

adhäsion **KLEBEN+ DICHTEN**

Das Fachmagazin für industrielle Kleb- und Dichttechnik

Marktübersicht

Rohstoffe für die
Klebstoffformulierung

Anwendungen

Strukturelles Kleben mit isocyanat-
freien Polyurethanhybriden

Prozesse und Verfahren

Sieben Vorteile der
Randwinkelmessung

Klebtechnik als innovative Verbindungstechnologie

Kleben additiv gefertigter Kunststoffbauteile



Strukturelles Kleben mit isocyanat-freien Polyurethanhybriden

Dieser Fachartikel befasst sich mit der Entwicklung und Charakterisierung isocyanat-freier Polyurethanhybride für strukturelle Klebeanwendungen. Die Entwicklung konzentriert sich auf eine Eintopfsynthese bei Raumtemperatur, die Epoxide, polyfunktionelle zyklische Carbonate und Amine kombiniert. Trotz Herausforderungen wie der begrenzten Verfügbarkeit höherfunktioneller zyklischer Carbonate zeigen diese Hybride ein großes Potenzial für vielfältige strukturelle Anwendungen, für Multimateriallaminat oder wo spezifisch eine zuverlässige Adhäsion auf unbehandelten Metalloberflächen wichtig ist.

Bruno Traber, Heiko Jung, Raphael Schaller

Die Entdeckung der Polyurethane im Jahre 1937 durch Otto Bayer markiert einen Meilenstein in der Polymerchemie [1]. Diese Polymerklasse, charakterisiert durch ihre Urethanverbindungen, offenbart eine außergewöhnliche Vielseitigkeit, die in der Natur ihrer Grundbausteine beruht. Die daraus resultierende Variabilität der physikalischen und chemischen Eigenschaften ermöglicht ein breites Anwendungsspektrum, das von Schaumstoffen über Lacke bis hin zu Textilfasern und Klebstoffen reicht [2], [3], [4].

Alternativen zur konventionellen Polyurethan-Synthese

Die konventionelle Synthese der Polyurethane basiert auf einer Polyaddition zwischen Polyolen und Isocyanaten, wobei beide Stoffe mindestens bifunktionell sein müssen (Bild 1). Isocyanate sind jedoch wegen ihrer gesundheitlich bedenklichen Eigenschaften mit Vorsicht und Einschränkung verwendbar. Die jüngsten regulatorischen Anpassungen in der Europäischen Union [5] unterstreichen die Dringlichkeit, alternative Synthesewege für Polyurethane

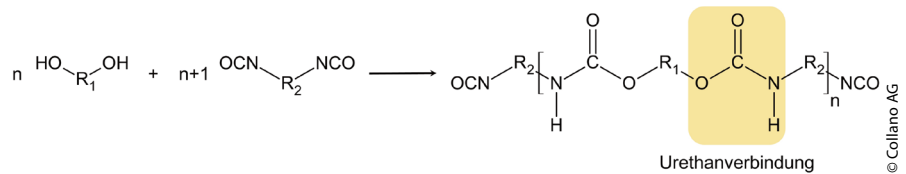


Bild 1 Polyaddition zwischen Polyol und Isocyanat zum Polyurethan.

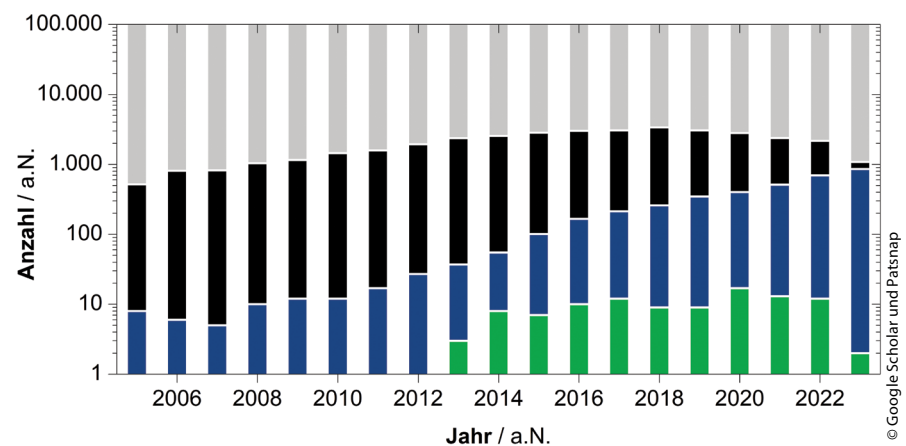


Bild 2 Aktivitäten im Veröffentlichen von Patenten und Artikeln zu Polyurethanen im Zeitraum 2005-2023. Patente: ■ isocyanat-freie Polyurethane und ■ Polyurethane. Artikel: ■ isocyanat-freie Polyurethane und ■ Polyurethane.

