatur beträgt etwa 65°C in Anwendungen, in denen die Dimensionsstabilität wie beispielsweise bei Fensterprofilen gewahrt werden muss. Sie kann jedoch durch Modifizieren mit wärmeformbeständigeren Komponenten in Grenzen angehoben werden. /DOM 12, EHR 07/

Die Glasübergangstemperatur (T_G) von Weich-PVC (PVC-P) unterscheidet sich deutlich von der des Hart-PVC und liegt typischerweise im Bereich von -20 °C bis +10 °C. Diese niedrige T_G ist auf den Einsatz von Weichmachern zurückzuführen, die die Beweglichkeit der Polymerketten erhöhen und somit die Glasübergangstemperatur senken /KKI 07, MCM 25/.

Der genaue Wert der T_G hängt stark von der Art und Menge der verwendeten Weichmacher ab. Bei einem Weichmacheranteil von 30 – 40 % kann die T_G auf Werte um -10 °C bis 0 °C sinken. Diese niedrige Glasübergangstemperatur verleiht dem Weich-PVC seine charakteristische Flexibilität bei Raumtemperatur /KKI 07, MCM 25/.

Die praktische Einsatzgrenze von Weich-PVC liegt bei etwa +60 °C, wobei das Material mit steigender Temperatur an Festigkeit und Härte verliert. Durch den Zusatz spezieller Weichmacher lässt sich die Dauergebrauchstemperatur auf bis zu +105 °C erhöhen. Am unteren Ende des Temperaturspektrums setzt je nach Art und Anteil des Weichmachers eine Versprödung bei -10 °C bis -50 °C ein /BKM 25/.

Höhere Belastungen bei Weich-PVC treten in Kabelanwendungen (speziell im Automobilbau) auf, wo Dauergebrauchstemperaturen von 70 °C bis über 100 °C gefordert werden /DOM 12/.

¹ Die Glasübergangstemperatur T_G kommt in allen Polymeren vor und bezeichnet die Temperatur, bei der sich der physikalische Zustand eines Polymers von glasig (hart & spröde) zu gummig (weich & flexibel) verändert. Die T_G wird üblicherweise verwendet, um die höchste Einsatztemperatur eines amorphen Polymers hervorzuheben. /MCM 25/

Mit geeigneten Stabilisatoren und Hilfsstoffen sind PVC-Formmassen mit sehr guten elektrischen Eigenschaften herstellbar. PVC-Isolierstoffe werden im Niederfrequenzbereich bis etwa 10 kV eingesetzt. Bei höheren Frequenzen wirkt sich der verhältnismäßig hohe dielektrische Verlustfaktor nachteilig aus /KKI 07, MCM 25/.

6.2 Materialspezifische Einführung zu EPR

Ethylen-Propylen-Copolymere (EPR von engl. Ethylen-Propylen-Rubber), früher auch Ethylen-Propylen-Kautschuk (EPM) sind synthetische Elastomere, die durch die Copolymerisation von Ethylen und Propylen hergestellt werden. Diese Polymere sind bekannt für ihre hohe Formbeständigkeit, Dimensionsstabilität und geringe Spannungsrissbildung, was sie zu idealen Materialien für verschiedene Anwendungen macht. Sie werden häufig als Schmelzklebstoffe, Dichtstoffe und Kabelisolierungen eingesetzt, da sie resistent gegen Oxidationsmittel und Ozon sind. /BRI 25/

Zusätzlich gibt es eine Variante dieser Polymere, die als Ethylen-Propylen-Dien-Monomer (EPDM) bekannt ist. EPDM enthält ein zusätzliches Dien-Monomer, was ihm noch bessere elastische Eigenschaften verleiht und es zu einem beliebten Material für Dichtungen und andere Anwendungen macht. /BRI 25, BWG 25/

Herstellungsverfahren

Die Herstellung von EP(D)M erfolgt durch anionische Polymerisation von Ethylen, Propylen und/oder einem geringen Anteil eines Diens im Lösungs- bzw. Suspensionsverfahren oder in der Gasphase. Bevorzugte Katalysatorsysteme sind homogene Ziegler-Natta- und neuerdings auch Metallocenkatalysatoren, die die Herstellung amorpher Polymere mit statistisch verteilten Ethylen- und Propylen-Einheiten ermöglichen. Beide Monomere haben eine starke Tendenz zur Bildung von Sequenzen, die insbesondere bei langen Ethylensequenzen zu kristallinen Bereichen führen kann. Für die Herstellung von Polymeren mit ca. 50 % Ethylen-Anteil benötigt man daher einen hohen Überschuss an Propylen. /DOM 12, EHR 07/

EPR ist ein Polymerisat aus Ethylen und Propylen. Der Kautschuk enthält keine Doppelbindungen und lässt sich somit nicht durch Schwefel-Beschleuniger-Systeme, sondern nur mit Hilfe von Peroxiden vernetzen. EPDM ist ein Terpolymer.

Als Dien-Komponente verwendet man heutzutage Hexadien (HD), Dicyclopentadien (DCPD) und Ethylidennorbornen (ENB) (Abb. 6.1). /DOM 12, EHR 07/

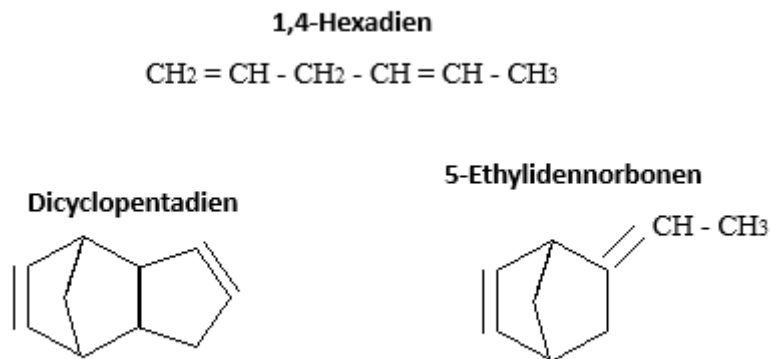


Abb. 6.1 Dienkomponenten für die Herstellung von EPDM

Abbildung nachgezeichnet aus /DOM 12/.

Die genannten Diene unterscheiden sich in ihrer Vernetzungsgeschwindigkeit, wobei Dicyclopentadien die niedrigste, Ethylidennorbornen die höchste Reaktivität besitzt. Der Diengehalt liegt in der Regel zwischen 2 und 12 Masse.-%. Ein höherer Diengehalt ermöglicht eine höhere Vernetzungsgeschwindigkeit und Vernetzungsdichte, höhere Festigkeiten und einen niedrigeren Druckverformungsrest. Da die EPDM-Hauptkette frei von Doppelbindungen ist, zeichnet sich EPDM durch gute Alterungs-, Witterungs- und Ozonbeständigkeit aus. Diese nehmen jedoch mit steigendem Diengehalt ab. Der generelle Aufbau von EPDM entspricht folgender Strukturformel: /DOM 12, EHR 07/

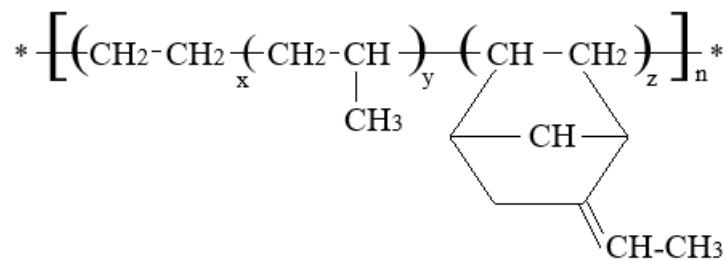


Abb. 6.2 Strukturformel von EPDM mit 5-Ethylidennorbornen als Dienkomponente

Abbildung nachgezeichnet aus /DOM 12/

Eigenschaften

Die Eigenschaften von EPDM werden durch die Anordnung und Sequenzlänge der Monomere, der Art und Menge des Termonomers sowie durch die Molmasse, Molmassenverteilung und die Kettenverzweigung bestimmt. /DOM 12, EHR 07/

Die viskoelastischen Eigenschaften werden im Wesentlichen durch den Ethylengehalt beeinflusst, da Polyethylen eine starke Neigung zum Kristallisieren hat. Bei einem Ethylengehalt zwischen 40 und 55 Masse.-% sind die Monomereinheiten statistisch in der Kette angeordnet. Die Glasübergangstemperatur liegt zwischen -50 und -60 °C. Mit steigendem Ethylengehalt nimmt die Sequenzlänge zu und es bilden sich teilkristalline Bereiche aus, die in einer höheren Glasübergangstemperatur des Kautschuks resultieren. /DOM 12, EHR 07/

Die wesentlichen Eigenschaften von EPDM sind eine gute Witterungs-, UV- und Ozonbeständigkeit sowie Hitze- und Dampfbeständigkeit. Schwefelvernetzte Typen können Temperaturen von $+135$ °C, peroxidvernetzte Elastomere bis $+150$ °C widerstehen. Durch spezielle Compoundierung sind die Werkstoffe sogar bis zu $+180$ °C dampfbeständig. Die Reißfestigkeit nimmt mit steigender Molmasse und steigendem Ethylengehalt zu. Der Weiterreißwiderstand ist bei teilkristallinen Typen besser als beim amorphen Kautschuk, dagegen ergeben amorphe Polymere mit hoher Molmasse, ebenso wie Kautschuke mit hohem ENB-Gehalt, bessere Werte für den Druckverformungsrest. /DOM 12, EHR 07/

Elastomere aus EPDM zeichnen sich durch eine gute Quellbeständigkeit in Heißwasser, Dampf, Waschlauge, oxidierend wirkenden Medien, Säuren, Basen, polaren organischen Medien, Ketonen, schwerentflammbaren Hydraulikflüssigkeiten der Gruppe HFC und einigen Typen der Gruppe HFD, sowie in Bremsflüssigkeiten auf Glykoletherbasis aus. Dagegen ist der Werkstoff stark quellend in Mineralölen und Fetten, Benzin und aliphatischen sowie aromatischen und chlorierten Kohlenwasserstoffen. Der thermische Anwendungsbereich reicht von ca. -50 °C bis $+150$ °C, wobei das Kälteverhalten stark vom Ethylenanteil abhängt. /DOM 12, EHR 07/

Die Glasübergangstemperatur kann durch Block-Copolymerisation mit Ethylen bzw. Elastifizieren mit thermoplastischen Elastomeren (z. B. EPDM) zu tieferen Temperaturen verschoben werden. Dadurch behält das aus diesem Polymer bestehende Isolatomaterial auch bei tieferen Temperaturen seine Flexibilität bei. /DOM 12, EHR 07/

Verarbeitung

EPDM-Kautschuke sind mit allen Dienkautschuken unverträglich. Verschnitte mit unpolaren Dienkautschuken dienen der Verbesserung der Witterungs- und Ozonbeständigkeit dieser Kautschuke. Für eine ausreichende Covulkanisation kommen vor allem EPDM-Typen mit hohem ENB-Gehalt in Anteilen um 30 % zum Einsatz. Allerdings liegen die mechanischen Eigenschaften dieser Blends deutlich unter denen der einzelnen Compounds. Zum Erreichen guter mechanischer Eigenschaften werden für amorphe und teilkristalline EPDM-Typen verstärkende Füllstoffe benötigt. Auch durch den Einsatz von aktiven Füllstoffen bleibt das Wertenniveau für Reißfestigkeit und Weiterreißwiderstand jedoch unter dem von Dienkautschuken. Weichmacher auf der Basis von unpolaren Mineralölen sind mit EPDM gut verträglich. Es werden bevorzugt paraffinische Mineralöle eingesetzt. Ölverstreckte Typen enthalten den Weichmacher bereits. Beim Einsatz von Weichmachern ist allerdings deren Flüchtigkeit bei höheren Temperaturen zu beachten. Alterungsschutzmittel kommen in EPDM-Compounds selten zur Anwendung, auf Ozonschutzmittel kann völlig verzichtet werden. /DOM 12, EHR 07/

Als Vulkanisationsmittel können sowohl Schwefel-Beschleuniger-Systeme als auch Peroxide, Chinondioxime oder Harze eingesetzt werden. Durch die wenigen Doppelbindungen verläuft die Schwefelvulkanisation verhältnismäßig langsam. Daher müssen effektive Vulkanisationsbeschleuniger in hoher Dosierung bei hohen Vulkanisationstemperaturen verwendet werden. Bei der Vernetzung mit Peroxiden kann eine Reihe unerwünschter Nebenreaktionen auftreten, die wesentlich vom Propylengehalt des Polymers abhängen und die teilweise durch Coagenzien unterdrückt werden können. Peroxidvernetzte EPDM-Typen mit hohem Ethylenanteil und niedrigem ENB-Gehalt zeigen eine gute Hitzebeständigkeit. Da Luftsauerstoff die Peroxidvernetzung stört, ist eine Vulkanisation nur in geschlossenen Werkzeugen möglich. Die Güte der Rußdispersion beim Mischvorgang hängt bei EPDM sehr von der Molmassenverteilung ab. Besonders die Hoch-Mooney-Typen können große Mengen an Füllstoffen und Weichmachern aufnehmen. /DOM 12, EHR 07/

6.3 Das Alterungsverhalten von ausgewählten Polymeren (PVC und EPR) unter dem Einfluss von Stressoren

Generell verläuft der typische Alterungsprozess für die meisten, aber nicht alle Stressoren derartig, dass die kovalenten Bindungen der Makromoleküle aufgebrochen werden und Radikale entstehen.

