

# Einsatz und Potential biobasierter Additive in Kunststoffen Abschlussbericht

## Auftraggeber:



Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.  
OT Gülzow  
Hofplatz 1  
18276 Gülzow

## Referenz:

Az.: 123-02.05-20.0328/17-II-K

## Projektlaufzeit:

April 2018 - Jan 2020 (21 Monate)

## Auftragnehmer:



BioMath GmbH  
Angewandte Statistik und Informatik in den  
Biowissenschaften

Friedrich-Barnewitz-Str. 8  
18119 Rostock-Warnemünde

Tel: +49 (0) 381/ 375 661 0  
Fax: +49 (0) 381/ 375 661 18  
E-Mail: kerstin.schmidt@biomath.de

vertreten durch:  
Dr. Kerstin Schmidt



SKZ - KFE gGmbH

Friedrich-Bergius-Ring 22  
97076 Würzburg/Germany

Tel.: +49 (0) 931 4104-391  
Fax: +49 (0) 931 4104-717  
E-Mail: m.lang@skz.de

vertreten durch:  
Dr. Marieluise Lang

## Autoren:

Kerstin Schmidt, Paul Schmidt, BioMath GmbH Rostock/ Hamburg  
Marieluise Lang, Alexander Rusam, SKZ - KFE gGmbH Würzburg

## 1. Inhaltsverzeichnis

1.	Inhaltsverzeichnis.....	1
2.	Zusammenfassung.....	3
3.	Einleitung.....	5
3.1	Hintergrund und Aufgabenstellung .....	5
3.2	Begriffsdefinitionen.....	6
3.2.1	Kunststoffe und Biokunststoffe .....	6
3.2.2	Kunststoff-Additive und biobasierte Kunststoff-Additive.....	7
3.2.3	Stoffe und Stoffgruppen, die als Additive eingesetzt werden .....	8
4.	Methodik.....	13
4.1	Primärerhebung: Befragung von Experten .....	13
4.1.1	Telefoninterviews mit Fachgesellschaften, Forschungseinrichtungen und Unternehmen	13
4.1.2	Online-Fragebogen.....	14
4.1.3	Weitere Kontakte .....	15
4.1.4	Expertenworkshop.....	15
4.2	Sekundärerhebung: Literaturrecherche .....	15
4.2.1	Marktstudien .....	15
4.2.2	Wissenschaftliche Fachpublikationen.....	15
5.	Datenerhebung.....	16
5.1	Primärerhebung: Befragung von Experten .....	16
5.1.1	Telefoninterviews mit Fachgesellschaften, Forschungseinrichtungen und Unternehmen	16
5.1.2	Online-Fragebogen.....	18
5.1.3	Weitere Kontakte .....	22
5.1.4	Expertenworkshop.....	23
5.2	Sekundärerhebung: Literaturrecherche .....	25
5.2.1	Marktstudien .....	25
5.2.2	Wissenschaftliche Fachpublikationen.....	33
5.2.2.1	Generell .....	33
5.2.2.2	Weichmacher.....	34
5.2.2.3	Biozide/ Biozide Wirkstoffe .....	40
5.2.2.4	Flammschutzmittel.....	47
5.2.2.5	Nukleierungsmittel .....	53
5.2.2.6	Schlagzähmodifikatoren .....	58
6.	Ergebnisse .....	61
6.1	Marktzahlen zu biobasierten Additiven .....	61
6.2	Aktueller Einsatz biobasierter Additive.....	64
6.3	Aktuelle Forschung und Entwicklung.....	65
7.	Handlungsempfehlungen .....	65

---

7.1	Priorisierung von Entwicklungen biobasierter Kunststoff-Additive.....	65
7.1.1	Entwicklung und Etablierung biobasierter Weichmacher .....	68
7.1.2	Entwicklung von Drop-In-Lösungen, z.B. für Schlagzähmodifikatoren .....	69
7.1.3	Grundlagenforschung an biobasierten Nukleierungsmitteln, Flammschutzmitteln und Bioziden.....	69
7.2	Weitere Forschungsfragestellungen .....	70
8.	Literaturverzeichnis .....	72

## 2. Zusammenfassung

Die Erstellung dieser Übersicht der aktuell am Markt eingesetzten Additive in Kunststoffen sowie des Anteils von biobasierten Additiven insbesondere in Biokunststoffen (für das Jahr 2016) erfolgte über eine Datenrecherche, basierend auf zwei Bausteinen: einer Befragung von Experten (Primärerhebung) und einer Literaturrecherche (Sekundärerhebung). Für die Primärerhebung wurden Fachgesellschaften, Additivhersteller und –verarbeiter sowie weitere Ansprechpartner in Telefoninterviews, einer Onlinebefragung und in einem Expertenworkshops befragt. Für die Sekundärerhebung wurden veröffentlichte Zahlen von Marktforschungsunternehmen, Fachgesellschaften oder publizierte Fachbeiträge in Datenbanken recherchiert.

Der Anteil Biokunststoffe an den Kunststoffen insgesamt betrug im Jahr 2016 weniger als 1%. Für Biokunststoffe gibt es deutlich weniger Additive auf dem Markt als für konventionelle Kunststoffe, die Wirkungsweisen und Wechselwirkungen müssen hier noch erforscht werden. Wichtig ist es derzeit, die Performance von Bio-Kunststoffen allgemein zu verbessern und nicht einzelne Eigenschaftsprofile durch bestimmte Bio-Additive zu erzielen.

Die Substitution konventioneller durch biobasierte Additive auch in konventionellen Kunststoffen erfordert die Lösung verfahrens- und anwendungstechnischen Anforderungen an Funktionalität, Verarbeitbarkeit, Performance und Maschineneinsatz, um technische Gleichwertigkeit zu erlangen. Außerdem sind finanzielle Herausforderungen im Hinblick auf die Kosten der Entwicklung und Produktionsumstellung zu bewältigen. Hierzu könnten Vergleichsstudien, die auch die Molekülgeometrie konventioneller und biobasierter Additive betrachten, beitragen. Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Struktur und der Eigenschaftsbeziehungen, auch die Wechselwirkungen von Bioadditiven mit unterschiedlichen Polymermatrices sind vielfach noch nicht verstanden.

Ein Teil der eingesetzten Additive ist (und war) biobasiert: auf Basis von Stearinsäure, Citraten oder epoxidierten Pflanzenölen. Die in Deutschland im Jahr 2016 verarbeiteten Stabilisatoren basierten zu etwa einem Viertel auf nachwachsenden Rohstoffen, für PVC wurden etwa 10% biobasierte Weichmacher in Form von Citraten oder epoxidierten Pflanzenölen verwendet. Für viele Additive wie Antiblock, Antifogging, Antistatika, Gleitmittel, Säurefänger sowie Schmier- und Verarbeitungshilfsstoffe werden Stoffe verwendet, die sehr häufig auf Fettsäuren basieren. In geringen Anteilen werden natürliche Rohstoffe auch bei Treibmitteln, Bioziden, Flammschutzmitteln und Nukleierungsmitteln eingesetzt.

Für Unternehmen stellen Image und Umweltverträglichkeit die größten Motivatoren dar, um biobasierte Additive in ihr Portfolio aufzunehmen. Die größten Probleme stellen die hohen Kosten und der damit zu hohe Preis sowie die fehlende Performance dar.

Fünf unterschiedlichen Additiv-Typen wird unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Machbarkeit einer biobasierten Substitution aufgrund des chemischen Aufbaus und der Einsatzhäufigkeit bzw. des angenommenen Bedarfs eine hohe Priorität für die Entwicklung biobasierter Alternativen zugesprochen: Weichmacher, Biozide, Flammschutzmittel, Nukleierungsmittel und Schlagzähmodifikatoren. Eine Substitution der Phthalate durch biobasierte Alternativen scheint realistisch, da der Markt viele Substituenten bietet und bereits umfangreiche Forschungsaktivitäten stattfinden. Ausgehend von der Vielfalt biogener Stoffe und ihren unterschiedlichen molekularen Strukturen, wird die Entwicklung biobasierter Biozide als realistisch eingeschätzt. Flammschutzmittel enthielten in der Vergangenheit häufig Halogene und werden in mittleren bis großen Mengen in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen verarbeitet, weshalb eine Substitution durch biobasierte Stoffe von großem Interesse ist. Im Bereich der Biokunststoffe ist Polylactid (PLA) ein sehr gefragtes und vielversprechendes Polymer. Um die Kristallisation von PLA mit anderen biobasierten Keimbildnern als PDLA zu kontrollieren, müssen geeignete Materialien identifiziert und auf ihre nukleierenden Eigenschaften hin untersucht werden.

Generell zeigt sich Forschungsbedarf in der Grundlagen- und in der Anwendungsforschung – es müssen geeignete Stoffe identifiziert und diese integriert und erprobt werden.

Ein Screening pflanzlicher Inhaltsstoffe würde helfen, geeignete Molekülstrukturen für beispielsweise biobasierte Antioxidantien, Biozide oder UV-Stabilisatoren zu finden. In Vergleichsstudien könnten konventionelle und biobasierte Additive in ihrer Funktionalität, Verarbeitbarkeit und der Performance in ihren Anwendungsgebieten gegenübergestellt werden.

Für den Einsatz neuer biobasierter Additive (u.a zu Witterungsverhalten, die Oberflächenstabilität, mechanische Stabilität oder auch Temperaturstabilität) sind Langzeitstudien notwendig, um Akzeptanz zu schaffen, sodass diese auch tatsächlich für einen Einsatz in einem hochwertigen Produkt in Erwägung gezogen werden. Wo Bioadditive bereits sehr grundlegend erforscht werden, ist ein wichtiger nächster Schritt die Forschung in Richtung Anwendung zu bringen. Neu entwickelte Additive müssen für unterschiedliche Verarbeitungsprozesse geeignet sein. Auch hier besteht noch Forschungsbedarf. Weiterhin besteht auch Bedarf an Rezepturenentwicklungen, um biobasierte Additive in einem Material mit erprobter Performance zu etablieren.

## 3. Einleitung

### 3.1 Hintergrund und Aufgabenstellung

Wurden Anfang des 20. Jahrhunderts noch überwiegend Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen zur Kunststoffherstellung eingesetzt (z. B. Naturkautschuk, Cellulose, Casein, ...), änderte sich die Rohstoffbasis im Laufe der Jahre zunehmend in Richtung synthetischer Polymere, die aus petrochemischen Produkten hergestellt werden. Erst aufgrund der steigenden Preise für Rohöl und Energie sowie dem damit verbundenen Bewusstsein, dass die fossilen Vorräte endlich sind, setzte im ausgehenden 20. Jahrhundert ein Trend zur Entwicklung von Kunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen ein. Heute können daher in vielen Bereichen klassische thermoplastisch verarbeitbare Werkstoffe wie Polyethylen (PE) oder Polyethylenterephthalat (PET) durch Kunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe wie Polylactid (PLA), Polyhydroxyalkanoate (PHA), Stärke- oder ligninbasierte Compounds ersetzt werden. Das größte Anwendungsgebiet finden Biopolymere derzeit in der Verpackungsindustrie (Ifeu et al. 2018). Andere typische Anwendungen sind Einweg-Geschirr oder -Besteck. Zudem werden die Biopolymere in vielen anderen Bereichen, wie z. B. in der Automobilindustrie, Elektronik oder Kosmetik, eingesetzt.

Biopolymere in reiner Form sind meistens ohne vorherige Veredelung aufgrund von unzureichenden Eigenschaften nicht anwendbar. PLA und PHB sind beispielsweise in reiner Form sehr spröde und zersetzen sich bereits bei Temperaturen knapp oberhalb des Schmelzpunktes. Aufgrund ihrer molekularen Struktur kristallisieren diese Biopolymere sehr langsam, was zu langen Zykluszeiten bei der Verarbeitung führt. Aus diesen Gründen werden normalerweise verschiedene Additive, wie z. B. thermische Stabilisatoren, Gleit- und Nukleierungsmittel, Weichmacher oder Schlagzähmodifikatoren eincompoundiert, um den Verarbeitungsprozess zu erleichtern oder das Eigenschaftsprofil des Biopolymers für bestimmte Anwendungen zu optimieren. Diesbezüglich gibt es mehrere Additivhersteller, die ihr Sortiment bereits um spezielle Additive für Biopolymere erweitert haben. Diese eignen sich für den Einsatz in Biopolymeren, werden jedoch meistens auf Erdölbasis hergestellt. Dies führt dazu, dass der Anteil an biobasierten Stoffen in Biopolymer-Additiv-Mischung reduziert wird. Dementsprechend besteht der Bedarf, dass auch die verwendeten Additive biobasiert sind. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren Additive aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt und für den Einsatz in Biopolymeren optimiert. Es existieren beispielsweise bereits verschiedene Weichmacher, wie z. B. Ester der Zitronensäure und natürliche Öle, die teilweise oder vollständig biobasiert sind und in Biopolymeren verwendet werden, um die Härte des Materials zu reduzieren. Zudem können biobasierte Wachse eingesetzt werden, um die Verarbeitbarkeit der Biopolymere zu erleichtern. Weitere Beispiele für biobasierte Additive sind biobasierte Pigmente, Elastomere und Ester, die Ihre Anwendung als Farbstoffe, Schlagzähmodifikatoren und Nukleierungsmittel finden.

Trotz deren großen technischen, wirtschaftlichen und Umweltpotentiale, fehlt jedoch bisher ein systematischer Marktüberblick der biobasierten Additive. Meist wird deshalb in Kauf genommen, dass Biokunststoffe mit handelsüblichen Stabilisatoren, Farbstoffen und Funktionszusätzen additiviert werden.

Im Rahmen des Projektes sollte daher eine Übersicht der aktuell am Markt eingesetzten Additive in Kunststoffen sowie des Anteils von biobasierten Additiven (für das Jahr 2016) erstellt werden. Insbesondere war dabei der Einsatz von biobasierten Additiven in Kombination mit biobasierten Kunststoffen herauszustellen. Darauf aufbauend war der Handlungsbedarf zur Identifizierung und Entwicklung von biobasierten Alternativen abzuleiten und eine Handlungsempfehlung abzugeben.

## 3.2 Begriffsdefinitionen

### 3.2.1 Kunststoffe und Biokunststoffe

Als Kunststoffe werden Werkstoffe bezeichnet, die hauptsächlich aus Makromolekülen bestehen. Wichtige Merkmale von Kunststoffen sind ihre technischen Eigenschaften, wie Formbarkeit, Härte, Elastizität, Bruchfestigkeit, Temperatur-, Wärmeformbeständigkeit und chemische Beständigkeit, die sich durch die Wahl der Makromoleküle, Herstellungsverfahren und in der Regel durch Beimischung von Additiven in weiten Grenzen variieren lassen (Menges et al. 2014).

Die jeweiligen Makromoleküle eines Kunststoffes sind Polymere, die aus wiederholenden Grundeinheiten, sogenannten Monomeren, aufgebaut sind. Die Polymere können aus Naturstoffen gewonnen werden oder rein synthetisch sein. Die meisten traditionellen Kunststoffe werden aus dem fossilen Rohstoff Rohöl hergestellt (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2016).

Kunststoffe, die auf Basis nachwachsender Rohstoffe erzeugt werden, werden als Biokunststoffe oder bio-basierte Kunststoffe („technische Biopolymere“) bezeichnet (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2016). Aber auch biologisch abbaubare Kunststoffe unabhängig von ihrer Rohstoffbasis werden als Biokunststoffe bezeichnet.

Abbildung 1 gibt einen Überblick zu biobasierten, fossilen und biologisch abbaubaren bzw. nicht biologisch abbaubaren Kunststoffen.

	Nicht biologisch abbaubar			Biologisch abbaubar		
<b>biobasiert (Nachwachsende Rohstoffe)</b>	Bio-PA	Polyamide	Polyamid	PHA	Polyhydroxyalkanoat	
	Bio-PBT	Polybutylenterephthalat	Polyester	PHB	Polyhydroxy-Butyrat	Polyester
<b>teilweise biobasiert</b>	Bio-PE	Polyethylen	Polyolefin	PHV	Polyhydroxy-Valerat	
	PEF	Polyethylenfuranoat	Polyester	PLA	Polylactid	Polyester
	Bio-PET	Polyethylenterephthalat	Polyester	PO3G		
	Bio-PMMA	Polydimethylmethacrylat	Polyacrylat	TPS	Thermoplastische Stärke	Polysaccharid
	Bio-PP	Polypropylen	Polyolefin	Zell	Zellulose	Polysaccharid
	Bio-PUR	Polyurethan	Polyurethan			
	Epoxy	Epoxidharz				
	ABS	Acrylonitril butadiene styrene		TPS	Thermoplastische Stärke	Polysaccharid
	PBT	Polybutylenterephthalat	Polyester			
	PET	Polyethylenterephthalat	Polyester			
PEIT	Polyethylene Isosorbide Terephthalate					
PTT	Polytrimethylene terephthalate	Polyester				
PUR	Polyurethan	Polyurethan				
PVC	Polyvinylchlorid	Polyvinylchlorid				
SBR						
Epoxy	Epoxidharz					
	Alkydharze	Polyester				
<b>fossil (Petrochemische Rohstoffe)</b>	ABS	Acrylonitril butadiene styrene		PBAT	Polybutylenadipat-Terephthalat	
	PA	Polyamide	Polyamid	PBS	Polybutylensuccinat	Polyester
	PBT	Polybutylene terephthalate	Polyester	PBSA	Polybutyrate succinate-co-adipate	Polyester
	PC	Polycarbonate	Polyester	PBSAT	Polybutyrate succinate-co-adipate terephthalate	
	PE	Polyethylen	Polyolefin	PBSL	Polybutyrate succinate-co-lactate	
	PEEK	Polyetheretherketone		PBST		
	PEK	Polyetherketone		PCBS	Ply(1-cystine bisamide-g-sulfadiazine)	
	PES	Polyester	Polyester	PCL	Polycaprolactone	
	PET	Polyethylenterephthalat	Polyester	PTMAT	Polytetramethylene adipate terphthalate	
	PMMA	Polydimethylmethacrylat	Polyacrylat			
	POM	Polyoxymethylene plastic				
	PP	Polypropylen	Polyolefin			
	PPS	Polyphenylsulfid				
	PS	Polystyrol				
	PTT	Polytrimethylene terephthalate	Polyester			
	PUR	Polyurethan	Polyurethan			
	PVC	Polyvinylchlorid	Polyvinylchlorid			
	SAN	Styrol-Acrylnitril-Copolymere				
	Epoxy	Epoxidharz				

**Abbildung 1** Überblick zu biobasierten/ fossilen und biologisch abbaubaren/ nicht biologisch abbaubaren Kunststoffen (eigene Darstellung BioMath/SKZ)

### 3.2.2 Kunststoff-Additive und biobasierte Kunststoff-Additive

Kunststoff-Additive sind Zusatz- bzw. Hilfsstoffe, die durch unterschiedlichste Eigenschaften wie Wärmestabilisierung, Flammschutz oder Antistatik die Verarbeitbarkeit und die Verwendung von Kunststoffen ermöglichen. Abhängig von der Produktanwendung werden Additive zweckgerichtet eingesetzt, um die Materialeigenschaften zu optimieren. Bereits geringe Anteile an Additiven können ausreichen, um einen wirkungsvollen Effekt zu erzielen.

Biobasierte Kunststoff-Additive werden auf Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht zu den verschiedenen Kunststoff-Additivtypen und ihren Funktionen.

