

1 Einleitung

Polymere besitzen in der Regel hohe elektrische Widerstände. In vielen Anwendungen, wie z.B. bei Mikrowellengeschirr oder auch Isolatoren für elektronische Bauteile (Kabelverkleidungen, Gehäuse), ist das ein Vorteil. Laden sich Teile einer polymeren Baugruppe durch Reibung elektrostatisch auf, so erweist sich aber gerade diese Eigenschaft als Nachteil. Die mit der Zeit aufgebauten Ladungen können auf Grund der schlechten Leitfähigkeit nicht mehr neutralisiert werden. Eine bestimmte Leitfähigkeit kann aber auch in anderen Fällen erforderlich sein: z.B. bei Gehäusen oder Abdeckungen, die hochfrequente elektromagnetische Strahlungen abschirmen sollen.

Elektrisch leitfähige Bauteile oder Halbzeuge auf Kunststoffbasis lassen sich auf unterschiedlichen Wegen herstellen. Einerseits kann man dafür ionisch oder intrinsisch leitfähige Polymere verwenden. Andererseits besteht bei vielen Polymeren die Möglichkeit sie mit einem leitfähigen Füllstoff zu durchmischen.

In *ionisch leitfähigen Polymeren* erfolgt der Ladungstransport über Ionen, die sich innerhalb der Polymermatrix frei bewegen können. Die Höhe der Leitfähigkeit hängt von der Konzentration und Beweglichkeit der Ionen ab. In intrinsisch leitfähigen Polymeren (ICP's) ist durch Reduktion oder Oxidation eine bestimmte Elektronenkonfiguration entlang der Polymerketten geschaffen worden, so dass der Ladungstransport über Ladungsschwerpunkte entlang der Kette erfolgt. Prinzipiell isolierende Kunststoffe lassen sich durch den Zusatz *leitender Füllstoffe* in ihrer Leitfähigkeit in weiten Bereichen ($10^{-8} < \sigma < 10$)S/m beeinflussen. Der Stromfluss erfolgt über Partikelcluster oder Fasern, die sich über die gesamte Bauteildimension erstrecken. Um diese Klasse leitfähig gefüllter Polymere soll es in dieser Arbeit gehen.

Bei Verwendung von kleinen leitfähigen Partikeln - hier werden als Füllstoff Hochleitfähigkeitsruß, Kohlenstoff Nanofasern und Kohlenstoff Nanoröhrchen verwendet - ändert sich der Widerstand des Verbundwerkstoffes stark nichtlinear mit dem Füllstoffgehalt. Bei niedrigem Füllstoffanteil liegen die Partikel isoliert in der Matrix vor. Die Leitfähigkeit wird dann von der Matrix dominiert. Erst ab einem kritischen Füllstoffgehalt bilden sich zusammenhängende Cluster, die sich über das ganze Bauteil erstrecken. Die Leitfähigkeit steigt in diesem auch als Perkolationschwelle bezeichneten Bereich um mehrere Größenordnungen an und wird dann vom Füllstoff dominiert [Car84, Ezq86, Wes89, Nar00, San03]. Für die Herstellung elektrisch leitfähiger Strukturteile aus Kunststoff kommt nur das zuletzt genannte Prinzip in Frage, da eine ausreichende Leitfähigkeit von ionisch leitfähigen Polymeren erst oberhalb der Glastemperatur möglich ist, wo die mechanischen Eigenschaften sehr schlecht sind. Der Einsatz intrinsisch leitender

1 Einleitung

Polymere entzieht sich den meisten Anwendungen auf Grund ihrer chemischen Instabilität. Weiterhin zeigen die beiden letztgenannten Werkstofftypen eine starke Neigung zum Altern. Das heißt, dass je nach gegebenen Umweltbedingungen mit der Zeit ein mehr oder weniger schneller Abfall der Leitfähigkeit auftritt.