Diese reaktiven Moleküle reagieren mit verschiedenen potentiellen Reaktionspartnern aus der Umgebung weiter, wobei je nach ablaufender Reaktion entweder weitere Radikale produziert werden oder es zu Kettenverknüpfungen kommt. Sauerstoff aus der Atmosphäre der Umgebung ist dabei ein wichtiger Reaktionspartner. Dieser kann im Rahmen der über längere Zeiten ablaufenden realen Alterungsvorgänge in das PVC bzw. in das EPR hineindiffundieren, wobei die Diffusion im Allgemeinen im amorphen Teil schneller abläuft als im kristallinen Teil, und steht daher im ganzen Material quasi homogen als Reaktionspartner zur Verfügung. Die beschriebenen Reaktionen finden daher nicht nur an der Oberfläche statt. Da dieser Diffusionsvorgang für alle Polymere stattfindet, gilt dies auch für Kabel mit einem Kabelmantel aus einem anderen Polymer.
/DOL 87/

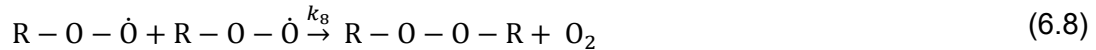
Initialisierung der Reaktion:



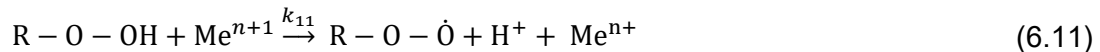
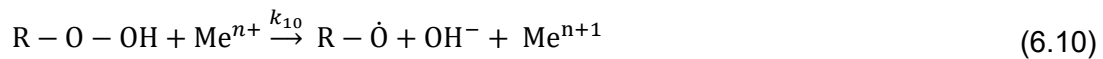
Ausbreitungs- und Vernetzungsreaktionen:



Abbruchreaktionen:



Kupfer oder andere metallische Elemente, wie sie für den Leiter verwendet werden, können dabei katalytisch wirken: /DOL 87/



Ozon kann die Oxidationsreaktionen ebenfalls fördern, da durch folgende Reaktion zusätzliche Radikale entstehen. Bei ungesättigten Polymeren, zu denen Polyethylen nicht gehört, finden weitere Reaktionen statt, so dass diese normalerweise stärker durch Ozon geschädigt werden: /DOL 87/



R steht in den obigen Formeln für „Rest“ und steht für den übrigen, nicht an der Reaktion beteiligten Teil des Makromoleküls

Me steht für ein beliebiges mehrwertiges Metallion

O steht für Sauerstoff

H für Wasserstoff

k_x stehen für verschiedene reaktionskinetische Geschwindigkeitskonstanten der einzelnen Reaktionen

Da die Reaktionen mit stark unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten ablaufen und die Produkte mancher Reaktionen die Edukte anderer Reaktionen sind, läuft das Alterungsverhalten außerdem gegenüber der Exposition mit dem Stressor zeitlich verzögert ab, insbesondere ist nach Abschluss der Beaufschlagung noch mit einer weiter ablaufenden Materialdegeneration zu rechnen. /DOL 87/

6.3.1 Beständigkeit gegen atmosphärische Einflüsse

PVC-Spezifika

Thermostabilisatoren und ihre evtl. Abbauprodukte sowie die Reinheit des PVC beeinflussen die UV-Stabilität in einer sehr komplexen und bis heute nicht vollständig erklär-
baren Art. Zusätze wie Thermostabilisatoren, Gleitmittel, Verarbeitungshilfen usw. können ebenso wie residuale Chromophore, hauptsächlich konjugierte Doppelbindungen, herrührend von der thermischen Degradation während der Verarbeitung, UV-Licht absorbieren und einen Abbau auslösen. M-PVC ist ein sehr reines Produkt und enthält keine Hilfsstoffe, die den Abbau negativ beeinflussen. S-PVC ist ähnlich dem M-PVC ein Produkt mit hoher Reinheit und vergleichbaren Abbaueigenschaften. E-PVC enthält Hilfsstoffe, die als Chromophore wirken können, d. h. die UV-Strahlung absorbieren und Ausgangspunkt für den photoinitierten Abbau sein können. In Anwesenheit von Weichmachern, Gleitmitteln, UV-Stabilisatoren usw. ist die Situation noch viel komplizierter. /DOM 12, EHR 07/

Temperatur, Feuchtigkeit, Niederschlag sowie atmosphärische Verschmutzung haben einen wesentlichen Einfluss auf das Bewitterungsverhalten von PVC. Wesentlichen Einfluss auf die Verfärbung von PVC-Oberflächen hat das Grenzflächenklima an der Oberfläche; feuchte Oberflächen vergilben weniger schnell, da aufgrund des Wasserfilms die Diffusion von Luftsauerstoff in das Isolatormaterial reduziert wird. /DOM 12, EHR 07/

Die Alterung von PVC ist das Ergebnis des thermischen Abbaus bei seiner Verarbeitung und des photo-chemischen Abbaus bei der Bewitterung. Die thermische Beanspruchung während der thermoplastischen Verarbeitung erzeugt im PVC-Makromolekül Doppelbindungen, die UV-Strahlung absorbieren können, wenn sich das Endprodukt im Freien befindet. Bei der Bewitterung von PVC finden im Wellenlängenbereich von 280 bis 500 nm sowohl eine Vergilbung als auch eine Aufhellreaktion statt. Die Vinylgruppe ist im Wellenlängenbereich um 320 nm am empfindlichsten gegenüber UV-Licht. Bei dieser Wellenlänge kommt es zur Abspaltung von HCl, wodurch sich Doppelbindungen bilden, die zu einer Vergilbung führen. Im Folgenden kommt es zur Oxidation und zur Bildung von Peroxiden, Aldehyden, Ketonen und Alkoholen. Im Wellenlängenbereich von 400 bis 500 nm tritt eine Aufhellung („Photo-Bleaching“) ein. /DOM 12, EHR 07/

EPR-Spezifika

EPR und EPDM haben keine Ungesättigkeit in der Hauptkette und sind folglich gut bewitterungs- und ozonbeständig. Antiozonate werden nicht benötigt. EPDM kann sogar im Verschnitt dazu verwendet werden, die Ozonbeständigkeit empfindlicher Kautschuke zu verbessern. /DOM 12, EHR 07/

Ungeschützte EPR und EPDM sind empfindlich gegenüber UV-Licht. Bei der Bewitterung vergilben diese Elastomere und es kommt zu einer Verringerung der Molmasse statt. Durch Zusatz von Ruß wird die Bewitterungsbeständigkeit erhöht, so dass ein Gebrauch über Jahrzehnte möglich ist, wie Untersuchungen an Isolatoren und Wetterhütten aus Ethylen-Propylen-(EP)-Gummi mit EPR und EPDM zeigen. Es wurde keine Beeinträchtigung festgestellt. In der Corona Cutting Kammer versagen bereits im Einsatz gewesenen Proben nach 378 Stunden, während neue Proben nach 405 Stunden versagen. Dies zeigt, dass die Proben auch nach 12-jährigen Einsatz noch in einem guten Zustand sind. Auch Freibewitterungen in Florida an rußgefüllten, bewitterungsbeständigen EPDM zeigen nach 20 Jahren nur geringe Veränderungen. Eine maximale Bewitterungsbeständigkeit kann bei EPDM erreicht werden, indem Additive und Füllstoffe (bevorzugt feiner Ruß) als UV-Absorber sowie Zinkoxide und Antioxidantien zugegeben werden und Verarbeitungsöle mit einem geringen aromatischen Anteil verwendet werden. Bei hellen EPR und EPDM kann die UV-Beständigkeit durch Verwendung von hochmolekularem EPR bzw. EPDM, hochreinen Paraffin-Ölen, Zinkoxid, Titandioxid (Rutil) und Pigmenten auf der Basis von Phthalocyaniden gesteigert werden. /DOM 12, EHR 07/

6.3.2 Temperatur

Unter thermischem Einfluss und Präsenz von Sauerstoff werden schwächere Bindungen der Makromoleküle durch Oxidation abgebaut und niedrigmolekulare Produkte abgespalten. Durch den Sauerstoff stellen sich dann die zu Beginn von diesem Kapitel dargestellten Oxidationsreaktionsketten ein. Die Aktivierung in Reaktion (6.1) erfolgt thermisch. Die Folgen sind eine Verschlechterung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Werkstoffs. /DOM 12, EHR 07/

Chemisch erfolgt neben den in Kapitel 2 dargestellten Vernetzungs- und Abbruchreaktionen auch die Bildung von Peroxy-, Carbonyl- und Carboxy-Gruppen aus Reaktionen von Radikalen mit dem Luftsauerstoff, die dann ebenfalls weiter an Vernetzungs- und Abbruchreaktionen teilnehmen können. /DOM 12, EHR 07/

In jedem Fall kommt es bei Temperaturänderungen auch zu dimensional Änderungen des Werkstoffs (thermische Expansion). Dies muss bei der Montage berücksichtigt werden, da sich ansonsten Spannungen und daraus folgend mechanische Rissbildungen ergeben können. Da dies durch geeignete Maßnahmen während der Installation vermieden werden kann, wird es im Folgenden nicht als klassischer für Kabel relevanter Alterungseffekt untersucht. /DOM 12, EHR 07/

Abhängig von den verwendeten Zusatzstoffen können diese bei erhöhten Temperaturen innerhalb des Werkstoffs diffundieren oder ausdampfen, was die Werkstoffeigenschaften ebenfalls beeinflussen kann. Die Relevanz derartiger Effekte ist folglich herstellerabhängig.