**Tabelle 1** Kunststoff - Additivtypen gemäß Handbuch Kunststoff-Additive (Maier und Schiller 2016)

Additiv-Typ	Beschreibung
Antioxidantien	verhindern thermische Reaktion von natürlichen und synthetischen Polymeren mit molekularem Sauerstoff und damit Unterdrückung bzw. Verminderung von Abbau und Alterung
Lichtschutzmittel/ UV Stabilisation	verhindern bzw. verzögern photooxidativen Abbau von natürlichen und synthetischen Polymeren
Säurefänger	unterbinden Zersetzungsreaktionen, die durch im Polymer verbliebene Katalysatorrückstände ausgelöst werden
Weichmacher	verbessern Dehnbarkeit, Weichheit und Biegsamkeit für Verarbeitung und Gebrauch
Gleitmittel/ Trennmittel	verbessern Fließverhalten der Schmelze, d. h. reduzieren die innere und äußere Reibung justieren die Rheologie der Kunststoffschmelze, setzen auch die Schädigung des Materials herab
Verarbeitungshilfsmittel	beeinflussen Oberfläche und Gelierverhalten des Polymers, das viskoelastische Verhalten und das Fließverhalten verbessern Produktivität, beispielsweise durch Steigerung des maximalen Durchsatzes und Reduzierung von Ablagerungen
Antistatika	senken den spezifischen elektrischen Widerstand der Kunststoffe <ul style="list-style-type: none"> <li>• klassisch (intern)</li> <li>• extern (gelöste Applikation klassischer Antistatika auf den Kunststoffen)</li> <li>• permanent (inhärent leitfähige Polymere)</li> </ul>
Antifogging-Additive	Antibeschlagmittel, vermeiden Bildung von kleinen Wassertropfen (Beschlügen) an bspw. Kunststofffolien
Slip-Additive	reduzieren Haftung oder Klebung des Polymers an Metalloberflächen oder aneinander (hoher Gleitreibungswert) auf das geforderte Niveau, indem sie durch Ausbildung eines dünnen Films die Oberfläche des Kunststoffes verändern
Antiblockmittel	reduzieren Haftung oder Klebung des Polymers an Metalloberflächen (hoher Gleitreibungswert), indem sie auf der Oberfläche auskristallisieren und als „Abstandhalter“ agieren
Nukleierungsmittel und Transparenzverstärker	bewirken eine Beschleunigung des Kristallisationsvorgangs und ermöglichen dadurch eine signifikante Reduktion der Zykluszeiten in der Verarbeitung beeinflussen mikroskopische Morphologieparameter, wie Lamellendicke, Sphärolithgröße und in bestimmten Fällen die Kristallmodifikation des Kunststoffes, welche ihrerseits die

	makroskopischen Eigenschaften wie Steifigkeit, Zähigkeit, Transparenz und Wärmeformbeständigkeit sowie Barriereigenschaften und Ästhetik von Verpackungen beeinflussen
Farbmittel	umfassen Pigmente und Farbstoffe, diese verändern das Aussehen des Kunststoffes
Optische Aufheller	verbessern Aussehen der Endprodukte bzw. maskieren Anfangsfarbe von Kunststoffen, Steigerung der Brillanz von schwarz, weiß und buntpigmentierten Produkten
Vernetzung und kontrollierter Abbau von Polyolefinen	Erhöhung (Verzweigung) bzw. Verringerung der Molekülmasse
Chemische Treibmittel	werden für die Herstellung von Schaumstoffen aus Kunststoffen und Kautschuken benötigt, um eine geringere Dichte gegenüber dem nicht geschäumten Material zu erreichen
Flammschutzmittel	werden benötigt, um brandschutztechnische Anforderungen zu erfüllen und so ein bestimmtes Sicherheitsniveau zu gewährleisten
Füllstoffe und Verstärkungsmittel	inaktiv: erhöhen das Volumen und reduzieren die Kosten aktiv: verbessern mechanische Eigenschaften (= verstärkend)
Biozide Wirkstoffe	haben hemmende oder abtötende Wirkung auf Schadorganismen, insbes. Mikroorganismen
Schlagzähmodifikatoren	sind meist Polymere mit entsprechend guten Schlagzähigkeiten, die die hart-spröden Eigenschaften mindern bzw. ganz aufheben
Netz- und Dispergieradditive	bewirken eine feine und gleichmäßige Verteilung fester Pigmente im Bindemittel und verhindern das Ausflocken der Pigmente
Haftvermittler	stellen an den Grenzflächen unmischbarer Stoffe eine enge physikalische oder meist chemische Bindung her
Rheologie-Modifizierer	verbessern das Verformungs- und Fließverhalten
Schleppmittel	reduzieren geruchs- und emissionsverursachende Bestandteile des Compounds während der Vakuumentgasung

Nicht betrachtet im Rahmen dieses Projektes wurden Füll- und Verstärkungsmittel sowie Farbmittel/Pigmente.

### **3.2.3 Stoffe und Stoffgruppen, die als Additive eingesetzt werden**

Es gibt sehr viele in Kunststoffen einsetzbare Additive. Tabelle 2 gibt einen Überblick und eine Gegenüberstellung von erneuerbaren und nicht erneuerbaren Rohstoffen, die in den verschiedenen Additiv-Typen eingesetzt werden.

**Tabelle 2** Überblick zu Stoffen/ Stoffgruppen, die in Additiven eingesetzt werden

Additiv-Typ	Typischer Gehalt (%)	nicht erneuerbar					erneuerbar
		fossil (petrochemische Rohstoffe)	metallische Rohstoffe	Gesteine/ Sedimente	Salze	Sonstiges	biobasiert (nachwachsende Rohstoffe)
Antiblock-Additive			Talk, Alumosilikate, Zeolite, Kalkstein	Kalkstein		Silicone	Metallseifen, Fettsäureamide, Glycerinester
Antifogging-Additive / Antitau-Additive		Phenole					Ethoxylierte Alkohole, Fettsäureester, Glycerinester,
Antistatika						Alkylsulfonate	Fettsäureester, Glycerinester, Ethoxylierte Alkylamine
Haftvermittler		Polyolefine, n-Butan					-
Rheologie-Modifizierer		Polymere					Fettsäureester
Schmierstoffe		Wachse, Paraffine, Polyolefine, Fettsäureamide, Fettsäureester				Metallstearate	Fettsäureamide, Fettsäureester, Fettalkohole, Metallseifen, Carbonsäuren, Glycerinester, Polyolester,
Trennmittel / Gleitmittel	0,1-3	Naphta, Fettsäureamide, Fettsäureester				Metallstearate	Fettsäureamide, Fettsäureester, Metallseifen, Carbonsäureester, Glycerinester, Polyolester
Antioxidantien / UV- und Thermostabilisatoren	0,05-3	Acrylate, Amine, Anilide, Benzotriazole, Hydrazine, Aryle, Phosphite, Thioether, Triazine, Phenole	Blei, Cadmium, Zinn, Barium, Zink				Fettsäureamide, Carbonsäureester, Tocopherol
Säurefänger			Metalloxide, Alumosilikate				Metallseifen
Verarbeitungshilfsstoffe		Fluorpolymere, Polyether, Polyacrylate, Phthalate, Paraffine				Silicone	Metallseifen
Weichmacher	10-70	Phthalate, Glykole, Sulfonamide, (halogenierte) Paraffine, Pyrrolidone			Carbonate	Phosphate	Pflanzenölderivate, epoxidierte Öle oder Fettsäuren, acetyliertes Rizinus-Öl oder Stearat-Ester, dimerisierte Fettsäuren,

					esterifiziertes Glycerin, Kohlenhydrate, Furanderivate, Terpene, Carbonsäureester
Biozide / Biozide Wirkstoffe	0,001-1	Isothiazolinone, IPBC, Azol-, Benzimidazolverbindungen, Thiabendazol, Folpet, Zink- und Natriumpyrithion, Phenole, Ammoniumverbindungen, Dithiocarbonate	Silberverbindungen, Kupferverbindungen, Arsenverbindungen		Chitosan, antimikrobielle Peptide (Poly-Lysin) oder Enzyme (Peroxidasen)
Farbmittel / Pigmente		Azoverbindungen, Amide, Aryle, Heterocyclen, Ruß	Metalloxide, Metallkomplexe	Pigmente	pflanzliche Farbstoffe
Flammschutzmittel	0,7-25	Arylhalogenide, Borate, halogenierte Polymere, Phosphate	Metalloxide, Zink, Aluminiumhydroxid, Antimon	Bromverbindungen	Carbonsäureester, Lignin, Stärke
Netz- und Dispergieradditive		Polyether		Silane	Fettsäureester
Nukleierungsmittel		Carbonsäureamide	Talk	Natriumcarbonat	
Quervernetzer		Aryle	Vinylsilane, Methacrylsilane, Alkylsilane, Aminosilane, Epoxysilane, Halogenalkylsilane	Peroxide	
Schlagzähmodifikatoren		Terpolymere, Acrylate, Synthesekautschuke			Naturkautschuke
Schleppmittel		Polyolefine			CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O
Treibmittel		Azoverbindungen, Hydrazine, Nitrosoamine, niedrigsiedende Kohlenwasserstoffe		Carbonate	Stickstoff, CO <sub>2</sub> , Zitronensäureester

Im Anhang 2 befindet sich eine detaillierte, sortier- und selektierbare Liste von etwa 7.500 Additiven, inklusive der am Markt erhältlichen Produkte und Hersteller.

Für jedes Produkt sind folgende Informationen (in Deutsch und Englisch) verfügbar:

- Art des Additivs (biobasiert/ fossil),
- Additiv-Typ (s. Tabelle 1)
- Stoffgruppe und Stoffuntergruppen
- Name
- Tradename
- CAS Nummer
- Hersteller

Der Aufbau der Liste ist in Abbildung 2 ersichtlich. Die Angabe „Art des Additivs“ wurde anhand der Herstellerangaben ausgefüllt. Wurde von Herstellerseite keine Angabe über den Rohstoff gemacht, wurde „fossil“ angegeben. So kann es sein, dass manche Stoffe abhängig vom Hersteller sowohl als „fossil“ als auch als „biobasiert“ gekennzeichnet wurden.

Typ DE	Typ EN	Stoffgruppe DE	Stoffgruppe EN	Stoffuntergruppe I DE	Stoffuntergruppe I EN	Stoffuntergruppe II DE	Stoffuntergruppe II EN	Name	Tradename	CAS	Hersteller
Weichmacher	Plasticizers	Carbonsäuren	Carboxylic Acids	Dicarbonsäure	Dicarboxylic Acid	Azelainsäure	Azelalaic Acid	n-Nonanedioic acid	Emerox 1144	123-99-9	Henkel Corporation
Weichmacher	Plasticizers	Carbonsäuren	Carboxylic Acids	Epoxidierete Fettsäure	Epoxidized Fatty Acid			epoxidized soybean fatty acid	Vikoflex 4050	68082-34-8	Arkema
Weichmacher	Plasticizers	Carbonsäuren	Carboxylic Acids	Epoxidierete Fettsäure	Epoxidized Fatty Acid			iso-amy epoxy stearate	Proviplast PLS Green 5		Proviron
Weichmacher	Plasticizers	Carbonsäuren	Carboxylic Acids	Epoxidierete Fettsäure	Epoxidized Fatty Acid			2-ethylhexyl 8-(3-octyloxiran-2-yl)octanoate	Proviplast PLS Green 8	141-38-8	Proviron
Weichmacher	Plasticizers	Carbonsäuren	Carboxylic Acids	Epoxidierete Fettsäure	Epoxidized Fatty Acid			9,10-Epoxyoctadecanoic acid, 2-ethylhexyl ester	Proviplast PLS Green 8	141-38-8	Proviron
Weichmacher	Plasticizers	Carbonsäuren	Carboxylic Acids	Epoxidierete Fettsäure	Epoxidized Fatty Acid			2-Ethylhexyl 9,10-epoxystearate	Proviplast PLS Green 8	141-38-8	Proviron
Weichmacher	Plasticizers	Carbonsäuren	Carboxylic Acids	Epoxidierete Fettsäure	Epoxidized Fatty Acid			2-Ethylhexyl 9,10-epoxyoctadecanoate	Proviplast PLS Green 8	141-38-8	Proviron
Weichmacher	Plasticizers	Carbonsäuren	Carboxylic Acids	Epoxidierete Fettsäure	Epoxidized Fatty Acid			Oxiraneoctanoic acid, 3-octyl-, 2-ethylhexyl ester	Proviplast PLS Green 8	141-38-8	Proviron
Weichmacher	Plasticizers	Carbonsäuren	Carboxylic Acids	Epoxidierete Fettsäure	Epoxidized Fatty Acid			2-ethylhexyl 8-(3-octyloxiran-2-yl)octanoate	Proviplast PLS Green 8	141-38-8	Proviron
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	Methyl abietate		127-25-3	Parchem
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	1-Phenanthrenecarboxylic acid, 1,2,3,4,4a,4b,5,6,10,10a-decahydro-1,4a-dimethyl-7-(1-methylethyl)-, methyl ester		127-25-3	Parchem
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	Podocarpa-7,13-dien-15-oic acid, 13-isopropyl-, methyl ester		127-25-3	Parchem
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	Methyl [1R-(1a,4ab,4ba,10aa)]-1,2,3,4,41,4b,5,6,10,10a-decahydro-1,4a-dimethyl-7-(1-methylethyl)-1-phenanthrenecarboxylate		127-25-3	Parchem
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	methyl [1R,4aR,4bR,10aR]-1,4a-dimethyl-7-ppan-2-yl-2,3,4,4b,5,6,10,10a-octahydrophenanthrene-1-carboxylate		127-25-3	Parchem
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	Methyl abietate	AGN-PC-0PU46	127-25-3	Angene
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	1-Phenanthrenecarboxylic acid, 1,2,3,4,4a,4b,5,6,10,10a-decahydro-1,4a-dimethyl-7-(1-methylethyl)-, methyl ester	AGN-PC-0PU46	127-25-3	Angene
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	Podocarpa-7,13-dien-15-oic acid, 13-isopropyl-, methyl ester	AGN-PC-0PU46	127-25-3	Angene
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	Methyl [1R-(1a,4ab,4ba,10aa)]-1,2,3,4,41,4b,5,6,10,10a-decahydro-1,4a-dimethyl-7-(1-methylethyl)-1-phenanthrenecarboxylate	AGN-PC-0PU46	127-25-3	Angene
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	methyl [1R,4aR,4bR,10aR]-1,4a-dimethyl-7-ppan-2-yl-2,3,4,4b,5,6,10,10a-octahydrophenanthrene-1-carboxylate		127-25-3	Angene
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	Methyl Ester of Rosin	Abalyn D-E	68186-14-1	Eastman Chemical Company
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	methyl (1,4a-dimethyl-7-(methylethyl)-1,2,3,4,5,6,10,10a,4a,4b-decahydrophenanthrene-carboxylate	Abalyn D-E	68186-14-1	Eastman Chemical Company
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	Ethyl Ester of Rosin		631-71-0	
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	ethyl (1,4a-dimethyl-7-(methylethyl)-1,2,3,4,5,6,10,10a,4a,4b-decahydrophenanthrene-carboxylate		631-71-0	
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	benzyl ester of rosin			
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Abietinsäureester	Abietic Acid Esters	phenylmethyl (1,4a-dimethyl-7-(methylethyl)-1,2,3,4,5,6,10,10a,4a,4b-decahydrophenanthrene-carboxylate			
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	dimethyl adipate		627-93-0	
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Podocarpa-7,13-dien-15-oic acid, 13-isopropyl-, methyl ester		627-93-0	
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	dimethyl hexanedioate		627-93-0	
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	diethyl hexane-1,6-dioate	Adimol DB	105-99-7	Lanxess
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Di-n-butyladipat	Adimol DB	105-99-7	Lanxess
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Hexandisäure-di-n-butylester	Adimol DB	105-99-7	Lanxess
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Dibutyladipat	Adimol DB	105-99-7	Lanxess
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Dibutyl hexanedioate	Adimol DB	105-99-7	Lanxess
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Di-n-butyl adipate	Adimol DB	105-99-7	Lanxess
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Hexanedioic acid, dibutyl ester	Adimol DB	105-99-7	Lanxess
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Adipic acid, dibutyl ester	Adimol DB	105-99-7	Lanxess
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Adipic acid dibutyl ester	Adimol DB	105-99-7	Lanxess
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Hexanedioic acid, 1,6-dibutyl ester	Adimol DB	105-99-7	Lanxess
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Dibutyladipat	DnBA	105-99-7	Chemoxy
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Dibutyl hexanedioate	DnBA	105-99-7	Chemoxy
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Di-n-butyl adipate	DnBA	105-99-7	Chemoxy
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Hexanedioic acid, dibutyl ester	DnBA	105-99-7	Chemoxy
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Adipic acid, dibutyl ester	DnBA	105-99-7	Chemoxy
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Adipic acid dibutyl ester	DnBA	105-99-7	Chemoxy
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Hexanedioic acid, 1,6-dibutyl ester	DnBA	105-99-7	Chemoxy
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Diisobutyladipat	Plasthall DIBA	141-04-8	Hallstar
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	DIISOBUTYL ADIPATE	Plasthall DIBA	141-04-8	Hallstar
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Bis(2-methylpropyl) hexanedioate	Plasthall DIBA	141-04-8	Hallstar
Weichmacher	Plasticizers	Ester	Esters	Carbonsäureester	Carboxylic Acid Esters	Adipinsäureester	Adipic Acid Esters	Adipic acid bis(2-methylpropyl) ester	Plasthall DIBA	141-04-8	Hallstar

Abbildung 2 Screenshot der Produktliste Kunststoff-Additive

## 4. Methodik

Die Datenrecherche basierte im Wesentlichen auf zwei Bausteinen: einer Befragung von Experten (Primärerhebung) und einer Literaturrecherche (Sekundärerhebung). Für die Primärerhebung wurden Fachgesellschaften, Additivhersteller und –verarbeiter sowie weitere Experten zum Thema Additive befragt. Für die Sekundärerhebung wurden veröffentlichte Zahlen von Fachgesellschaften und publizierte Fachbeiträge in Datenbanken recherchiert.

### 4.1 Primärerhebung: Befragung von Experten

Im Rahmen der Expertenbefragung wurden Fachgesellschaften, Firmen, Hersteller und weitere Kontakte zum Thema biobasierte Kunststoff-Additive befragt. Dies ist im Folgenden näher erläutert.

#### 4.1.1 *Telefoninterviews mit Fachgesellschaften, Forschungseinrichtungen und Unternehmen*

Für die Befragung wurden zunächst auf der Basis einer Internetrecherche nach Institutionen Adresslisten mit Ansprechpartnern zusammengestellt. Die Fachgesellschaften und Firmen wurden erst per E-Mail informiert, dann telefonisch kontaktiert und zu biobasierten Additiven in Kunststoffen befragt. Die befragten Fachgesellschaften und Firmen sind im Folgenden aufgelistet:

AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V., Deutschland, Frankfurt am Main  
Bayern innovativ, Deutschland, Nürnberg  
Bio-Composites And More (B.A.M.), Deutschland, Ipsheim  
bioplastics Magazine, Deutschland, Mönchengladbach  
Carbon Composites e. V., Deutschland, Augsburg  
DECHEMA, Deutschland, Frankfurt am Main  
Emery Oleochemicals GmbH, Deutschland, Düsseldorf  
EuropaBio, EU, Brüssel  
European Bioplastics, EU, Berlin  
European Composites Industry Association EuCIA, EU, Brüssel  
Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften, Universität Bayreuth, Deutschland  
Federchimica Assobiotec, Italien, Mailand  
Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, Deutschland, Stuttgart  
Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Deutschland, Potsdam-Golm  
Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut WKI, Deutschland, Braunschweig  
Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV, Deutschland, Freising  
FSK - Fachverband Schaumkunststoffe und Polyurethane e. V., Deutschland, Stuttgart  
Gesellschaft Deutscher Chemiker GDCh, Deutschland, Frankfurt am Main  
Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie, Deutschland, Berlin  
GKV/TecPart - Verband Technische Kunststoff-Produkte e. V., Deutschland, Frankfurt am Main  
Grafe Polymer Solutions GmbH, Deutschland, Blankenhain  
Hager Group, Deutschland, Blieskastel  
HMS Concept e.U., Österreich, Arnoldstein  
IAR French Bioeconomy Cluster, Frankreich, Barenton-Bugny  
Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e. V., Deutschland, Bad Homburg  
Institut für Agrartechnologie, Thünen Institut, Deutschland, Braunschweig  
Institut für Biokunststoffe und Bioverbundstoffe, Hochschule Hannover, Deutschland  
Institut für Kunststofftechnik (IKT), Universität Stuttgart, Deutschland  
Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH Aachen, Deutschland  
Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik, TU Clausthal, Deutschland  
Institut für Werkstofftechnik - Fachgebiet Kunststofftechnik, Universität Kassel, Deutschland  
Kunststofftechnik Paderborn KTP, Universität Paderborn, Deutschland  
Kunststoff-Institut Lüdenscheid, Deutschland  
Kunststoffzentrum Leipzig, Deutschland  
Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Deutschland  
Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V., Deutschland  
narocon Innovationsberatung, Deutschland, Berlin  
nova -Institut GmbH, Deutschland, Hürth  
PlasticsEurope Deutschland e.V., Deutschland, Frankfurt am Main  
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung TU Chemnitz, Deutschland

pro-K - Industrieverband Halbzeuge und Konsumprodukte aus Kunststoff e.V., Deutschland, Frankfurt am Main  
 SKZ Würzburg, Deutschland  
 Tehalit GmbH/ Hager Group, Deutschland, Heltersberg  
 Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V. (TITK), Deutschland, Rudolstadt  
 VCI Verband Chemischer Industrie, Deutschland, Frankfurt am Main

#### 4.1.2 Online-Fragebogen

Hersteller und Verarbeiter von Kunststoffen (Erarbeitung einer Kontaktliste über Branchenrecherche) wurden über einen Online-Formularfragebogen zu ihrer Einschätzung zum gegenwärtigen und zukünftig sinnvollen Einsatz biobasierter Additive in Kunststoffen befragt. Ca. 450 Ansprechpartner aus ca. 300 Unternehmen aus 25 Ländern wurden direkt per E-Mail angeschrieben und um Teilnahme an der Umfrage gebeten. Weiterhin pflegt das SKZ ein über 400 Mitglieder starkes Netzwerk (FSKZ) aus kleinen und mittleren Unternehmen der Kunststoffbranche. Allen Mitgliedern wurde der Online-Formularfragebogen übermittelt, mit der Bitte diesen auch an Dritte weiterzuleiten. Zusätzlich wurde der Link in den sozialen Netzwerken Xing und LinkedIn geteilt.

