

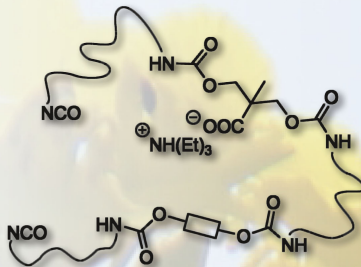


Jasmin Bullermann (Autor)

# Entwicklung von DMPA armen und freien alternativen Syntheserouten für selbst-emulgierbare Polyurethandispersionen auf Basis nachwachsender Rohstoffe

Jasmin Bullermann

Entwicklung von DMPA armen und freien alternativen Syntheserouten für selbst-emulgierbare Polyurethandispersionen auf Basis nachwachsender Rohstoffe



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6842>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>



## 1 Einleitung

Als eine erneuerbare Ressource stellt Holz ein bemerkenswertes Material für viele Anwendungen im Außen- und Innenbereich dar. Es findet Einsatz im Bau- und Möbelpbereich sowie im dekorativen Bereich. Die Oberfläche des Holzes ist dabei häufig mit einem Bindemittel beschichtet [1]. Die Hauptfunktion einer solchen Holzbeschichtung ist der Oberflächenschutz gegenüber mechanischen und chemischen Einflüssen. Insbesondere ist es wichtig, die Holzoberfläche vor Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit, Strahlung oder der biologischen Alterung zu schützen. Mit der Schutzwirkung durch die Beschichtung ist eine Gebrauchswertsteigerung des Materials verknüpft. Weiterhin sind für den Einsatz als Werkstoff ästhetische und dekorative Eigenschaften wie der Glanz und die Farbe der beschichteten Holzoberfläche von großer Bedeutung [2]. Dabei wird seitens der Anwender zunehmend gewünscht, das Aussehen des Holzes als ein Naturprodukt mittels der Beschichtung zu bewahren. Zur Aufrechterhaltung dieses Aussehens sind während der gesamten Lebensdauer des Produkts eine hohe Leistungsfähigkeit sowie eine lange Haltbarkeit der Beschichtung erforderlich [3, 4].

Wässrige Polyurethandispersionen stellen eine Möglichkeit der Holzbeschichtung dar. Diese zeichnen sich insbesondere durch Eigenschaften wie Abriebbeständigkeit, sehr gute Pigmentbenetzung und einer guten Haftfestigkeit auf Holz aus. Weitere Vorteile sind Lichtechtheit und eine gute Holzanfeuerung durch die Dispersionen (Betonung der charakteristischen natürlichen Holzmaserung) [5].

Das Polymer der Dispersionen besteht im Allgemeinen aus einem Polyol, einem Diisocyanat, einem Emulgator und einem Kettenverlängerer, welche über die jeweiligen funktionellen Gruppen miteinander verknüpft sind. Zurzeit sind diese Rohstoffe in der Regel petrochemischer Natur. Im Zuge der Verknappung des Erdöls sowie dessen steigender Preis ist es notwendig, alternative erneuerbare Rohstoffe zu finden. Diese sollen zum selben Eigenschaftsprofil im späteren Polymerfilm führen und somit die anspruchsvollen Anforderungen an eine funktionale und dekorative Beschichtung, insbesondere einer Holzbeschichtung erfüllen. Zudem steigt das Bewusstsein für Umweltbelange, resultierend in einer erhöhten Forderung nach „grünen Produkten“ [6].



Aufgrund der hohen Verfügbarkeit und dem einhergehenden niedrigen Preis stellen pflanzliche Öle eine ideale erneuerbare Alternative zu petrochemischen Rohstoffen dar [7, 8]. Pflanzenöle bestehen aus einer Triglyceridstruktur mit verschiedenen ungesättigten Fettsäuren. Die Verwendung dieser Öle zur Synthese von Alkydharzen ist seit Jahrzehnten bekannt. Dabei werden die pflanzlichen Öle mit mehrprotonigen Säuren und Alkoholen zu den Harzen umgesetzt [9]. Die Funktionalisierung der Öle mit Hydroxylgruppen an den Positionen der Doppelbindungen führt zu weiteren vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten dieser Rohstoffe [10]. Auf diese Weise erhaltene Polyole können als Ausgangskomponente für die Synthese von Polyurethandispersionen eingesetzt werden.

