

## 2 Parameter der inneren Festigkeit

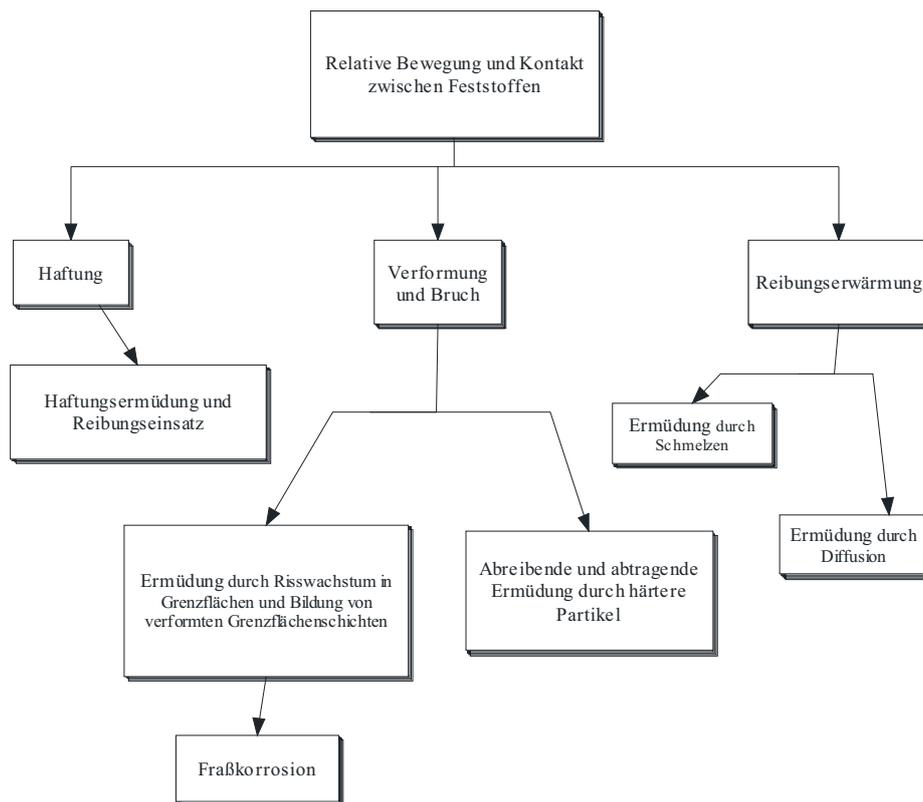
Die innere Festigkeit eines Isoliersystems wird von Faktoren und Mechanismen bestimmt, die im Inneren des Isolierkörpers einen Einfluss auf die gesamte Festigkeit ausüben. Und ist wesentlich von der Belastungsart und –dauer abhängig. Die elektrische Belastung ist dabei der bestimmende Faktor für den Beginn einer nicht umkehrbaren Isoliersystemverschlechterung, da die erste Zersetzung des Isolierstoffes meistens im sogenannten elektronischen Stadium auftritt. Durch die mikroskopischen Zersetzungsprozesse werden chemische Neben- und Spaltprodukte erzeugt, die im Allgemeinen eine geringere dielektrische Festigkeit aufweisen. Thermische und mechanische Belastungen können ebenfalls eine chemische Zersetzung des Isolierstoffes bewirken. Allerdings reagiert der Isolierstoff deutlich langsamer auf eine thermische und mechanische Belastung, da die Mechanismen für eine Zersetzung aufgrund der geringen Aktivität pro Zeit zur Freisetzung von Elektronen nur eine langsame Zerstörung des Isoliersystems bewirken.

### 2.1 Mechanische Belastung

Die mechanische Ermüdung eines Feststoffes bezieht sich immer auf Bewegungen und Kontaktpunkte zwischen Isolierstoff und Elektrode. Die Klassifizierung der beteiligten unterschiedlichen Prozesse während der Feststoffermüdung ist wichtig, um die eigentliche Ursache für diese Ermüdungsvorgänge zu erkennen.

In **Bild 2.1** sind die möglichen Fälle von mechanischen Ermüdungsarten nach [Batchelor-1] aufgeführt.

Die mechanische Ermüdung in einem Epoxidharzisoliersystem kann durch verschiedene Mechanismen verursacht werden, Allerdings weisen die Abnutzungsmechanismen niedrige Auftretswahrscheinlichkeiten auf, sodass für ein Epoxidharzisoliersystem nur in Ausnahmefällen die mechanische Belastung von Bedeutung ist.