Der Fragebogen beinhaltete 14 Fragen mit größtenteils Mehrfachantworten. Der Fragebogen wurde bewusst knapp konzipiert, sodass eine Bearbeitung innerhalb weniger Minuten erfolgen konnte.

In Abbildung 3 ist ein Ausschnitt des Online-Formularfragebogens dargestellt.



\* Erforderlich

1. Mit welcher Art von Kunststoffen arbeiten Sie/ wo setzen Sie Additive/ biobasierte Additive ein? \*

- PVC
- PP
- PE
- PUR
- Technische Kunststoffe
- Styrol-basierte Kunststoffe
- Hochleistungsthermoplasten
- 

**Abbildung 3** Screenshot des Online Fragebogens

### **4.1.3 Weitere Kontakte**

Es wurde Kontakt zu den Autoren Ralph-Dieter Maier und Michael Schiller des Handbuchs *Kunststoff-Additive* (Maier und Schiller 2016) aufgenommen. Herr Dr. Schiller, der mehr als 25 Jahre Erfahrung in der internationalen PVC-Industrie gesammelt hat, lieferte eine Einschätzung über Zahlen zu Additiven im Bereich der PVC-Anwendungen. Diese Einschätzungen stützen sich auf Zahlen der Jahre 2011–2015 für Europa und Deutschland. Anhand dieser Zahlenwerte wurden Hochrechnungen für das Jahr 2016 vorgenommen. Dabei wurde der Werkstoff PVC in seine Hauptanwendungsbereiche *Profiles, Pipes, Cables, Calander/Plastisols und Rigid Packaging* eingeteilt und die dafür relevanten Additive in Betracht gezogen. Typische Rezepturmischungen und -bestandteile dienten als Grundlage für die Einschätzung biobasierter Anteile an Additiven in PVC.

### **4.1.4 Expertenworkshop**

Der Handlungsbedarf wurde in einem eintägigen Workshop mit relevanten Experten vorgestellt und diskutiert. Die Experten stammten aus den Bereichen:

- Industrie (Entwicklung und Produktion, Verarbeitung von Additiven)
- Forschung (Forschung und Entwicklung: Universitäten, Institute)
- Verbände und Gesellschaften (Bildung, Information, Kommunikation)
- Politik und Verwaltung (Förderung, Umweltschutz, Nachhaltigkeit)

Der Workshop fand am 7. Mai 2019 in Frankfurt am Main statt.

## **4.2 Sekundärerhebung: Literaturrecherche**

### **4.2.1 Marktstudien**

Zu Entwicklung und Markt der Biokunststoffe wurden mehrere Literaturquellen ausgewertet: (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2016; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2014; Lörcks 2005; ifeu et al. 2018; Shen et al. 2009; van den Oever et al. 2017; Endres und Siebert-Raths 2009; BKV Kunststoff Konzepte Verwertung 2016; Institute for Bioplastics and Biocomposites 2017).

Marktzahlen zu Additiven werden regelmäßig vom Unternehmen Ceresana eK erhoben. Die Marktstudie *Kunststoff-Additive*, Ausgabe Juni 2017 (Ceresana 2017), lieferte aktuelle Zahlen für das Jahr 2016 und Prognosen bis 2024.

Ferner wurden von Fachgesellschaften/ Forschungseinrichtungen publizierte Zahlen recherchiert (European Bioplastics 2017, 2018; PlasticsEurope 2018; Witten et al. 2016; PlasticsEurope 2017; Institute for Bioplastics and Biocomposites 2017).

### **4.2.2 Wissenschaftliche Fachpublikationen**

Zu fünf Additiv-Typen (Weichmacher, Biozide, Flammschutzmittel, Nukleierungsmittel, Schlagzähmodifikatoren) fand eine Recherche nach wissenschaftlichen Publikationen zum Einsatz und Potential biobasierter Additive in Kunststoffen statt. Die Fragestellungen der Suche lauteten:

- Welche Additive (Anzahl, Art, Menge) werden aktuell am Markt von welchen Herstellern in Kunststoffen eingesetzt und wie hoch ist der Anteil von biobasierten Additiven (für das Jahr 2016)?
- Welche biobasierten Alternativen gibt es bzw. sind in der Entwicklung? Welches Potenzial haben sie?

Gesucht wurde in zwei multidisziplinären Datenbanken

- Scopus (Elsevier, New York, USA)

Scopus ist eine multidisziplinäre Abstract- und Zitationsdatenbank für Forschungsliteratur und hochwertige Internet-Quellen (peer-reviewed). Zur Verfügung stehen verschiedene Tools zur Verfolgung, Analyse und Visualisierung von Forschungsinformationen aus allen Fachgebieten, wie z.B. Naturwissenschaften, Technik, Medizin und Gesundheitswissenschaften, Sozialwissenschaften oder Kunst- und Geisteswissenschaften.

Scopus liefert zudem die Zitierungen der wissenschaftlichen Artikel (References und Citations), die die Zitationsanalyse ermöglichen. Die Auswertung erfolgt ab dem Publikationsjahr 1996.

- Web of Science (Clarivate Analytics, Philadelphia, USA)

Das *Web of Science* ist eine Rechercheoberfläche, in der in verschiedenen Literatur- und Zitationsdatenbanken nach relevanter wissenschaftlicher Literatur gesucht werden kann. *Web of Science* liefert auch die Zitierungen der wissenschaftlichen Artikel (References und Citations), die die Zitationsanalyse ermöglichen.

Web of Science CC hat den Vorteil der Interdisziplinarität, also des breiten Fächerspektrums von Medizin, Natur-, Geistes-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften.

Gesucht wurde zusätzlich im Internet über Google und Google Scholar. Je Additiv-Typ wurden zwei Suchen definiert (deutsch/ englisch), in denen jeweils die ersten 50 Ergebnisse auf ihre Relevanz geprüft wurden:

Die Suche, Selektion und Datenextraktion relevanter Publikationen fand im Zeitraum Oktober 2018 bis Mai 2019 statt.

## 5. Datenerhebung

In diesem Abschnitt ist die Datenerhebung der Telefoninterviews, des Online-Fragebogens, weiterer Kontakte, des Expertenworkshops sowie der Marktstudien und wissenschaftlicher Fachpublikationen dargestellt. Die Ergebnisse der Daten sind in Abschnitt 6 zusammengefasst.

### 5.1 Primärerhebung: Befragung von Experten

#### 5.1.1 *Telefoninterviews mit Fachgesellschaften, Forschungseinrichtungen und Unternehmen*

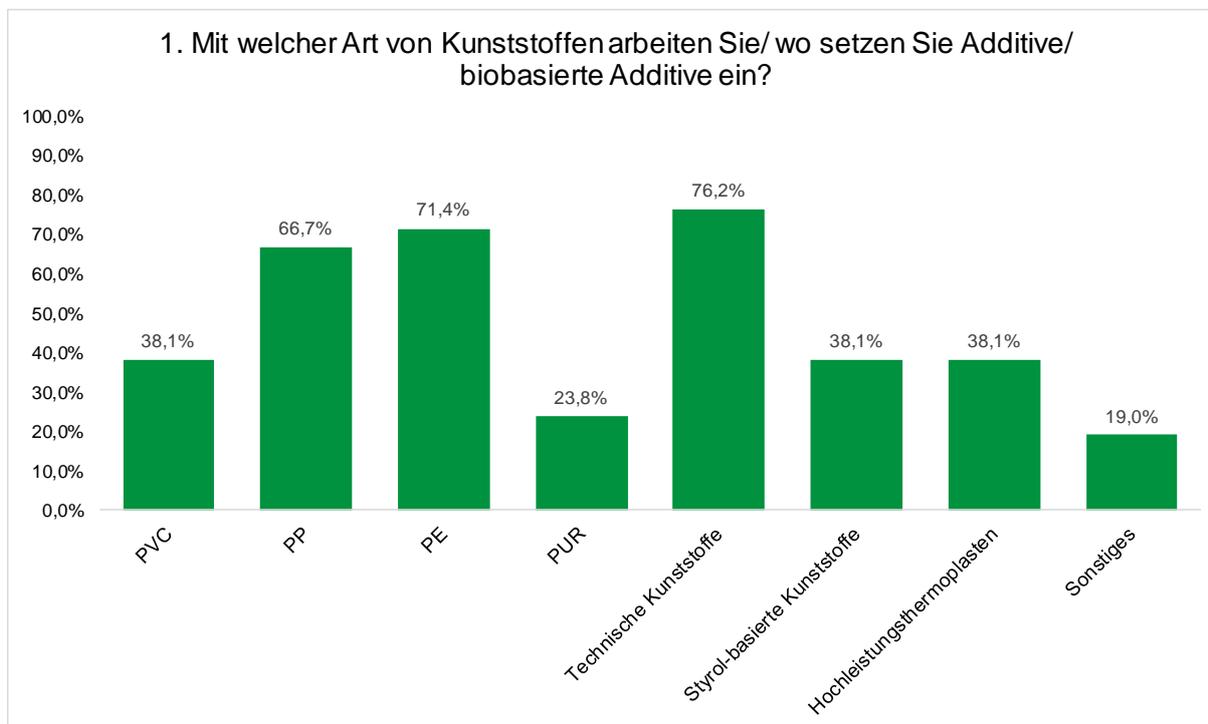
Telefoninterviews zum Thema Bio-Additive mit verschiedenen Forschungseinrichtungen und Firmen fanden im Zeitraum von September bis Dezember 2018 statt. Namen der Interviewpartner sowie deren zugehörige Institutionen sind in diesem Bericht aus Datenschutzgründen nicht genannt. Die Kernaussagen der Interviews sind im folgenden Abschnitt zusammengefasst.

Die verschiedenen Forschungseinrichtungen und Firmen haben entlang der Wertschöpfungskette von der Additivherstellung über Compoundieren / Spritzgießen bis hin zu konkreten Anwendungsgebieten unterschiedliche Berührungspunkte mit Kunststoffadditiven und Biokunststoffen, wie Antioxidantien, Biozide, UV-Stabilisatoren, Schlagzähmodifikatoren, Füllstoffe, Weichmacher, Flammenschutzmittel, Gleitmittel, Antistatika, Antifogging-Additive, PLA, PAB oder PAA. Manche der Befragten hatten den Fokus auf Additiven allgemein, nicht aber konkret auf biobasierten Stoffen. Hinsichtlich des Forschungsbedarfs an biobasierten Additiven wurden unterschiedliche Ansätze geäußert. Eine Vergleichsstudie, in der konventionelle und biobasierte Additive in ihrer Funktionalität, Verarbeitbarkeit und der Performance in ihren Anwendungsgebieten gegenübergestellt werden, fehle bislang. Forschungsbedarf an Additiv-Typen, die weniger als 1 % des Kunststoffs ausmachen, sei von geringer

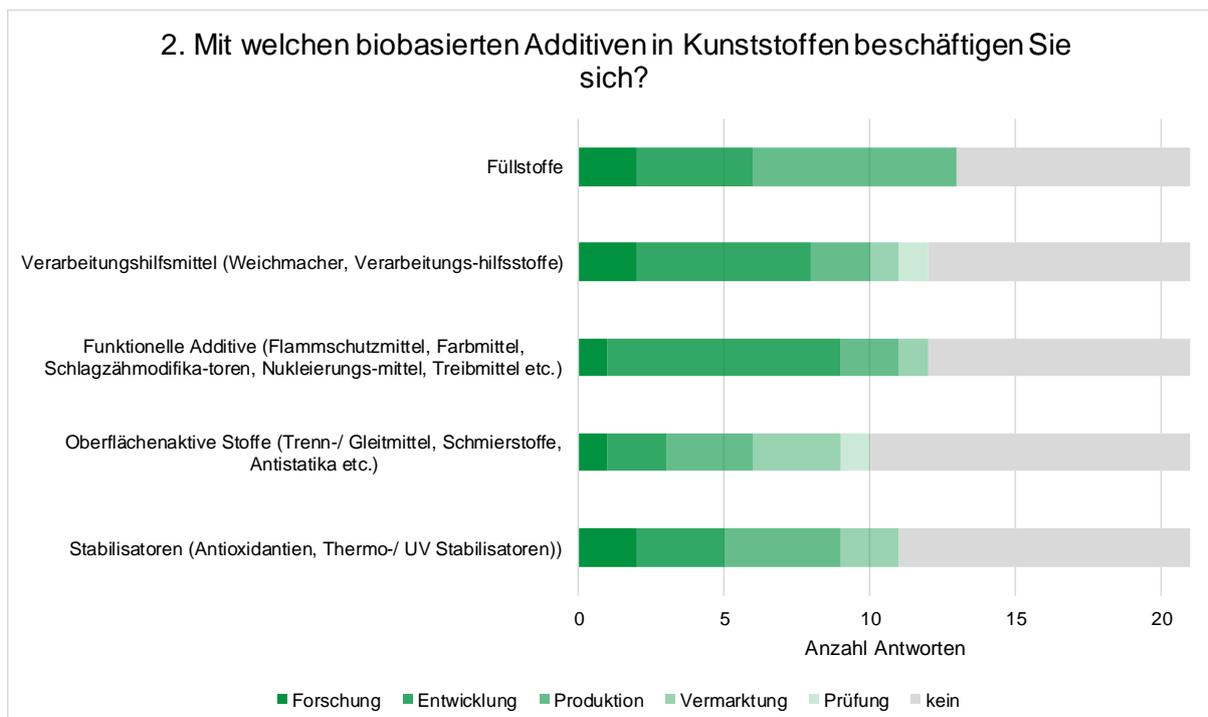
Priorität. Grundlegend müsse ein Screening pflanzlicher Inhaltsstoffe erfolgen, um geeignete Molekülstrukturen für beispielsweise biobasierte Antioxidantien, Biozide oder UV-Stabilisatoren zu finden. Bereits identifizierte Stoffe wie Kolophonium müssen weiterentwickelt werden, um Eigenschaften wie Sauerstoff- oder Wasserdampfsperren für Lebensmittelverpackungen zu ermöglichen. Die Entwicklung geeigneter biobasierter Additive wirkt sich auf die verfahrens- und anwendungstechnischen Anforderungen aus. Daher seien Untersuchungen hinsichtlich der Verarbeitbarkeit biobasierter Flammenschutzmittel nötig, um den Einsatz gleicher Werkzeuge bei konventionellen und biobasierten Stoffen zu prüfen sowie den Einsatz von beispielsweise Haftvermittlern oder Schlagzähmodifikatoren bei Dauergebrauchstemperaturen. Neben den technischen Aspekten müssen biobasierte Additive wie Öle oder andere pflanzliche Stoffe entsprechend ihrem Anwendungsbereich auf Toxizität geprüft werden, um etwa die Unbedenklichkeit beim Kontakt mit Lebensmitteln zu gewährleisten. Der Druck zur Forschung an biobasierten Alternativen steige durch Verbote bzw. gesundheitliche Risiken. Insgesamt haben konventionelle Kunststoffe und Additive 100 Jahre Vorsprung gegenüber den biobasierten. Additive hindern bislang am Erreichen des 100 %-Biokunststoffziels. Besonders PVC habe ein schlechtes Image, wobei Weichmacher hierbei den größten Angriffspunkt darstellen. Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der Bioadditive würden durch den Preis gebremst, weshalb Kosten optimiert werden müssen.

## 5.1.2 Online-Fragebogen

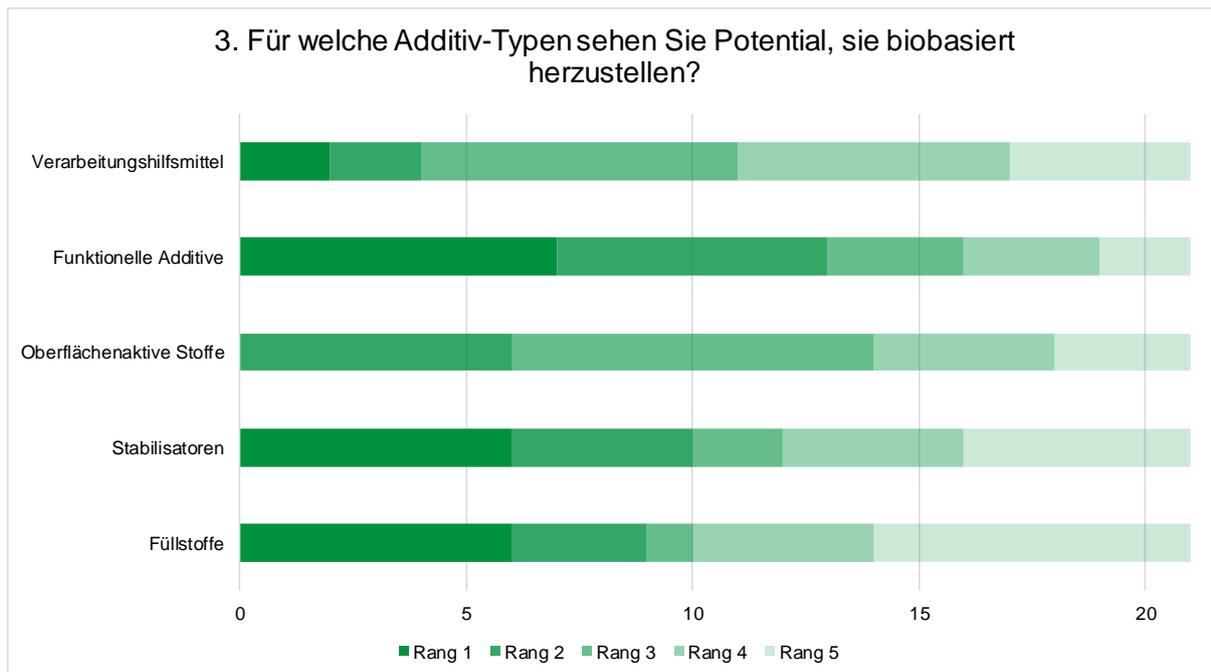
Im Zeitraum vom 10. Dezember 2018 bis 12. Februar 2019 wurde der Fragebogen (vgl. Abb. 3) von 21 Personen beantwortet. Die Antworten sind im Folgenden deskriptiv aufbereitet.



In der Kategorie Sonstiges wurde spezifiziert: Entwicklungsprojekte mit PLA, Flüssiganwendungen, PLA, Polyester, Polyamide, keine.