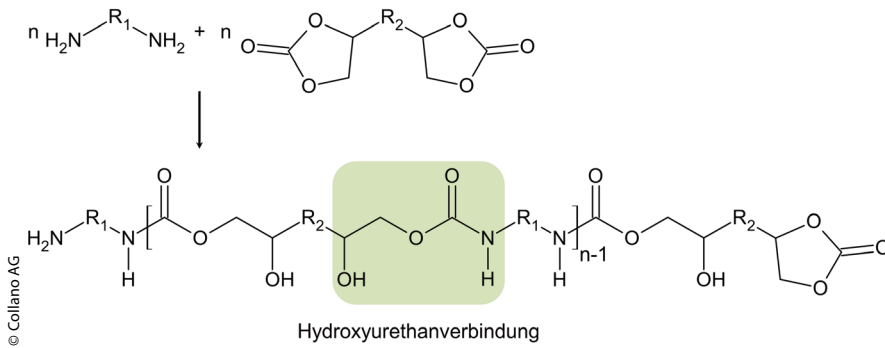


Bild 3 Polyaddition zwischen Amin und zyklischem Carbonat für die isocyanat-freie Bildung von Poly(hydroxyurethan).

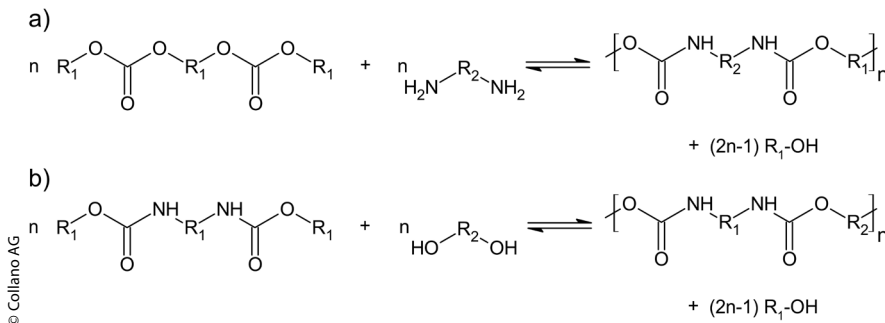


Bild 4 NIPU-Herstellung durch Polykondensation von a) Polycarbonaten mit Polyaminen und b) Polycarbamaten mit Polyolen.

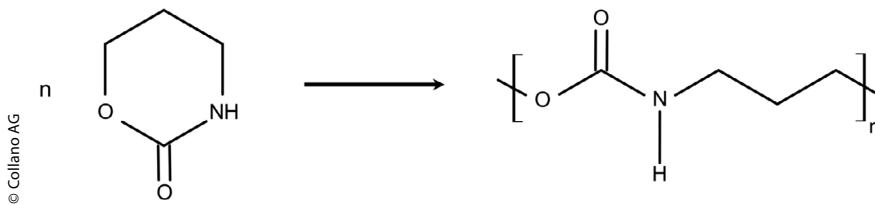
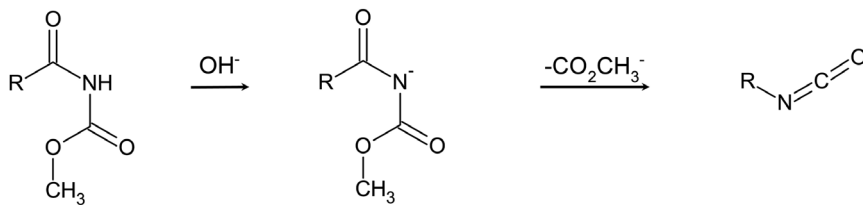
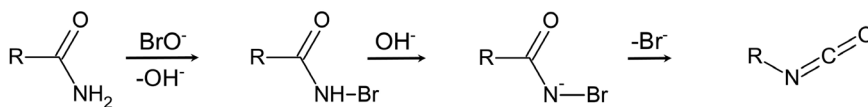


Bild 5 Ringöffnende Polymerisation von zyklischen Carbamaten zu einem Polyurethan.

Lossen:



Hoffmann:



Curtius:

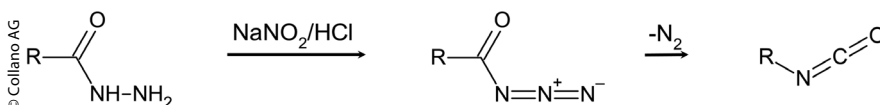


Bild 6 Lossen-, Hoffmann- oder Curtius-Umlagerung: Bei diesen aufwendigen Synthesewegen reagieren die angegebenen Ausgangsverbindungen über eine Umlagerung zu in-situ entstehenden Isocyanaten.

zu erschließen. In den letzten neunzehn Jahren wurden im akademischen und industriellen Umfeld mehr als eine Million Publikationen zum Thema Polyurethane veröffentlicht. Im Vergleich dazu stellen im gleichen Zeitraum isocyanat-freie Polyurethane mit etwa 4.500 Publikationen und rund 100 erteilten Patenten ein Nischengebiet dar (Bild 2). In diesem Kontext haben sich vier Hauptansätze zur Herstellung isocyanat-freier Polyurethane (non-isocyanate polyurethanes, NIPUs) herauskristallisiert [6], [7]:

- Polyaddition polyfunktioneller zyklischer Carbonate und Amine

Vorteil dieses Syntheseweges ist, dass mit jeder Urethangruppe eine weitere funktionelle Gruppe, eine primäre oder sekundäre Hydroxylgruppe entsteht (Bild 3). Weiterhin entstehen bei der Polyaddition, die bei moderaten Temperaturen (< 120 °C) durchführbar ist, keine Kondensationsprodukte. Ein Zusatznutzen dieser Synthese ist die Bioabbaubarkeit, die mögliche Bioverfügbarkeit und die geringe Toxizität der zyklischen Carbonate.