Ziel dieser Arbeit ist es, die chemisch-physikalischen Wechselwirkungen von Epoxyharzen mit kohlenstoffartigen Füllstoffen soweit zu klären, dass sowohl das Perkulationsverhalten der Verbundwerkstoffe - damit beschäftigt sich Kapitel 4 - als auch das Verhalten der Füllstoff/Epoxyharz Dispersionen im elektrischen Feld (\rightarrow Kapitel 5) aus charakteristischen Parametern der Epoxyharze und des Füllstoffes vorhergesagt werden kann. Diese Parameter sind:

Epoxyharz	Basizität, Acidität Viskositätsverlauf während der Härtung Aushärtungszeit Ionische Leitfähigkeit der Dispersion
Füllstoff	Zustand des Ausgangsmaterials Größenordnung, Form (Aspektverhältnis)

Tabelle 1.1: Charakteristische Parameter der Epoxyharze sowie der Füllstoffe.

Zu diesem Zweck sind drei chemisch unterschiedliche Epoxyharze sowie drei kohlenstoffartige Füllstoffe ausgewählt worden. In Kapitel 3 werden die grundlegenden Eigenschaften dieser Materialien vorgestellt.

Um die Einflüsse des Füllstoffs auf die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe zu minimieren und auch die optische Transparenz der Polymere zu erhalten, wurden in dieser Arbeit einerseits Füllstoff-Matrix-Systeme mit äußerst niedrigen Perkulationsschwellen hergestellt. Andererseits ist ein Verfahren entwickelt worden, um strukturiert leitfähige Verbundwerkstoffe zu konstruieren, die bei Füllgraden von 0,0025% die Transparenz des Epoxyharzes erhalten [Mar03].

Zur theoretischen Beschreibung des Perkulationsverhaltens von heterogenen Stoffsystemen wurde eine Vielzahl von Modellen entwickelt [Kir73, Wes88, Lux93, Fla99]. Diese können die Vorgänge, die in partikelgefüllten Kunststoffen auftreten, mehr oder weniger gut erklären. Um das Verhalten von Füllstoffpartikeln in Dispersionen beim Anlegen eines elektrischen Feldes theoretisch zu beschreiben, wird in dieser Arbeit einerseits auf die Mechanismen in elektrorheologischen Flüssigkeiten eingegangen. Andererseits werden zwei Modellansätze, die sich mit der elektrischen Anordnung von Rußnetzwerken im Polymer durch ein elektrisches Feld beschäftigen, in Verbindung mit den hier verwendeten Systemen gebracht. Diese theoretischen Aspekte werden in Kapitel 2 erläutert.

2 Theoretische Grundlagen

Um isolierende Epoxyharze elektrisch leitfähig zu machen, werden in dieser Arbeit Kohlenstoff Nanopartikel, -fasern und -röhrchen mit Hilfe eines geeigneten Dispergierprozesses zugegeben. Die Perkolationsschwelle ϕ_c definiert dabei diejenige Füllstoffkonzentration, ab der ein leitfähiger Cluster aus Füllstoffteilchen die gesamte Probe durchzieht [Kir73]. In Kapitel 2.1 werden die für das Verständnis der Perkolation erforderlichen theoretischen Grundlagen dargestellt. Dabei wird in Abschnitt 2.1.1 zunächst auf die relevanten Modelle zur statistischen Perkolation kugelförmiger Füllstoffe eingegangen und ein Modell zur Beschreibung der Perkolation von Füllstoffen mit hohem Aspektverhältnis genauer diskutiert. Da es sich bei den hier verwendeten gefüllten Duroplasten zu Beginn der Verarbeitung um kolloidale Dispersionen handelt, befassen sich die Abschnitte 2.1.2 und 2.1.3 mit den für diese Betrachtungsweise nötigen Grundlagen aus dem Bereich der Kolloidtheorie.