In Frage 3 sollten verschiedene Additiv-Typen im Hinblick auf das Potential der biobasierten Herstellung in eine Rangfolge gebracht werden.



#### 4. Bitte konkretisieren Sie kurz, welches Potential Sie sehen.

Faserstoffe auf Basis Holz, Cellulose und aus Getreide-Ballaststoffen zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften

kunststoffgebundene Naturprodukte

plättchenförmige Mineralien wie Talk oder Glimmer als Verstärkungstoff (Modul und HDT) und für gute Dimensionsstabilität in Kunststoffen

Wir möchten Kunststoffe entwickeln, die andere Eigenschaften als bisher haben und lebensmittel-tauglich sind.

Allgemeiner Trend zur Nachhaltigkeit im Bereich Folien und Verpackungen. Verringerung der Emissionen im Automobil durch Verarbeitungshilfen und Stabilisatoren.

Füllstoffe bis zu 20.000 to

Nachwachsende Rohstoffe

Extrakte aus Lebensmittelabfällen u. ä. für Kunststoff-Verpackungen

Wir setzen ausschließlich Füllstoffe auf mineralischer Basis zur Verstärkung von Kunststoffen im Bereich der Rohrproduktion von Abwasserrohren ein. Ansonsten sind Zusätze bei Gas- und Trinkwasserrohren im Rahmen der Rohrproduktion praktisch verboten. Die Rezepturen für Gas- und Trinkwasserrohre werden bereits beim Hersteller der Granulate festgelegt und auf der Kunststoffrohrverband-Werkstoffliste für den jeweiligen Verwendungszweck dokumentiert.

Holzpartikel als Füllstoffe

Nachwachsende Rohstoffe (auch Ester) als Additive für thermoplastische Verarbeitung

neue Funktionalitäten und Materialeigenschaften durch funktionelle Gruppen, die erdölbasiert nicht möglich sind

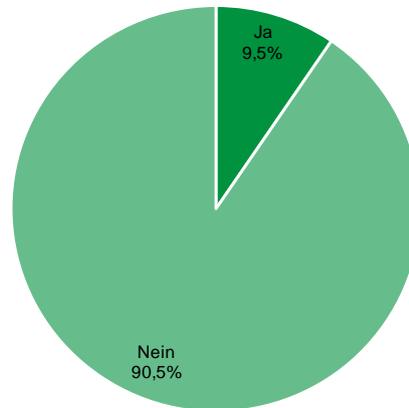
Verpackungsmaterialien / Folien biologisch abbaubar aus Renewable Raw materials

Für Anwendungen mit kurzer Lebensdauer sehr hohes Potential, für Produkte mit großer Langlebigkeit eher kritisch.

Ersatz petrochemischer Additive, Nutzung Imagevorteile Bioadditive in Verpackung und Kosmetik

Oleochemisch basierte Additive

5. Haben Sie Kenntnis zu Produktions-/ Verarbeitungszahlen von Additiven/ Anteilen biobasierter Additive in Kunststoffen in Deutschland und würden Sie uns Zahlen nennen?



6. Welchen Forschungsbedarf zu dem Thema sehen Sie? Woran würde Ihre Institution gern arbeiten?

Umsetzung an Projekten und marktfähigen Produkten auf Basis biobasierter Kunststoffe, zukünftiger Marktpotenziale

kunststoffgebundene Naturprodukte

Einsatz von Mineralien in verschiedensten Biopolymeren

Siehe Punkt Nr. 4

biologisch abbaubare Werkstoffe

Additive, die höhere Temperaturen >300 °C aushalten

UV-Stabilisatoren

Beschichtungen für Kunststoff-Produkte, die biobasierte Additive enthalten, da diese nicht alle Spezifikationen erreichen

Da wir ein reiner Verarbeitungsbetrieb sind, haben wir hier keine Aktivitäten

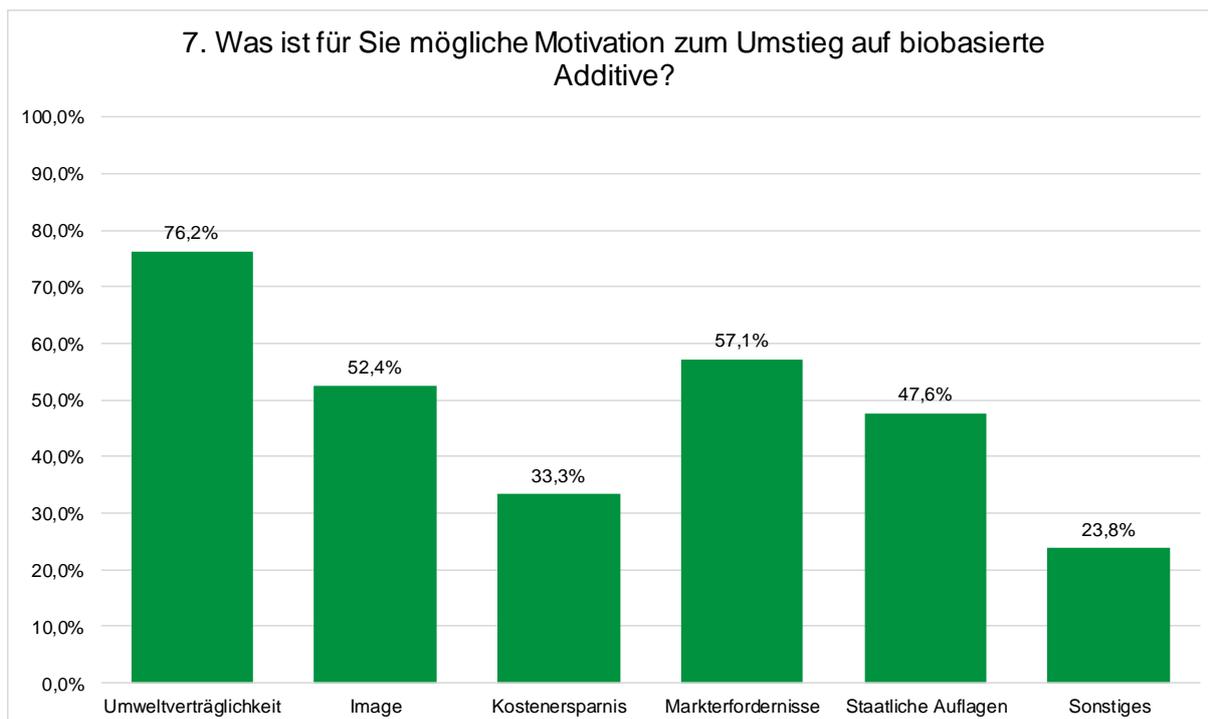
Eher nicht

Ersatz von Feedstock-basierten Produkten wie Paraffine oder PE Wachse

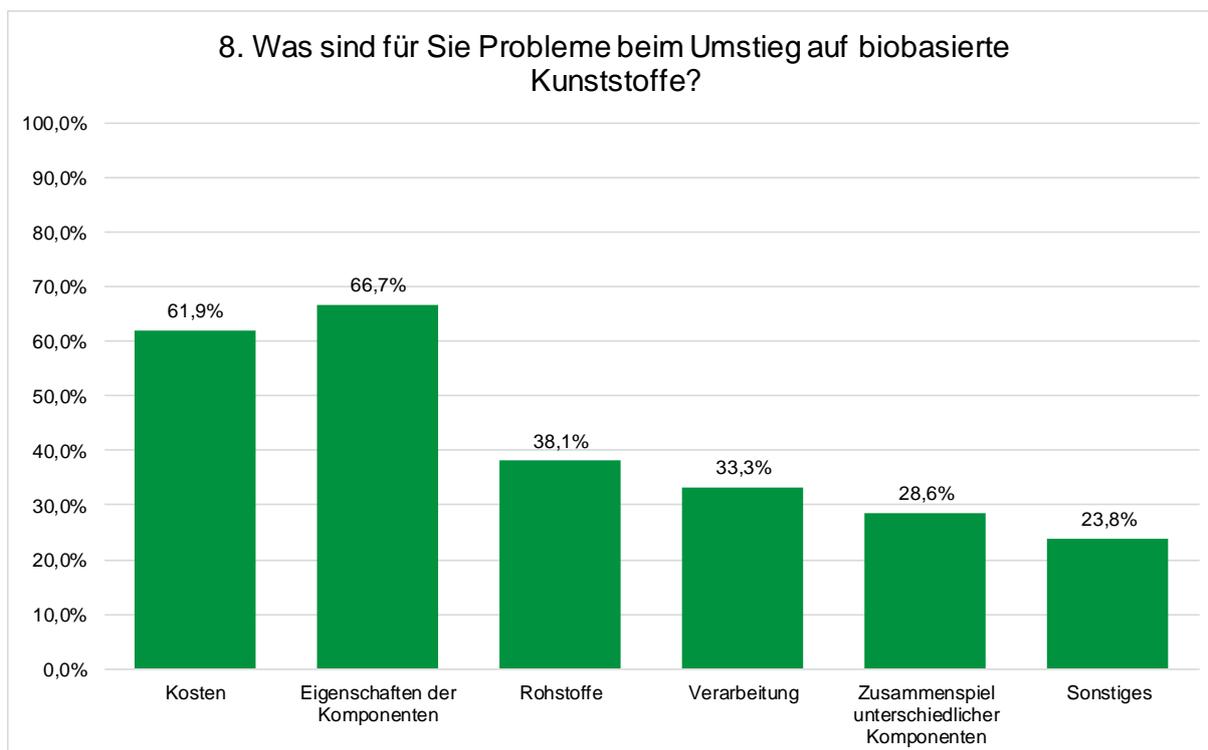
Industrie-getriebene Forschung

Verfügbarkeit unter kommerziellen Gesichtspunkten für nachwachsende Rohstoffe und deren Anwendung

wir würde gerne für Kunden bei uns Auftrags-Forschung und Entwicklung im Bereich Compounds durchführen



In der Kategorie Sonstiges wurde spezifiziert: Gesundheitswesen, Technische Gleichwertigkeit, Nachhaltigkeit, neue Materialeigenschaften, Performance.



In der Kategorie Sonstiges wurde spezifiziert: Fehlender Druck vom Markt bzw. Konsumenten basierend auf fehlender Gesetzgebung, wir setzen keine Biokunststoffe ein, Vorgaben aus gesetzlichen Regelungen zur Trinkwasserhygiene und Lebensmittelbedarfsgesetz, Produktion, Langlebigkeit.

9. Welche Akteure in Deutschland im Bereich Additive/ biobasierte Additive in Kunststoffen würden Sie uns noch empfehlen?

-

keine

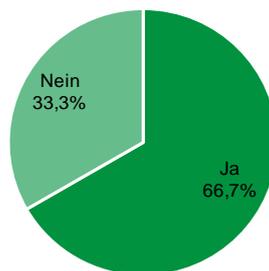
BASF / FKUR / Microfol

Hersteller von technischen Kunststoffen / Additivhersteller

Kenne keine

Wir sind wahrscheinlich Marktführer

10. Haben Sie Interesse an der Teilnahme an einem Workshop?



### 5.1.3 Weitere Kontakte

#### Additive im PVC-Bereich

Durch Herrn Dr. Schiller, Autor des Buches „Handbuch Kunststoff-Additive“, wurden konkrete Einschätzungen hinsichtlich des Additiv-Verbrauchs für den PVC-Sektor vorgenommen<sup>1</sup>. Als Grundlage zur Hochrechnung der Verbrauchszahlen diente die Präsentation *The global PVC industry, stabilization trends and the European VinylPlus initiative* von R. Grasmück (iPVC Conference Mumbai Oktober 2012). Demzufolge lag der Verbrauch an PVC in Deutschland in den Jahren 2013 und 2015 bei etwa 1.560 Tsd. t. Unter der Annahme eines Wachstums des PVC-Marktes von etwa 1 % in Deutschland, betrug demnach der PVC-Verbrauch im Jahr 2016 etwa 1.575 Tsd. t. Die im PVC-Sektor am häufigsten eingesetzten Additive sind Stabilisatoren, Weichmacher, Gleitmittel, Füllstoffe, Verarbeitungshilfsstoffe, Antioxidantien und Farbmittel. Schiller ging insbesondere auf die Bereiche Stabilisatoren und Weichmacher näher ein in den fünf größten Anwendungsbereichen von PVC: Profile, Rohre, Kabel, Folien und feste Verpackungen ein. Die dafür notwendigen Stabilisatoren besitzen je nach Anwendung unterschiedliche Zusammensetzungen und werden in einem Konzentrationsbereich von 2 phr<sup>2</sup> bis hin zu 12 phr eingesetzt. Daraus ermittelte Schiller einen Gesamtverbrauch von 207 Tsd. t – 244 Tsd. t an Stabilisatoren für PVC in Europa und 48,6 Tsd. t in Deutschland. Auf Deutschland bezogen, wurden hiervon etwa 9,2 – 12,8 Tsd. t Stearinsäure zu Metallseifen, phenolischen Verbindungen o. ä. umgesetzt sowie etwa 1,7 – 2,4 Tsd. t Esterwax verwendet. Diese Verbindungen basieren teilweise oder vollständig auf nachwachsenden Rohstoffen. Das entspricht in der Summe einem Anteil von etwa 25 – 30 % der Stabilisatoren für PVC.

Für PVC werden biobasierte Weichmacher in Form von Citraten oder epoxidierten Pflanzenölen verwendet. Schiller bezog sich auf von Rainer Busch präsentierte Zahlen (Präsentation *Marktanalyse – Verwendung von Pflanzenölen in der Industrie* auf der Schmierstofftagung 2016 in Neuss/D.) zu

<sup>1</sup> Michael Schiller, HMS Concept e.U. (2018) Bio-basierende Additive in PVC in Deutschland

<sup>2</sup> phr: parts per hundred rubber

biobasierten Ölen, wie epoxidiertes Sonnen-, Raps-, Lein-, Rizinus- oder Sojaölen als Additive in Kunststoffen, die aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden. Da Weichmacher hauptsächlich in PVC-Materialien eingesetzt werden, ist für 2016 die von Busch genannte Menge von 45 Tsd. t epoxidiertes Öle als Weichmacher in PVC für den gesamten europäischen Markt anzunehmen, wovon etwa 10 Tsd. t allein in Deutschland verarbeitet wurden. Zu Citraten konnte Schiller keine Einschätzung vornehmen, da ihm hierzu keine Daten vorlagen.

### 5.1.4 Expertenworkshop

Am 07. Mai 2019 fand in Frankfurt a. M. ein Workshop mit 20 Experten aus dem Bereich Kunststoffe/Additive statt. Das Programm ist in Abbildung 4 dargestellt.

<b>Dienstag, 07.05.2019</b>	
10:30	<b>Eintreffen der Teilnehmer</b>  Kaffee und Tee mit herzhaften Snacks
11:30	<b>Eröffnung der Veranstaltung</b> Robert Hardt, FNR, Gülzow
11:45	<b>Marktübersicht zu Additiven in Kunststoffen</b> Einsatz und Potential biobasierter Additive Dr. Kerstin Schmidt, BioMath GmbH, Rostock- Hamburg
12:30	<b>Handlungsbedarf und Empfehlungen</b> Sinnvolle Entwicklungen und Einsatz biobasierter Additive in der Zukunft Dr. Marieluise Lang, SKZ, Würzburg
13:00	<b>Aktuelle Forschung an biobasierten Additiven für Kunststoffe</b> Vertreter aus der Forschung
13:30	<b>Entwicklungsbedarf der Industrie an biobasierten Additiven für Kunststoffe</b> Vertreter aus der Industrie
14:30	<b>Diskussion zu folgenden Themen</b> - Wohin geht die Entwicklung? - Was erwartet der Markt? - Welche Forschungsfragestellungen drängen? - Wo besteht Handlungsbedarf?
	<b>Impulsreferate der Teilnehmer à 5 Minuten und gemeinsame Diskussion</b>
16:15	<b>Abschlussworte</b> Dr. Kerstin Schmidt, BioMath GmbH, Rostock- Hamburg Dr. Marieluise Lang, SKZ, Würzburg Robert Hardt, FNR, Gülzow
16:30	<b>Ende des Workshops</b>

**Abbildung 4** Programm des Expertenworkshops

Von den Experten wurden nachfolgende Einschätzungen zu Entwicklung und Markt biobasierter Additive gegeben:

In der Gegenüberstellung von konventionellen Kunststoffe und Biokunststoffen hinsichtlich der Auswahlmöglichkeit von Polymeren und Additiven und des Know-hows der Verarbeitungsprozesse zeigt sich, dass es deutlich weniger Additive für Biokunststoffe auf dem Markt gibt, wobei Wirkungsweisen/Wechselwirkungen teilweise noch unklar sind. Sowohl die kommerzielle Verfügbarkeit als auch Know-how zu Einsatz und Verarbeitung müssen für eine breite Anwendung gegeben sein. Von den Teilnehmern wurden folgende Anmerkungen geäußert:

Um die Performance konventioneller Kunststoffe zu erreichen, müssen verschiedene Blends von Biokunststoffen kombiniert werden.

Das Zusammenspiel von Preis und Performance muss berücksichtigt werden. Eine niederländische Firma stellte Verpackungen fast vollständig auf PLA um. Die Einführung im deutschen Markt erfolgte nicht, da Komposteure das Verpackungsmaterial nicht verarbeiten können.

Das Image von „100 % Biokunststoff“ hat eine große Auswirkung auf Kunden und beseitigt Skepsis. Es ist eine kritische Masse nötig, um Recyclinganlagen für kompostierbare Kunststoffe zu bekommen.

Recycling ist nicht nötig, da minderwertige Produkte hergestellt werden. Der Grund dafür ist die Sortenunreinheit.

Verpackungsgesetze wurden gemacht, die Wirtschaft muss selbst tätig werden, um Probleme zu lösen (bspw. Recycling). Wieso gibt es keine einheitlichen Rezepturen für bestimmte Anwendungen (bspw. Wurstwarenverpackungen).

Zykluszeit der Materialien wird durch die Werkzeugtemperatur reduziert. Die Stabilität lässt sich nicht nur durch Additive beeinflussen.

Materialanforderungen wurden klar an Rezepturentwickler gegeben und von diesen umgesetzt. Die erzielte Kompostierbarkeit kann aber durch die Komposteure nicht umgesetzt werden. Hier ist die Politik in der Pflicht.

Faserfüllstoffe aus Weichholz, Getreide eignen sich für die Verarbeitung in der Verpackungsindustrie. Naturfasern sind nachhaltig, bewirken eine höhere Steifigkeit, sorgen durch die Faserorientierung für eine höhere Wärmeformbeständigkeit und sind bioabbaubar, indem sie durch Kapillaren einen Feuchtigkeitstransport ermöglichen und die Zersetzung des Materials gefördert wird. Dennoch weisen die Produkte aufgrund einer relativ langsamen Abbaubarkeit der Fasern eine verhältnismäßig hohe Stabilität auf. Praktische Anwendungsbeispiele der Faserfüllstoffe sind Folien und Spritzguß-Artikel mit bis zu 30 % Füllstoffanteil. Eine anwendungsnahe Forschung ist nötig, um Erkenntnisse zu den Wechselwirkungen zwischen Lignin und der Kunststoffmatrix zu gewinnen.