- Polykondensation von Polycarbonaten mit Polyaminen und Polycarbamaten mit Polyolen

Der Weg scheint ähnlich zur vorher beschriebenen Polyaddition. Es wird die Synthese über Polycarbonate und Polyamine oder Polycarbamate und Polyolen mit Funktionalitäten von mindestens zwei gewählt. Wie in Bild 4 zu erkennen, handelt es sich um eine Polykondensation bei dem Alkohol als ungewünschtes Kondensat entsteht, der entweder abdestilliert wird oder im Produkt verbleibt.

- Ringöffnende Polymerisation von sechs- oder siebengliedriger zyklischen Carbamaten

Dies scheint zunächst wieder ein eleganter Weg ohne Nebenprodukte zu sein: Allerdings sind in den meisten Fällen sehr hohe Temperaturen von etwa 200 °C und Katalysatoren wie Natriumhydrid erforderlich, um das Gleichgewicht in die gewünschte Richtung zu verschieben (Bild 5). Auch wird zur Herstellung der zyklischen Carbamate meist Phosgen verwendet.

- In-situ-Bildung von Isocyanatgruppen, zum Beispiel durch Lossen-, Hoffmann- oder Curtius-Umlagerung

Bei diesen aufwendigen Synthesewegen reagieren die angegebenen Ausgangsverbindungen (Bild 6) über eine Umlagerung zu in-situ entstehenden Isocyanaten, die dann mit Alkoholen zu Urethanen umgesetzt werden. Nachteil dieser Umlagerung

	A	B	Bemerkungen
Zusammensetzung	% w/w	% w/w	-
Epoxid	53.3	29.7	-
Zyklisches Carbonat	32.7	48.8	A: bi-, B: trizyklisches Carbonat
Katalysator	1.0	1.0	TBD als Katalysator
Amin	13.0	20.5	-
Eigenschaften	A	B	Methoden
Startviskosität / Pa·s	6.0	324.0	DIN EN ISO 10364
Topfzeit bei 20 °C / min	5.0	6.0	DIN EN ISO 10364
Zugscherfestigkeit / MPa			
A: auf Buchenholz gehobelt	6.0	9.8	DIN EN 302-1:2013
B: auf Aluminium EN AW-5754 unbehandelt			
Speichermodul bei 20 °C / MPa	1200.0	1200.0	ASTM D5279
Zugfestigkeit / MPa	36.4	46.6	DIN EN ISO 527-1:2019
Bruchdehnung / %	6.2	9.0	DIN EN ISO 527-1:2019
Glasübergangstemperatur T_g / °C	51.6	49.6	ASTM D5279

© Collano AG

Tabelle 1 Erste hybride NIPU-Klebstoffformulierungen A und B mit ihren Zusammensetzungen und Eigenschaften.

ist, dass der Prozess streng genommen nicht isocyanat-frei ist. Unter diesen Methoden erweist sich die Polyaddition polyfunktioneller zyklischer Carbonate und Amine als besonders vielversprechend. Sie führt zur Bildung von Poly(hydroxyurethan) (PHU), die neben Urethanbindungen auch primäre oder sekundäre Hydroxylgruppen aufweisen (Bild 3).

Entwicklung und Optimierung isocyanat-freier Polyurethane

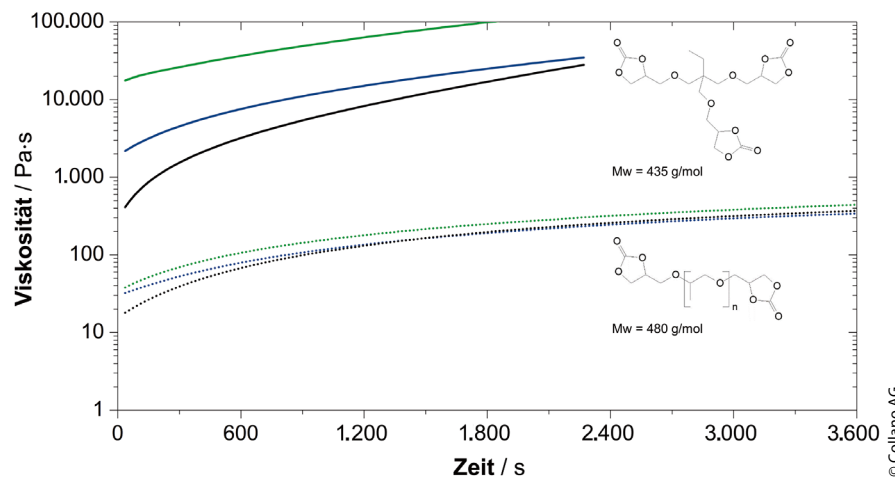
Die Motivation für diese Arbeit lag nicht nur in der Erforschung und Entwicklung isocyanat-freier Polyurethane, sondern in der Optimierung ihrer Eigenschaften für spezifische Klebstoffanwendungen. Im Zuge dieser Entwicklung wurde eine vielversprechende Kombination aus Epoxiden, polyfunktionellen zyklischen Carbonaten und Aminen identifiziert. Diese hybriden NIPUs können hinsichtlich ihrer Steifigkeit, Flexibilität und ihres Adhäsionsspektrums maßgeschneidert werden, was sie für Anwendungen als Klebstoffe, Vergussmassen oder Imprägnierharze prädestiniert. In der Fachliteratur werden häufig mehrstufige Verfahren zur Herstellung dieser hybriden NIPUs beschrieben. Diese Methoden beinhalten typischerweise die initiale Synthese eines Prepolymers,