6.3.2.1 PVC-Spezifika

Stabilisatorfreies PVC zersetzt sich bei Temperaturen über 100°C unter Verfärbung. Dabei beschleunigt sich der Abbauprozess mit steigender Temperatur. Der Abbau beginnt mit einer HCl-Abspaltung (Dehydrochlorierung). Ausgehend von einer Stelle, an der bereits ein HCl-Molekül abgespalten wurde, werden reißverschlussartig weitere HCl-Moleküle abgespalten, wodurch konjugierte Doppelbindungen entstehen. Ab einer Zahl von 5 bis 7 konjugierten Doppelbindungen verfärbt sich das PVC. Bei der Bildung von Sequenzen konjugierter Doppelbindungen können sich zudem Carbeniumsalze bilden, die Chlorwasserstoff (HCl) binden. Dies führt zu einer Farbvertiefung (Halochromie) und der starken Verfärbung von thermisch belastetem PVC. /DOM 12, EHR 07/

Unregelmäßigkeiten im Aufbau der Hauptkette unter Bildung von Bindungen geringer Bindungsenergie, beispielsweise Kopf-Kopf-Verknüpfungen, Verzweigungen oder sauerstoffhaltige Gruppen sind für den Abbau ausschlaggebend. Die HCl-Abspaltung findet durch eine Spaltung an einer Bindung mit geringer Bindungsenergie und anschließender Reaktion der Chlorradikale mit der Hauptkette unter Bildung von HCl statt. Katalysatorreste an den Kettenenden können ebenfalls zum Abbau beitragen. Nach Freisetzung von HCl wirkt dieser autokatalytisch auf den weiteren Abbau. /DOM 12, EHR 07/

Bei der Verarbeitung von PVC müssen daher immer Stabilisatoren zugegeben werden, die die Dehydrochlorierung durch Bindung von HCl und Ausschaltung von Initialstellen verzögern, die Autoxidation zurückdrängen und mechanochemische Fragmentierung durch innere Gleitmittelwirkung vermindern. /DOM 12, EHR 07/

Größere Polyensequenzen können intra- und intermolekulare Cyclisierungsreaktionen eingehen, so dass der PVC-Abbau zunächst nicht zwingend von Kettenspaltungen begleitet ist. /DOM 12, EHR 07/

Sauerstoff ist ein Promoter für die HCl-Abspaltung. Daher führt Luft einerseits zu einer Verstärkung der Dehydrochlorierung, kann aber auf der anderen Seite auch die Verfärbung verlangsamen und ein gering verfärbtes PVC sogar wieder aufhellen, da Sauerstoff ebenfalls mit den Polyengruppen reagiert und somit das konjugierte Doppelbindungssystem aufbricht. /DOM 12, EHR 07/

Eine Depolymerisation unter Bildung von Vinylchlorid findet nicht statt. Die Bindungsenergie einer C-Cl-Bindung ist mit 317 kJ/mol wesentlich geringer als die Bindungsenergie der C-C-Bindung in der Hauptkette mit 348 kJ/mol. /DOM 12, EHR 07/

PVC wird typischerweise in Schnellmischern bei Temperaturen bis zu 120 °C aufbereitet. Dabei treten bei den herrschenden Umfangsgeschwindigkeiten sehr hohe Friktionen auf, so dass bei leicht dispergierbaren Pigmenten eine Schädigung eintreten kann, die sich durch Veränderung der Koloristik und Verschlechterung der Wetter- und Chemikalienbeständigkeit äußert. Bei kornweichen Pigmenten lässt sich das Problem lösen, indem diese bei 80 °C im Schnellmischer oder später im Kühlmischer zugesetzt werden. Kornharte Pigmente, wie oxidische Verbindungen, führen leicht zu Metallabrasion in den Mixern. Durch Einschleppung von Schwermetallen in den Kunststoff tritt nicht nur eine koloristische Veränderung ein, sondern auch eine Reduktion der Wetterbeständigkeit, weil die Zersetzung von PVC durch Eisen katalysiert wird. Abhilfe schafft eine möglichst späte Zugabe der kornharten Zusatzstoffe. /EHR 07/

6.3.2.2 EPR-Spezifika

Ethylen-Propylen-Kautschuke (EPDM) zeichnen sich durch eine herausragende Temperaturbeständigkeit aus, die sie für vielfältige industrielle Anwendungen prädestiniert. Der typische Einsatzbereich liegt zwischen -50 °C und +150 °C, wobei die exakten Grenzen von der Vernetzungsart und der Mischungszusammensetzung abhängen /ERI 25, RAD 25/.

Bei tiefen Temperaturen behält EPDM seine Elastizität bis etwa -50 °C, wodurch es auch in Kälteumgebungen einsetzbar bleibt.

Für kurzzeitige Belastungen können speziell formulierte Compounds sogar Temperaturen bis +200 °C in Dampfumgebungen oder +180 °C in Luft aushalten. Im Dauerbetrieb liegt die Obergrenze je nach Vernetzung bei +120 °C (schwefelvernetzt) oder +150 °C (peroxidvernetzt). Letztere Variante zeigt zudem eine verbesserte Beständigkeit gegenüber Heißwasser und Chemikalien wie Bremsflüssigkeiten. /RAD 25, LEB 25/

Die Langzeitstabilität von EPDM ist bemerkenswert: Unter Standardbedingungen weist das Material eine Haltbarkeit von über 50 Jahren auf, selbst bei starker UV- oder Ozonexposition. Allerdings führt anhaltende Hitzeeinwirkung oberhalb der maximalen Dauergebrauchstemperatur zur allmählichen Zersetzung des Materials, nicht zu Verformungen. /RAD 25/

Für Anwendungen mit extremen Temperaturwechseln oder chemischen Belastungen (z. B. in Hydrauliksystemen oder Dampfleitungen) werden häufig peroxidvernetzte EPDM-Typen bevorzugt, die eine optimale Balance zwischen Flexibilität und Widerstandsfähigkeit bieten. /ERI 25/

6.3.3 Strahlung

Die folgenden Ausführungen entstammen der Expertise der GRS. Grundsätzlich können alle Arten von Strahlung, also sowohl Teilchenstrahlung als auch Photonen, Veränderungen im Werkstoff hervorrufen. In der Praxis ist die Wechselwirkung mit α -Teilchen auf Grund deren kurzen Reichweite nicht relevant. Elektronen (β -Teilchen) interagieren mit Elektronen in der Hülle der Atome bzw. Moleküle, diese können dabei angeregt werden oder die Atome werden direkt ionisiert. Photonen (γ -Teilchen) interagieren je nach Energie über den photoelektrischen Effekt (Ionisation) oder den Compton-Effekt (elastische Streuung). Bei höheren Energien kann es auch zur Paarbildung ($>1,022$ MeV) oder photonuklearen Absorption (mehrere MeV) kommen. Neutronen interagieren über Streuung mit Kern und Hülle. Kernchemische Reaktionen sind aufgrund der beteiligten Elemente (Kohlenstoff und Wasserstoff) nur von untergeordneter Bedeutung, da diese keine ausgeprägten Neutronenwechselwirkungsquerschnitte haben. Schlussendlich befinden sich die betroffenen Atome entweder in einem ionisierten Zustand oder besitzen angeregte Elektronen. Aus diesen entstehen dann Radikale über folgende Reaktionen:

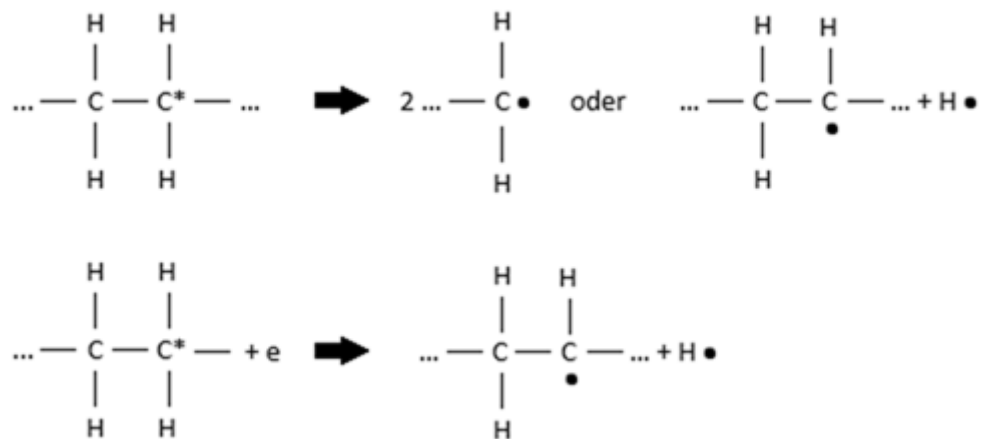


Abb. 6.3 Beispielreaktionen für die Entstehung von Radikalen aus angeregten oder ionisierten Molekülen

Abbildung erstellt auf Basis der GRS-Expertise

Das radikalisierte Kohlenstoffatom kann sich auch über verschiedene Umwandlungen unter zwischenzeitlicher Ausbildung einer Doppelbindung entlang eines Makromoleküls bewegen oder von einem Molekül zum anderen „überspringen“. Zwei Radikale können rekombinieren und bilden so eine zusätzliche Verbindung zwischen zwei vorher unabhängigen Makromolekülen: /EHR 07, VTT 16/

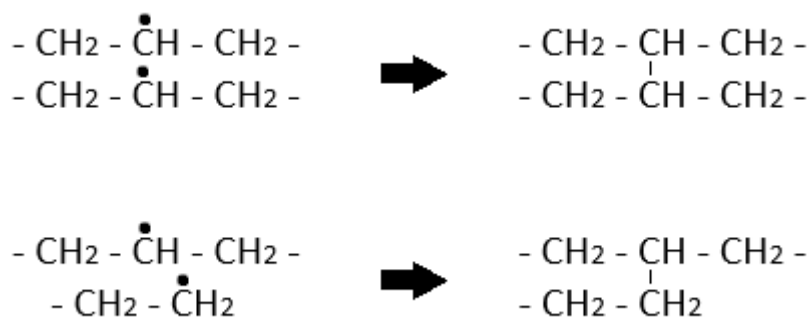


Abb. 6.4 Beispiele für Verkettungen zwischen zwei Polymerketten nach der Bildung von Radikalen in beiden Makromolekülen

Das obere Beispiel bildet eine H-artige Verkettung aus, das untere eine T-artige. Abbildung nachgezeichnet aus /EHR 07, VTT 16/

Bei Präsenz von Sauerstoff können auch die von Kapitel 6.3 aufgeführten Oxidationsreaktionen ablaufen.

Als Aktivierung fungiert hier die oben beschriebene Radikalbildung durch Strahlungseinwirkung. Chemisch erfolgt neben den in Kapitel 6.3 dargestellten Vernetzungs- und Abbruchreaktionen auch die Bildung von Peroxy-, Carbonyl und Carboxy-Gruppen (siehe Abb. 6.5) aus Reaktionen von Radikalen mit dem Luftsauerstoff, die dann ebenfalls weiter an Vernetzungs- und Abbruchreaktionen teilnehmen können. /EHR 07/



Abb. 6.5 Struktur von Carbonyl- und Carboxy-Gruppen. Abbildung nachgezeichnet aus /EHR 07/

Insgesamt entsteht bei Bestrahlung durch die Rekombination von Radikalen verschiedener Makromoleküle eine zunehmende Vernetzung. Andererseits führt die Spaltung der Hauptketten durch entsprechende Radikalbildung oder im Rahmen der Oxidationsreaktionen zu einer Kettenverkürzung. Im Rahmen der genannten Reaktionen kann es auch zur Ausgasung gasförmiger Reaktionsprodukte (bei PE in der Regel (Anteil ca. 98 %) in Form von Wasserstoff, bei Silikonkautschuken zusätzlich auch Methan oder Kohlenstoffdioxid) kommen, welche zu internen Spannungen im Material führen können. Während ersterer Mechanismus die Materialeigenschaften tendenziell verbessert, wirken die anderen beiden degenerierend. Die Vernetzung findet dabei vor allem im amorphen Bereich statt, da die Molekülketten sich für die Vernetzung einander annähern können müssen. /EHR 07/

Allgemeingültig

An dieser Stelle soll kurz die Dosisratenabhängigkeit strahleninduzierter Alterung diskutiert werden. Bei hohen Dosisraten kann Sauerstoff so schnell in den Radikal- und Oxidationsreaktionen verbraucht werden, dass rein durch Diffusion nicht genug Sauerstoff nachgeliefert werden kann. Folglich findet dann nur an den Oberflächen des Probenkörpers eine der tatsächlichen Dosis entsprechende Alterung statt. Im Probenkörper finden die Oxidationsreaktionen dann auf Grund von Sauerstoffmangel nur in einem stark reduzierten Umfang statt.