**Bild 2.1:** Klassifizierung der mechanischen Prozesse für die Ermüdung eines Feststoffes

## 2.2 Elektrische Belastung

Die Erkennung einer hohen elektrischen Belastung im Inneren des Isolierkörpers wird im Allgemein durch die Beobachtung von Spuren erfolgen, die der elektrische Durchschlag im Isolierstoff hinterlassen hat. Ein elektrischer Durchschlag kann sich in Abhängigkeit von der Belastung und der Zeit als rein elektrischer Durchschlag oder als sogenannter Erosionsdurchschlag entwickeln.

Diese Durchschlagmechanismen treten mit ähnlichen Auswirkungen in allen festen Isolierstoffen auf, obwohl für jede Feststoffisolierung die Dauer, bis der vollständige Durchschlag eingetreten ist, sehr unterschiedlich sein kann. Generell kann für feste Isolierstoffe nach umfangreichen experimentellen Untersuchungen ein empirisches Lebensdauergesetz zur Beschreibung des Lebensdauerhaltens eingesetzt werden:

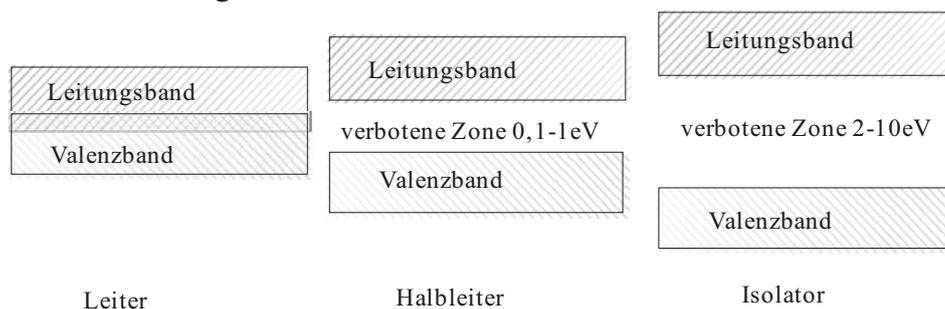
$$E^N \cdot t = const. \quad (2.1)$$

$E$  bezeichnet die Belastungsfeldstärke,  $t$  die Belastungszeit und  $N$  bildet den Lebensdauerexponenten, der je nach der Art des Isolierfeststoffes unterschiedlich ist.

Die Theorien über die Durchschlagmechanismen in Feststoffisolierungen sind nicht eindeutig, da die Prozesse im Gegensatz zu Gasen nicht sicher geklärt sind. Es wird davon ausgegangen, dass der Durchschlag in Form einer Elektronenlawine im Isolierstoff erfolgt. Insbesondere die Theorie von [Sparks-1] über die Erregung und Bewegung der Elektronen in einem kristallinen Isolierstoff ist von Bedeutung. Hierbei wird angenommen, dass sich ein Anfangselektron in willkürlicher Art durch das kristalline Gitter bewegt und vor jeder Kollision mehr kinetische Energie aufnimmt, bis es schließlich ins Leitungsband springt. Dann verliert es seine kinetische Energie durch die Wechselwirkung der Relaxationsfrequenzen der Phononen des Gitters wieder und generiert Elektronen bzw. Photonen, so dass ein Exziton (Exciton) im Leitungsband generiert wird, das als Übergang des Zustandes zwischen einem Elektron und seinem Loch gilt. Damit werden günstige Bedingungen für die nachfolgende Generation anderer Elektronen geschaffen, die sich dem ersten Elektron anschließen. Dieser Prozess wiederholt sich solange, bis eine kritische Elektronzahl erreicht wird. Der Unterschied zwischen dieser und den anderen Theorien [Fröhlich-1], [O'Dwyer-1], [Beyer-1] ist die Berücksichtigung der Wechselwirkung der Relaxationsfrequenzen der Phononen und Elektronen bzw. Photonen in Matrixform. Damit kann auch der Einfluss der Frequenz und der Temperatur auf den Durchschlag teilweise erklärt werden. Eine Wirkung von Exzitonen und Phononen wurde schon in früheren Modellen berücksichtigt, indem im Polaron-Modell und für das hohe energetische Kriterium von Fröhlich, modifiziert von Stratton, diese Ursache erwähnt wird [O'Dwyer-1]. Nach [O'Dwyer-1] benutzen andere Autoren das Konzept des Generationenmechanismus des Gasdurchschlages aber in einer veränderten Form, da dort die Lawine aufgrund mehrerer Elektronengenerationen zwischen Kathode und Anode entstehen kann. Die Generationenzahl entspricht ungefähr 40 Generationen, wenn die kritische Anzahl der Elektronen als  $10^{12}$  angenommen wird. Diese Theorien wurden ausschließlich für kristalline Isolierstoffe entwickelt, sodass ihre Anwendung auf Materialien, die keine reine kristalline Struktur besitzen, nicht unmittelbar zulässig ist, sodass andere Theorien eingesetzt werden sollen.