Pflanzenölpolyole zeichnen sich durch eine hohe Hydrophobie aus. Dies ist für eine gute Wasserbeständigkeit der aus den Dispersionen hergestellten Polyurethanfilme bei einer Holzanwendung von essentieller Bedeutung. Der Nachteil der hohen Hydrophobie ist die erschwerte Stabilisierung des Polyurethanpolymers im Wasser. Im Allgemeinen wird die Stabilisierung von Polyurethandispersionen durch den Zusatz von Emulgatoren ermöglicht. Diese Emulgatoren enthalten hydrophile Zentren, die eine Dispergierung des Polymers in Wasser ermöglichen [11]. Hauptsächlich bestehen diese hydrophilen Zentren aus ionischen Gruppen. Daher werden Polyurethane, die derartige Gruppen enthalten, auch Ionomere genannt [12]. Die Emulgatoren sind in der Regel Diole und werden durch Reaktion der Hydroxylgruppen mit Isocyanatgruppen Bestandteil des Polyurethanpolymers, wodurch sogenannte selbst-emulgierbare Polyurethandispersionen erhalten werden [13].

Neben der Stabilisierung über ionische Gruppen ist ebenfalls eine Stabilisierung über hydrophile nicht-ionische Segmente innerhalb des Polyurethanpolymers möglich. Überwiegend wird jedoch die anionische Stabilisierung eingesetzt. Diese erfolgt über Carboxyl- oder Sulfonsäuregruppen. Am häufigsten wird Dimethylolpropionsäure (DMPA) als interner Emulgator eingesetzt. Der Grund hierfür ist die sterische Abschirmung der Carboxylgruppe, wodurch Nebenreaktionen dieser mit Isocyanatgruppen minimiert werden [14, 15]. Die Neutralisierung der Carboxylgruppen mit tertiären Aminen führt zu einer elektrostatischen Stabilisierung der Dispersion. Neben DMPA werden in der Regel keine weiteren Carboxylgruppen haltigen Emulgatoren zur Herstellung von Polyurethandispersionen verwendet. Zur Minimierung der Abhängigkeit des Rohstoffes ist es nicht nur von wissenschaftlichem Interesse sondern auch aus ökonomischen Gründen sinnvoll, alternative DMPA freie Synthesemethoden zu entwickeln.



Um das hohe Potential von Pflanzenölen als neue Rohstoffquellen für wässrige Polyurethandispersionen nutzen zu können, sind systematische Untersuchungen zur Synthese und zur Stabilisierung des auf Pflanzenöl basierenden Polyurethanpolymers unerlässlich. Bisher sind überwiegend die Synthesen von Polyurethandispersionen auf Basis von Rizinusöl und Sojaöl betrachtet worden [16]. Rapsöl stellt eine weitere Alternative zu den bekannten Pflanzenölen dar. Dieses pflanzliche Öl kann ebenfalls durch entsprechende Modifikation mit Hydroxylgruppen versehen werden, wodurch die Synthese von einer umweltfreundlichen Polyurethandispersion ermöglicht wird.

Die Zielsetzung der Arbeit ist die Synthese von selbst-emulgierbaren Polyurethandispersionen auf Basis eines Rapsölpolyols und damit die Verfügbarkeit geeigneter Polyurethandispersionen als Alternative zu konventionellen petrochemischen Beschichtungssystemen zu erweitern. Im Vordergrund steht die umfassende Erarbeitung eines geeigneten Synthesekonzepts zur Untersuchung der Stabilität und zur Charakterisierung wesentlicher chemischer und physikalischer Parameter, die sich aus der Molekülarchitektur des selbst-emulgierbaren Polyurethanpolymers ergeben.

Die Wahl der zur Synthese der Polyurethandispersionen notwendigen Ausgangskomponenten soll dabei unter dem Aspekt der Erzielung eines höchstmöglichen Gehaltes an nachwachsenden Rohstoffen im Polymer erfolgen. Ein weiteres Ziel ist es, die Garantie einer hohen Reproduzierbarkeit der im Labormaßstab synthetisierten Polyurethandispersionen durch eine ausreichende Verfügbarkeit aller Rohstoffe sowie einer konstanten Qualität der nachwachsenden Rohstoffe zu gewährleisten.