Daher kann die gleiche Dosis abhängig von der Dosisrate unterschiedlich umfangreiche Schäden verursachen, wenn eine der Dosisraten hoch genug ist, um eine heterogene Oxidation wie oben beschrieben zu verursachen. Dies ist besonders bei gerafften Alterungsvorgängen im Rahmen der Komponentenqualifikation zu beachten, da die dort verwendeten Dosisraten tendenziell höher sind als die unter realen Bedingungen auftretenden Dosisraten. Da die Diffusionsrate von Sauerstoff im kristallinen Teil geringer ist, tritt der Effekt dort ausgeprägter auf und ist im Allgemeinen daher von der Kristallinität des Polymers abhängig (und damit auch von der Temperatur). Auch das bereits Anfangs in Kapitel 6.3 beschriebene nachlaufende Verhalten ist hier besonders ausgeprägt, wenn nach Abschluss der Bestrahlung Sauerstoff wieder in sauerstoffarme Regionen diffundiert.

6.3.3.1 PVC-Spezifika

Polyvinylchlorid geht unter dem Einfluss ionisierender Strahlung Vernetzungsreaktionen ein; diesen ist jedoch je nach Bestrahlungsbedingungen und Reinheit ein mehr oder weniger starker Abbau überlagert, der durch die Anwesenheit von Sauerstoff begünstigt wird. In inerter Atmosphäre überwiegt die Vernetzung, in Gegenwart von Sauerstoff hingegen die Kettenspaltung. Durch energiereiche Strahlung wird vor allem HCl abgespalten. Dabei entstehen konjugierte Doppelbindungen, wodurch es zur Gelbfärbung kommt. Bei höheren Strahlungsdosen (150 kGy) geht die Farbe in braun bis schwarz über. Dieser Vorgang geht auch nach Beendigung der Bestrahlung weiter, wenn das PVC im Dunkeln gelagert wird. Die Verfärbung wird daher durch Radikale mit einer hohen Lebensdauer hervorgerufen, die während der Bestrahlung entstehen. /EHR 07/

Die auftretenden chemischen Veränderungen bewirken eine Änderung der mechanischen Eigenschaften, wie z. B. die Abnahme der Reißfestigkeit von PVC-Kabelisolierungen. In Gegenwart von Sauerstoff ändern sich die mechanischen Eigenschaften wesentlich schneller als in inerter Atmosphäre oder im Vakuum. /EHR 07/

Weichmacher beeinflussen die Beständigkeit von PVC gegenüber energiereicher Strahlung: die mechanischen Eigenschaften ändern sich langsamer, da durch den Weichmachergehalt die Menge der Querverbindungen geringer ist. Dabei spielt nicht nur die Menge, sondern auch die chemische Zusammensetzung des Weichmachers eine Rolle. Manche Weichmacher – wie z. B. Diallylphthalat und Triallylcyanurat – beschleunigen die Vernetzung beträchtlich, da diese auch als Vernetzungshilfsmittel wirken. /EHR 07/

PVC kann durch Vernetzungshilfsmittel vernetzt werden, wobei für jedes Vernetzungshilfsmittel spezifische Bestrahlungsbedingungen und Konzentrationen ausgewählt werden müssen, da kein allgemeiner Zusammenhang zwischen Dosierung und Vernetzung existiert. In Abhängigkeit des PVC-Typs, des Weichmachers und des Vernetzungshilfsmittels kann die Migration von Weichmachern reduziert werden. /EHR 07/

6.3.3.2 EPR-Spezifika

Die Strahlungsbeständigkeit von EPDM ist bei gleichem Aufbau geringer als die von EPM. Dieses Verhalten wird durch die Anwesenheit der Doppelbindungen verursacht. Während der anfänglichen Bestrahlung (bis 100 kGy) werden bedeutende Mengen von Abbauprodukten (Alkohole, Ketone und Aldehyde) gebildet, die sich durch die Reaktion von freien Radikalen mit molekular in der Polymermatrix gelöstem Sauerstoff bilden. Die Konzentration der radikalischen Zwischenprodukte ist sehr hoch, so dass geringe Mengen an Antioxidantien keine effektive Stabilität bewirken. Eine effektive Stabilisierung gegen den Abbau durch Strahlung findet im Bereich mittlerer Strahlungsdosen (zwischen 200 und 350 kGy) statt. Die Reaktionswahrscheinlichkeit der Stabilisatoren ist deutlich angestiegen und ein bedeutender Anteil der Oxidationsreaktion kann unterdrückt werden. /EHR 07/

Die Konzentrationszunahmen von Ketonen und Aldehyden weisen große Ähnlichkeiten auf, da die Bindungsspaltung zufällig stattfindet. Es ist wahrscheinlich, dass die Radikalposition von der ursprünglichen Position entlang dem Kohlenstoffgerüst wandert. Das Verhältnis zwischen Aldehyd- und Ketonkonzentration hängt nicht von der Lage der Spaltung ab. /EHR 07/

6.3.4 Synergetische Effekte bei gleichzeitiger thermischer und radiologischer Alterung

6.3.4.1 EPR-Spezifika

Bei der gleichzeitigen thermischen und radiologischen Alterung von Ethylen-Propylen-Kautschuk (EPR/EPM) entstehen synergetische Degradationsmechanismen, die über die Summe einzelner Belastungseffekte hinausgehen. Diese Elastomere, häufig als Kabelisolierung eingesetzt, unterliegen dabei komplexen Wechselwirkungen zwischen Vernetzungs- und Abbauprozessen. /DOM 12, EHR 07/

Unter thermischer Belastung (typischerweise bis 120 °C) wird die thermische Oxidation der Polymerketten beschleunigt, während ionisierende Strahlung radikalische Zerfallsreaktionen auslöst. Paradoxe Weise induziert Strahlung gleichzeitig zusätzliche Vernetzungen im Material, insbesondere bei peroxidvernetzten EPM-Typen. Dieser Dualismus führt zu einer drastischen Versprödung: Während die Zugfestigkeit kurzfristig durch Vernetzung ansteigt, fällt die Reißdehnung durch strahlungsbedingte Kettenbrüche rapide ab. /UBM 15, GAK 17/

Kritisch ist die Rolle von Additiven: Antioxidantien migrieren unter Wärmeeinfluss schneller an die Oberfläche, wo sie durch Strahlung zersetzt werden. Dieser synergistische Effekt reduziert den oxidativen Schutz und begünstigt die Bildung von Mikrorissen, die wiederum Ozonangriffe ermöglichen – ein entscheidender Nachteil, da Ozonresistenz eine Kernstärke von EPR-Materialien ist. /LEI 08/

Elektrisch zeigt sich ein nichtlinearer Anstieg der dielektrischen Verluste, da durch Strahlung erzeugte Poren und thermisch induzierte Kristallitbildung Polarisationsverluste potenzieren. Langzeitstudien an Kernkraftwerkskabeln belegen, dass solche Synergieeffekte die Lebensdauerprognosen von Alterungstests, die nur Einzelfaktoren berücksichtigen, um 30 – 50 % herabsetzen. /GAK 17, LEI 08/

Ein Schlüsselmechanismus ist die Radikalbildung: Restperoxide aus der Vulkanisation reagieren unter Strahlungseinwirkung mit Sauerstoff, wodurch autokatalytische Zersetzungsketten initiiert werden. Ab 80 °C und Dosisraten > 1 Gy/h verstärken sich diese Effekte exponentiell, da die Wärme die Sauerstoffdiffusion in die Polymerstruktur beschleunigt. /DOM 12, EHR 07/

Praktisch äußert sich dies in: /DOM 12, EHR 07/

- Härteanstieg um 40 – 60 % durch Vernetzung bei gleichzeitiger Abnahme der Zugfestigkeit um 25 – 35 %
- Reduktion des Volumenwiderstands um 2 – 3 Größenordnungen durch kohlenstoffhaltige Zersetzungsprodukte

Gegenmaßnahmen erfordern eine optimierte Vulkanisation: Peroxidvernetzte EPM-Varianten mit reduziertem Restperoxid-Gehalt (< 0,1 Gew.-%) und nachgeschaltetem Temperprozess zeigen höhere Stabilität, da unerwünschte Radikalreaktionen minimiert werden.

Zudem verbessert die Zugabe von Nanofüllstoffen wie SiO_2 die Strahlungsresistenz, indem sie die Bildung stabiler C-C-Netzwerke fördert. /LEI 08, GAK 17/

6.3.4.2 PVC-Spezifika

Bei der gleichzeitigen thermischen und radiologischen Alterung von PVC-Kabeln treten synergetische Effekte auf, die den Materialabbau erheblich beschleunigen und zu einer stärkeren Degradation führen, als es bei einer isolierten Belastung durch Hitze oder Strahlung der Fall wäre. Diese Wechselwirkungen beruhen auf chemischen, mechanischen und elektrischen Veränderungen, die sich gegenseitig verstärken. /DOM 12, EHR 07/

Ein zentraler chemischer Abbaumechanismus ist die Dehydrochlorierung, bei der unter Hitze- und Strahlungseinwirkung Chlorwasserstoff (HCl) aus der PVC-Matrix freigesetzt wird. Thermische Alterung bei Temperaturen über 70 °C führt dazu, dass Weichmacher aus dem Material entweichen, wodurch die Polymerketten starrer werden. Gleichzeitig bewirkt Gammastrahlung (ab einer Dosis von etwa 10 kGy), dass C-Cl- und C-H-Bindungen in der PVC-Struktur gebrochen werden, was die Freisetzung von HCl weiter verstärkt. Das entstehende HCl-Gas kann lokale Mikrorisse und Oberflächenpitting verursachen, was die strukturelle Integrität des Materials beeinträchtigt /SCI 22, ACS 24/.

Mechanisch verschlechtern sich durch die kombinierte Belastung die Eigenschaften des Materials deutlich stärker als bei einer einzelnen Belastungsart. Während thermische Alterung allein die Zugfestigkeit zunächst leicht erhöht (durch eine Verfestigung infolge von Kristallinitätszunahme), führt die gleichzeitige Strahlungsbelastung zu einem drastischen Abfall der Zugfestigkeit um etwa 40 % nach einer Dosis von 50 kGy bei 80 °C. Auch die Dehnung bis zum Bruch nimmt stark ab – um bis zu 70 % –, was das Material spröder macht. Diese Effekte sind das Ergebnis einer Überlagerung von Vernetzungs- und Abbauprozessen: Strahlung induziert zwar Vernetzungen in der Polymerstruktur, erhöht jedoch gleichzeitig die Oxidationsrate. Die thermische Belastung beschleunigt zudem die Diffusion von Antioxidantien aus dem Material, wodurch der Schutz vor oxidativem Abbau weiter reduziert wird. /IAE 97/

Elektrisch verschlechtert sich das Material ebenfalls deutlich. Der Volumenwiderstand sinkt unter kombinierter thermischer und radiologischer Belastung um mehrere Größenordnungen, während die dielektrischen Verluste aufgrund von Polarisationsphänomenen in den durch Zersetzung entstandenen Mikroporen steigen.

Gleichzeitig erhöht sich die Oberflächenleitfähigkeit durch Kohlenstoffablagerungen aus den Zersetzungsreaktionen. /IAE 97/

Die synergetischen Effekte werden besonders kritisch ab bestimmten Schwellenwerten. So verstärken sich diese Wechselwirkungen exponentiell bei Temperaturen über 80 °C und Strahlungsdosen ab etwa 30 kGy. Auch die Expositionszeit spielt eine Rolle: Nach zwei bis fünf Äquivalenzjahren beschleunigt sich der Abbau erheblich. Studien der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEA) zeigen, dass niedrige Dosisraten (z. B. 1 Gy/h) in Kombination mit moderaten Temperaturen Schäden hervorrufen können, die um 50 – 70 % höher sind als bei einer rein additiven Betrachtung von Hitze- und Strahlungsbelastung. Dies verdeutlicht, dass Standardtests zur Alterungsbewertung von PVC-Kabeln in kritischen Anwendungen wie Kernkraftwerken häufig nicht ausreichen, um diese komplexen Wechselwirkungen realistisch abzubilden. /IAE 97/

7 Sicherheitszuschläge aus synergetischen Effekten

In den vorherigen Kapiteln wurden bereits entsprechende Sicherheitszuschläge abgeleitet. Gemäß den Ausführungen am Beginn von Kapitel 3 ist zu berücksichtigen, dass die Zusammensetzung der Isolierungen von Kabeln nicht perfekt homogen ist, was entlang eines Kabels zu ortsabhängigen Schwankungen der Geschwindigkeit der Alterungsreaktionen bei gleichen Umgebungsbedingungen führen kann. Um eine konservative Abschätzung der Lebensdauer sicherzustellen, müssen daher die Fehler der Modellparameter ausreichend groß gewählt werden, so dass diese Schwankungen in den Alterungsreaktionen über die Fehler der Modellparameter berücksichtigt werden. Dabei helfen entsprechende Erfahrungswerte. Im Kapitel 3.1 wurden Sicherheitszuschläge für die Aktivierungsenergie E_a der rein thermischen Alterung und im Kapitel 3.2 für den Dosisleistungseffektexponenten n der rein radiologischen Alterung festgelegt. Zusätzlich führt die Definition der nutzbaren Lebensdauer t_N in Kapitel 3, welche nach Gleichung (4.1) zu berechnen ist, zu einer konservativen Abschätzung der Lebensdauer von Isolatorwerkstoffen.