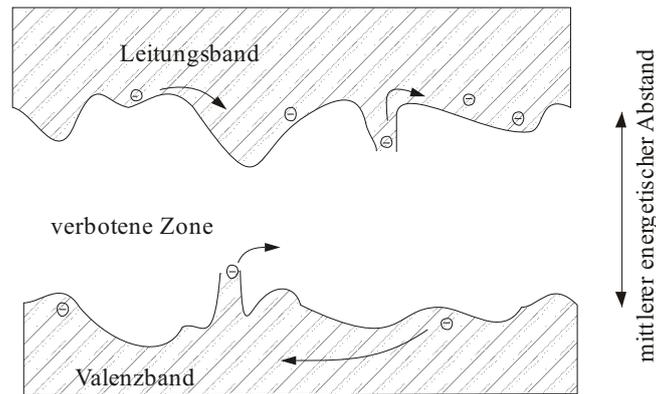
Leitungsverluste werden in jedem Isolierstoff zu einem großen Anteil von den freien beweglichen Elektronen verursacht, die einen Strom zwischen den Elektroden verursachen und sich deswegen im Leitungsband befinden. Der Leitungsbandbegriff wurde zunächst von Hippel begründet [Fröhlich-1]. Später konnten die Lücken dieser Theorie durch die Forschungen von Fröhlich ergänzt werden. Die Theorie basiert auf der Tatsache, dass sich der Durchschlagkanal in einem Kristallgitter immer in solche Richtungen entwickelt, in der die Elektronen die kleinste potenzielle Schwelle überwinden müssen.

Das so genannte ‘‘Fröhlichsche Bändermodell‘‘ basiert auf dem Konzept, dass es in einem Kristallgitter drei energetische Stufungen für Elektronen gibt. Diese energetischen Ebenen sind das Valenzband, eine verbotene Zone und das Leitungsband. Der energetische Abstand zwischen Valenzband und Leitungsband wird durch die verbotene Zone dargestellt. Dadurch wurde es möglich, den Unterschied zwischen Isolatoren, Halbleitern und Leitern zu erklären. Die Größe der verbotenen Zone entspricht dabei dem energetischen Niveau der Bindungsenergie, welche die Elektronen im Verbundstoff in Bezug auf die molekulare Art der Bindung aufweisen. Die Atome sind sowohl für einen Leiter als auch für eine Isolierung in einer kristallinen Struktur angeordnet. Der Unterschied zwischen den Materialien liegt in der Elektronenkonfiguration auf dem höchsten Energieniveau. Für einen Leiter ist eine einfache Loslösung eines Elektrons aus seiner höchsten Umlaufbahn unter geringem Energieaufwand möglich. In einem Isolator ist das Elektron wegen seiner starken Anbindung an das Atom nur mit einer höheren Energie von seiner Anbindung zu trennen. Für Isolatoren existiert deshalb eine größere verbotene Zone, während für Leiter diese Zone nicht vorhanden ist, wie im **Bild 2.2** an einer Energieniveaudarstellung zu erkennen ist.



**Bild 2.2:** Energieniveaus der drei möglichen Materialarten

Eine Weiterentwicklung dieser Theorie ist in der Arbeit von Bauser [Kotte-1] zu finden. In der mit einem verbesserten Ansatz die energetischen Grenzen zwischen dem Leitungsband und der verbotenen Zone sowie dem Valenzband nicht als scharfe Grenzen definiert werden. Je nach der Struktur des amorphen oder kristallinen Aufbaus des betrachteten Materials sind somit auch keine festen Energiegrenzwerte vorhanden, sodass unterschiedliche Materialstrukturen und Gitterplätze an verschiedenen Positionen im Material existieren. Durch diese Darstellungsart sind stochastisch verteilte tiefe und flache Haftstellen im Isolierstoff möglich, die mit einem mittleren energetischen Abstand zwischen dem Valenz- und Leitungsband beschrieben werden können, wie es im **Bild 2.3** dargestellt ist.



**Bild 2.3:** Darstellung der energetischen Bänder in einem nicht idealen Isolierstoff

Bei Belastung einer solchen Struktur durch ein elektrisches Feld können sich einige Elektronen von ihren molekularen Bindungen befreien, das Valenzband verlassen und in das Leitungsband gelangen und somit am Leitungsprozess teilnehmen. Der mittlere Bandabstand für die verbotene Zone beträgt für Epoxidharz etwa 4,5 bis 5 eV [Kotte-1].