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden zeigen, dass das zusätzliche Anlegen eines elektrischen Feldes während der Aushärtung des Verbundwerkstoffes zur Ausrichtung der Partikel, zur Anordnung in kettenförmige Strukturen und schließlich zu leitfähigen Netzwerken bei äußerst geringen Füllgraden führt. Die Forschergruppe um Jones hat die dafür relevanten Mechanismen sehr ausführlich untersucht [Jon90, Jon92, Jon95]. In Kapitel 2.2 werden die für das Verständnis notwendigen Grundlagen gelegt. Nach der Einführung der elektrokinetischen Erscheinungen in Kapitel 2.2.1 beschäftigt sich Abschnitt 2.2.2 mit den Eigenschaften elektrorheologischer Flüssigkeiten (ERF). Diese zeigen, wenn sie elektrischen Feldern ausgesetzt sind, ein den Nanopartikel gefüllten Dispersionen sehr ähnliches Verhalten. In Abschnitt 2.2.3 werden spezielle Modellansätze zur Ausrichtung und Anordnung leitfähiger Füllstoffpartikel in einer Dispersion durch ein elektrisches Feld erläutert.

2.1 Perkolation leitfähiger Füllstoffnetzwerke

Sobald ein gewisser Füllgrad, die Perkolationsschwelle ϕ_c , erreicht ist, steigt die Leitfähigkeit eines Nanopartikel-Kunststoff-Verbundes sprunghaft um bis zu 10 Größenordnungen an [J.Y86, FCD87, KF88, Wes89, JWL93, Tan94, TH96, MS97, Bou98, Fla99, Nar00, Ezq01, ET02, Wyc02, San03, San04]. Ab diesem Punkt durchzieht ein leitfähiges Füllstoffnetzwerk die gesamte Probe. In den folgenden Kapiteln werden die allgemein bekannten Ansätze zur statistischen Perkolation kugelförmiger und stabförmiger Partikel, die relevanten Eigenschaften kolloidaler Dispersionen und die Kräfte zwischen dispersen Partikeln erläutert. Es existiert

2 Theoretische Grundlagen

eine Vielzahl von Ansätzen, die Aggregation von Füllstoff Teilchen in Polymeren sowie die Bildung eines Netzwerkes zu modellieren [Kir73, Wes88, Cle90, Wes91, Lux93, Tan94, Cel96, Sch97, Wu00, You03].

2.1.1 Perkulationsmodelle

Das Ziel der statistischen Perkulationstheorie ist, den Isolator-Leiter-Übergang sowie eine Vielzahl anderer physikalischer Eigenschaften von mehrphasigen Systemen zu beschreiben [Sta95]. Hierbei wird die statistische Besetzung von Gitterplätzen bzw. Verbindungslinien zwischen den Gitterpunkten betrachtet. Indem deren Anzahl variiert wird, kann der Übergang von einem lokalen zu einem unendlichen Zustand der Kommunikation oder Wechselwirkung der Objekte beschrieben werden. Die Perkulationsschwelle ϕ_c ist der die beiden Zustände trennende Volumenanteil. Unter der Annahme der ausbleibenden Wechselwirkung der Füllstoffteilchen untereinander und mit der Matrix wird ein Gitter modelliert, welches eine bestimmte Anzahl zufällig besetzter Plätze enthält. Die Anzahl der besetzten Plätze steigt mit steigendem Füllstoffanteil, und bei Besetzung zweier benachbarter Plätze wird ein sog. Cluster gebildet. Die Bildung eines unendlichen Clusters, in welchem die Mehrzahl der Teilchen integriert ist, ist also nicht das Ergebnis eines Triebkräfte oder Diffusion involvierenden Prozesses, sondern entsteht zufällig [Sta95]. Erreicht dieses Cluster die Abmessungen der makroskopischen Probe, also bei einer Füllstoffkonzentration ϕ_c , so sind die Probenenden durchgehend verbunden. Zallen [Zal83] hat berechnet, dass sich für leitende Kugeln, die in einem isolierenden amorphen Körper dispergiert sind, ein minimales ϕ_c von 16% ergibt.

Das Erreichen der Perkulationsschwelle ist bei Erhöhung der Füllstoffkonzentration mit einem weiteren Anstieg der Zahl der die Probe durchziehenden Verbindungen verknüpft. In der Nähe von ϕ_c folgt für die Leitfähigkeit für $\phi > \phi_c$

$$\sigma \propto (\phi - \phi_c)^t. \quad (2.1)$$

Der kritische Exponent t ist dabei nur von der Dimensionalität des zugrunde liegenden Netzwerkes abhängig. In dreidimensionalen Systemen ist $t \approx 2$ [Sah94].