Die elektrostatische Stabilisierung des hydrophoben Modellsystems über DMPA soll weiterhin systematisch untersucht werden. Ziel ist es, den DMPA-Gehalt auf ein Minimum zu reduzieren. Darüber hinaus wird die Entwicklung neuer elektrostatischer in der Literatur noch nicht beschriebener Stabilisierungswege angestrebt, die DMPA frei sind und ebenfalls zu selbst-emulgierbaren Polyurethandispersionen führen. Der Fokus sollte dabei auf alternative carboxylgruppenhaltige Emulgatoren liegen, aber auch die kationische Stabilisierung soll in Betracht gezogen werden.

In allen Synthesen soll auf den Einsatz von giftigen Lösemitteln verzichtet werden. Zusätzlich wird angestrebt, den Anteil an leicht flüchtigen Komponenten zu reduzieren, um somit besonders umweltfreundliche Polyurethandispersionen zu erhalten.



## 2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik

### 2.1 Beschichtungen

Beschichtungsstoffe werden nach der DIN EN ISO 4618 als Sammelbegriff für Lacke, Anstrichstoffe und ähnliche Produkte definiert. Ein Beschichtungsstoff kann flüssig, pasten- oder pulverförmig sein. Hauptbestandteil einer Beschichtung ist das Bindemittel, welches zur Applikation in den meisten Fällen in einem Lösungsmittel gelöst oder in Wasser dispergiert oder emulgiert vorliegt [17]. Entsprechend können Bindemittel grob in drei Systeme unterteilt werden:

- Lösemittelhaltige Systeme
- Wässrige Systeme
- Pulver Systeme

Wichtige lösemittelhaltige Harze für Lacke und Anstrichstoffe sind zum Beispiel Alkydharze, Polyesterharze oder Acrylate. Zu den wässrigen Systemen zählen zum Beispiel Acrylat-dispersionen, Vinylacetatdispersionen und Polyurethandispersionen. Des Weiteren werden Bindemittel in Ein-Komponenten und Zwei-Komponenten Systeme unterteilt. Im Ein-Komponenten System liegt das Polymer in Wasser dispergiert oder in einem Lösungsmittel gelöst vor. Zwei-Komponenten Systeme bestehen aus zwei reaktiven Komponenten, einem Bindemittel und einem Härter, die unterschiedliche funktionelle Gruppen enthalten. Das Bindemittel wird dabei erst kurz vor der Verarbeitung mit der Härterkomponente gemischt. Diese Zwei-Komponenten Systeme müssen in einer gewissen Zeit, der sogenannten Topfzeit verarbeitet werden, bevor eine Viskositätsveränderung verbunden mit einer Änderung der Polyurethanfilmeigenschaften oder eine Gelierung des Systems eintritt [3].

Das Bindemittel ist weitgehend verantwortlich für die Ausbildung eines Lackfilmes. Hier wird zwischen einer physikalischen Trocknung und einer chemischen Härtung unterschieden. Unter der physikalischen Trocknung wird die Ausbildung eines Lackfilmes unter Verdunstung der Lösemittel- oder Wasseranteile und der anschließenden Verschmelzung der Polymerteilchen verstanden [18, 19]. Bei Applikation des Bindemittels auf ein Substrat muss die Umgebungstemperatur zur Ausbildung eines



homogenen Polymerfilmes oberhalb der sogenannten Mindestfilmbildetemperatur (MFT) des Polymers liegen. Die MFT kann dabei gegebenenfalls von geringen Mengen an Lösemitteln, den Koaleszenzmitteln, erniedrigt werden. Weitere Voraussetzung für eine physikalische Trocknung und der Bildung eines klebfreien Polymerfilms ist ein hohes Molekulargewicht des Polymers. Zu diesen beschriebenen physikalisch trocknenden Systemen gehören zum Beispiel die genannten Polyurethan-dispersionen oder Acrylatdispersionen.

Eine chemische Härtung findet unter einer chemischen Reaktion mit gleichzeitiger Molmassenvergrößerung und Vernetzung statt. Diese Härtung kommt bei Einbrennlacken, Zwei-Komponenten Lacken oder Pulverlacken zur Anwendung. Die physikalische Trocknung kann auch mit einer chemischen Härtung, wie es zum Beispiel bei UV-härtenden Polyurethandispersionen durchgeführt wird, kombiniert werden.