In diesem Kapitel werden noch Sicherheitszuschläge definiert, die sich aus den synergetischen Effekten ergeben, die bei der Verifikation des Superpositionsverfahrens (kombinierte thermische und radiologische Alterung) in Abschnitt 5.3.1 beobachtet wurden. Dabei stellt man fest, dass die Graphen der Lebensdauer bei gleichzeitiger thermischer und radiologischer Alterung aus den Abb. 5.30, Abb. 5.31 und Abb. 5.32 bei niedrigen Temperaturen stark abflachen, im Gegensatz zum Graphen der Lebensdauer in Abb. 5.6 bei rein thermischer Alterung. Dies ist bei der Berechnung der Lebensdauer über das Arrhenius-Modell der rein thermischen Alterung zu berücksichtigen, wenn radiologische Alterungseffekte nicht ausgeschlossen werden können. In diesem Fall kann die Lebensdauer nur innerhalb des Temperaturbereichs extrapoliert werden, über den die Arrhenius-Gerade für die Bestimmung der Aktivierungsenergie E_a aufgetragen wurde oder für noch höhere Temperaturen, sofern die Alterungsreaktionen gleichbleiben und keine Phasenübergänge im Isolationsmaterial auftreten. Denn dann dominiert die thermische Alterung und radiologische Alterungseffekte können vernachlässigt werden.

Darüber hinaus ist zu beobachten, dass die Graphen der Lebensdauer bei gleichzeitiger thermischer und radiologischer Alterung aus den Abb. 5.33, Abb. 5.34 und 5.35 bei niedrigen Dosistraten stark abflachen, im Gegensatz zum Graphen der Lebensdauer in Abb. 5.18 bei rein radiologischer Alterung.

Das ist wiederum bei der Berechnung der Lebensdauer über das Potenzgesetz der rein radiologischen Alterung zu berücksichtigen, da zusätzliche thermische Alterungseffekte immer auftreten. In diesem Fall kann die Lebensdauer nur innerhalb des Bereichs der Dosisrate extrapoliert werden, über den die Gerade zur Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n aufgetragen wurde oder für noch höhere Dosisraten, sofern die Alterungsreaktionen gleichbleiben und keine Phasenübergänge im Isolationsmaterial auftreten. Dann dominiert die radiologische Alterung und thermische Alterungseffekte können vernachlässigt werden.

In allen anderen Fällen kombinierter thermischer und radiologischer Alterung sollte nach Möglichkeit das Superposition I- oder das Superposition II-Verfahren verwendet werden oder für das betreffende Polymer ist bereits bekannt, dass unter den herrschenden Umgebungsbedingungen das Arrhenius-Modell für die rein thermische Alterung bzw. das Potenzgesetz für die rein radiologische Alterung angewendet werden darf.

Aufgrund von Synergieeffekten, die im Kapitel 6.3.4 behandelt wurden, kann es vorkommen, dass sich thermische und radiologische Alterungsreaktionen gegenseitig verstärken (z. B. erhöhte Mobilität der Polymerketten durch Strahlungseinfluss in PVC, was zu thermischen Abbauprozessen bei niedrigeren Temperaturen führt /KUN 17, LIN 25/).

Dies kann zu einem komplexeren Alterungsverhalten führen, das durch die in diesem Vorhaben behandelten Rechenmodelle nicht abgebildet werden kann. Wenn sich die Modellparameter nicht wie durch die Rechenmodelle vorgegeben bestimmen lassen, dann kann das ein Hinweis auf ein komplexeres Alterungsverhalten infolge synergetischer Effekte sein. Die in diesem Vorhaben behandelten Rechenmodelle sind dann nicht anwendbar. Für PVC ist dies zum Beispiel bei Temperaturen über 80 °C und gleichzeitiger Schädigungsdosis von mehr als 30 kGy der Fall, da der Einfluss synergetischer Effekte oberhalb dieser Werte exponentiell zunimmt. Ein exponentielles Ansteigen der Auswirkungen synergetischer Effekte ist bei EPR dagegen oberhalb einer Temperatur von 80 °C bei einer gleichzeitig auftretenden Dosisrate von mehr als 1 Gy/h zu beobachten.

8 Zusammenfassung

Zu Beginn dieses Eigenforschungsvorhabens (ALISe) verfügte die GRS über keine Verfahren, um die Lebensdauer von Isolierwerkstoffen von Kabeln abhängig von den Umgebungsbedingungen zu quantifizieren. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein grundsätzlich in der Praxis einsetzbares Werkzeug in Form von Rechenmodellen entwickelt, mit dem die Lebensdauer von Isolierwerkstoffen von Kabeln unter Temperatur- und Strahleneinfluss bestimmt werden kann. Dies geschah basierend auf verschiedenen mathematischen Verfahren aus ausgewählten Regelwerken und Normen.

Aufbauend auf dem Arrhenius-Modell nach der Norm DIN 60216-7-1 „Beschleunigte Ermittlung der relevanten thermischen Beständigkeit mit analytischen Prüfverfahren – Anleitung für die Berechnung auf der Grundlage der Aktivierungsenergie“ /DIN 15/ ist ein Rechenwerkzeug zur Ermittlung der Lebensdauer von Kabelisolierwerkstoffen bei rein thermischer Alterung umgesetzt worden.

Anhand der Norm DIN IEC 61244-2 „Bestimmung der Langzeit-Strahlungs-Alterung in Polymeren – Teil 2: Verfahren zur Vorhersage der Alterung bei niedrigen Dosisleistungen“ /DIN 16/ konnte ein auf dem Potenzgesetz (Power-Law) beruhendes Rechenmodell zur Bestimmung der Lebensdauer von Kabelisolierwerkstoffen bei rein radiologischer Alterung realisiert werden.

Da in der Praxis die beiden Stressoren Temperatur und Strahlung in der Regel gleichzeitig vorliegen, wurden zusätzlich zwei Rechenmodelle für die kombinierte thermische und radiologische Alterung entwickelt, welche auf dem Superpositionsansatz nach Norm DIN IEC 61244-2 /DIN 16/ basieren. Das eine Rechenmodell setzt dabei das Superposition I-Verfahren zur Bestimmung der Modellparameter über zeitabhängige Messdaten um, während das zweite Rechenmodell nach dem Superposition II-Verfahren arbeitet, bei dem die Modellparameter über DED-Daten (DED = Dose Equivalent Damage = Schädigungsdosis) aufgetragen über die Dosisrate ermittelt werden.

Alle Rechenmodelle wurden in Form von Notebooks mit dem Programm Wolfram Mathematica 11.2 umgesetzt. Über die Notebooks können die erforderlichen Messdaten aus Excel-Dateien eingelesen und verarbeitet werden. Das Ergebnis für die ermittelte Lebensdauer wird jeweils graphisch als auch in Form von Zahlenwerten ausgegeben. Zusätzlich befindet sich in jedem Notebook eine Anleitung für dessen Verwendung.

Um eine konservative Abschätzung der Lebensdauer von Isolierwerkstoffen von Kabeln sicherzustellen, wurden diverse Sicherheitszuschläge festgelegt, die mögliche Unsicherheiten der Modellparameter und die Fehlerfortpflanzung aufgrund von Messunsicherheiten berücksichtigen. Darüber hinaus wurden noch Sicherheitszuschläge definiert, die aus synergetischen Effekten bei der kombinierten thermischen und radiologischen Alterung resultieren, die bei der Verifikation der Rechenmodelle beobachtet und bei der Literaturrecherche ermittelt wurden.

Für die Verifikation der in diesem Vorhaben entwickelten Rechenmodelle wurde der Bericht SAND 2010 – 7266 /SAN 10/ der Sandia National Laboratories der USA herangezogen. In diesem Bericht wird die qualifizierte Lebensdauer von Isolierwerkstoffen von Kabeln nicht nur anhand von Messwerten ermittelt, sondern es werden auch die Ergebnisse eines Alterungsmodells vorgestellt, das von den Sandia National Laboratories entwickelt wurde. Dadurch war es der GRS möglich, die Rechenmodelle des Kabelalterungsprojekts ALISe sowohl über reale Messdaten zu testen als auch mit den Vorhersageergebnissen eines anderen, unabhängigen Alterungsmodells einer externen Forschungseinrichtung zu vergleichen. Die Ergebnisse des Kabelalterungsprojekts ALISe stimmen mit den im Sandia-Bericht angegebenen Messdaten und den Ergebnissen des Sandia-Alterungsmodells hervorragend überein. Auch die Zwischenergebnisse bei der Bestimmung der jeweiligen Modellparameter konnten mit den Daten aus dem Sandia-Bericht verglichen werden und zeigten eine hohe Übereinstimmung.

Die in den Normen und Regelwerken dargestellten Rechenmethoden sind materialunabhängig formuliert. Daher wurde eine Literaturrecherche zu den Materialien Polyvinylchlorid (PVC) und Ethylen-Propylen-Copolymeren (EPR) durchgeführt, um materialspezifische Sondereffekte zu ermitteln, die in den Rechenmodellen berücksichtigt werden müssen bzw. unter denen die Rechenmodelle nicht mehr anwendbar sind. Für die Materialien Vernetztes Polyethylen (VPE) und Silikonkautschuk (Silicon Rubber SIR) sind die entsprechenden Materialrecherchen bereits durch GRS-interne Vorarbeiten erfolgt.

PVC unterliegt unter Normalbedingungen (Raumtemperatur, Standarddruck) keinen Phasenübergängen. Die Abspaltung von Chlorwasserstoff (HCl) stellt eine konkurrierende Reaktion zu Oxidationsprozessen dar. Dieser Alterungseffekt tritt vor allem bei Temperaturen über 100 °C auf, ist aber auch schon bei niedrigeren Temperaturen nachweisbar. Eine weitere konkurrierende Reaktion zur Oxidation ist die thermisch induzierte Freisetzung von Weichmachern.