Es existieren verschiedene Ansätze, die Perkulationsschwelle für nicht kugelförmige Teilchen zu modellieren. Der nach [Cel96] für Kohlenstoff Partikel gefüllte Polymere geeignete beruht auf der Berechnung des verdrängten Volumens und soll im Folgenden vorgestellt werden.

N gleiche Partikel des Volumens V seien in einem System statistisch verteilt. Das verdrängte Volumen V_e wird nun als dasjenige Volumen definiert, welches das Objekt umgibt und in das das Zentrum eines gleichen Objektes nicht eindringen kann. Die Perkulationsschwelle wird somit nicht anhand des eigentlichen Volumens des Objektes, sondern anhand seines verdrängten Volumens definiert. Innerhalb V_e wird das Objekt seinen nächsten Nachbarn verdrängen. Der Einfluss der Orientierung der Objekte wird durch die Berechnung des durchschnittlichen

2.1 Perkolation leitfähiger Füllstoffnetzwerke

θ_μ	C_{disor}
0	0
$\frac{\pi}{6}$	0,44
$\frac{\pi}{4}$	0,6
$\frac{\pi}{2}$	0,78

Tabelle 2.1: Abhängigkeit des Geometriefaktors C_{disor} vom maximalen Disorientierungswinkel θ_μ [Cel96].

verdrängten Volumens $\langle V_e \rangle$ in Betracht gezogen [Cel96]. Das gesamte verdrängte Volumen aller dispergierten Partikel ist dann

$$\langle V_{ex} \rangle = N \langle V_e \rangle \quad (2.2)$$

und wird durch eine obere und untere Schranke begrenzt, abhängig von Form und Orientierung der Teilchen. In einem dreidimensionalen System wird die Perkolationsschwelle dann zu

$$\phi_c = 1 - \exp\left(-\frac{\langle V_{ex} \rangle V}{\langle V_e \rangle}\right). \quad (2.3)$$

Der maximale Disorientierungswinkel θ_μ zwischen der Zylinderachse und der Richtung, in der die Perkolation untersucht wird, wird durch den Faktor C_{disor} im durchschnittlichen verdrängten Volumen ausgedrückt:

$$\langle V_e \rangle = \frac{4\pi}{3} W^3 + 2\pi W^2 L + 2W L^2 C_{disor}, \quad (2.4)$$

wobei L die Zylinderlänge und W dessen Durchmesser ist und C_{disor} wie in Tabelle 2.1 aufgeführt von θ_μ abhängt.

Nach [Cel96] liegt das gesamte verdrängte Volumen von Fasern im Bereich

$$1,4 \leq \langle V_{ex} \rangle \leq 2,8. \quad (2.5)$$

Mit $A = \frac{L+2W}{W} \approx \frac{L}{W}$ als dem Aspektverhältnis folgt nun für die Perkolationsschwelle

$$1 - \exp\left(-\frac{1,4\left(\frac{\pi}{4}A + \frac{\pi}{6}\right)}{\frac{4\pi}{3} + 2\pi A + 2A^2 C_{disor}}\right) \leq \phi_c \leq 1 - \exp\left(-\frac{2,8\left(\frac{\pi}{4}A + \frac{\pi}{6}\right)}{\frac{4\pi}{3} + 2\pi A + 2A^2 C_{disor}}\right). \quad (2.6)$$

Zur Berechnung des zur Perkolation führenden Massenanteils ϕ_m des Füllstoffes können für kleine Füllstoffanteile die folgenden Vereinfachungen getroffen werden:

$$\phi_m = \frac{m_f}{m_f + m_d} \approx \frac{m_f}{m_d} = \frac{\rho_f V_f}{\rho_d V_d} \approx \frac{\rho_f}{\rho_d} \phi. \quad (2.7)$$

2 Theoretische Grundlagen

Dabei steht der Index d für das Dispersionsmittel, der Index f für den Füllstoff.