Triebfeder für die Entwicklung biobasierter Weichmacher waren phthalatfreie Weichmacher, die von verschiedenen Firmen wie Oxea oder Lanxess angeboten werden. Bekannte Vertreter dieser Stoffgruppe sind epoxidiertes Soyabohnenöl, Isosorbidester, acetylierte Fettsäureester aus Rizinusöl, epoxidierte Alkylester und acetylierte tributylcitrate. Die Firma Segestis brachte einen levulinsäurebasierten Weichmacher auf den Markt, dessen Eigenschaftsprofil besser war als das des konventionellen DINP (Diisononylphthalat). Das Produkt war aber zu teuer, weshalb es sich nicht auf dem Markt halten konnte. Der Einsatz biobasierter Additive ist sinnvoll, wenn diese günstig sind, das beste LCA (Life Cycle Assessment) besitzen und wo chemische Vorläuferstrukturen ein Design der Struktur erlauben (Struktur Eigenschaftsbeziehungen). Biobasierte Weichmacher scheinen unter leichten Einschränkungen der Performance anwendbar zu sein. Nukleierungsmittel erfordern viel ‚Trial and Error‘ bei der Entwicklung biobasierter Alternativen, ebenso bei Impactmodifiern (Schlagzähmodifikatoren). Unklarheiten hinsichtlich der Entwicklung des Marktes bestehen hinsichtlich der Lieferkette bei Verpackungen, dem Konsumverhalten in Zeiten von Mikroplastik als auch dem Verhalten von Unternehmen im Rahmen von Vorgaben der Kreislaufwirtschaft. Der Markt verlangt Funktionalität, geringe (Lager-) Kosten und eine einfache Handhabung. Handlungsbedarf besteht in der Erforschung von chemischen Vorläuferstrukturen. Von den Teilnehmern wurden folgende Anmerkungen geäußert:

Im Biosektor fehlen die klassischen Zweige oder auch Side Streams der Wertschöpfungskette der petrochemischen Chemie, obwohl die Raffinerie ursprünglich aus der Zuckerherstellung, nicht aus der Erdölindustrie kommt. Ein Beispiel für eine vollwertstoffliche Verwertung ist die Bio-Raffinerie.

Fettsäureprodukte wie Metallseifen sind Precursor für Schwamm- und Netzstrukturen, Hydrophobiermittel und besitzen teils antimikrobielle Wirkung. Sie besitzen stabilisierende Eigenschaften, werden für Ersatzklebstoffe in Spanplatten verwendet und bilden mit anorganischen Materialien Hybridkombinationen.

Wichtig ist es, die Performance von Bio-Kunststoffen allgemein zu verbessern und nicht ein Eigenschaftsprofil durch bestimmte Bio-Additive zu erzielen. Eigenschaften wie etwa eine hohe Schlagzähigkeit bei PLA hängen von der Kristallisation ab. Dieser Vorgang läuft relativ langsam ab und lässt sich nicht durch Nukleierungsmittel steigern. Eine Modifikation der Polymermatrix in Form von Blockcopolymeren (keine Polymerblends) könnte hier die Kristallisation begünstigen. Weiterhin könnte möglicherweise die Wärmeformbeständigkeit von PLA durch eine Schwammstruktur erhöht

werden, wobei die geringe Wandstärke das Schäumen von PLA erschwert. Konventionelle Treibmittel als Additive stellen hier keinen Lösungsansatz dar. Insgesamt sind viele Wechselwirkungen biobasierter Stoffe mit der Polymermatrix und anderen Additiven bislang unklar, weshalb viele Forschungsprojekte nötig sind. Wichtig für den Einsatz sind dabei die Funktionalität, die Verfügbarkeit und der Preis bzw. ob ein Produkt vom Markt angenommen wird. Trotz des Imageproblems von „Fast 100 % biobasierten Kunststoffen“, kann dieses Ziel vermutlich vorerst nicht erreicht werden.

## 5.2 Sekundärerhebung: Literaturrecherche

### 5.2.1 Marktstudien

Offizielle Statistiken zu Biokunststoffen und speziell zu Bio-Additiven für Kunststoffe gibt es nicht. Durch das IfBB und auf der European Bioplastics Conference werden aber jährlich aktuelle Zahlen und Prognosen veröffentlicht, die auf eigenen Umfragen und Recherchen beruhen (IfBB, Webinar 21.02.2019). Im Folgenden sind die für das Projekt relevanten Ergebnisse der Marktstudien zusammengefasst.

#### **Marktstudie Kunststoff-Additive, Ausgabe Juni 2017 (Ceresana 2017)**

Die weltweite Nachfrage nach Kunststoff-Additiven erreichte im Jahr 2016 rund 31,5 Millionen Tonnen. Mehr als die Hälfte davon wurde in Asien-Pazifik verbraucht. Dahinter folgte mit großem Abstand Nordamerika an zweiter Stelle. Kunststoffe ersetzen immer häufiger andere Materialien, wie beispielweise Holz oder Metall. Deshalb wird sich auch die Nachfrage nach Kunststoff-Additiven weiter erhöhen: Gemessen an Verbrauchsmengen und Preisentwicklung erwartet Ceresana, dass der Umsatz bis zum Jahr 2024 auf rund 60 Milliarden US-Dollar wachsen wird. Die aktuelle Ceresana-Studie untersucht detailliert die jeweilige Entwicklung einzelner Kunststoff-Additive in den bedeutendsten 16 Ländern.

Kunststoffe sind sicher, verlässlich, leicht und preiswert: diese Eigenschaften führen zu einem weiter anwachsenden Einsatz in der Bauindustrie. Außerdem sind Kunststoffe bei der energetischen Dämmung von Gebäuden zunehmend erste Wahl. Die Bauindustrie muss in vielen Disziplinen überzeugen, beispielsweise Effizienz, Qualität, Umwelt- und Brandschutz. Deshalb werden weltweit die meisten Kunststoff-Additive in diesem Anwendungsgebiet eingesetzt.

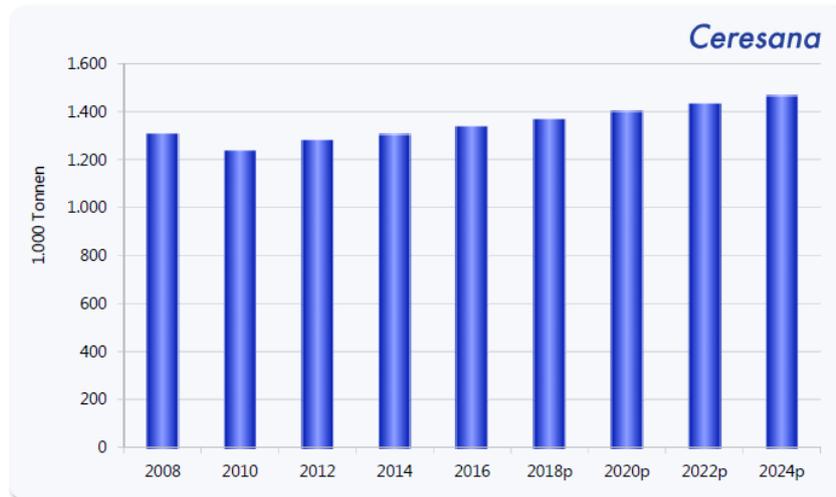
Am zweithäufigsten werden Kunststoff-Additive im Bereich Verpackungen verwendet. Kunststoffverpackungen sind nach wie vor relativ beliebt, da sie leicht, einfach zu handhaben, mikrowellengängig und optisch ansprechend sind, den Inhalt gut erkennen lassen und dafür sorgen, dass die Ware möglichst lange haltbar und geschmacksintensiv bleibt. Ceresana prognostiziert auch für dieses Anwendungsgebiet einen weiterhin steigenden Verbrauch von Kunststoff-Additiven.

In der Studie wird der Additiv-Einsatz in unterschiedlichen Kunststoff-Sorten genauer betrachtet, das heißt in Polyethylen, Polypropylen, Polyvinylchlorid, Polyurethan, technischen und sonstigen Kunststoffen. Zu beachten ist, dass bei den angegebenen Daten zu PP, PA und PET die synthetischen Kunstfasern nicht eingerechnet sind. Da PVC an sich ein sprödes, hartes und weißes Material ist, werden weltweit die meisten Additive in diesem Kunststoff-Typ eingesetzt, um ihn an verschiedenste Einsatzmöglichkeiten anzupassen.

Füllstoffe sind die Additive, die Kunststoffen mit Abstand am häufigsten beigemischt werden. Danach folgen Weichmacher und Pigmente. Über 16 Millionen Tonnen Füllstoffe wurden im Jahr 2016 für Kunststoffe gebraucht: Füllstoffe erhöhen das Volumen eines Stoffgemischs, ohne die wesentlichen Eigenschaften zu ändern. Immer öfter werden auch hochgefüllte Kunststoffe mit für die jeweiligen Kunden maßgeschneiderten Eigenschaften hergestellt: Mit bis zu 85 % Füllstoffanteil verfügen sie über sehr gute mechanische Eigenschaften und sind oft kostengünstiger als herkömmlichere Werkstoffe.

Als Weichmacher werden Stoffe bezeichnet, die zu Kunststoffen gegeben werden, um Dehnbarkeit, Weichheit und Biegsamkeit für Verarbeitung und Gebrauch zu verbessern. Auf die Hersteller von PVC entfällt dabei der mit Abstand größte Anteil des weltweiten Weichmacher-Verbrauchs. Hier kommen sie zum Beispiel bei der Herstellung von Profilen für Fenster oder Türen zum Einsatz.

Der Verbrauch von Kunststoff-Additiven in Deutschland lag im Jahr 2016 bei 1,34 Mio. Tonnen. Seit dem Jahr 2008 nahm die Nachfrage demnach um durchschnittlich 0,3 % p. a. zu. Ceresana erwartet, dass die Nachfrage mit einer durchschnittlichen Wachstumsrate von 1,1 % weiter ansteigen und im Jahr 2024 bei rund 1,46 Mio. Tonnen liegen wird (Abbildung 5). Der Umsatz mit Kunststoff-Additiven betrug im Jahr 2016 ca. 1,55 Mrd. Bis zum Jahr 2024 erwartet Ceresana einen durchschnittlichen Anstieg von 2,6 % pro Jahr (Abbildung 6).



**Abbildung 5** Verbrauch an Kunststoff-Additiven in Deutschland (Quelle: Ceresana)



**Abbildung 6** Umsatz mit Kunststoff-Additiven in Deutschland (Quelle: Ceresana)

Wichtige Hersteller von Kunststoff-Additiven in Deutschland sind:

ALTANA AG, Baerlocher GmbH, BASF SE, Evonik Industries AG, Gebrüder Dorfner GmbH & Co. Kaolin- und Kristallquarzsand-Werke KG, Heubach GmbH, Lanxess AG, Merck, KGaA, Nabaltec AG, Quarzwerke GmbH, Wacker AG.

In Tabelle 3 ist der Verbrauch verschiedener Additiv-Typen aufgelistet.

**Tabelle 3** Verbrauch von Kunststoff-Additiven in Deutschland, aufgeteilt nach Additiv-Typen (Quelle: Ceresana)<sup>3</sup>

in 1.000 Tonnen	2008	2010	2012	2014	2016	2018p	2020p	2022p	2024p	2016-2024
Füllstoffe	692	655	679	692	710	726	744	762	780	1,2% p.a.
Weichmacher	283	261	267	272	279	284	290	296	302	1,0% p.a.
Pigmente	111	108	113	115	117	120	123	126	129	1,2% p.a.
Flammschutzmittel	58	56	59	61	62	64	66	67	69	1,2% p.a.
Stabilisatoren	60	55	57	58	60	61	62	63	65	1,0% p.a.
Schlagzähmodifikatoren	28	28	29	30	30	31	32	32	33	1,2% p.a.
Gleitmittel	22	21	22	22	22	23	23	24	24	0,9% p.a.
Antioxidantien	13	13	13	14	14	14	15	15	16	1,4% p.a.
Treibmittel	16	16	17	17	18	18	19	19	20	1,7% p.a.
Sonstige Additive	23	23	24	24	25	26	26	27	28	1,4% p.a.
<b>Total</b>	<b>1.308</b>	<b>1.236</b>	<b>1.281</b>	<b>1.303</b>	<b>1.337</b>	<b>1.367</b>	<b>1.400</b>	<b>1.432</b>	<b>1.464</b>	<b>1,1% p.a.</b>

#### Verbrauch nach Anwendung

Der wichtigste Absatzmarkt für Kunststoff-Additive war im Jahr 2016 die Bauindustrie. Deutlich dahinter lag das zweitgrößte Absatzgebiet, Verpackungen, noch vor dem Bereich Fahrzeuge (Tabelle 4). Die Nachfrage nach Kunststoff-Additiven im Segment Elektro&Elektronik wird sich in den kommenden acht Jahren mit voraussichtlich 1,6 % am dynamischsten entwickeln. Die Nachfragesteigerung im Anwendungsgebiet Industrie wird hingegen prozentual am geringsten ausfallen.

Die meisten Kunststoff-Additive wurden im Jahr 2016 in PVC eingesetzt. An zweiter Stelle standen die technischen Kunststoffe (Tabelle 5). Für die kommenden acht Jahre wird die höchste Wachstumsrate bei PP und PUR mit jeweils 1,7 % p. a erwartet. Im Jahr 2024 werden voraussichtlich 779.000 Tonnen Kunststoff-Additive in PVC eingesetzt.

<sup>3</sup> Bezug zur Tabelle 40: Pigmente sind Untergruppe der Farbstoffe. Antioxidantien zählen zu den Stabilisatoren (Antioxidantien, UV-Stabilisatoren, Thermostabilisatoren, Säurefänger). Antioxidantien und Stabilisatoren sind hier aber separat aufgeführt.

**Tabelle 4** Verbrauch von Kunststoff-Additiven in Deutschland, aufgeteilt nach Anwendungen (Quelle: Ceresana)

in 1.000 Tonnen	2008	2010	2012	2014	2016	2018p	2020p	2022p	2024p	2016-2024
Verpackungen	187	182	189	190	194	198	202	207	211	1,1% p.a.
Bauindustrie	546	516	534	544	560	572	585	600	615	1,2% p.a.
Fahrzeuge	146	143	146	150	154	159	164	168	172	1,3% p.a.
Elektro und Elektronik	105	101	108	112	116	120	125	128	131	1,6% p.a.
Industrie	134	127	131	132	135	138	141	144	146	1,0% p.a.
Sonstige Anwendungen	189	167	173	175	178	179	183	186	189	0,8% p.a.
<b>Total</b>	<b>1.308</b>	<b>1.236</b>	<b>1.281</b>	<b>1.303</b>	<b>1.337</b>	<b>1.367</b>	<b>1.400</b>	<b>1.432</b>	<b>1.464</b>	<b>1,1% p.a.</b>

**Tabelle 5** Verbrauch von Kunststoff-Additiven in Deutschland, aufgeteilt nach Kunststoff-Typen (Quelle: Ceresana)

in 1.000 Tonnen	2008	2010	2012	2014	2016	2018p	2020p	2022p	2024p	2016-2024
PVC	732	672	690	703	722	736	751	766	779	1,0% p.a.
PP	148	140	139	142	148	153	158	164	170	1,7% p.a.
PE	109	111	122	123	127	130	134	138	142	1,4% p.a.
PUR	128	127	134	133	138	141	146	151	157	1,7% p.a.
Techn. Kunststoffe	159	152	162	168	169	173	176	178	181	0,8% p.a.
Sonstige	32	33	33	34	34	35	35	35	36	0,7% p.a.
<b>Total</b>	<b>1.308</b>	<b>1.236</b>	<b>1.281</b>	<b>1.303</b>	<b>1.337</b>	<b>1.367</b>	<b>1.400</b>	<b>1.432</b>	<b>1.464</b>	<b>1,1% p.a.</b>

### Studien der BKV

Die im Auftrag von BKV (Kunststoff Konzepte Verwertung) u. a. Stakeholdern erstellten Studien zu Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland (BKV Kunststoff Konzepte Verwertung 2016, 2018) gehen von einer Gesamtproduktion an Kunststoff in Deutschland von ca. 18,5 Mio. t (2015)/ 21,8 Mio. t (2017) und einer Verarbeitung von etwa 15 Mio. t (2015)/ 14,4 Mio. t (2017) aus.

Spezifische Zahlen zu (biobasierten) Additiven gibt die Studie nicht.

### European Bioplastics

European Bioplastics schätzt die globalen Produktionskapazitäten für Biokunststoffe auf 2,054 Mio. t in 2017 (1,174 Mio. t biobasiert/ nicht biologisch abbaubar, 880 Tsd. t biologisch abbaubar) und prognostiziert einen Anstieg auf 2,44 Mio. t in 2022 (European Bioplastics 2018, 2017), davon 18 % in Europa, 16 % in Nordamerika, 10 % in Südamerika und 56 % in Asien. Europa wird bei Biokunststoffen als Knotenpunkt der Forschung und Entwicklung und als weltweit größter Markt gesehen.

Spezifische Zahlen zu (biobasierten) Additiven gibt es in der Studie nicht.

### Plastics Europe

Plastics Europe veröffentlicht jährlich Zahlen zu Kunststoff-Produktion und Verbrauch weltweit und in der EU/ in europäischen Länder, darunter auch Deutschland (PlasticsEurope 2018). Die weltweite Produktion von Kunststoffen im Jahr 2016 betrug 335 Mio. t, in Europa 60 Mio. t. In Europa wurden 2016 ca. 49,9 Mio. t Kunststoff verarbeitet, davon über 12 Mio. t in Deutschland.

Der Bericht von Plastics Europe liefert keine spezifischen Zahlen zu Additiven und biobasierten Kunststoffen/ Additiven.

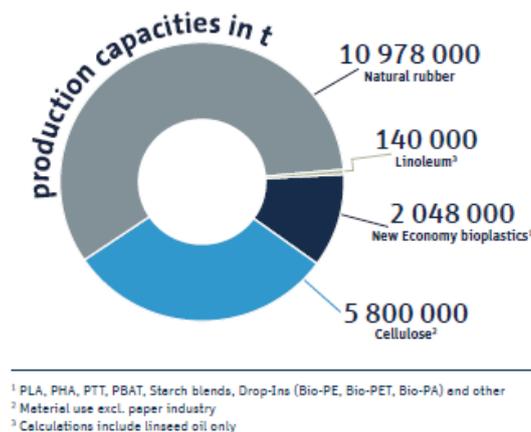
### nova Institute

Das deutsche Nova-Institute veröffentlicht jährlich einen Markt- und Trendreport *Bio-based Building Blocks and Polymers – Global Capacities, Production and Trends*. Darin wird von einer Gesamtproduktionsmenge an bio-basierten Polymeren von 7,5 Mio. t berichtet. Dies sind 2 % der Produktionsmenge petrochemischer Polymere.

Spezifische Zahlen zu (biobasierten) Additiven gibt es nicht.

### IfBB

Das Institut für Biokunststoffe und Bioverbundstoffe veröffentlicht jährlich die Broschüre *Biopolymers - facts and statistics*. Danach betragen die Produktionskapazitäten für Biokunststoffe etwa 18,9 Mio. t weltweit, darunter 2,048 Mio. t für neuartige<sup>1</sup> Biokunststoffe wie PLA, PHA oder Bio-PE, Bio-PET etc. (Institute for Bioplastics and Biocomposites 2017), siehe Abbildung 7.



**Abbildung 7** Produktionskapazitäten für Biokunststoffe weltweit (Quelle IfBB)

Die globalen Produktionskapazitäten zu Biokunststoffen der ‚New Economy‘<sup>4</sup> für 2016 betreffen verschiedenen Kunststoff-Typen (Abbildung 8), diese werden aufgeteilt in 757 Tsd. t biologisch abbaubar und 1,292 Mio. t biobasiert/ nicht biologisch abbaubar (Institute for Bioplastics and Biocomposites 2017, 2018).

Spezifische Zahlen zu (biobasierten) Additiven gibt es nicht.

<sup>4</sup> Als Biokunststoffe der ‚New Economy‘ werden neuartige Biokunststoffe, die in den letzten 30 Jahren entwickelt wurden, verstanden. Dazu gehören sowohl chemisch neuartige Stoffe wie PLA, PHA, PEF, thermoplastische Stärke als auch mit nachwachsenden statt petrochemischen Rohstoffen hergestellte Kunststoffe wie Bio-PA, Bio-PE, Bio-PET oder Bio-PP. Im Gegensatz dazu sind Bio-Kunststoffe der ‚Old-Economy‘ altbekannt (z.B. Kautschuk, Zellophan, Linoleum).