Typische Literaturwerte für eine Einsatzdauer des PVC von 60 Jahren liegen im Temperaturbereich von 30 – 70 °C bei einer Strahlendosis von bis zu 200 kGy. Die Aktivierungsenergie wird in der Literatur häufig mit etwa 1,25 eV angegeben. /DOM 12, EHR 07, SAE 13/

Unter Normalbedingungen (Raumtemperatur, Standarddruck) zeigt Ethylen-Propylen-Kautschuk (EPM/EPDM) in Kabelanwendungen keine Phasenübergänge. Aufgrund seiner amorphen Struktur und der statistischen Copolymerisation von Ethylen und Propylen verhält sich das Material über einen weiten Temperaturbereich elastisch. Der Glasübergang liegt typischerweise zwischen -50 °C und -60 °C, wodurch EPDM auch bei tiefen Temperaturen flexibel bleibt. Literaturwerte für eine Einsatzdauer von EPDM von 60 Jahren zeigen, dass die Materialien Temperaturen von 100 – 120 °C sowie Bestrahlungsdosen von bis zu 500 kGy standhalten können. Sowohl EPDM- als auch EPR-Isolierungen sind jedoch im Allgemeinen für den Dauerbetrieb bei einer Leitertemperatur von 90 °C ausgelegt, was ihre typischen Anwendungsgrenzen unterschreitet. Daher ist die Anwendbarkeit der Rechenmodelle nicht eingeschränkt. /DOM 12, EHR 07, SAE 13/

Die kombinierte thermische und radiologische Belastung von PVC-Kabeln führt zu starken Synergieeffekten, die den Materialabbau deutlich beschleunigen. Bei Temperaturen über 70 °C entweichen Weichmacher, während Strahlung ab 10 kGy C-Cl-Bindungen brechen und die Freisetzung von HCl verstärkt. Dies verursacht Mikrorisse und schädigt die Materialstruktur. Mechanisch kommt es zu widersprüchlichen Effekten: Während die thermische Belastung die Zugfestigkeit zunächst erhöht, führt die Kombination mit Strahlung zu einem Festigkeitsverlust von 40 % und einer um 70 % reduzierten Dehnbarkeit. Elektrisch sinkt der Volumenwiderstand, während dielektrische Verluste durch Mikroporenbildung zunehmen. Besonders kritisch wird der Abbau ab 80 °C und 30 kGy, wodurch sich die Effekte exponentiell verstärken. IAEA-Studien zeigen, dass selbst niedrige Strahlungsdosen von 1 Gy/h in Kombination mit Wärme zu 50 – 70 % stärkeren Schäden führen können als additive Einzeleffekte. /DOM 12, EHR 07, SAE 13/

Ethylen-Propylen-Kautschuk (EPR/EPM) unterliegt bei kombinierter thermischer und radiologischer Belastung synergistischen Degradationsmechanismen, die stärker wirken als die Summe einzelner Effekte. Thermische Oxidation (bis 120 °C) und Strahlung induzieren gleichzeitig Kettenabbau und Vernetzung, was zu Versprödung führt: Zugfestigkeit steigt kurzzeitig, während Reißdehnung stark abfällt. Antioxidantien werden durch Wärme- und Strahlenwirkung abgebaut, was Mikrorisse und Ozonanfälligkeit verstärkt. Die dielektrischen Verluste nehmen nichtlinear zu.

Dadurch sinkt die Lebensdauer von Kabeln in Kernkraftwerken um 30 – 50 %. Hauptursache ist die Radikalbildung durch Restperoxide, besonders ab 80 °C und >1 Gy/h . Praktische Folgen sind Härteanstieg (40 – 60 %), Festigkeitsverlust (25 – 35 %), Mikrorisse nach 5 – 7 Jahren und stark reduzierte Isolationsfähigkeit. Gegenmaßnahmen umfassen peroxidarme Vulkanisation (< 0,1 % Restperoxide) und Nanofüllstoffe wie SiO₂ zur Stabilisierung der Polymerstruktur. /DOM 12, EHR 07, SAE 13/

Literaturverzeichnis

- /ACS 24/ ACS OMEGA, Advances in Manufacturing a New Cable Coating Resistant to Thermal Aging and γ Rays by Cobalt-60 up to 50 KGy, Nabila Boutouchent-Guerfi, Sabrina Berkani, Inas Al-Qadsy, Nesrine Seddiki, Waseem Sharaf Saeed and Taieb Aouak, 2024, 9, 41819–41829
- /BKM 25/ BKM Kunststoffe, Weich PVC Hersteller, 2025, <https://bkm-kunststoffe.de/produktion/hersteller-fuer-kunststoffe/weich-pvc-hersteller/>, [abgerufen am 30.09.2025]
- /BMU 15/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Bekanntmachung der "Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke" vom 3. März 2015, BAnz AT 30.03.2015 B2
- /BRI 25/ Encyclopedia Britannica, Synthetic Polymers, 26.09.2025, <https://www.britannica.com/science/polymer/Synthetic-polymers>, [abgerufen am 30.09.2025]
- /BWG 25/ BW GUMMI GmbH, EPDM Elastomer, <https://bw-gummi.de/ethylen-propylen-dien-kautschuk/>, [abgerufen am 30.09.2025]
- /DIN 65/ DIN IEC/TS 60216-7-1 (VDE V 0304-7-1), Elektroisolierstoffe – Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens – Teil 7-1: Beschleunigte Ermittlung der relativen thermischen Beständigkeit mit analytischen Prüfverfahren (RTEA) – Anleitung für die Berechnung auf der Grundlage der Aktivierungsenergie, November 2015
- /DIN 16/ DIN IEC/TS 61244-2 (VDE V 0306-12), Bestimmung der Langzeitstrahlungs-Alterung in Polymeren – Teil 2: Verfahren zur Vorhersage der Alterung bei niedriger Dosisleistung, Mai 2016
- /DOL 87/ Dolezel, B.: „Die Beständigkeit von Kunststoffen und Gummi“, Carl Hanser Fachbuchverlag, April 1987, ISBN 978-3-446-12394-6

- /DOM 12/ Domininghaus, H., Elsner, P., Eyerer, P., Hirth, T., (Hrsg.): Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen, 8. überarbeitete Ausgabe, Springer 2012, ISBN 978-3-642-16172-8
- /EHR 07/ Ehrenstein G. W., Pongratz S.: "Beständigkeit von Kunststoffen (2 Bände)", Publisher Carl-Hanser-Verlag, September 2007, ISBN 978-3-446-21851-2
- /ERI 25/ ERIKS, Ethylen- und Propylen-Monomeren EPDM, <https://o-ring.info/de/materialien/epdm/>, [abgerufen am 30.09.2025]
- /GAK 17/ Gummi Fasern Kunststoffe GAK, Alterung von Elastomeren, Aspekte der Alterung elastomerer Werkstoffe, K. Oßwald, K. Reincke, S. Döhler, U. Heuert, B. Langer, W. Grellmann, GAK 8 / 2017
- /IAE 97/ IAEA-TECDOC-932, Pilot study on the management of ageing of instrumentation and control cables, Results of a co-ordinated research programme 1993-1995, March 1997
- /IAE 12/ IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.6, Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants, International Atomic Energy Agency Vienna, 2012
- /IAE 24/ IAEA Safety Reports Series No. 82 (Rev. 2), Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL), International Atomic Energy Agency Vienna, 2024
- /IEE 03/ IEEE 323-2003, IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, 23.01.2004
- /IEE 23/ IEEE 383-2023, IEE Standard for Qualifying Electric Cables and Splices for Nuclear Facilities, 19.12.2023
- /JNE 23/ JNES SS Report, JNES-SS-0903, The final Report of the Project of "Assessment of Cable Aging for Nuclear Power Plants", Japanese Nuclear Energy Safety Organization (JNES), 2003, [abgerufen am 07.12.2012]

- /KKI 07/ Kaiser, Kunststoffchemie für Ingenieure, C. Hanser Verlag, München 2007
- /KTA 17A/ KTA 3706 Sicherstellung des Erhalts der Kühlmittelverlust-Störfallfestigkeit von Komponenten der Elektro- und Leittechnik in Betrieb befindlicher Kernkraftwerke, Fassung 06/2000, inhaltlich überprüft und unverändert weiterhin gültig 2017-11
- /KTA 17B/ KTA 3504 „Elektrische Antriebe des Sicherheitssystems in Kernkraftwerken“, Fassung 11/2015, inhaltlich überprüft und unverändert weiterhin gültig Fassung 2017-11
- /KTA 18/ KTA 3505 "Typprüfung von Messwertgebern und Messumformern der Sicherheitsleittechnik", Fassung 01/2021
- /KUN 17/ Kunststoffe, Die „Falten“ der Kunststoffe nach Alterung, Thermooxidative Alterung von Polypropylen und Polyamid 6, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Ausgabe 8, 2017
- /LEB 25/ Lelebeck, Elastomer Werkstoffe, Ethylen-Propylen Dien Kautschuk (EPDM), <https://lelebeck.de/epdm.htm>, [abgerufen am 30.09.2025]
- /LEI 08/ Leibniz Universität Hannover, Thermisch-oxidative Alterungsvorgänge bei Dienkautschuken, Dissertation, Peregi, Éva Kató, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2008
- /LIN 25/ LIN SEIS, Polyvinylchlorid (PVC): Eine eingehende Untersuchung, <https://www.linseis.com/wissen/polyvinylchlorid-pvc-eine-eingehende-untersuchung/>, [abgerufen am 30.09.2025]
- /MCM 25/ MCM Systeme, Glasübergangstemperatur bei Kunststoffen, <https://www.mcm-systeme.de/Glasuebergangstemperatur-bei-Kunststoffen>, [abgerufen am 13.08.2025]
- /NIS 24/ National Institute of Standards and Technology NIST, The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty, <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?kev>, [abgerufen am 09.10.2024]

- /POL 22/ Polymers 14, Comparison of Crosslinking Kinetics of UV-Transparent Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer and Polyolefin Elastomer Encapsulants, 2022, <https://www.mdpi.com/journal/polymers>, [abgerufen am 10.07.2025]
- /RAD 25/ RADO Gummi GmbH, Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk EPDM, <https://www.rado.de/spezialitaeten/epdm/>, [abgerufen am 30.09.2025]
- /SAE 13/ Baur et al.: „Saechtling Kunststoff Taschenbuch“ 31. Auflage, Carl Hanser Verlag, München 2013, ISBN 978-3-446-43442-4
- /SAN 10/ Sandia National Laboratories der USA, SANDIA REPORT SAND 2010-7266, Review of Nuclear Power Plant Safety, Cable Aging Studies with Recommendations for Improved Approaches and Future Work, November 2010
- /SCI 22/ Scientific.Net, Publisher in Material Science & Engineering, Case Study of PVC Cables Exposed in Accelerated Thermal and Radiation Environment, Hassan Waqas, Sumaira Naz, Tayyab Ali Khan, Muhammad bin Ahmed, Fiaz Khan, August 2022, Defect and Diffusion Forum (Volume 418)
- /TEC 25/ Sustainable Nuclear Energy Technology SNETP, TeaM CABLES, Tools and Methodologies for an efficient ageing management of nuclear power plant Cables, <https://snetp.eu/portfolio-items/team-cables-2>, [abgerufen am 11.09.2025]
- /TRC 25/ TransChem, Polyvinyl chloride (PVC), <https://www.transchem.ru/en/polymeric-materials/>, [abgerufen am 30.09.2025]
- /UBM 15/ Universität der Bundeswehr München, Zum Alterungsverhalten von Polymeren: Experimentell gestützte, thermo-chemomechanische Modellbildung und numerische Simulation, Habilitationsschrift, Dr.-Ing. Michael Johlitz, März 2015

/VTT 16/ Sipilä, K.: „Methods used in evaluating the severity of dose rate effect”,
VTT Research Report VTT-R-04773-16, VTT Technical Research Center
of Finland Ltd, Dezember 2016

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Die Arrhenius-Geraden der beiden Polymere Ethylen-Vinylacetat-Copolymere (EVA) und Polyolefin (POE). Die Aktivierungsenergien E_a sind hier jeweils in kJ pro Mol angegeben. Abbildung in Anlehnung an Figur 4 aus /POL 22/.....	8
Abb. 3.2	Das Rechenmodell ist nicht anwendbar, wenn die Arrhenius-Gerade einen Knick aufweist, was hier symbolisch dargestellt ist.....	10
Abb. 3.3	Beispielhafte Darstellung der Geraden zweier, verschiedener Polymere zur Bestimmung deren Dosisleistungseffektexponenten $n = 0,5$ und $n = 0,75$. Abbildung auf Basis von Bild 2 aus /DIN 16/.	12
Abb. 3.4	Beispielhafte Darstellung der Verschiebung der Funktionsgraphen $\lg(G(\lg t))$ um die von der Temperatur T und der Dosisleistung D abhängigen Werte $\lg(\alpha(T, D))$	20
Abb. 3.5	Fit zur Bestimmung der Aktivierungsenergie E_a und ihres Fehlers ΔE_a	21
Abb. 3.6	Fit der Verschiebungen $\lg \alpha T, D$ zur Bestimmung der Parameter k und x sowie ihrer Fehler Δk und Δx	22
Abb. 3.7	Beispielhafte Darstellung der Verschiebung der Funktionsgraphen $\lg DED$ um die von der Temperatur T abhängigen Werte $\lg(\alpha'(T))$	24
Abb. 3.8	Beispielhafte Darstellung der Überlagerung / Superposition der DED -Daten zu einem einheitlichen Datensatz bei der Referenztemperatur T_{ref}	25
Abb. 4.1	Struktureller Aufbau des Mathematica-Notebooks zur Berechnung der Lebensdauer von Kabeln	27
Abb. 4.2	Beispiel-Datensatz zur Bestimmung der Aktivierungsenergie für ein generisches Polymer aus einer Excel-Datei.....	28
Abb. 4.3	Beispiel für den Fit der Arrhenius-Geraden für ein generisches Polymer.	29
Abb. 4.4	Ergebnis-Plot für die Temperaturabhängigkeit der Lebensdauer am Beispiel eines generischen Polymers.....	31
Abb. 4.5	Ergebnis-Plot.....	32
Abb. 4.6	Struktureller Aufbau des Mathematica-Notebooks zur Berechnung der Lebensdauer von Kabeln.....	33