In [Cel96] sind einige experimentell gefundene Perkolationschwellen mit den nach Formel 2.6 berechneten oberen und unteren Grenzen verglichen worden, wobei sich gute Übereinstimmungen ergeben haben. Jedoch stößt dieser Ansatz dort an Grenzen, wo die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen sowie zwischen Teilchen und Matrix an Bedeutung gewinnen. Dies ist insbesondere bei dispergierten Teilchen der Fall, die auf Grund ihrer kleinen Dimensionen über ein großes Verhältnis zwischen Grenzfläche und Volumen verfügen. So kann die statistische Perkolations-theorie etwa nicht die wie z.B. in [Adr97, Pra98] gefundenen niedrigen Perkolationschwellen für kleine Rußpartikel erklären. Besonders hier wie auch im Fall der Kohlenstoff Nanofasern und Nanoröhrchen müssen van-der-Waals-Kräfte, die Coulomb-Wechselwirkungen sowie Teilchenbewegungen in Betracht gezogen werden, welches im Rahmen der Kolloidtheorie geleistet wird [Nov82, Gas89, Rus91, Eve92, Bre93, Mor02].

2.1.2 Kolloidtheoretischer Ansatz

Im Folgenden soll auf die grundlegenden Eigenschaften des Stoffsystems Füllstoff/Duromer während der niedrig viskosen Phase eingegangen werden. Dazu wird zunächst die kolloidale Dispersion definiert, bevor dann auf die für die Wechselwirkung Füllstoff/Epoxyharz wesentlichen Kräfte eingegangen wird.

2.1.2.1 Duromer/Füllstoff als kolloidale Dispersion

Grundsätzlich ergibt sich bei der Verteilung von Kohlenstoff Nanopartikeln in einem organischen Harz ein kolloidales System, welches zunächst dadurch gekennzeichnet ist, dass die verteilten Teilchen viel größer sind als die Moleküle der sie umgebenden Phase [Hun93]. Dieses System, im Fall eines in einem flüssigen Lösungsmittel verteilten festen Stoffes *Sol* oder *Dispersion* genannt, zeichnet sich durch Teilchendiffusion, Brown'sche Bewegung der Teilchen und Wechselwirkung der Teilchen mit der Matrix sowie untereinander aus. Letztere wird durch anziehende van-der-Waals-Kräfte, durch abstoßende Coulomb-Wechselwirkung gleichnamig geladener Teilchen und durch anziehende und abstoßende Kräfte zwischen adsorbierten Molekülen bestimmt. Die Wechselwirkung der Teilchen untereinander und mit dem Dispersionsmittel wird über die Oberflächen bzw. Grenzflächen gesteuert [Bre93].

Lyophobe oder *irreversible* kolloidale Systeme minimieren ihre freie Energie durch Zusammenschluss aller Partikel [Hun93], sind also im dispergierten oder verteilten Zustand thermodynamisch metastabil oder instabil. Auch Dispersionskolloide gehören zu dieser Art von Systemen [Bre93]. Solche Systeme können vor einem Zusammenschluss dennoch für eine beträchtliche Zeit über voneinander getrennte Partikel verfügen. Das instabile System zeichnet sich durch Aggregatbildung nach der Kollision oder dem Annähern von Teilchen aus [Hun93]. Dieser

Prozess wird Koagulation genannt und kann u.a. durch Temperaturänderungen, Scherung oder Elektrolytzusätze beeinflusst werden, welche die Höhe von Energiebarrieren beeinflussen, die für die Koagulation überwunden werden müssen. Scherung führt zu einer Erhöhung der Stoßzahl und unterstützt energiereiche Zusammenstöße, wodurch wiederum Energiebarrieren überwunden werden können.

2.1.2.2 Kräfte zwischen dispersen Partikeln

Die oben erwähnten Energiebarrieren, die vor dem Annähern der Teilchen aneinander überwunden werden müssen, sind das Resultat verschiedener abstoßender Kräfte [Bre93]:

- Elektrostatische Abstoßung gleichnamig geladener Partikel,
- kurzreichende Hydratationsabstoßung,
- Bornsche Abstoßung,
- entropische Abstoßung.