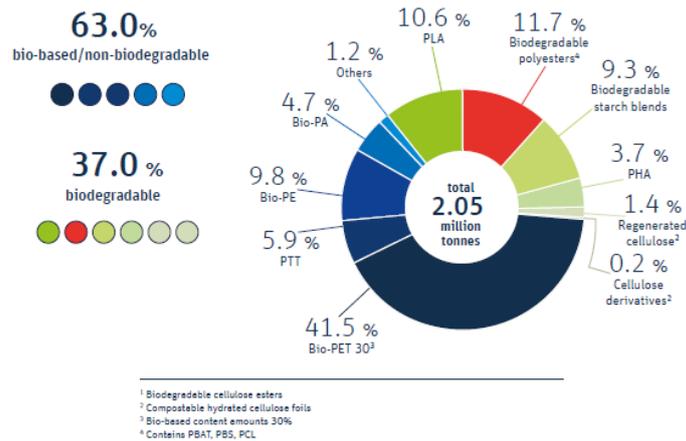


Abbildung 8 Produktionskapazitäten 2016 für biobasierte Kunststoffe der ‚New Economy‘

**Townsend Solutions**

Townsend Solutions, ein Marktforschungsunternehmen für die petrochemische Industrie mit Hauptsitz in Houston TX USA, führt seit 1990 globale Studien speziell zu Kunststoff-Additiven durch. Auf der Konferenz *PVC Australia 2018: Shaping the future* wurden Verbrauchszahlen zu Additiven weltweit/ in unterschiedlichen Regionen bzw. asiatischen Ländern vorgestellt (Moore 2018).

Demnach betrug der Verbrauch an Weichmachern im Jahr 2017 weltweit 7.982 Tsd. t, davon allein 81 % Phthalate (Abbildung 9). Der Verbrauch in Europa lag bei 1.098,7 Tsd. t.

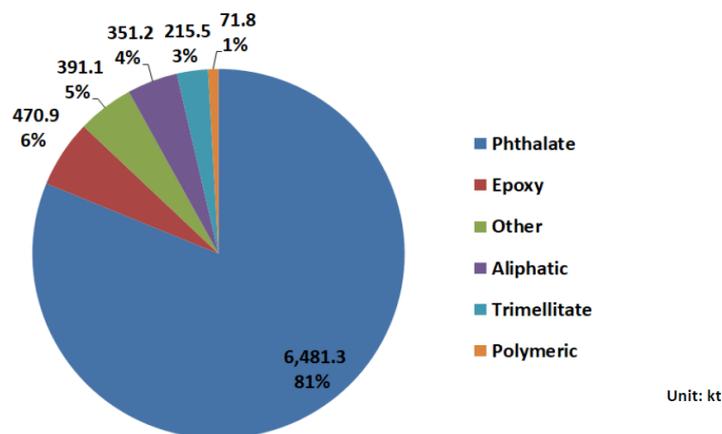
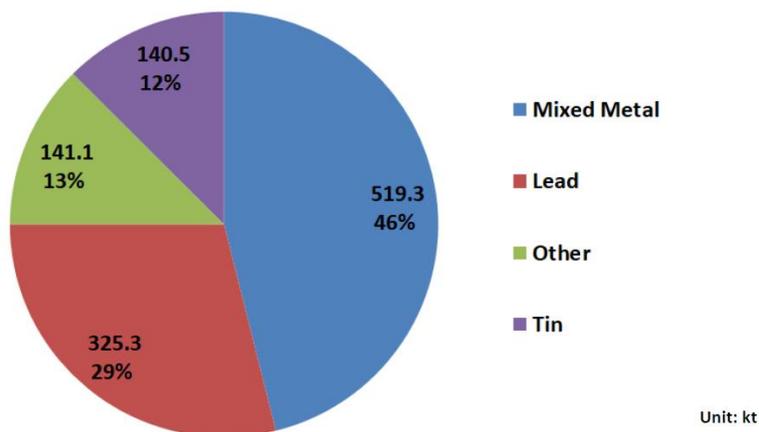


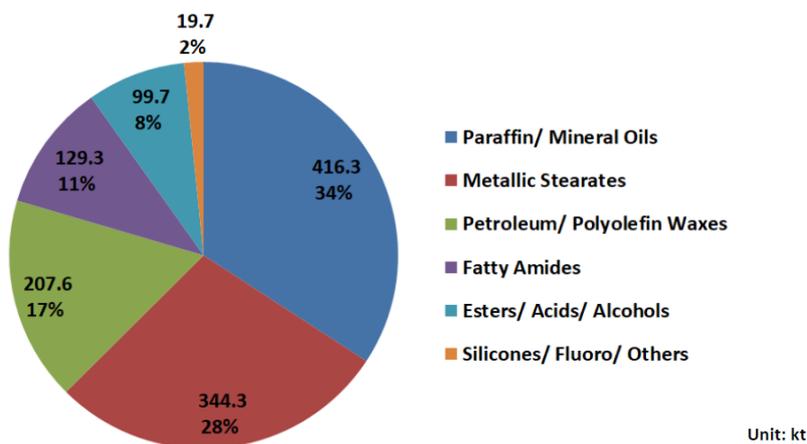
Abbildung 9 Weltweiter Verbrauch an Weichmachern in Tsd. Tonnen (Quelle: Townsend)

Der globale Verbrauch an Thermostabilisatoren im Jahr 2017 betrug 2.126,2 Tsd. t, davon 162.9 Tsd. t in Europa. 46 % der Stabilisatoren enthielten mehrere Metallkomponenten (Abbildung 10).



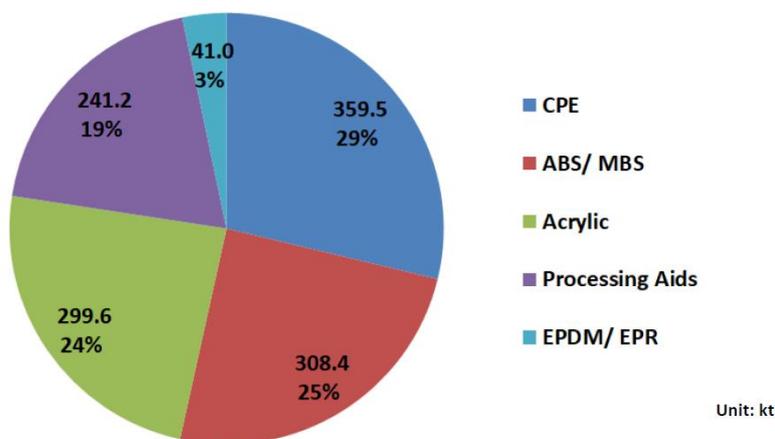
**Abbildung 10** Weltweiter Verbrauch an Thermostabilisatoren in Tsd. Tonnen (Quelle: Townsend)

Der globale Verbrauch an Gleitmitteln lag im Jahr 2017 bei 1.216,8 Tsd. t, davon 242,8 Tsd. t in Europa. Der Anteil der verschiedenen Weichmachertypen ist in Abbildung 11 dargestellt.



**Abbildung 11** Weltweiter Verbrauch an Gleitmitteln in Tsd. Tonnen (Quelle: Townsend)

Der globale Verbrauch an Schlagzähmodifikatoren in 2017 lag bei 1.249,7 Tsd. t, die einzelnen Typen sind aus Abbildung 12 ersichtlich. In Europa wurden 192,2 Tsd. t verbraucht.



**Abbildung 12** Weltweiter Verbrauch an Schlagzähmodifikatoren in Tsd. Tonnen (Quelle: Townsend)

Die von Townsend prognostizierten Trends und Treiber für diese vier Additiv-Typen sind in Tabelle 6 wiedergegeben. Ein bedeutender Aspekt hierbei ist der Einsatz von alternativen Stoffen für Phthalate.

**Tabelle 6** Trends und Treiber auf dem Kunststoff-Additiv Markt (Quelle: Townsend)

<p><b>Plasticizer Trends &amp; Drivers</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Driven initially by Europe, concern regarding the perceived health risks of phthalates. In recent years, regulations have restricted some phthalates and thus alternatives have begun to be used.</li> <li>• <i>DINP</i>, is seen as a replacement for DOP, and although not restricted under REACH, it is restricted in the EU from items intended to be mouthed by children.</li> <li>• <i>DOTP (di-octyl terephthalate)</i> is a terephthalate plasticizer. Eastman classifies DOTP as a non-phthalate (i.e., not derived from phthalic acid as are all ortho-phthalates). Applications in PVC are in flooring, toys, upholstery, wire &amp; cable jacketing and various others.</li> <li>• BASF's <i>DINCH</i> (di-isobonyl cyclohexane dicarboxylate) is also a non-phthalate plasticizer making steady progress in the market.</li> <li>• <i>DPHP</i>, also from BASF, is a newer phthalate plasticizer, being touted as a replacement for DOP, DINP, DIDP, and linear phthalates. Strong growth is anticipated.</li> <li>• <i>Disoheptyl phthalate</i>, sold by ExxonMobil Chemical under the JAYFLEX 77 brand, competes with DOP and BBP (n-butyl benzyl phthalate) in PVC flooring and is also used coating and dipping applications.</li> <li>• <i>PETV (pentaerythritol tetravalerate)</i> from Perstorp is a non-phthalate plasticizer that reportedly outperforms DOTP and DINCH on several fronts</li> <li>• Despite the availability of non-phthalate and "safe" phthalate plasticizers, some quarters are still pushing for PVC's replacement with resins such as TPU and PE, especially in medical applications.</li> </ul>	<p><b>Heat Stabilizer Trends &amp; Drivers</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• REACH regulations have changed the heat-stabilizer landscape by phasing out lead use in Europe and restricting tin, thus driving use of mixed-metal stabilizers and organic stabilizers.</li> <li>• In Europe, lead has been replaced in wire &amp; cable with Ca/Zn stabilizers.</li> <li>• Lead stabilizers remain widely used in wire &amp; cable and rigid pipe applications in non-regulated regions such as India, unless the products are for export. Most other areas have shifted to Ca/Zn.</li> <li>• In North America lead stabilizers have limited use for high-performance power cables.</li> <li>• Japan is moving away from the use of lead stabilizers in PVC pipe; replaced by Ca-Zn powder systems.</li> <li>• Developments in tin stabilizers, widely used in the US, include reduced tin content and cost, lower odor, and improved weatherability for siding and window profiles, particularly in dark colors.</li> <li>• There has also been a general global shift away from dibutyl tin oxide to dioctyltin oxide and methyl tin driven by REACH.</li> <li>• Another trend is toward heat stabilizers with lower levels of VOCs by reducing or eliminating solvent carriers in liquid heat stabilizers.</li> </ul>
<p><b>Lubricant Trends &amp; Drivers</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Southeast Asian palm oil is becoming a key raw material for the lubricant market for stearates, fatty amides, esters and alcohols. Animal-based ingredients are generally being shunned, particularly for medical and food-related applications.</li> <li>• Cost reduction is a key issue with lubricants. Efforts to reduce loading levels or switch to lower cost alternatives, such as PE waxes instead of ethylene bis-stearamide (EBS), will continue.</li> <li>• The use of one-pack systems, which are blends lubricants, heat stabilizers and impact modifiers, or blends of just lubricants, is the new norm.</li> <li>• The use of lubricants together with other additives requires careful selection and can result in synergistic effects.</li> <li>• Wood plastic composites based on PVC represent a growth market for lubricants, particularly in Asia, as manufacturers strive to improve final product quality.</li> <li>• In the medical field, there is a push towards reducing or eliminating any extractable chemicals, including use of fewer lubricants.</li> <li>• Recently, Fischer-Tropsch waxes have emerged from China with suspect quality</li> <li>• They are also trying to oxidize these FT waxes, something only Honeywell has been successful in doing to date with its PE waxes (oxidation delivers better metal release)</li> </ul>	<p><b>Impact Modifier Trends &amp; Drivers</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• CPE impact modifier prices have decreased significantly because of slower economic growth and low-cost imports from Chinese producers, as well as shale gas effect driving PE prices down.</li> <li>• This has resulted in plant closures and some Western suppliers outsourcing production to China, and/or focusing on higher end products like MBS and Acrylics for non-PVC applications.</li> <li>• Chinese CPE suppliers are working to improve CPE quality and performance. Hebei Jingxin Chemical's acid phase CPE production process, for example, reportedly yields CPE with superior elongation properties (up to a 90% improvement).</li> <li>• Ultra High Molecular Weight acrylic PVC processing aids have emerged in the past 5 years (e.g., Rike UHMW, Kane Ace PA650, Arkema Plastistrength 580 and 566) for cellular PVC (lower density)...</li> <li>• ...while low molecular weight acrylic processing aids such as Kane Ace PA121 and PA131 enhance metal release (less sticking), and Kane Ace PA211 reduces fish eye formation in films.</li> <li>• Other new processing aids improve efficiency for processors or require lower loadings, including better compatibility with Ca/Zn heat stabilizer one-pack systems.</li> <li>• A recently developed impact modifier from Arkema features anti-plate out properties.</li> </ul>

Spezifische Zahlen zu biobasierten Additiven wurden nicht präsentiert.

### Allied Market Research

Allied Market Research (UK) recherchiert und publiziert regelmäßig Marktdaten zu Kunststoff-Additiven und hat in 2014 eine Marktanalyse und Prognose für den Zeitraum 2012-2020 veröffentlicht (<https://www.alliedmarketresearch.com/plastic-additives-market><sup>5</sup>). Demnach wird der wachsende globale Kunststoff-Additiv Markt dominiert von Weichmachern, gefolgt von Flammschutzmitteln und Schlagzähmodifikatoren. Auch hier wird die Entwicklung alternativer Einsatzstoffe zu Phthalaten hervorgehoben. Der globale Additiv-Verbrauch wird mit 14,8 Mio. t beziffert.

Spezifische Zahlen zu biobasierten Additiven werden nicht genannt.

### European Plasticisers

Die 'European Plasticisers' Initiative der europäischen, chemischen Industrie beziffert in ihrem Informationsblatt zu Weichmachern den weltweiten Verbrauch an Weichmachern mit 7,7 Mio. t darunter ca. 1,3 Mio. t in Europa (European Plasticisers 2018), siehe Abbildung 13. Über 900 Tsd. t werden in PVC verarbeitet.

Die Marktentwicklung in Europa zeigt einen deutlichen Rückgang der niedermolekularen Orthophthalate. Hochmolekulare Orthophthalate bilden in Europa den Großteil des Weichmachermarktes, gefolgt von den Terephthalaten und Cyclohexanoaten (Abbildung 14).

<sup>5</sup> Link zuletzt geprüft am 25.11.2019

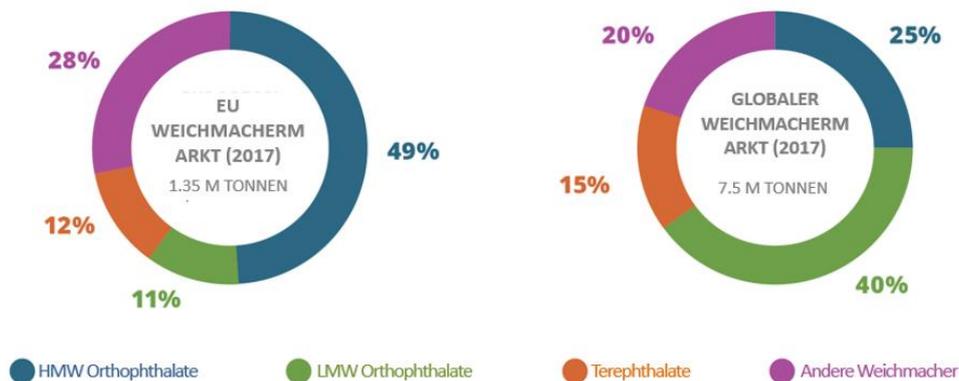


Abbildung 13 Globaler und europäischer Markt für Weichmacher (Quelle: European Plasticisers)



Abbildung 14 Entwicklung des europäischen Weichmacher-Marktes (Quelle: European Plasticisers)

Die Studienergebnisse werden in Abschnitt 6 zusammengestellt und verglichen.

## 5.2.2 Wissenschaftliche Fachpublikationen

### 5.2.2.1 Generell

Grundsätzlich werden verschiedene Prozesse zur Produktion biobasierter Kunststoffe bzw. Additive unterschieden (Mülhaupt 2013):

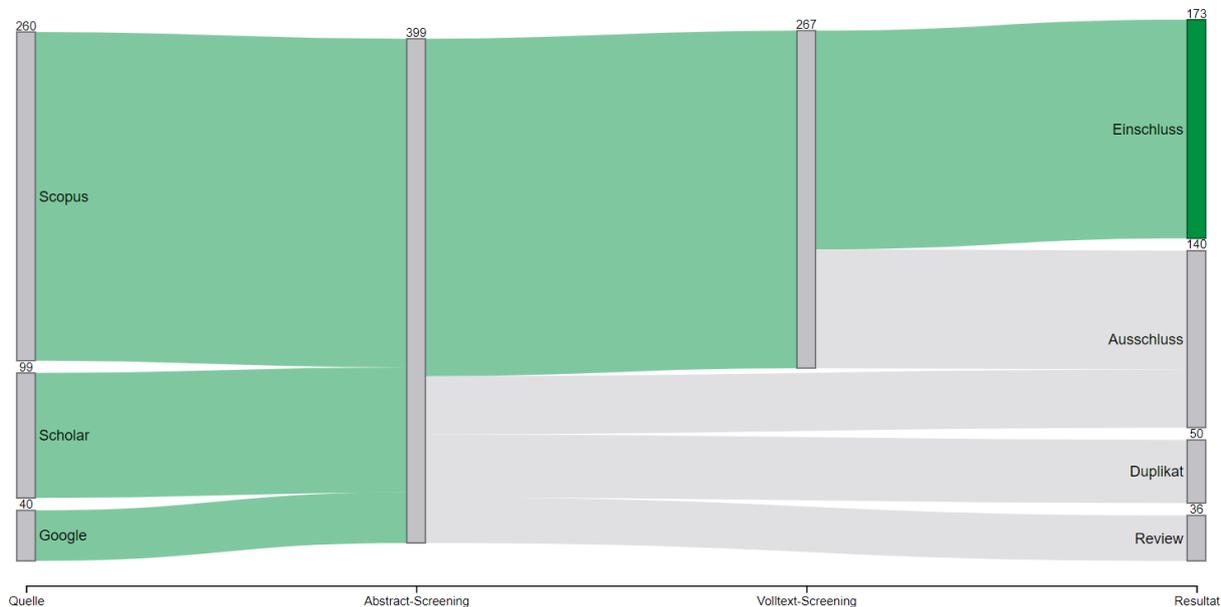
1. aus agronomischen Ressourcen (nachwachsende Rohstoffe)
2. mit Hilfe von Mikroorganismen
3. biotechnologische Produktion von Biomono-/polymeren
4. Aktivierung und Polymerisation von Kohlendioxid

Mülhaupt schätzt den Ersatz petrochemischer durch nachwachsende Rohstoffe als technisch machbar ein, sieht aber das derzeitige Kosten-Nutzen-Verhältnis als Problem an. Die Nutzung nachwachsender Rohstoffe für die Produktion von recycelbaren Kunststoffen bezeichnet er als ausgesprochen nachhaltige Nutzung grüner Kohlenstoffressourcen.

Zur gleichen Einschätzung der realistischen Machbarkeit kommt auch das IfBB in den jährlichen Abschätzungen der notwendigen Land- und Wasserressourcen für die Herstellung biobasierter Kunststoffe (Institute for Bioplastics and Biocomposites 2017, 2018).

### 5.2.2.2 Weichmacher

Die Suche nach Publikationen zu biobasierten Weichmachern in drei Suchbereichen lieferte 399 Ergebnisse, von denen nach Bewertung ihrer Relevanz letztendlich 173 Publikationen in die Datenextraktion eingeschlossen wurden (Abbildung 15). Die Gesamtübersicht der eingeschlossenen Publikationen (Tabelle 45) sowie eine Liste der Reviews (Tabelle 46) befinden sich im Anhang.