Abb. 4.7	Zwei Beispiel-Datensätze zur Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n und seines Fehlers Δn	34
Abb. 4.8	Beispiele für den Fit der doppelt logarithmischen Messkurve zur Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n und seines Fehlers Δn	35
Abb. 4.9	Ergebnis-Plot für die radiologisch bedingte Reduzierung der Lebensdauer.....	38
Abb. 4.10	Struktureller Aufbau des Mathematica-Notebooks zur Berechnung der Lebensdauer von Kabeln	40
Abb. 4.11	Beispieldatensätze zur Bestimmung der Aktivierungsenergie Ea und ihres Fehlers ΔEa für das Polymer FR-XLPE.....	41
Abb. 4.12	Fit zur Bestimmung der konstanten Parameter G_0 , G_∞ , m und $\lg t_0$ in der Funktion $\lg G(t)$ aus Gleichung (4.5)	43
Abb. 4.13	Bestimmung der Aktivierungsenergie Ea :	44
Abb. 4.14	Bestimmung der Parameter k und x :	45
Abb. 4.15	Ergebnis-Plots:	49
Abb. 4.16	Struktureller Aufbau des Mathematica-Notebooks zur Berechnung der Lebensdauer von Kabeln	50
Abb. 4.17	Beispieldatensätze für das Polymer FR-XLPE mit dem DED -Wert der Schädigungsdosis in kGy in Abhängigkeit von der Dosisrate D in Gy/h	51
Abb. 4.18	Fit zur Bestimmung der konstanten Parameter tm , k und x in der Funktion zur Berechnung des $\lg DED$ -Werts aus Gleichung (3.48)	52
Abb. 4.19	Bestimmung der Aktivierungsenergie Ea :	54
Abb. 4.20	Bestimmung der Parameter k und x durch Überlagerung der DED -Daten, indem die Verschiebungen entfernt werden und anschließend Fit.	55
Abb. 5.1	Reißdehnung über die Alterungszeit aufgetragen für das Polymer Okenit-Neopren.	58
Abb. 5.2	Bestimmung der Lebensdauer anhand des Akzeptanzkriteriums von $EAB = 50 \%$	59
Abb. 5.3	Arrhenius-Diagramme:.....	60
Abb. 5.4	Ergebnisse für die Fitparameter aus dem Fit in Abb. 5.3 b)	60

Abb. 5.5	Plot der temperaturabhängigen Verschiebungen ohne Strahlung für Okenit-Neopren aus dem Superpositionsverfahren.....	61
Abb. 5.6	Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C.....	63
Abb. 5.7	Modellvorhersage des Sandia-Berichts für die Dauer ($TED = tE$) bis zum Erreichen des Akzeptanzkriteriums (50% EAB).....	64
Abb. 5.8	Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C.....	65
Abb. 5.9	DED -Messwerte in Gy aufgetragen über die Dosisrate in Gy/h für verschiedenen Temperaturen	67
Abb. 5.10	Verschobene DED -Messwerte in Gy aufgetragen über die Dosisrate in Gy/h für eine Referenztemperatur von 50 °C	67
Abb. 5.11	Reißdehnung EAB über die Alterungszeit in Wochen	68
Abb. 5.12	EAB-Wert aufgetragen über den Logarithmus der Zeit in Wochen.....	68
Abb. 5.13	Ergebnisse für die Fitparameter aus dem Fit in Abb. 5.12.....	68
Abb. 5.14	EAB-Wert aufgetragen über den Logarithmus der Zeit in Wochen.....	69
Abb. 5.15	Verschiebungen $Ig\alpha$ aufgetragen über den reziproken Temperaturwert $1000/T$ für Brandrex CLPO	70
Abb. 5.16	Verschobene DED -Messwerte in Gy	71
Abb. 5.17	Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n für Brandrex CLPO.....	72
Abb. 5.18	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über der Einsatzdosisleistung DE bei einer konstanten Temperatur von 50 °C	73
Abb. 5.19	Modellvorhersage des Sandia-Berichts für die Dauer ($TED = tE$) bis zum Erreichen des Akzeptanzkriteriums (50 % EAB).....	74
Abb. 5.20	DED -Messwerte in Gy aufgetragen über die Dosisrate in Gy/h.....	75
Abb. 5.21	Bestimmung des Dosisleistungseffektexponenten n für Rockbestos Neopren.....	76
Abb. 5.22	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über der Einsatzdosisleistung DE bei einer konstanten Temperatur von 40 °C	78
Abb. 5.23	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über der Einsatzdosisleistung DE bei einer konstanten Temperatur von 50 °C.....	78
Abb. 5.24	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über der Einsatzdosisleistung DE bei einer konstanten Temperatur von 60 °C.....	79

Abb. 5.25	EAB-Wert aufgetragen über den Logarithmus der Zeit in Jahren a bei 70 °C mit zugehörigem Fit für das Polymer Okenit-Neopren.....	81
Abb. 5.26	EAB-Wert aufgetragen über den Logarithmus der Zeit in Jahren	81
Abb. 5.27	Verschiebungen $\lg \alpha$ ohne Strahlung ($D = 0$) aufgetragen über den reziproken Temperaturwert $1000/T$ für Okenit-Neopren.....	82
Abb. 5.28	Schädigungsdosis DED in Gy aufgetragen über der Dosisrate D in Gy/h bei unterschiedlichen Temperaturen.....	83
Abb. 5.29	Verschobene DED -Messwerte in Gy aufgetragen über die Dosisrate D in Gy/h für eine Referenztemperatur von 50 °C für Okenit-Neopren.....	84
Abb. 5.30	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C bei einer konstanten Dosisrate von 390 Gy/h (Messdaten).....	85
Abb. 5.31	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C bei einer konstanten Dosisrate von 900 Gy/h (Messdaten).....	86
Abb. 5.32	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren	86
Abb. 5.33	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Dosisrate D in Gy/h bei einer konstanten Temperatur von 22 °C (Messdaten).....	88
Abb. 5.34	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Dosisrate D in Gy/h bei einer konstanten Temperatur von 100 °C (Messdaten).....	88
Abb. 5.35	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Dosisrate D in Gy/h bei einer konstanten Temperatur von 120 °C (Messdaten).....	89
Abb. 5.36	Modellvorhersage	90
Abb. 5.37	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C bei einer konstanten Dosisrate von 0,1 Gy/h (Modelldaten).....	91
Abb. 5.38	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C bei einer konstanten Dosisrate von 1 Gy/h (Modelldaten).....	91

Abb. 5.39	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C bei einer konstanten Dosisrate von 5 Gy/h (Modelldaten).....	92
Abb. 5.40	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C bei einer konstanten Dosisrate von 20 Gy/h (Modelldaten).....	92
Abb. 5.41	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Temperatur ϑ in °C bei einer konstanten Dosisrate von 100 Gy/h (Modelldaten).....	93
Abb. 5.42	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Dosisrate D in Gy/h bei einer konstanten Temperatur von 40 °C (Modelldaten).....	94
Abb. 5.43	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Dosisrate D in Gy/h bei einer konstanten Temperatur von 50 °C (Modelldaten).....	94
Abb. 5.44	Überprüfung der Lebensdauer in Jahren a aufgetragen über die Dosisrate D in Gy/h bei einer konstanten Temperatur von 60 °C (Modelldaten).....	95
Abb. 6.1	Dienkomponenten für die Herstellung von EPDM	104
Abb. 6.2	Strukturformel von EPDM mit 5-Ethylidennorbornen als Dienkomponente.....	104
Abb. 6.3	Beispielreaktionen für die Entstehung von Radikalen aus angeregten oder ionisierten Molekülen	114
Abb. 6.4	Beispiele für Verkettungen zwischen zwei Polymerketten nach der Bildung von Radikalen in beiden Makromolekülen	114
Abb. 6.5	Struktur von Carbonyl- und Carboxy-Gruppen. Abbildung nachgezeichnet aus /EHR 07/.....	115

Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1	Datensatz für die Abhängigkeit der Lebensdauer tE in Jahren a von der Temperatur in °C bei einem Akzeptanzkriterium von EAB = 50 %.	59
Tab. 5.2	Vollständiger Datensatz für die Abhängigkeit der Lebensdauer tE in Jahren a von der Temperatur in °C.....	62
Tab. 5.3	Datenpunkte des Modells des Sandia-Berichts aus Abb. 5.7 bei der festen, minimalen Dosisrate von 10 – 2 Gy/h	65
Tab. 5.4	Werte der Messdatenpunkte, extrahiert aus Abb. 5.20.....	75
Tab. 5.5	Datenpunkte bei einer Temperatur von 70 °C, extrahiert aus Abb. 5.1.....	80

Abkürzungsverzeichnis

BHA	Butylhydroxyanisol, ein Gallat (Antioxidationsmittel)
BHT	Butylhydroxytoluol, ein Gallat (Antioxidationsmittel)
C	chemisches Element Kohlenstoff
Cl	chemisches Element Chlor, kommt frei in der Regel nur zweiatomig vor (Cl_2)
CLPO	Cross-linked Polyolefin, engl. für vernetztes Polyolefin, ein Polymer
Co	chemisches Element Kobalt
DCPD	Dicyclopentadien, eine Dien-Komponente in Polymeren
DED	Dose Equivalent Damage, engl. für Schädigungsdosis; Dabei handelt es sich um die aufgenommene Dosis, bei der das Akzeptanzkriterium erreicht wird.
DIN	Deutsche Industrie-Norm
EAB	Elongation At Break, engl. für Reißdehnung
ENB	Ethylidennorbornen, eine Dien-Komponente in Polymeren
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Monomer, M-Gruppe, ein Polymer
EPM	Ethylen-Propylen-Kautschuk, M-Gruppe, früher verwendet für die heutige Bezeichnung von EPR, ein Polymer
EPR	Ethylen-Propylen-Rubber, engl. für Ethylen-Propylen-Copolymere, ein Polymer
E-PVC	Emulsions-PVC
EVA	Ethylen-Vinylacetat-Copolymere, ein Polymer
FR-XLPE	Flame Retardent - XLPE, engl. für flammhemmendes XLPE
H	chemisches Element Wasserstoff, kommt frei in der Regel nur zweiatomig vor (H_2)
HCl	chemische Verbindung Chlorwasserstoff aus einem Wasserstoffatom (H) und einem Chloratom (Cl)
HD	Hexadien, eine Dien-Komponente in Polymeren
HFC	Hydraulikflüssigkeitsgruppe, Wasser-Glykol-Flüssigkeiten
HFD	Hydraulikflüssigkeitsgruppe, schwer entflammbare Hydraulikflüssigkeiten
IAEA	International Atomic Energy Agency, engl. für die Internationale Atomenergie-Organisation
IEC	International Electrotechnical Commission, engl. für Internationale elektrotechnische Kommission, Herausgeber von elektrotechnischen Industrienormen (IEC-Normen)