gefolgt von dessen Weiterverarbeitung in einem zweiten Schritt. Solche Prozesse sind oft komplex und zeitaufwendig, da sie mehrere Isolierungs- und Reinigungsschritte erfordern [8]. Als Alternative zu diesen mehrstufigen Verfahren wurde unter anderem die Eintopfsynthese von Ke et al. entwickelt [9]. Bei dieser Methode werden alle Stoffe si-

multan kombiniert. Das Verfahren umfasst das Mischen einer epoxidhaltigen Verbindung mit einem zyklischen Carbonat und einem Organokatalysator – in diesem Fall 1,4-Diazabicyclo[2.2.2]octan (DABCO) – gefolgt von der Umsetzung mit einer aminhaltigen Verbindung. Obwohl diese Methode den Vorteil bietet, mehrere Prozessschritte zu vermeiden, erfordert sie eine Erwärmung der Reaktionsmischung, was die Anwendungsmöglichkeiten, beispielsweise im gewerblichen Umfeld in einer Schreinerei oder auf Baustellen, einschränken kann. Im Folgenden werden neuartige hybride NIPUs vorgestellt, die mittels einer Eintopfsynthese bei Raumtemperatur innerhalb einer Stunde hergestellt und verarbeitet werden können. Diese werden hinsichtlich ihrer Eigenschaften mit anderen strukturellen Klebstoffklassen verglichen und evaluiert.

Initiale Formulierungen

Die Entwicklung begann mit grundlegenden hybriden NIPU-Formulierungen (Tabelle 1), basierend auf der Kombination polyfunktioneller zyklischer Carbonate, Diethylentriamin und Epoxiden in einer Eintopfsynthese. Die Umsetzung des Carbonats mit dem Amin zur C-N-Bindungsbildung erfolgte durch gezielte Katalyse mittels Organokatalysatoren. Diese Katalysatorwahl ermöglichte die angestrebte Vernetzung bei Raumtemperatur, wo-



© Collano AG

Bild 7 Viskositätszunahme von NIPU-Formulierungen mit polyfunktionalen zyklischen Carbonaten und Diethylentriamin. Es wurde ein Platten-Platten-Rheometer bei 20 °C und einer Scherrate von 100 s⁻¹ verwendet. Formulierungen mit einem bicyklischen Carbonat (Poly(propylenglykol) α,ω-bis(zyklocarbonat), Mw = 480 g/mol): ••• nicht katalysiert, ••• Katalysator 1, DBU und ••• Katalysator 2, TBD. Formulierungen mit einem trizyklischen Carbonat (Trimethylpropan-tri(zyklocarbonat), Mw = 435 g/mol): — nicht katalysiert, — Katalysator 1, DBU und — Katalysator 2, TBD.

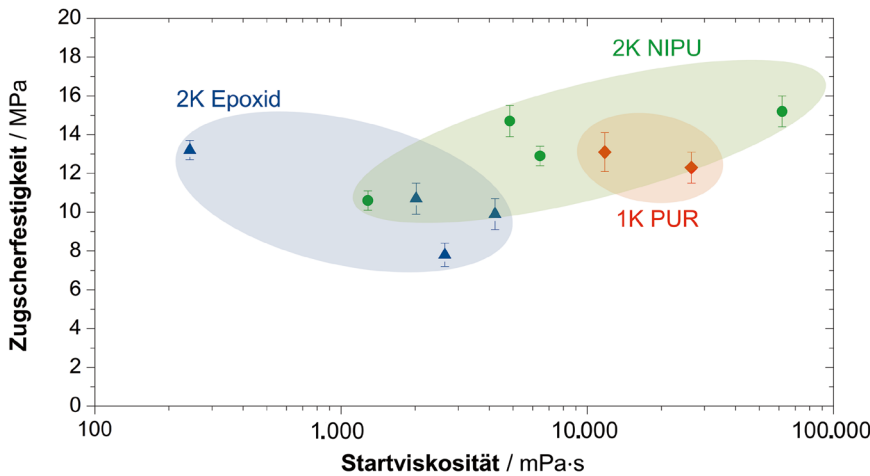


Bild 8 Zugscherfestigkeit auf gehobeltem Buchenholz gegen Startviskosität von strukturellen Klebstoffen: ▲ 2K Epoxid, ◆ 1K PUR und ● 2K NIPU.