Eine andere Form des Durchschlagmechanismus, der für die Beschädigung eines festen Isolierstoffs in Frage kommt, ist der Erosionsdurchschlag. Während der betrieblichen Belastung soll jeder Isolierstoff langfristig ohne größere Schädigungen bleiben, was in der Regel durch Routineprüfungen kontrolliert wird. Im betrieblichen Einsatz kann eine lange elektrische Belastung trotzdem zu einer Schädigung des Isoliersystems führen, indem durch die Entstehung von Teilentladungskanälen im Innern des Isolierkörpers in Fehlstellen wie z.B. Mikrohohlräumen, eine langsam fortschreitende Zerstörung erfolgt. Solche sich langsam entwickelnden Schädigungen werden auch als Alterung bezeichnet, wobei sich die dielektrischen Eigenschaften des Isoliersystems langsam und teilweise unbemerkt vermindern.

Die unterschiedlichen Durchschlagmechanismen benötigen auch verschiedene Zeiträume. Der rein elektrische Durchschlag erfolgt meist im Zeitbereich von weniger als einer Sekunde [Beyer-1], während der Erosionsdurchschlag besonders stark von der Art der Isolierung, den Betriebsbedingungen und der Herstellungsqualität abhängt und im Zeitbereich von Jahren oder sogar Jahrzehnten auftreten kann [Farahani-1], [Wasserberg-1].

Im Allgemeinen werden äußere Entladungen oder Korona als Ionisationsverluste bezeichnet. Äußere Entladungen stellen aber nur einen Teil der gesamten Ionisationsverluste in einer Isolierung dar, der andere Teil wird von den inneren Entladungen, den so genannten Teilentladungen verursacht. Die gesamten Ionisationsverluste können daher in äußere und innere Entladungen unterteilt werden.

Die äußeren Entladungen oder Koronaerscheinungen treten an Stellen einer inhomogenen Verteilung des elektrischen Feldes z.B. an scharfen Kanten oder Konturen von Leitern, Zubehörteilen usw. auf. Die Verwendung von Wechselspannung reduziert die Erzeugungsrate der Ionen wegen des Wechsels der Spannungspolarität, da die negativen und positiven Ionen ihre Ladung durch Zusammenstöße verlieren können. Der Ionisationspegel nimmt jedoch wegen der noch vorhandenen Ionen zu. Bei Gleichspannung werden Ionen derselben Polarität erzeugt, sodass eine zunehmende Ionisation der Umgebung erfolgt, die die Verteilung des elektrischen Feldes stark beeinflusst und eine Ansammlung der Ionen erzeugt.

Die Betrachtung der Vorgänge bei Teilentladungen erfolgt zunächst bei Wechselspannung. Der Verlauf der Wechselspannung erzeugt mehr oder weniger regelmäßig auftretende Teilentladungen. Eine Teilentladung erfolgt dann in einem Hohlraum im Isolierkörper, wenn die lokale Feldstärke größer als die Zündfeldstärke des Hohlraums ist. Wenn eine Wechselspannung an einen Isolator ( $U_p$ ) mit einem Hohlraum angelegt wird, findet ein typischer Spannungsverlauf in Hohlraum statt. Die Hohlraumspannung ( $U_h$ ) folgt zunächst dem Verlauf der angelegten Spannung ( $U_p$ ) bis die dielektrische Festigkeit des Hohlraumes mit der Zündspannung ( $U_z$ ) erreicht wird ( $U_{z(+)}$  oder  $U_{z(-)}$ ) und ein Durchschlag des Hohlraumes stattfindet. Die Hohlraumspannung bricht zusammen und steigt anschließend wieder an, wobei sie der angelegten Spannung ( $U_p$ ) folgte bis erneut die Zündspannung ( $U_z$ ) erreicht wird. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis die Spannung nicht mehr die dielektrische Festigkeit des Hohlraumes erreicht, da die Hohlraumspannung weiter dem Verlauf der angelegten Spannung folgt, und die Polarität wechselt. Die Hohlraumspannung steigt erneut an aber mit anderer Polarität an, bis auch hier die dielektrische Festigkeit des Hohlraumes und somit die Zündspannung erreicht wird. Dann erfolgt erneut ein Spannungszusammenbruch und die Spannung steigt wieder an bis zum nächsten Erreichen der Zündspannung. Die Spannungszusammenbrüche können dann infolge der Ladungsverschiebung als Stromimpulse erfasst werden. Mit einer Integration über die Zeit ergibt sich dann eine Ladung, die als scheinbare Ladung bezeichnet wird. Diese Art der Entladungen wird als Teilentladungen bezeichnet, da im kleinen Hohlraum eine Entladung stattfindet.