IGALL	International Generic Ageing Lessons Learned, ein internationales Projekt der IAEA, das sich grundsätzlich mit allen Aspekten des Alterungsmanagements befasst
KTA	Kerntechnischer Ausschuss, Verfasser des frei zugänglichen KTA-Regelwerks
LOCA	Loss of Coolant Accident, engl. für Unfall in Folge Kühlmittelverlust
M-PVC	Massen-PVC
O	chemisches Element Sauerstoff, kommt frei in der Regel nur zweiatomig vor (O_2); Bei dreiatomigem Sauerstoff handelt es sich um Ozon (O_3).
Paste-PVC	alternativ für Emulsions-PVC (E-PVC)
POE	Polyolefin, ein Polymer
PVC	Polyvinylchlorid, ein amorpher thermoplastischer Kunststoff
PVC-P	PVC plasticized, engl. für Weich-PVC
PVC-U	PVC unplasticized, engl. für Hart-PVC
Si	chemisches Element Silizium
SiO₂	chemische Verbindung Siliziumoxid aus einem Siliziumatom (Si) und zwei Sauerstoffatomen (O_2)
SIR	Silicon Rubber (engl. für Silikonkautschuk), oder Styrol-Isopren-Rubber (engl. für Styrol-Isopren-Kautschuk)
S-PVC	Suspensions-PVC
TED	Time to Equivalent Damage, steht synonym für die qualifizierte Lebensdauer
TS	Technische Spezifikation; ein technisches Regelwerk, das nicht die vollen formellen Anforderungen einer Norm erfüllt
UV	Ultraviolette Strahlung, Frequenzbereich: 770 - 30000 THz
VPE	Vernetztes Polyethylen, ein Polymer
XLPE	Cross(X)linked Polyethylene, engl. für vernetztes Polyethylene, ein Polymer

Formelsymbolverzeichnis

P	Wahrscheinlichkeit
E_a	Aktivierungsenergie, erforderliche Energie für den Ablauf der Alterungsreaktion
k_B	Boltzmann-Konstante
T	Temperatur in Kelvin (K)
ϑ	Temperatur in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$)
ν	Reaktionsgeschwindigkeit, bei der Alterungsreaktion umgesetzte Stoffmenge pro Zeit
ξ	während des Alterungsprozesses umgesetzte Stoffmenge
t	Zeit
D	aufgenommene Strahlendosis
$\dot{D}$	Dosisleistung/-rate, aufgenommene Dosis pro Zeit
DED	Dose Equivalent Damage, Schädigungsdosis, aufgenommene Dosis bis zum Erreichen des Akzeptanzkriteriums
n	Dosisleistungseffektexponent
$\alpha(T, \dot{D})$	Verschiebungsfaktor des Superpositionsverfahrens, abhängig von Temperatur T und Dosisleistung $\dot{D}$
$\alpha'(T)$	Verschiebungsfaktor des Superposition II-Verfahrens, abhängig von der Temperatur T
x	Modellparameter Superpositionsverfahren
k	Modellparameter Superpositionsverfahren
G	alterungssensitive physikalische Größe
G_0	Anfangswert der alterungssensitiven physikalischen Größe G zum Zeitpunkt $t = 0$
G_{∞}	Endwert gegen den die alterungssensitive physikalische Größe G während des Alterungsprozesses strebt
G_C	Wert der alterungssensitiven physikalischen Größe G beim Erreichen des Akzeptanzkriteriums

A Anhang

A.1 Datensätze der zeitabhängigen Änderung der Reißdehnung (Elongation at Break EAB) für das Polymer FR-XLPE aus /JNE 03/

- Umgebungstemperatur: 80 °C, Dosisrate: 0,99 Gy/h

	A	B
1	Zeit in Stunden	alterungssensitive physikalische Größe
2	100	560
3	1000	560
4	10000	550
5	14000	500
6	20000	400
7	23000	300
8	30000	200
9	34000	100
10	100000	10

- Umgebungstemperatur: 80 °C, Dosisrate: 18 Gy/h

	A	B
1	Zeit in Stunden	alterungssensitive physikalische Größe
2	100	560
3	1000	560
4	5000	500
5	7000	400
6	8300	300
7	10100	200
8	11000	100
9	40000	10
10	100000	10

- Umgebungstemperatur: 80 °C, Dosisrate: 100 Gy/h

	A	B
1	Zeit in Stunden	alterungssensitive physikalische Größe
2	100	560
3	2050	400
4	2900	300
5	3700	200
6	5000	100
7	30000	10
8	100000	10

- Umgebungstemperatur: 90 °C, Dosisrate: 0,99 Gy/h

	A	B
1	Zeit in Stunden	alterungssensitive physikalische Größe
2	100	560
3	1000	560
4	10000	550
5	11000	500
6	16000	400
7	18000	300
8	20500	200
9	23000	100
10	50000	10
11	100000	10

- Umgebungstemperatur: 90 °C, Dosisrate: 18 Gy/h

	A	B
1	Zeit in Stunden	alterungssensitive physikalische Größe
2	100	560
3	1000	560
4	4900	500
5	6000	400
6	7000	300
7	8300	200
8	10100	100
9	30000	10
10	100000	10

- Umgebungstemperatur: 90 °C, Dosisrate: 100 Gy/h

	A	B
1	Zeit in Stunden	alterungssensitive physikalische Größe
2	100	560
3	1300	500
4	2050	400
5	2300	300
6	3000	200
7	4000	100
8	20000	10
9	100000	10

- Umgebungstemperatur: 100 °C, Dosisrate: 0,99 Gy/h

	A	B
1	Zeit in Stunden	alterungssensitive physikalische Größe
2	100	560
3	1000	560
4	10000	550
5	10500	500
6	11000	400
7	13000	300
8	17000	200
9	19000	100
10	40000	10
11	100000	10

- Umgebungstemperatur: 100 °C, Dosisrate: 18 Gy/h

	A	B
1	Zeit in Stunden	alterungssensitive physikalische Größe
2	100	560
3	1000	560
4	4300	500
5	5300	400
6	6000	300
7	6900	200
8	8000	100
9	20000	10
10	100000	10

- Umgebungstemperatur: 100 °C, Dosisrate: 100 Gy/h

	A	B
1	Zeit in Stunden	alterungssensitive physikalische Größe
2	100	560
3	1000	550
4	1300	500
5	1900	400
6	2050	300
7	2300	200
8	3050	100
9	10000	10
10	100000	10

A.2 Superposition I-Verfahren: Berechnung des Parameters k in Abhängigkeit vom Parameter x

Als Ausgangspunkt dient Gleichung (3.45), die nachstehend angegeben ist:

$$\alpha(T, \dot{D}) = \alpha'(T) \cdot \left(1 + k \cdot \left(\frac{\dot{D}}{\alpha'(T)} \right)^x \right).$$

Betrachtet wird eine feste Temperatur ($T = \text{konst.}$) und zwei unterschiedliche Dosisraten $\dot{D}_1$ und $\dot{D}_2$. Daraus folgt: $\alpha_{1/2} = \alpha(T, \dot{D}_{1/2})$ und $\alpha' = \alpha'(T) = \text{konst.}$ Damit erhält man aus obiger Gleichung:

$$\alpha_{1/2} = \alpha' \cdot \left(1 + k \cdot \left(\frac{\dot{D}_{1/2}}{\alpha'} \right)^x \right).$$

Durch Division folgt daraus:

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{1 + k \cdot \left(\frac{\dot{D}_2}{\alpha'} \right)^x}{1 + k \cdot \left(\frac{\dot{D}_1}{\alpha'} \right)^x}$$

$$1 + k \cdot \left(\frac{\dot{D}_2}{\alpha'} \right)^x = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot \left(1 + k \cdot \left(\frac{\dot{D}_1}{\alpha'} \right)^x \right)$$

$$k \cdot \left(\left(\frac{\dot{D}_2}{\alpha'} \right)^x - \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot \left(\frac{\dot{D}_1}{\alpha'} \right)^x \right) = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} - 1$$

$$\frac{k}{\alpha'^x} \cdot \left(\dot{D}_2^x - \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot \dot{D}_1^x \right) = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_1}$$

$$k = \alpha'^x \cdot \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_1 \cdot \dot{D}_2^x - \alpha_2 \cdot \dot{D}_1^x}$$

$$k = \alpha'^x \cdot \frac{10^{\lg \alpha_2} - 10^{\lg \alpha_1}}{10^{\lg \alpha_1 + x \cdot \lg \dot{D}_2} - 10^{\lg \alpha_2 + x \cdot \lg \dot{D}_1}}.$$

Setzt man hier für $\alpha' = \alpha'(T)$ den Ausdruck (3.44) ein, so erhält man schließlich:

$$k = e^{x \cdot \frac{E_a}{k_B} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \cdot \frac{10^{\lg \alpha_2} - 10^{\lg \alpha_1}}{10^{\lg \alpha_1 + x \cdot \lg \dot{D}_2} - 10^{\lg \alpha_2 + x \cdot \lg \dot{D}_1}}.$$

A.3 Superposition II-Verfahren: Berechnung der Parameter t_m und k in Abhängigkeit vom Parameter x

Als Ausgangspunkt dient Gleichung (3.46), die nachstehend angegeben ist:

$$DED = \frac{t_m \cdot \frac{\dot{D}}{\alpha'(T)}}{1 + k \cdot \left(\frac{\dot{D}}{\alpha'(T)} \right)^x}.$$

Betrachtet wird die Referenztemperatur ($T = T_{ref}$), so dass man aus Gleichung (3.44) $\alpha'(T_{ref}) = 1$ erhält. Zudem werden zwei Schädigungsdosen DED_1 und DED_2 bei zwei zugehörigen Dosisraten $\dot{D}_1$ und $\dot{D}_2$ betrachtet. Damit erhält man aus obiger Gleichung:

$$DED_{1/2} = \frac{t_m \cdot \dot{D}_{1/2}}{1 + k \cdot \dot{D}_{1/2}^x}. \quad (A.1)$$

Durch Division folgt daraus:

$$\begin{aligned} \frac{DED_2}{DED_1} &= \frac{\dot{D}_2}{\dot{D}_1} \cdot \frac{1 + k \cdot \dot{D}_1^x}{1 + k \cdot \dot{D}_2^x} \\ 1 + k \cdot \dot{D}_2^x &= \frac{\dot{D}_2}{\dot{D}_1} \cdot \frac{DED_1}{DED_2} \cdot (1 + k \cdot \dot{D}_1^x) \\ k \cdot \left(\dot{D}_2^x - \frac{\dot{D}_2}{\dot{D}_1} \cdot \frac{DED_1}{DED_2} \cdot \dot{D}_1^x \right) &= \frac{\dot{D}_2}{\dot{D}_1} \cdot \frac{DED_1}{DED_2} - 1 \\ k \cdot \left(\dot{D}_2^x - \frac{\dot{D}_2}{\dot{D}_1} \cdot \frac{DED_1}{DED_2} \cdot \dot{D}_1^x \right) &= \frac{\dot{D}_2 \cdot DED_1 - \dot{D}_1 \cdot DED_2}{\dot{D}_1 \cdot DED_2} \\ k &= \frac{\dot{D}_2 \cdot DED_1 - \dot{D}_1 \cdot DED_2}{\dot{D}_1 \cdot \dot{D}_2^x \cdot DED_2 - \dot{D}_2 \cdot \dot{D}_1^x \cdot DED_1}. \end{aligned} \quad (A.2)$$

Durch Umstellen erhält man aus Gleichung (A.1):

$$t_m = \frac{DED_1}{\dot{D}_1} \cdot (1 + k \cdot \dot{D}_1^x) = \frac{DED_1}{\dot{D}_1} + k \cdot DED_1 \cdot \dot{D}_1^{x-1}.$$

Hier ist wiederum die Größe k aus Gleichung (A.2) einzusetzen:

$$t_m = \frac{DED_1}{\dot{D}_1} + DED_1 \cdot \dot{D}_1^{x-1} \cdot \frac{\dot{D}_2 \cdot DED_1 - \dot{D}_1 \cdot DED_2}{\dot{D}_1 \cdot \dot{D}_2^x \cdot DED_2 - \dot{D}_2 \cdot \dot{D}_1^x \cdot DED_1}.$$

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-911727-05-1