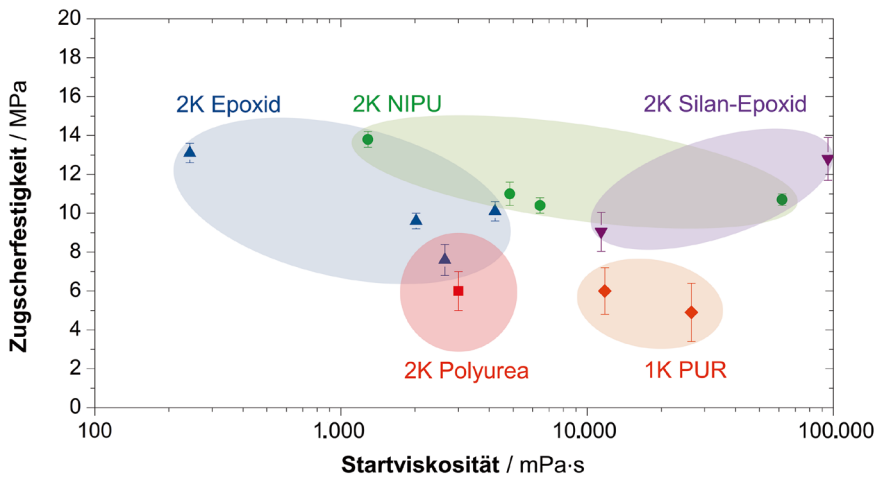


Bild 9 Zugscherfestigkeit auf unbehandeltem Aluminium EN AW-5754 gegen Startviskosität von strukturellen Klebstoffen: ▲ 2K Epoxid, ■ 2K Polyurea, ◆ 1K PUR, ▼ 2K Silan-Epoxid und ● 2K NIPU.

durch die bei erhöhten Temperaturen (typischerweise bis zu 120 °C für mehrere Stunden) oft auftretenden unerwünschten Nebenreaktionen vermieden wurden. Organokatalysatoren wie tertiäre Amine und Wasserstoffbrückendonoren, exemplarisch 1,5,7-Triazabicyclo[4.4.0]dec-5-en (TBD) oder Thioharnstoff, zeigten sich als effektive Aktivator der Carbonylgruppen zyklischer Carbonate bei Raumtemperatur. Die Eintopfsynthese der initialen Formulierungen folgte einem präzisen, mehrstufigen Protokoll:

- Homogenisierung des Epoxids und des polyfunktionellen zyklischen Carbonats mittels Speedmixer (2.000 min⁻¹, 1 min).
- Integration des Katalysators und weitere Homogenisierung (2.500 min⁻¹, 3 min).
- Thermische Behandlung zur Auflösung des Katalysators in der Epoxid-Carbonat-Mischung (80 °C, 40 min).

- Abkühlung auf Raumtemperatur und erneute Homogenisierung (2.500 min⁻¹, 3 min).
- Inkorporation des Diethylentriamins bei Raumtemperatur (2.000 min⁻¹, 1 min).
- Unmittelbare Verarbeitung der Masse durch Vergießen oder Applikation für Verklebungen bei Raumtemperatur.

Detaillierte Informationen zur Synthesemethodik sind in der Patentschrift „Verfahren zur Herstellung eines hybriden nicht-isocyanathaltigen Polyurethans“ von Lutz und Odermatt offenbart [10]. Für die industrielle Skalierung werden diese hybriden NIPUs als 2K-Klebstoffsysteme konzipiert, wobei Komponente A das Gemisch aus Epoxid, zyklischem Carbonat und Katalysator enthält, während Komponente B die Aminkomponente darstellt.

Kinetische Untersuchungen

Zur Optimierung der NIPU-Formulierungen wurden umfangreiche kinetische Untersuchungen durchgeführt. Die zeitabhängige Viskositätszunahme verschiedener Formulierungen wurde mittels Platten-Platten-Rheometrie bei 20 °C und einer Scherrate von 100 s⁻¹ über einen Zeitraum von bis zu einer Stunde quantifiziert. Diese Methodik ermöglichte eine präzise Ermittlung der optimalen Kombination aus polyfunktionellen zyklischen Carbonaten und Diethylentriamin hinsichtlich ihrer Reaktionskinetik. Bild 7 veranschaulicht die Viskositätsentwicklung der untersuchten NIPU-Formulierungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Katalysatoren für bi- und trizyklische Carbonate.

Die Analyse offenbarte Unterschiede in der Reaktionskinetik: Während Formulierungen mit bizyklischen Carbonaten eine moderate Viskositätszunahme von initial 10-50 Pa s auf etwa 450 Pa s innerhalb einer Stunde zeigten, wiesen jene mit trizyklischen Carbonaten einen drastischen Anstieg auf über 10.000 Pa s innerhalb von nur 30 Minuten auf. Diese signifikant schnellere Viskositätszunahme der trizyklischen Carbonate indiziert eine beschleunigte Aushärtung bei Raumtemperatur, was ihre Eignung für schnell aushärtende NIPU-Systeme unterstreicht. Die kinetischen Studien wurden unter konstanten Bedingungen durchgeführt, wobei zwei verschiedene Katalysatoren – neben TBD auch 1,8-Diazabicyclo[5.4.0]undec-7-en (DBU) – mit jeweils 1 % w/w Konzentration und einem stöchiometrischen Verhältnis von 1:1 zwischen Carbonat und Amin eingesetzt wurden.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden alle nachfolgenden Formulierungen für NIPU-Klebstoffe mit strukturellen Eigenschaften unter Verwendung eines trizyklischen Carbonats konzipiert und TBD als Katalysator eingesetzt, da dieser die Reaktion effizienter katalysiert. Diese systematische Herangehensweise ermöglichte nicht nur eine detaillierte Evaluation der Reaktionskinetik, sondern legte auch den Grundstein für die Entwicklung optimierter NIPU-Formulierungen mit verbesserten Verarbeitungs- und Leistungseigenschaften. Zukünftige Forschungsansätze könnten sich auf die weitere Optimierung der Katalysatorsysteme sowie die Feinabstimmung der Carbonat-Amin-Stöchiometrie konzentrieren, um die Aushärtungskinetik weiter zu verbessern und