## **2.2 Bedeutung nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie**

Die weltweite Verknappung des Erdöls sowie dessen ständig steigender Preis stellen enorme Herausforderungen für die chemische Industrie auf dem Gebiet der Energiegewinnung und insbesondere der stofflichen Nutzung der Rohstoffe dar [20, 21]. Während der Energiewirtschaft mit der Nutzung der Wind-, Sonnen-, Wasser- und Gezeitenkraft eine Auswahl an Alternativen zur Verfügung steht und auch bereits in zunehmendem Maß genutzt wird, bleibt der chemischen Industrie als einzige alternative Kohlenstoffquelle zur Synthese chemischer Produkte die Verwendung nachwachsender Rohstoffe [22]. Daher ist die Untersuchung der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie ein bedeutungsvolles Entwicklungsthema im 21. Jahrhundert [23]. Im Jahr 2006 betrug die Verwendung nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie Deutschlands etwa 10 %, welches einer Menge von etwa 2 Mio. Tonnen entspricht [24]. Aber nicht nur die Endlichkeit des Öls, sondern auch zunehmende ökologische und gesellschaftliche Aspekte bestimmen die vielfältigen Tätigkeiten auf diesem Gebiet.

Bei einer Umstellung von fossilen auf nachwachsende Rohstoffe müssen die Entwickler und Produzenten der chemischen Industrie folgende ökonomische und technische Parameter berücksichtigen:



- Ausreichende Verfügbarkeit
- Rentable und effiziente Technologien zum Aufschluss der Biomasse sowie zur Konversion zum Zielprodukt
- Preisrelation zu anderen Rohstoffquellen (fossilen Rohstoffen)
- Konstante Qualität
- Stoffliche Zusammensetzung
- Molekülstruktur

Eine ausreichende Verfügbarkeit sowie die Preisstruktur alternativer Kohlenstoffquellen sind zurzeit die entscheidenden Schlüsselfaktoren für den Rohstoffwandel in der chemischen Industrie [25]. Zudem spielen klimatisch bedingte Ernteschwankungen hinsichtlich der Qualität bei der Verwendung von pflanzlichen Ölen und der daraus hergestellten Produkte eine große Rolle. Zusätzlich sind die stoffliche Zusammensetzung sowie die Molekülstruktur von großer Bedeutung. Auf der einen Seite müssen nachwachsende Rohstoffe häufig auf Grund ihrer hohen Funktionalität entfunktionalisiert werden, damit geeignete Synthesebausteine erhalten werden. Zum anderen bietet es sich auch an, bestehende Funktionalisierungen zu nutzen, um die Syntheseleistung und die vorteilhaften Eigenschaften der Natur zu erschließen.

Ein weiterer Schwerpunkt aktueller Forschungen liegt in der weißen beziehungsweise industriellen Biotechnologie. Diese beinhaltet die Synthese von chemischen Produkten über Fermentationsprozesse und enzymatische Umwandlungen [26, 27]. Das Ziel der weißen Biotechnologie ist es, klassische petrochemische Syntheseverfahren durch biotechnologische Verfahren zu ersetzen und gleichzeitig Wege zu neuen Produkten zu finden. Die biotechnologischen Syntheseprozesse sollen kostengünstiger, umweltfreundlicher und unabhängiger sein, indem insbesondere hohe Energieaufwände und die Entstehung von giftigen Abfallprodukten vermieden werden [28, 29]. Somit ermöglichen die biotechnologischen Verfahren erdölunabhängige und CO<sub>2</sub>-neutrale Synthesen auf Basis nachwachsender Rohstoffe.

Hauptsächlich werden zurzeit biotechnologisch Feinchemikalien und Spezialrohstoffe, vorwiegend für die Pharma- und Agrochemie hergestellt. Eine Zunahme dieser Verfahren ist jedoch auch im Bereich der Synthese von Bulkchemikalien, die unter anderem Einsatz in der Beschichtungstechnologie finden, zu erkennen. Die weiße Biotechnologie hat demzufolge das Potential, langfristig die klassische Petrochemie auf dem Gebiet der Synthesen von Grundchemikalien zu ergänzen und sogar teilweise zu ersetzen [30].