Entropische Abstoßung tritt bei Anlagerung von Polymeren oder anderen Molekülen an den Teilchenoberflächen auf. An frei beweglichen Teilen können die Moleküle oder Molekülketten verschiedene Konformationen oder etwa Vibrationszustände annehmen. Ein Entropieverlust tritt dann ein, wenn sich bei diesen Bewegungen die Bewegungsräume zweier Makromoleküle überlappen und es zur gegenseitigen Behinderung kommt. Allerdings ist dieser Effekt nur bei kleinen Partikeln von Bedeutung, da ansonsten die anziehenden van-der-Waals-Kräfte viel größer werden [Bre93].

Bornsche oder Kontaktabstoßung bedeutet die nicht vollständige Annäherung zweier Partikel aufgrund unregelmäßiger Oberflächen. Hydratationsabstoßung erfolgt durch die Hydrathülle, mit der sich Partikel in einer wässrigen Lösung umgeben. In nichtwässrigen Lösungen wird die Abstoßung als Lyosphärenabstoßung bezeichnet. In beiden Fällen müssen die umhüllenden Moleküle vor einem Kontakt zumindest an der Kontaktstelle desorbieren, was mit einem Energieaufwand verbunden ist.

Die wichtigste repulsive Kraft ist, falls vorhanden, die elektrostatische Wechselwirkung gleichnamig geladener Teilchen. Bei in Lösung vorliegenden kolloidalen Teilchen kommt es aufgrund einer Oberflächenladung (siehe auch Kapitel 3.3.2) zur Ausbildung einer elektrischen Doppelschicht durch im Dispersionsmittel enthaltene Ionen. Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, wird die Überschussladung auf der Teilchenoberfläche durch eine ionische Gegenladung in der Lösung ausgeglichen, wobei sich dicht an der Oberfläche des Teilchens eine relativ unbewegliche Schicht von Ionen einstellt, die die Oberflächenladung teilweise kompensiert. Diese fest haftende Schicht mit der Dicke δ heißt Stern- oder Helmholtz-Schicht. Innerhalb dieser fällt der Wert des Potentials linear von Ψ_0 auf das Stern-Potential

2 Theoretische Grundlagen

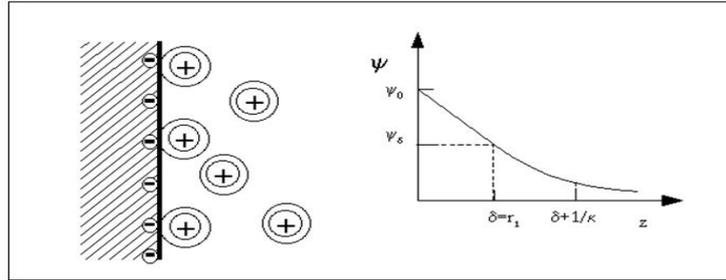


Abbildung 2.1: Potentialverlauf des Stern-Modells der elektrischen Doppelschicht an einem Teilchen mit Oberflächenladung, aufgetragen über dem Abstand von der Partikeloberfläche. Ψ_0 Galvani-Spannung zwischen Festkörperoberfläche und Elektrolytinnerem; Ψ_δ Stern-Potential; δ Dicke der Stern-Schicht; $1/\kappa$ Dicke der diffusen Schicht, nach [Bre93].

Ψ_δ ab. Oftmals spricht man von einer inneren und einer äußeren Helmholtz-Schicht. Dabei bilden die direkt an der Festkörpergrenzfläche adsorbierten Anionen in Abbildung 2.1 die innere, die Ladungsschwerpunkte der Kationen die äußere Helmholtz-Schicht [Mül96].

Etwas weiter vom Teilchen entfernt ist die Konzentration der positiv geladenen Ionen immer noch größer als die mittlere Konzentration im Dispersionsmittel. Infolge Molekül- und Ionenbewegung entsteht hier eine diffuse Schicht. Der Abfall des die restliche Überschussladung kompensierenden Potentials erfolgt nach dem Stern-Modell in exponentieller Form [Bre93]. Dies bedeutet, dass bei großen Abständen zum Teilchen wieder Ladungsneutralität in der Lösung herrscht.