© Collano AG

© Collano AG

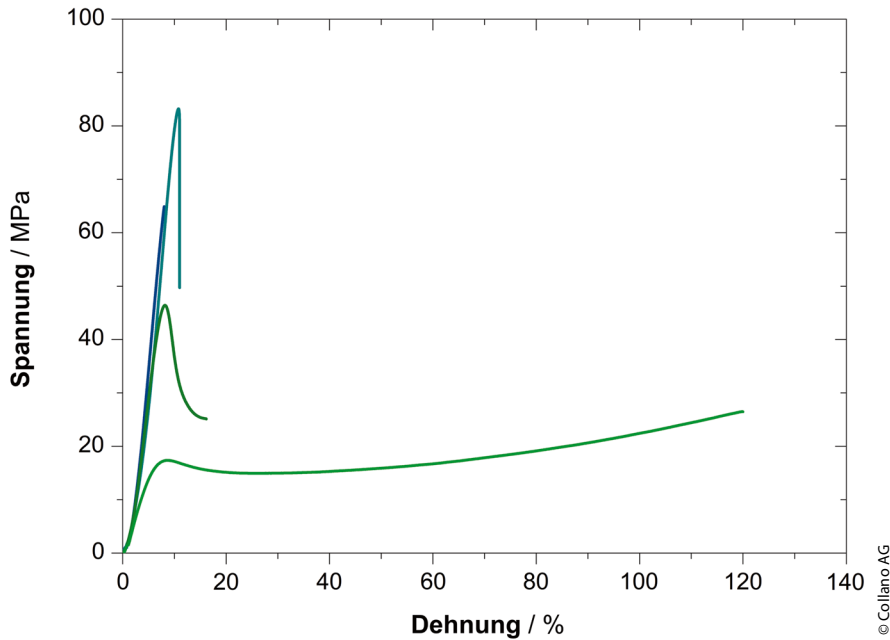


Bild 10 Das Spannungs-Dehnungsdiagramm zeigt einen Übergang von einem Epoxid-, zu einem spröden und einem zähen hybriden NIPU-Klebstoff: Epoxid mit 0 % w/w, 22 % w/w, 33 % w/w und 45 % w/w NIPU-Anteil (Vergleiche Zugscherfestigkeiten auf Buchenholz gehobelt und Aluminium unbehandelt aus Tabelle 2).

maßgeschneiderte Eigenschaften für spezifische Anwendungen zu erzielen.

Isocyanat-freie Polyurethanhybride für das strukturelle Kleben

Die Bilder 8 und 9 illustrieren die Anwendungsbereiche verschiedener struktureller Klebstoffe, wobei die Zugscherfestigkeit in Relation zur initialen Viskosität dargestellt wird. Die Zugscherfestigkeitsprüfungen wurden auf gehobeltem Buchenholz (Bild 8) und unbehandeltem Aluminium (EN AW-5754 Legierung, Bild 9) durchgeführt. Die Prüfkörper wurden für 12 Stunden bei 20 °C verpresst und anschließend sieben Tage bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit konditioniert. Die initiale Viskosität wurde mittels Platten-Platten-Rheometrie bei 20 °C und einer Scherrate von 100 s⁻¹ bestimmt.

Auf Buchenholz zeigen 2K-Epoxid-Klebstoffe, die für Holzverbindungen atypisch sind, im Bereich niedriger Viskositäten gute Zugscherfestigkeiten von maximal 13 MPa. Reaktive 1K-PUR-Systeme erreichen bei typischerweise höheren Initialviskositäten Zugscherfestigkeiten von 12-13 MPa. Die hybriden NIPUs demonstrieren über den gesamten Viskositätsbereich hinweg die höchsten Zugscherfestigkeiten von über 15 MPa, wobei in mehr als 60 % der Fälle Holzausriss auftritt, was auf ihre Vielseitigkeit und Effektivität hinweist. Auf unbehandeltem Aluminium EN AW-5754 zeigen Polyurethan- und Polyureaklebstoffe erwartungsgemäß schwache Adhäsion ohne Oberflächenvorbehandlung. Epoxid- und silanmodifizierte Klebstoffe erreichen Zugscherfestigkeiten von 10-14 MPa. Bemerkenswert ist, dass hybride NIPUs auf unbehandeltem Aluminium ähnlich