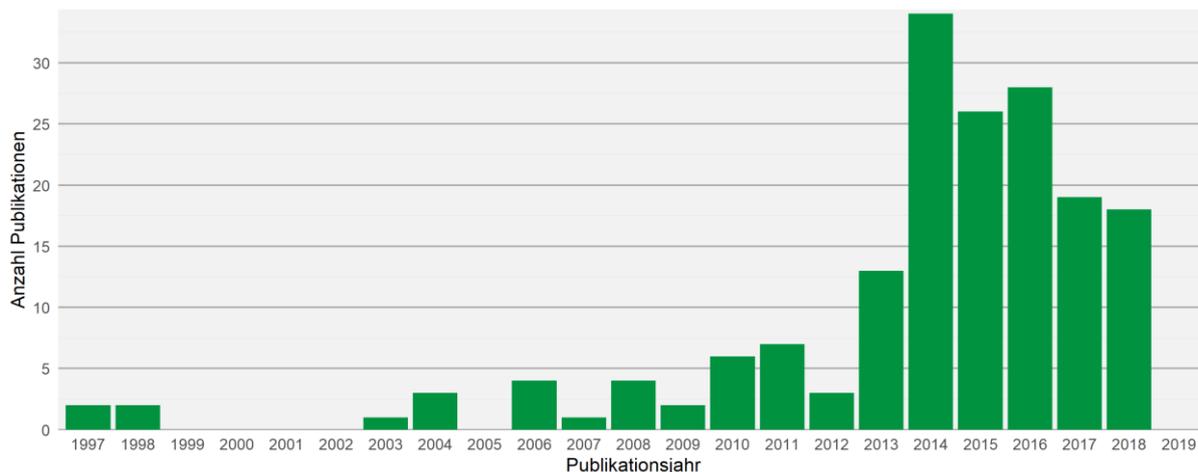


**Abbildung 15** Sankey-Diagramm der Suche nach Publikationen zu biobasierten Weichmachern

Die eingeschlossenen Publikationen sind größtenteils in den Jahren seit 2013 erschienen. Die erste identifizierte Publikation stammt aus dem Jahr 1997 (Tabelle 7; Abbildung 16).

**Tabelle 7** Jahr der Veröffentlichung der Publikationen zu biobasierten Weichmachern

Jahr	Anzahl	Anteil	Jahr	Anzahl	Anteil	Jahr	Anzahl	Anteil
1997	2	1,16%	2005	0	0,00%	2013	13	7,51%
1998	2	1,16%	2006	4	2,31%	2014	34	19,65%
1999	0	0,00%	2007	1	0,58%	2015	26	15,03%
2000	0	0,00%	2008	4	2,31%	2016	28	16,18%
2001	0	0,00%	2009	2	1,16%	2017	19	10,98%
2002	0	0,00%	2010	6	3,47%	2018	18	10,40%
2003	1	0,58%	2011	7	4,05%	2019	0	0,00%
2004	3	1,73%	2012	3	1,73%			



**Abbildung 16** Jahr der Veröffentlichung der Publikationen zu biobasierten Weichmachern

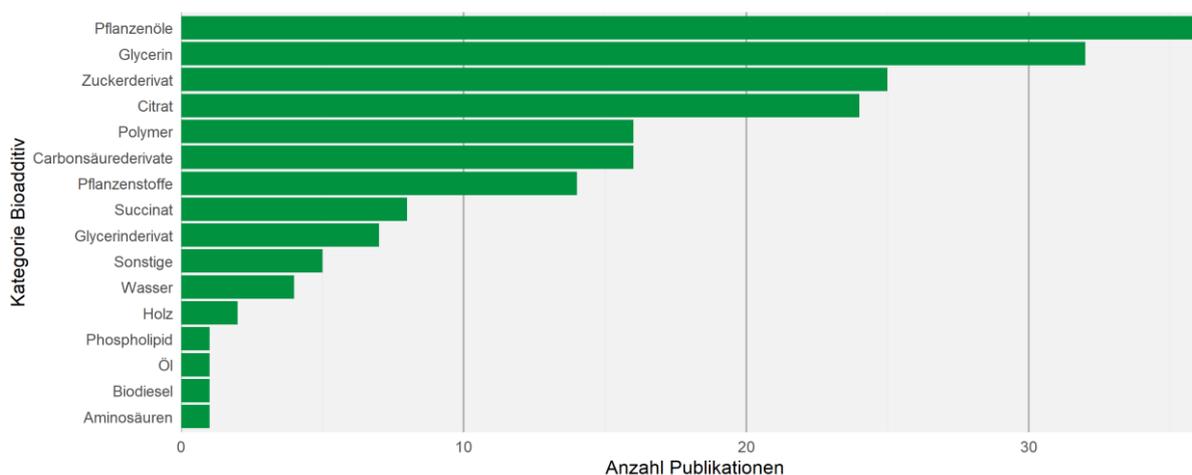
Insgesamt wurden 121 biobasierte Weichmacher identifiziert (Tabelle 8), wobei diese in 16 Kategorien zusammengefasst werden konnten (Tabelle 9; Abbildung 17). Glycerin war dabei mit 32 Publikationen der am häufigsten genannte Weichmacher. Zusammengenommen machen Glycerin, Acetyltributylcitrate und epoxidiertes Sojabohnenöl etwa ein Viertel aller genannten Weichmacher aus. Des Weiteren können knapp die Hälfte aller genannten Weichmacher entweder den Pflanzenölen, Glycerinen oder Zuckerderivaten zugeordnet werden.

**Tabelle 8** In den Publikationen identifizierte biobasierte Weichmacher, die mehr als einmal genannt wurden

Weichmacher	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Glycerin	32	13,62%	32	13,62%
Acetyltributylcitrate	16	6,81%	48	20,43%
Epoxidiertes Sojabohnenöl	10	4,26%	58	24,68%
Sorbitol	8	3,40%	66	28,09%
Triethylcitrate	7	2,98%	73	31,06%
Epoxidiertes Sonnenblumenöl	6	2,55%	79	33,62%
Diocylsuccinat	4	1,70%	83	35,32%
Glycerintriacetat	4	1,70%	87	37,02%
Tributylcitrate	4	1,70%	91	38,72%
Wasser	4	1,70%	95	40,43%
Cardanolacetat	3	1,28%	98	41,70%
Isosorbiddiester	3	1,28%	101	42,98%
Polyhydroxalkanoate (PHA)	3	1,28%	104	44,26%
Rizinusöl	3	1,28%	107	45,53%
Saccharose	3	1,28%	110	46,81%
Sojabohnenöl	3	1,28%	113	48,09%
Stearinsäure	3	1,28%	116	49,36%
5-Hydroxymethylfurfural	2	0,85%	118	50,21%
Bernsteinsäure	2	0,85%	120	51,06%
Biobasiertes Polyamid	2	0,85%	122	51,91%
Epoxidierte Fettsäuremethylester	2	0,85%	124	52,77%
Flüssiges Holz	2	0,85%	126	53,62%
Glucosehexanoatester	2	0,85%	128	54,47%
Isosorbid	2	0,85%	130	55,32%
Oligolactid	2	0,85%	132	56,17%
Ölsäure	2	0,85%	134	57,02%
Pflanzenöl	2	0,85%	136	57,87%
Polyglycerin	2	0,85%	138	58,72%
Sorbit	2	0,85%	140	59,57%
Squalen	2	0,85%	142	60,43%
Tributtersäureglycerinester	2	0,85%	144	61,28%
Tungöl	2	0,85%	146	62,13%

**Tabelle 9** In den Publikationen identifizierte biobasierte Weichmacher gegliedert nach Überkategorien

Kategorie Weichmacher	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Pflanzenöle	36	18,65%	36	18,65%
Glycerin	32	16,58%	68	35,23%
Zuckerderivat	25	12,95%	93	48,19%
Citrat	24	12,44%	117	60,62%
Carbonsäurederivate	16	8,29%	133	68,91%
Polymer	16	8,29%	149	77,20%
Pflanzenstoffe	14	7,25%	163	84,46%
Succinat	8	4,15%	171	88,60%
Glycerinderivat	7	3,63%	178	92,23%
Sonstige	5	2,59%	183	94,82%
Wasser	4	2,07%	187	96,89%
Holz	2	1,04%	189	97,93%
Aminosäuren	1	0,52%	190	98,45%
Biodiesel	1	0,52%	191	98,96%
Öl	1	0,52%	192	99,48%
Phospholipid	1	0,52%	193	100,00%

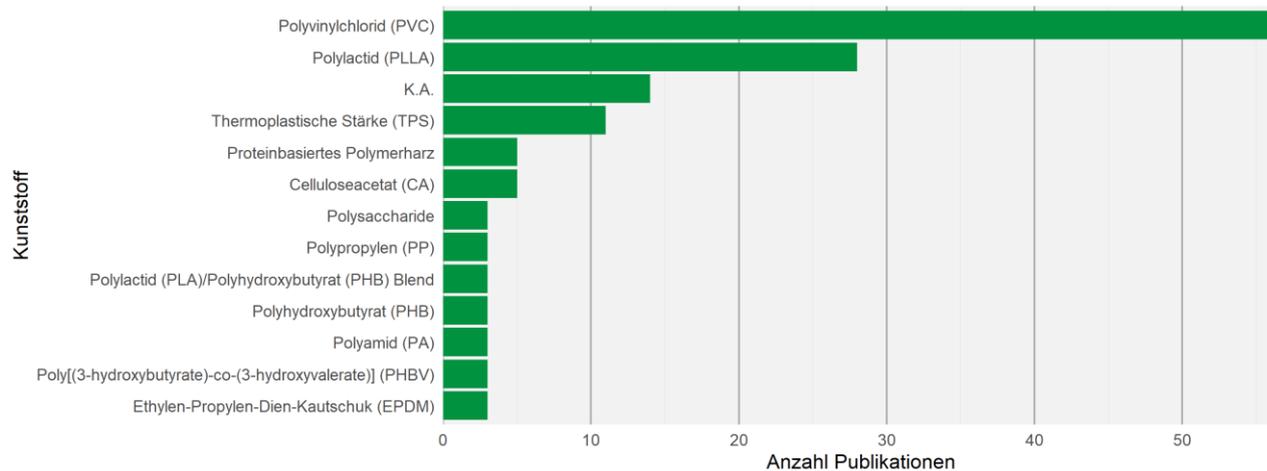


**Abbildung 17** Anzahl der in den Publikationen identifizierten biobasierten Weichmacher gegliedert nach Überkategorien

Insgesamt wurden 48 Kunststoffe identifiziert, denen die biobasierten Weichmacher jeweils zugesetzt wurden (Tabelle 10; Abbildung 18). Dabei machen PVC und PLA knapp die Hälfte aller Nennungen aus. In 14 Fällen wurde in der Publikation keine Angabe dazu gemacht, in Kombination mit welchem Kunststoff der jeweilige biobasierte Weichmacher eingesetzt wurde.

**Tabelle 10** In den Weichmacher-Publikationen identifizierte Kunststoffe, die mehr als einmal genannt wurden

Kunststoff	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Polyvinylchlorid (PVC)	56	31,28%	56	31,28%
Polylactid (PLA)	28	15,64%	84	46,93%
K.A.	14	7,82%	98	54,75%
Thermoplastische Stärke (TPS)	11	6,15%	109	60,89%
Celluloseacetat (CA)	5	2,79%	114	63,69%
Proteinbasiertes Polymerharz	5	2,79%	119	66,48%
Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM)	3	1,68%	122	68,16%
Poly[(3-hydroxybutyrate)-co-(3-hydroxyvalerate)] (PHBV)	3	1,68%	125	69,83%
Polyamid (PA)	3	1,68%	128	71,51%
Polyhydroxybutyrat (PHB)	3	1,68%	131	73,18%
Polylactid (PLA)/Polyhydroxybutyrat (PHB) Blend	3	1,68%	134	74,86%
Polypropylen (PP)	3	1,68%	137	76,54%
Polysaccharide	3	1,68%	140	78,21%
Naturkautschuk	2	1,12%	142	79,33%
Polyvinylalkohol (PVA)	2	1,12%	144	80,45%
Sojabasiertes Polymer	2	1,12%	146	81,56%



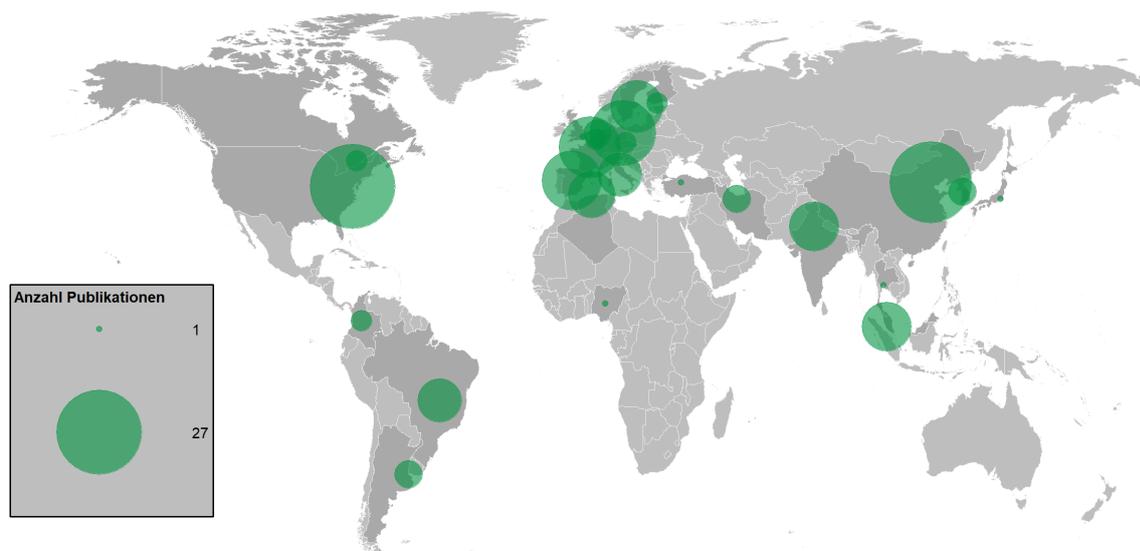
Anmerkung: In dieser Abbildung wurden nur Kunststoffe mit mind. 3 Publikationen eingeschlossen. Demnach fehlen insgesamt 39 Nennungen.

**Abbildung 18** Anzahl der in den Publikationen identifizierten Kunststoffe, die mehr als einmal genannt wurden

Mehr als die Hälfte aller Publikationen stammen entweder aus den USA, China, Deutschland, Frankreich oder Spanien (Tabelle 11; Abbildung 19).

**Tabelle 11** Ursprungsland der Publikation zu biobasierten Weichmachern. Je Publikation wurde nur die Zugehörigkeit des Erstautors berücksichtigt.

Land	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Vereinigte Staaten	27	15,61%	27	15,61%
China	25	14,45%	52	30,06%
Deutschland	16	9,25%	68	39,31%
Frankreich	14	8,09%	82	47,40%
Spanien	13	7,51%	95	54,91%
Schweden	10	5,78%	105	60,69%
Indien	9	5,20%	114	65,90%
Malaysia	9	5,20%	123	71,10%
Algerien	8	4,62%	131	75,72%
Brasilien	7	4,05%	138	79,77%
Italien	7	4,05%	145	83,82%
Argentinien	3	1,73%	148	85,55%
Iran	3	1,73%	151	87,28%
Niederlande	3	1,73%	154	89,02%
Korea, Republik von	3	1,73%	157	90,75%
Belgien	2	1,16%	159	91,91%
Kanada	2	1,16%	161	93,06%
Kolumbien	2	1,16%	163	94,22%
Tschechische Republik	2	1,16%	165	95,38%
Finnland	2	1,16%	167	96,53%
Japan	1	0,58%	168	97,11%
Luxemburg	1	0,58%	169	97,69%
Nigeria	1	0,58%	170	98,27%
Thailand	1	0,58%	171	98,84%
Türkei	1	0,58%	172	99,42%
Großbritannien	1	0,58%	173	100,00%



**Abbildung 19** Ursprungsland der Publikation zu biobasierten Weichmachern. Je Publikation wurde nur die Zugehörigkeit des Erstautors berücksichtigt. Die Größe der Kreise ist proportional zur Anzahl der Publikationen. Der Mittelpunkt der Kreise liegt jeweils auf den Koordinaten der Landeshauptstadt.

Die zusätzlich identifizierten 36 Reviews bestätigen bzw. ergänzen die identifizierten Tendenzen mit folgenden Kernaussagen:

Ambrogio et al. (2016) zeigen auf, dass ein großer Anteil der am Markt verfügbaren biobasierten Additive auf Pflanzenölen (Soja, Palmöl, Leinsamen, Jatropha) basieren, diese aber modifiziert, d. h. epoxidiert werden müssen. Sie erwarten einen dramatischen Anstieg des Einsatzes biobasierter Additive in naher Zukunft.

Der Review von Azeredo et al. (2014) geht ausführlich auf die verschiedenen aus Biomasse gewinnbaren Verbindungen, die als Additive in Verpackungsfolien und Beschichtungen eingesetzt werden können, ein.

Babu et al. (2013) betrachten explizit neuartige biobasierte Kunststoffe (PLA, PHA, PBS, Bio-PE) sowie biobasierte natürliche Polymere und stellen fest, dass der Additiv-Markt für diese Polymere noch sehr klein ist. Das umfangreiche Know-how zum Einsatz von Additiven in petrochemisch basierten Kunststoffen kann genutzt werden, um die Performance und die Eigenschaften von biobasierten Polymeren zu verbessern.

Baroncini et al. (2016) fassen die Entwicklungen zu Härtemitteln synthetisiert aus Pflanzenölen, Zuckern, Polyphenolen, Terpenen, Harz, Naturgummi und Lignin für den Einsatz in biobasierten Epoxidharzen zusammen.

Alternativen zu Phthalaten und halogenierten Flammschutzmitteln werden in der Übersicht von Beach et al. (2013a) dargestellt, mit dem Hinweis, dass natürliche Herkunft nicht gleichbedeutend ist mit reduziertem Risiko. Beispielsweise werden als Phthalat-Alternativen zu niedermolekularen Weichmachern aufgeführt: Isosorbide, Citrate, Aconitsäure (Nebenprodukt der Zuckerrohrverarbeitung), Nebenprodukten der Biodieselproduktion oder ionischen Flüssigkeiten. Insgesamt gibt es reichlich Alternativen, aber viele Entwicklungen und Überprüfungen stehen noch aus.

Bocqué et al. (2016) geben einen umfangreichen Überblick zu Geschichte, chemischen Strukturen, Eigenschaften (u. a. Löslichkeit, Polarität) und Einsatz sowie Design und industriellen Produkten von petro- und biobasierten Weichmachern (Abbildung 20, Abbildung 21).

Brentin (2014) beschreibt die Nutzung von Soja, u. a. auch als Weichmacher.

Geert Bleys (2015) gibt in seiner Übersicht zum Weichmacher-Markt an, dass über 50 % der Industrieforschung zu Weichmachern auf die Nutzung nachwachsender Rohstoffe und hier speziell auf den Einsatz und die Modifizierung von Pflanzenölen, von Glycerin als Nebenprodukt der Biodiesel-Produktion, von Kohlenhydraten, Furan oder Terpenen gerichtet ist.