Ein wichtiger Kennwert zur Charakterisierung geladener Teilchen in Dispersionen ist das Zetapotential. Dieses ist definiert als Wert des elektrischen Potentials an der unbeweglichen ersten Ionenschicht, welche direkt am geladenen Partikel entsteht, relativ zum Wert des elektrischen Potentials weit entfernt vom Teilchen [Mül96], entspricht also dem Potentialabfall über dem diffusen Teil der Doppelschicht.

Je dicker die Doppelschicht und je größer das Zetapotential, desto stärker die Stabilisierung der Dispersion durch elektrostatische Abstoßung. Nähern sich zwei Partikel einander an, so durchdringen sich die diffusen Teile der Doppelschichten gegenseitig, die gleiche Ladung der Ionen verhindert eine weitere Annäherung bis zur Agglomeration. Die Dicke der Doppelschicht, v.a. des diffusen Teils, kann durch Zugabe von Elektrolyten beeinflusst werden, sie sinkt mit steigender Kon-

2.1 Perkolation leitfähiger Füllstoffnetzwerke

zentration an Ionen im Dispersionsmittel.

Den abstoßenden Kräften steht eine Reihe anziehender Kräfte gegenüber [Bre93]:

- Van-der-Waals-Kräfte,
- Kräfte der physikalischen und chemischen Adsorption bei der molekularen Verbrückung von Kolloidteilchen,
- Grenzflächenkräfte bei der Teilchenkoaleszenz flüssig umhüllter Kolloidteilchen,
- elektrostatische Kräfte zwischen positiv und negativ geladenen Teilchen.

Die attraktive Coulomb-Wechselwirkung zwischen unterschiedlich geladenen Teilchen hat energetisch die größte Wirkung aller attraktiven Kräfte, kommt jedoch in der Praxis nur in zwei Fällen vor. Zum einen bei der Mischung zweier Kolloidsysteme, in denen die Kolloidteilchen unterschiedliche Ladungen aufweisen, zum anderen bei Ladungsinhomogenitäten auf der Teilchenoberfläche, bei denen ein Teil der Oberfläche negativ, der andere positiv geladen ist.

Die Teilchenverbrückung durch eine umhüllende Flüssigkeit setzt die Zugabe einer nicht mischbaren Flüssigkeit zum Dispersionsmittel voraus. Falls die Grenzflächenspannung zwischen dispergiertem Teilchen und Flüssigkeit geringer ist als diejenige zwischen Teilchen und Dispersionsmittel, so können die Teilchen mit einer Flüssigkeitshülle umgeben werden. Bei einer Annäherung der Teilchen kommt es zur Koagulation der Flüssigkeitshüllen, weil dabei die Grenzflächenenergie weiter sinkt.

Greift ein Molekül mit mehreren funktionellen Gruppen an verschiedene Teilchen an, so werden diese verbrückt und können sich nicht weiter voneinander entfernen. Neben der physikalischen Adsorption von Molekülen an Teilchen können auch chemische Bindungen zwischen Molekülgruppe und Teilchen entstehen.

Van-der-Waals-Kräfte wirken zwischen allen Feststoffteilchen aller Sole. Ihre Ursache liegt in Fluktuationen in der Ladungsverteilung der Elektronenhüllen der Moleküle, welche Dipole induzieren. Die zwischen zwei Dipolen entstehende Wechselwirkungsenergie wirkt proportional zur sechsten Potenz des reziproken Teilchenabstandes und ist somit sehr kurzreichweitig. Die anziehenden Kräfte gehen vom Volumen des Teilchens aus und wachsen mit dessen Masse, da sich die Wirkung der atomaren und molekularen Beiträge addiert.

2.1.3 Aggregation und Koagulation

Wie im Abschnitt über kolloidale Dispersionen bereits gesagt, liegt die disperse Phase in kolloidalen Systemen in einer fein verteilten Form vor. Damit es zum Übergang vom Nichtleiter zum Leiter kommt, muss sich ein über die ganze Probe erstreckendes Netzwerk aus Partikeln bilden, die miteinander verbunden sind. Der Zusammenschluss mehrerer Teilchen erfolgt durch Koagulation [Jul87].