gute Ergebnisse wie Epoxid- oder silanmodifizierte Klebstoffe erzielen (Bild 9), ohne dabei ihre charakteristischen Polyurethaneigenschaften einzubüßen, wie in Bild 10 ersichtlich. Bild 10 demonstriert die Anpassungsfähigkeit hybrider NIPUs an spezifische Anwendungen. Das Spannungs-Dehnungsdiagramm zeigt, dass durch Erhöhung des NIPU-Anteils im Epoxid ein Übergang von sprödem zu elastischem Verhalten mit Kaltverfestigung erreicht werden kann. Tabelle 2 präsentiert die korrespondierenden Zugscherfestigkeiten. Bei einem Epoxid:NIPU-Verhältnis von 78:22 werden die höchsten Zugscherfestigkeiten auf Holz erzielt, mit etwa 80 % Holzausriss. Auf der Aluminiumlegierung EN AW-5754 wurde die maximale Zugscherfestigkeit von 15,9 ± 1,0 MPa bei einem Epoxid:NIPU-Verhältnis von 55:45 erreicht. Diese Resultate sind nennenswert für eine auf Polyurethanen basierende Klebstoffformulierung. Der Klebstoff demonstriert eine hohe Zähigkeit, wobei das Epoxid zur Adhäsion auf Metallen beiträgt, unterstützt durch die zusätzlichen Hydroxygruppen des NIPUs. Diese Kombination von Eigenschaften eröffnet neue Möglichkeiten für die Entwicklung hochleistungsfähiger, vielseitiger Klebstoffsysteme für diverse strukturelle Anwendungen.

Herausforderungen und Opportunitäten

Die Entwicklung und Anwendung hybrider NIPU-Klebstoffe stehen vor mehreren signifikanten Herausforderungen technischer und ökonomischer Natur. Erstens liegt eine grundlegende Problematik in der generell niedrigen Reaktivität zyklischer Carbonate, die die Effizienz der Polyadditionsreaktionen beeinträchtigt und zu verlängerten Reaktionszeiten führt. Diese kinetische Limitation kann in industriellen Anwendungen problematisch sein, da sie die Verarbeitungsgeschwindigkeit und folglich die Prozessökonomie negativ beeinflusst. Die Entwicklung geeigneter Katalysatorsysteme zur Beschleunigung der Reaktion bleibt daher ein zentrales Entwicklungsziel. Ebenfalls sind die jetzt eingesetzten Katalysatormengen mit 1 % w/w zu hoch. Die Optimierung von Katalysatorsystemen zur Beschleunigung der Polyadditionsreaktion ist daher bereits ein aktuelles zentrales Forschungsthema. Fortschritte in diesem Bereich könnten die Verarbeitungsgeschwindigkeit erhö-

Anteil NIPU in Epoxid % w/w	Zugscherfestigkeit Buchenholz gehobelt	Zugscherfestigkeit Aluminium EN AW-5754
	MPa	unbehandelt MPa
00	11.3 ± 0.2	10.1 ± 0.4
22	13.3 ± 0.4	10.8 ± 0.9
33	12.9 ± 0.6	14.1 ± 0.5
45	10.2 ± 0.2	15.9 ± 1.0

Tabelle 2 Zugscherfestigkeit der hybriden NIPU-Klebstoffe bei verschiedenen Epoxid:NIPU-Verhältnissen.

© Collano AG

hen und damit die industrielle Anwendbarkeit verbessern.

Zweitens ist die Langzeitstabilität hybrider NIPU-Klebstoffe unter Anwendungsbedingungen bisher unzureichend erforscht. Umfassende Alterungsstudien, einschließlich Klimawechsel- und Bewitterungstests, sind erforderlich, um belastbare Daten zur Beständigkeit verklebter Bauteile zu generieren.

Eine weitere Herausforderung stellt die limitierte Verfügbarkeit höherfunktioneller zyklischer Carbonate dar. Während monofunktionale zyklische Carbonate in großen Mengen kommerziell erhältlich sind, unter anderem von Huntsman oder UBE Corporation, werden höherfunktionelle Varianten nur im Labormaßstab produziert, zum Beispiel von Specific Polymers [11]. Diese Beschränkung hat beträchtliche Auswirkungen auf die Skalierbarkeit und ökonomische Realisierbarkeit der NIPU-Technologie.

Nichtsdestotrotz werden im akademischen Bereich diverse Ansätze zur Herstellung zyklischer Carbonate aus alternativen Quellen erforscht. Vielversprechende Strategien umfassen die Verwendung von Polyetherpolyolen aus der Fermentation von Polysacchariden oder die Nutzung von Ligninen oder Glycerin mit anschließender Zykoaddition von CO₂ als reichlich vorhandene und kostengünstige nachwachsende Rohstoffquelle für die Herstellung zyklischer Carbonate [6], [12], [13], [14]. Diese Forschungsrichtungen zielen darauf ab, die Ressourceneffizienz von höherfunktionellen Carbonaten zu verbessern und einen Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Materialien zu leisten.

Anwendungsspektrum und Fazit

Hybride isocyanat-freie Polyurethane können ein breites Anwendungsspektrum im Bereich struktureller Verklebungen demonstrieren. In diesem Kontext wurden mit ersten Formulierungen Zugscherfestigkeiten von 14-16 MPa auf unbehandeltem Aluminium und gehobeltem Buchenholz erreicht, was ihre Eignung für anspruchsvolle Verbindungen unterstreicht. Die Abwesenheit von Isocyanaten in diesen Klebstoffsystemen bietet signifikante Vorteile hinsichtlich des Gesundheitsschutzes, insbesondere in gewerblichen Anwendungen und auf Baustellen, wo die Exposition gegenüber potenziell gesundheitsschädlichen Substanzen minimiert werden kann.