Produkte auf Basis nachwachsender Rohstoffe kommen bisher überwiegend in Nischenprodukten zum Einsatz [31]. Zur Erhöhung des Marktpotenzials sowie der Wettbewerbsfähigkeit nachwachsender Rohstoffe gegenüber petrochemisch erzeugten Rohstoffen existieren daher im Bereich der Forschung und Entwicklung zahlreiche staatliche Fördermaßnahmen. Eine aktuelle Übersicht für die Förderung in Deutschland ist durch Wydra gegeben [32].

Im Zuge der Substitution von petrochemischen Rohstoffen werden zusätzliche Themen wie die Steigerung der Materialeffizienz, die Wieder- und Weiterverwendung von Rohstoffen sowie eine Verlängerung der Nutzungsdauer der Produkte diskutiert [22]. Die Lebenszyklen chemischer Erzeugnisse werden verstärkt ganzheitlich in Form der sogenannten „Life-Cycle-Analysis“ betrachtet. Es werden entsprechende CO<sub>2</sub> Bilanzen der Rohstoffgewinnung vor allem in der Produktion, unterteilt in die Nutz- und die Abfallphase, aufgestellt [33, 34].

### **2.3 Polyurethandispersionen und mögliche Verwendung nachwachsender Rohstoffe**

In den letzten Jahren haben wässrige Polyurethandispersionen als umweltfreundliche alternative Bindemittel im Vergleich zu konventionellen lösungsmittelhaltigen Beschichtungssystemen stark an Bedeutung gewonnen [35]. Gründe hierfür sind die zunehmenden gesetzlichen Reglementierungen im Arbeitsprozess mit organischen Lösemitteln während der Synthese von Dispersionen als auch bei der späteren industriellen Verwendung. Ein weiterer Grund für die Verwendung von wässrigen Systemen ist der steigende Preis der Lösungsmittel [36].

Die Einführung von gesetzlichen Regelungen zur Reduzierung von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC, volatile organic compounds) führte darüber hinaus zu einem Wandel in der Beschichtungsindustrie. Die Hersteller werden angehalten, umweltfreundliche Beschichtungssysteme zu entwickeln. Die toxischen und leicht entflammaren konventionellen lösemittelbasierenden Beschichtungen werden demzufolge zunehmend durch Neuentwicklungen von VOC-armen und -freien wässrigen Bindemitteln sowie deren Formulierungen ersetzt [37, 38].

Polyurethandispersionen sind kolloidale Systeme. Die Teilchen liegen dispergiert in einer kontinuierlichen Phase vor [39-41]. Der disperse Zustand ist dabei definiert als





mikroskopische Verteilungsform in einem Dispersionsmittel, welches in diesem Fall aus Wasser besteht. Polyurethandispersionen gehören zu den sogenannten Sekundärdispersionen, die durch direkte Dispergierung des vorher synthetisierten Polymers oder Oligomers in Wasser entstehen [42, 43].

Seit dem Jahr 1972 sind wässrige Polyurethandispersionen kommerziell auf dem Markt verfügbar. Einen wichtigen Beitrag zum Fortschritt in der Entwicklung von Polyurethandispersionen und zum Verständnis erzielte Dieterich im Jahre 1981 [44, 45]. Polyurethandispersionen verfügen über eine Reihe an verschiedenen vorteilhaften Eigenschaften. Dazu zählen eine gute Abriebfestigkeit, Härte oder auch Flexibilität, eine Chemikalien- und Wetterbeständigkeit sowie ein guter Glanz der Polymerfilme [46, 47]. Die Viskosität des Endproduktes ist zudem im Gegensatz zu anderen Systemen, in denen die Viskosität exponentiell mit der Molmasse steigt, unabhängig von dem Molekulargewicht des Polymers [48]. Demzufolge können Polymere mit relativ hohen Molekulargewichten und niedrigen Endviskositäten synthetisiert werden. Die niedrige Viskosität führt zu einer einfacheren Handhabung und Anwendbarkeit des Bindemittels. Zudem bewirkt das hohe Molekulargewicht eine Filmbildung des Polymers durch rein physikalische Trocknung über die Verdunstung des Wassers und anderer Hilfsstoffe.

Aufgrund des breiten Bereiches an unterschiedlichen Eigenschaften, resultierend aus der Vielzahl möglicher Rohstoffe, kommen Polyurethandispersionen auf vielen Gebieten kommerziell zur Anwendung. Beispiele sind die Verwendung als Beschichtungsmittel für Holz, Kunststoff, Metall, Plastik, Leder und Textilien, als Klebstoffe sowie als Bestandteil von Druckfarben [49-51].

Die Ausgangsstoffe einer Polyurethandispersion sind im Allgemeinen ein Polyol oder mehrere Polyole, ein Isocyanat oder ein Isocyanatgemisch, ein interner Emulgator und ein Kettenverlängerer. Durch Polyadditionsreaktionen zwischen den Isocyanaten und den hydroxylfunktionellen Verbindungen entstehen Urethangruppen. Die verwendeten Polyole sowie die Isocyanate sind in der Regel difunktionell, um Kettenabbruchsreaktionen zu vermeiden. Weiterhin bilden die Polyole und die Diisocyanate die Hauptkomponenten des Polymers. Der interne Emulgator verfügt in der Regel ebenfalls über Hydroxylgruppen und wird durch Reaktion mit den Isocyanatgruppen zum Bestandteil der Polymerkette. Diese Reaktion läuft in den meisten Fällen bei Temperaturen von 50-100 °C mit Einsatz eines Katalysators oder auch katalysatorfrei ab.

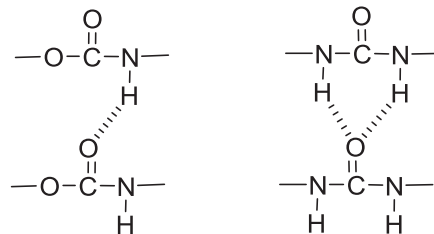
Das Verhältnis zwischen den Isocyanatkomponenten und den hydroxylgruppenhaltigen Komponenten bestimmt die Struktur des Polymers. Für physikalisch trocknende Polyurethandispersionen wird das Diisocyanat in einem Überschuss eingesetzt,





intramolekulare Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den –NH Gruppen der Urethangruppen und den Harnstoffgruppen mit Carbonylgruppen C=O, den Sauerstoffen -O- der Ether- und Estergruppen aus dem Polyol oder mit den Carbonylgruppen C=O des Urethans oder des Harnstoffes selbst [59, 60]. Abbildung 2 zeigt beispielhaft mögliche physikalische Vernetzungspunkte durch Wasserstoffbrückenbindungen. Das Ausmaß dieser Wasserstoffbrückenbindungen beeinflusst erheblich die mechanischen Eigenschaften des Polyurethanfilms.

Zusätzlich ist das unpolare Weichsegment mit dem polaren Hartsegment inkompatibel, wodurch eine Phasenseparation entsteht [61, 62]. Beide Segmente bestimmen wesentlich die Eigenschaften des späteren Polyurethanfilms. Die Härte des Polyurethanfilms wird von dem steifen und unbeweglichen Hartsegment bestimmt. Das Weichsegment, geformt von hochmolekularen Polyolen, ist flexibler und für die Elastizität des Polyurethanfilms verantwortlich. Zusätzlich stellt das Weichsegment meist eine hydrophobe Sequenz in der Polymerkette dar, welche für die Chemikalienbeständigkeit verantwortlich ist. Das Ausmaß dieser Beeinflussungen hängt im Wesentlichen von der Wahl des Isocyanates, der chemischen Struktur des Polyols sowie von dem NCO/OH-Verhältnis, welches die Anzahl an verfügbaren NCO-Gruppen zur Umsetzung mit Diaminen bestimmt [63].



**Abbildung 2:** Physikalische Vernetzungspunkte durch Wasserstoffbrückenbindungen

Im Folgenden werden die möglichen Rohstoffe zur Synthese von Polyurethandispersi-  
onen vorgestellt.

Als Polyolkomponente werden zur Polyurethan-Herstellung häufig Polyesterpolyole eingesetzt. Diese bestehen aus aliphatischen und aromatischen Dicarbonsäuren wie Adipinsäure, Isophthalsäure und Maleinsäure, welche mit di- oder multifunktionellen Alkoholen wie 1,6-Hexandiol, Diethylenglykol, Trimethylolpropan oder Neopentylglykol in einer Polykondensation umgesetzt werden [64, 65]. Ebenso können als Säurekomponente Anhydride wie Phthalsäureanhydrid und Maleinsäureanhydrid ver-