Besonders hervorzuheben sind die überraschenden Eigenschaften der hybriden NIPUs bezüglich ihres Adhäsionsspektrums auf unbehandelten Metalloberflächen und ihrer strukturellen Leistungsfähigkeit. Initiale Formulierungen erzielten Zugscherfestigkeiten von nahezu 16 MPa auf unbehandeltem Aluminium bei einer Aushärtungszeit von 12 Stunden unter Raumtemperaturbedingungen. Weiterführende Untersuchungen indizierten, dass sogar höhere Zugscherfestigkeiten in Kombination mit einer Erhöhung der Zähigkeit der hybriden NIPUs bei reduzierten Presszeiten realisierbar sind. Diese Entdeckung eröffnet neue Anwendungsfelder für Polyurethanklebstoffe in Bereichen, in denen eine ausgeprägte Metallhaftung von kritischer Bedeutung ist. Ein vielversprechendes Anwendungsgebiet stellt der Verguss von Batteriekomponenten in der Elektromobilität dar. Das erweiterte Adhäsionsspektrum der hybriden NIPUs prädestiniert sie zudem für den Einsatz als Laminierharze in Multimateriallaminaten, wie sie beispielsweise im Skibau Verwendung finden. //

Literaturhinweise

- [1] Bayer, O.: Das Di-Isocyanat-Polyadditionsverfahren (Polyurethane). In: *Angewandte Chemie* 59 (1947), Nr. 9, S. 257-272.
- [2] Akindoyo, J. O.; Beg, M. D. H.; Ghazali, S.; Islam, M. R.; Jeyaratham N.; Yuvaraj, A. R.: Polyurethane types, synthesis and applications – a review. In: *RSC Advances* 115 (2016), Nr. 6, S. 114453-114482.
- [3] Market Data. Online: <https://plasticseurope.org/resources/market-data/>, aufgerufen am 11.12.2024.
- [4] Szycher, M., *Szycher's Handbook of Polyurethanes*. CRC Press, 2012.
- [5] Commission Regulation (EU) 2022/1149. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R1149>, aufgerufen am 11.12.2024.
- [6] Blažek, K.; Datta, J.: Renewable natural resources as green alternative substrates to obtain bio-based non-isocyanate polyurethanes – review. In: *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* (2019), S. 1-39.
- [7] Stachak, P.; Lukaszewska, I.; Hebda, E.; Pielichowski, K.: Recent advances in fabrication of non-isocyanate polyurethane-based composite materials. In: *Materials* 14 (2021), Nr. 13, S. 3497-3524.
- [8] Cornille, A.; Auvergne, R.; Figovsky, O.; Boutevin, B.; Caillol, S.: A perspective approach

to sustainable routes for non-isocyanate polyurethanes. In: *European Polymer Journal* 87 (2017), S. 535-552.

- [9] Ke, J.; Li, X.; Jiang, S.; Wang, J.; Knag, M.; Li, Q.; Zhao, Y.: Critical transformation of epoxy resin from brittleness to toughness by incorporating CO₂-sourced cyclic carbonate. In: *Journal of CO₂ Utilization*, 26 (2018), S. 302-313.
- [10] Lutz, V.; Odermatt, D.: Verfahren zur Herstellung eines hybriden nicht-isocyanathaltigen Polyurethans. In: Patent Veröffentlichungsnummer WO 2024/165634 A1 (2024).
- [11] Poly(ethylene glycol), α,ω -bis(cyclo-carbonate). Online: <https://specificpolymers.com/product/polyethylene-glycol-%e%b1%cf%89-biscyclocarbonate/>, aufgerufen am 11.12.2024.
- [12] Chen, Q.; Gao, K.; Peng, C.; Xie, H.; Zhao, Z. K.; Bao, M.: Preparation of lignin/glycerol-based bis(cyclic carbonates) for the synthesis of polyurethanes. In: *Green Chemistry* 9 (2015), Nr. 17, S. 4546-4551.
- [13] Blažek, K.; Benes, H.; Walterova, Z.; Abbrent, S.; Eceiza, A.; Calvo-Correas, T.; Datta, J.: Synthesis and structural characterization of bio-based bis(cyclic carbonate)s for the preparation of non-isocyanate polyurethanes. In: *Polymer Chemistry* 11 (2021), Nr. 12, S. 1643-1652.
- [14] Rollin, P.; Soares, L. K.; Barcellos, A. M.; Araujo, D. R.; Lenardao, E. J.; Jacob, R. G.; Perin, G.: Five-membered cyclic carbonates. In: *Applied Sciences* 11 (2021), Nr. 11, S. 5024-5080.

Die Autoren | Kontakt

Dr. Bruno Traber, Entwickler und Know-how Manager, Collano AG

Dr. Heiko Jung, Entwicklungsleiter, Collano AG

Dr. Raphael Schaller, CTO, Collano AG

Collano AG

Neulandstrasse 1
6203 Sempach Station
Schweiz
info@collano.com
www.collano.com



Polyurethane



Leyla Buchholz: Brennstoffzellen zuverlässig abdichten.
<https://sn.pub/rht1bs>