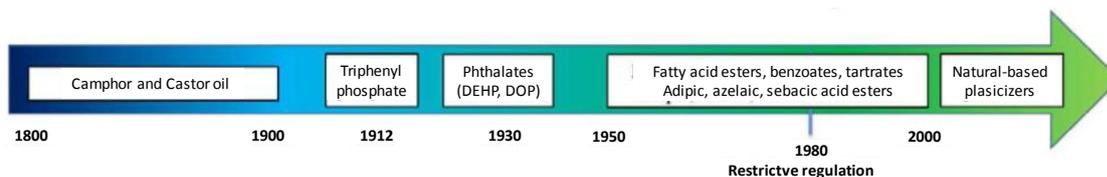


Abbildung 20 Evolution der Weichmacher (Quelle: Bocque, 2016)

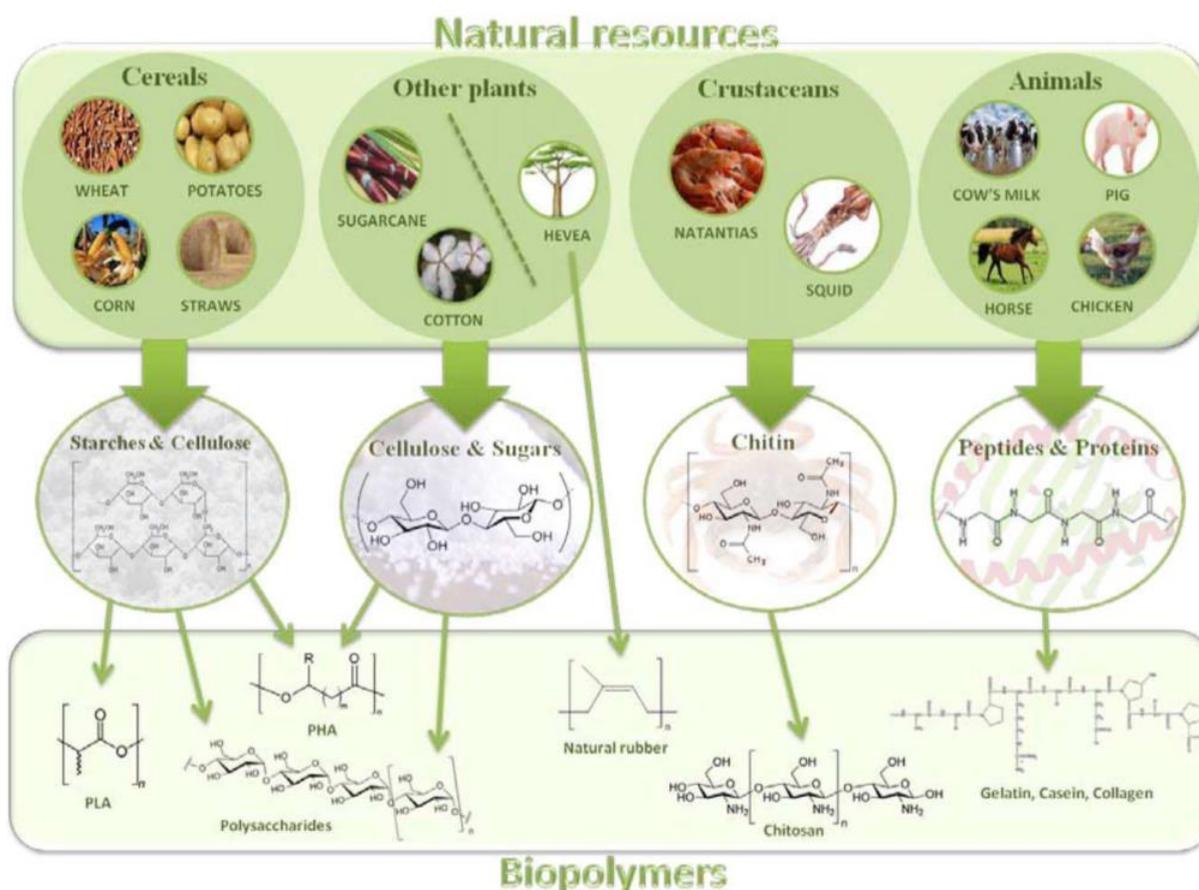


Abbildung 21 Von landwirtschaftlichen Ressourcen zu Bio-Weichmachern (Quelle: Bocque, 2016)

Caroline H. N. Laufer vergleichen verschiedene phthalatfreie Weichmacher, darunter auch fünf biobasierte mit Diisodecylphthalat (Formulierungen, mechanische und elektrische Eigenschaften).

Einen umfangreichen Überblick zu Substanzen und Anteilsmengen der verschiedenen in Kunststoffen eingesetzten Additiv-Typen gibt es bei Hahladakis et al. (2018), hier wird aber nicht speziell auf biobasierte Additive eingegangen.

Biobasierte Lösungen für die Verpackungsindustrie, insbesondere auch mit Bio-Kunststoffen der neuen Generation werden von (Johansson et al. 2012) betrachtet.

Die vergleichenden Untersuchungen von petro- und biobasierten PVC Weichmachern von Hosney et al. (2018) zeigen vielversprechende Ergebnisse im Hinblick auf vergleichbare Eigenschaften auf.

Menne (2015) nennt schon lange auf dem Markt befindliche (teil)biobasierte Weichmacher wie Citrate, Sebacate, Azelate oder epoxidierte Öle, aber auch neuere erfolgreiche Entwicklungen wie die aus Zuckern fermentativ hergestellte Bernsteinsäure oder biobasierte höheren Alkohole.

Der Stand der Entwicklungen für Weichmacher in biobasierten Folien wird von Vieira et al. (2011) eingeschätzt: die meistgenutzten/ -untersuchten Weichmacher sind Polyole, Mono-, Di- und Oligosaccharide, im speziellen: Glycerin, Ethylenglykol, Di-, Tri-, Tetra- und Polyethylenglykole, Propylenglykol, Sorbitol, Mannit, Xylitol, Fettsäuren, Glukose, Mannose, Fruktose, Saccharose, Ethanolamine, Harnstoff, Triethanolamine, Pflanzenöle, Letzthin, Wachse, Aminosäuren, Tenside und Wasser.

Pecht et al. (2018) nennen thermoplastische Elastomere und biobasierte Weichmacher die gefragtesten Alternativen für Weichmacher. Sie zitieren aus einer Studie der Universität Massachusetts (Lowell Center for Sustainable Production 2011) Alternativen für chemische Phthalate: Citrate, Sebacate, Adipate und Phosphate. Biobasierte Weichmacher können hergestellt werden aus Mais, Soja, Reis, Weizen oder Leinsamen. Epoxidiertes Sonnenblumenöl (ESO) wird als Beispiel eines biobasierten Weichmachers in PVC aufgeführt.

Marturano et al. (2017) führen Studien zur Untersuchung von Palmöl-basiertem Alkyd oder epoxidiertem Sonnenblumenöl als sekundäre Weichmacher für PVC an. Zum Einsatz als Weichmacher in biobasierten Folien nennen sie Polysaccharide, mikrobielle Polyhydroxyalkanoate (PHAs) und Polyhydroxybutyrate (PHBs) sowie Polyactide (PLA). Neben Wasser sind die gebräuchlichsten Weichmacher Glycerin, Polyole (wie Sorbitol, Xylitol) und Pflanzenöle.

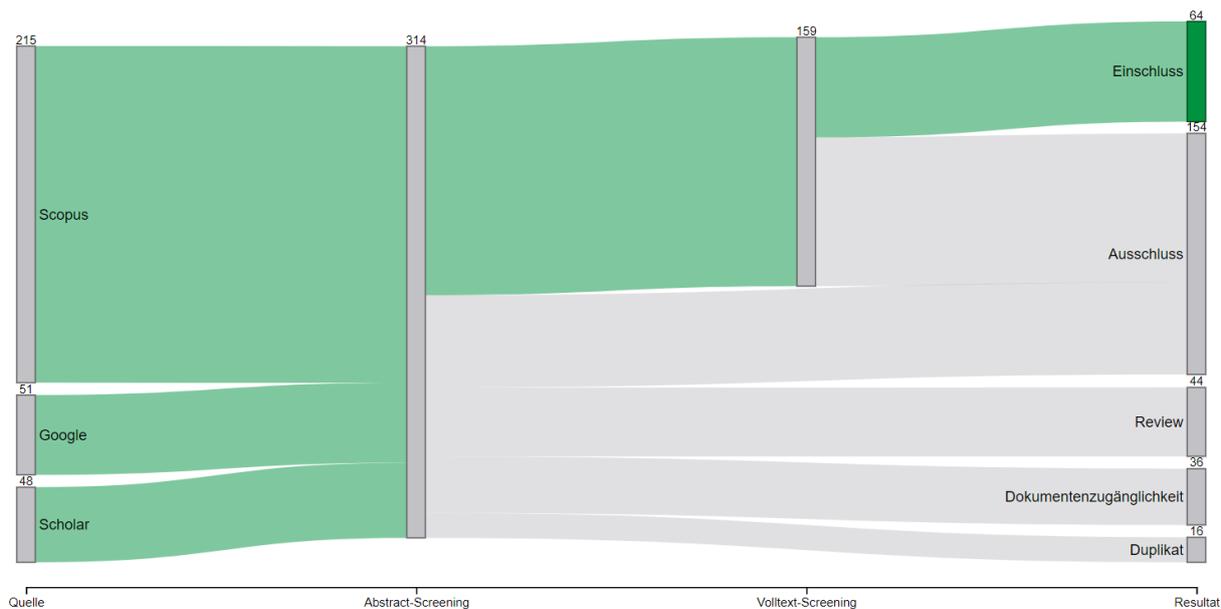
Der Review von Jia et al. (2018) klassifiziert verschiedenen Typen biobasierter PVC-Weichmacher nach ihrer chemischen Struktur: epoxidiert, Polyester, makromolekular, flammfest, Zitronensäureester, Glycerinester und andere. Cardanol aus Cashewnüssen und Pflanzenöle stellen die wichtigsten Rohstofflieferanten für die Produktion von Weichmachern dar. Die Autoren weisen aber darauf hin, dass es kaum Forschung zur biologischen Toxizität von biobasierten Weichmachern – weder für den Menschen noch für Tiermodelle wie Mäuse oder Fische – gibt.

#### Fazit:

Über biobasierte Weichmacher wurden in 173 Publikationen berichtet, die in die Datenextraktion eingeschlossen wurden. Zu den größten Vertretern zählen Glycerin, Zuckerderivate und Pflanzenöle. Weichmacher werden zum größten Teil in PVC und PLA eingesetzt. Sowohl die Performance als auch die Eigenschaften biobasierter Polymere bedürfen allgemeiner Verbesserungen. Es gibt reichlich biobasierte Alternativen zu konventionellen Weichmachern, wobei viele Entwicklungen und Überprüfungen noch ausstehen, wie etwa die biologische Toxizität. Biobasierte Weichmacher zeigen mit konventionellen Weichmachern vergleichbare Eigenschaften.

#### **5.2.2.3 Biozide/ Biozide Wirkstoffe**

Die Suche nach wissenschaftlichen Publikationen zu bioziden Wirkstoffen in drei Suchbereichen lieferte 314 Ergebnisse, von denen letztendlich 64 Publikationen in die Datenextraktion eingeschlossen wurden (Abbildung 22). Die Gesamtübersicht der eingeschlossenen Artikel (Tabelle 41) sowie eine Liste der Reviews (Tabelle 42) befinden sich im Anhang.

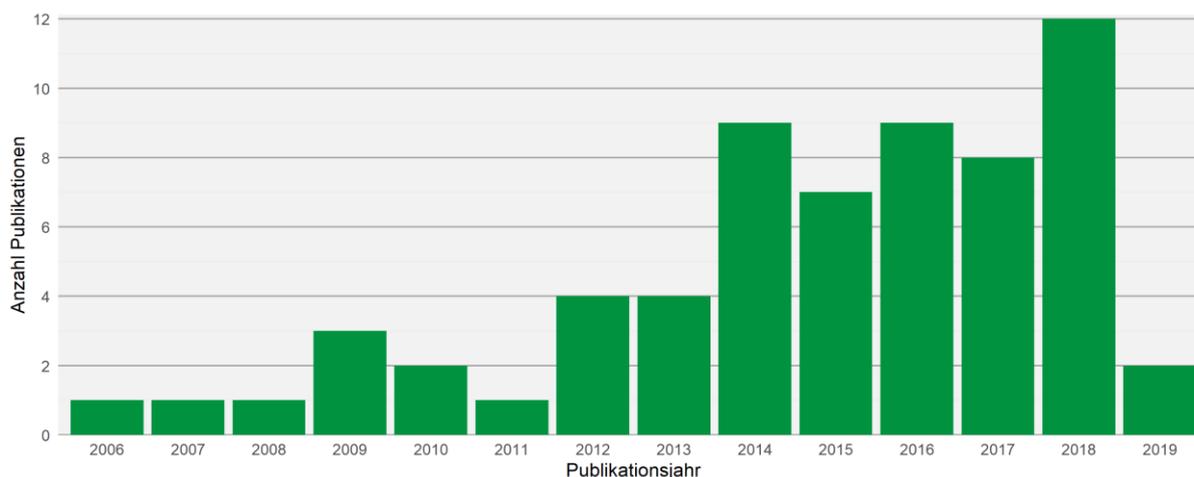


**Abbildung 22** Sankey-Diagramm der Suche nach Publikationen zu biobasierten Bioziden

Die eingeschlossenen Publikationen stammen vor allem aus dem Zeitraum ab 2014 (Tabelle 12, Abbildung 23).

**Tabelle 12** Jahr der Veröffentlichung der Publikationen zu biobasierten Bioziden

Jahr	Anzahl	Anteil	Jahr	Anzahl	Anteil	Jahr	Anzahl	Anteil
2006	1	1,56%	2011	1	1,56%	2016	9	14,06%
2007	1	1,56%	2012	4	6,25%	2017	8	12,50%
2008	1	1,56%	2013	4	6,25%	2018	12	18,75%
2009	3	4,69%	2014	9	14,06%	2019	2	3,13%
2010	2	3,13%	2015	7	10,94%	2016	9	14,06%



**Abbildung 23** Jahr der Veröffentlichung der Publikationen zu biobasierten Bioziden

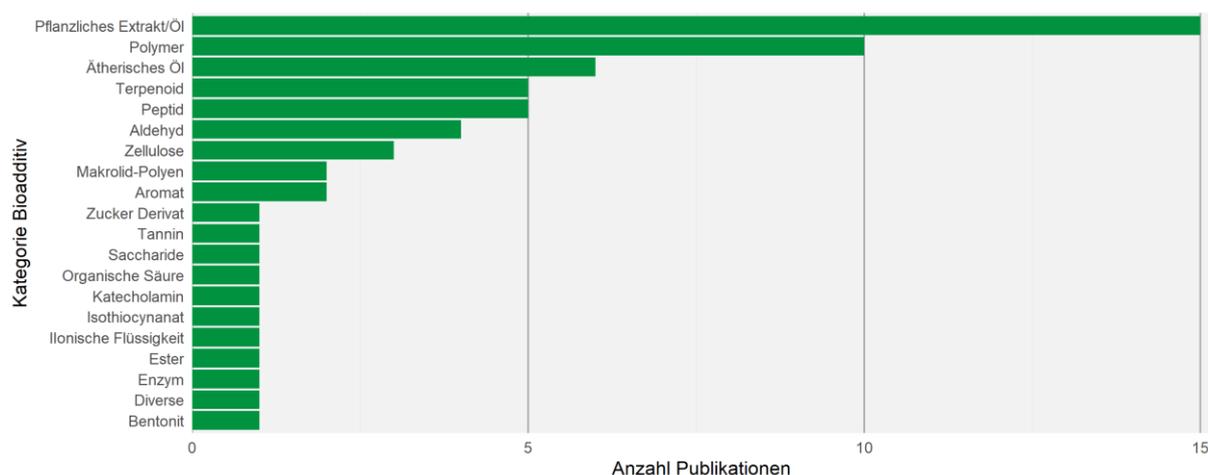
Die fünf häufigsten der insgesamt 60 identifizierten biobasierten Biozide waren Chitosan, Extrakte bzw. Öle aus Zimt, Carvacrol, Nisin und Thymol (Tabelle 13). Alle konnten insgesamt 20 Überkategorien zugeordnet werden, von denen die pflanzlichen Extrakte bzw. Öle die am meisten vertretenen waren (Tabelle 14, Abbildung 24).

**Tabelle 13** In den Publikationen identifizierte biobasierte Biozide

Biobasierten Biozide	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Chitosan	10	9,09%	10	9,09%
Zimt Extrakt/Öl	9	8,18%	19	17,27%
Carvacrol	6	5,45%	25	22,73%
Nisin	6	5,45%	31	28,18%
Thymol	6	5,45%	37	33,64%
Nelke Extrakt/Öl	4	3,64%	41	37,27%
Natamycin	3	2,73%	44	40,00%
Oregano Extrakt/Öl	3	2,73%	47	42,73%
Tanninsäure	3	2,73%	50	45,45%
Zellulose Nanokristalle	3	2,73%	53	48,18%
Allyl Isothiocyanat (AITC)	2	1,82%	55	50,00%
Knoblauch Extrakt/Öl	2	1,82%	57	51,82%
Lysozym	2	1,82%	59	53,64%
Milchsäure	2	1,82%	61	55,45%
Natriumbenzoat (Bz)	2	1,82%	63	57,27%
Natriumlaktat	2	1,82%	65	59,09%
Propolis Extrakt	2	1,82%	67	60,91%
(E)-2-Hexenal	1	0,91%	68	61,82%
A-Tocopherol	1	0,91%	69	62,73%
9-Decen Ester	1	0,91%	70	63,64%
Alpinia malaccensis rhizome Öl	1	0,91%	71	64,55%
Amonibenzoessäure	1	0,91%	72	65,45%
Basilikum Extrakt	1	0,91%	73	66,36%
Basilikumöl	1	0,91%	74	67,27%
Benzoazin	1	0,91%	75	68,18%
Benzoessäure	1	0,91%	76	69,09%
Cardanol	1	0,91%	77	70,00%
Catechin	1	0,91%	78	70,91%
Cholin Citrat	1	0,91%	79	71,82%
Citrat	1	0,91%	80	72,73%
Cloisit 30 B	1	0,91%	81	73,64%
Copaiba Öl	1	0,91%	82	74,55%
Cyclodextrin	1	0,91%	83	75,45%
Dopamin	1	0,91%	84	76,36%
Essigsäure	1	0,91%	85	77,27%
Eugenol	1	0,91%	86	78,18%
Grapefruit Samen Extrakt	1	0,91%	87	79,09%
Grüntee Extrakt	1	0,91%	88	80,00%
Kaliumsorbat	1	0,91%	89	80,91%
Kardamom Öl	1	0,91%	90	81,82%
Leindotter Saat Öl	1	0,91%	91	82,73%
Limonenextrakt	1	0,91%	92	83,64%
Meerrettich Extrakt	1	0,91%	93	84,55%
Mesusa ferrea Samen Öl	1	0,91%	94	85,45%
Modifizierte Polyisoprene	1	0,91%	95	86,36%
Monolaurin	1	0,91%	96	87,27%
Natrium Diacetat	1	0,91%	97	88,18%
Niemöl	1	0,91%	98	89,09%
Octyl-β-D-Galactofuranosid	1	0,91%	99	90,00%
Olivenbaum Blätter	1	0,91%	100	90,91%
Oxidierter Nanozellulose (TOCN)	1	0,91%	101	91,82%
P-Anisaldehyde (pA)	1	0,91%	102	92,73%
Para-Benzoat	1	0,91%	103	93,64%
Polythiophene-g-polyalanine (PT-Pala)	1	0,91%	104	94,55%
Propyl Paraben	1	0,91%	105	95,45%
Rhabarber Extrakt	1	0,91%	106	96,36%
Rhamnolipid	1	0,91%	107	97,27%
SakacinLaurinsäure	1	0,91%	108	98,18%
Sorbat	1	0,91%	109	99,09%
Vanillin Oxim-formaldehyd-p-hydroxyacetophenon	1	0,91%	110	100,00%

**Tabelle 14** In den Publikationen identifizierte biobasierte Bioziden, gegliedert nach Überkategorien

Kategorie	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Pflanzliches Extrakt/Öl	15	23,81%	15	23,81%
Polymer	10	15,87%	25	39,68%
Ätherisches Öl	6	9,52%	31	49,21%
Peptid	5	7,94%	36	57,14%
Terpenoid	5	7,94%	41	65,08%
Aldehyd	4	6,35%	45	71,43%
Zellulose	3	4,76%	48	76,19%
Aromat	2	3,17%	50	79,37%
Makrolid-Polyen	2	3,17%	52	82,54%
Bentonit	1	1,59%	53	84,13%
Diverse	1	1,59%	54	85,71%
Enzym	1	1,59%	55	87,30%
Ester	1	1,59%	56	88,89%
Ionische Flüssigkeit	1	1,59%	57	90,48%
Isothiocyanat	1	1,59%	58	92,06%
Katecholamin	1	1,59%	59	93,65%
Organische Säure	1	1,59%	60	95,24%
Saccharide	1	1,59%	61	96,83%
Tannin	1	1,59%	62	98,41%
Zucker Derivat	1	1,59%	63	100,00%

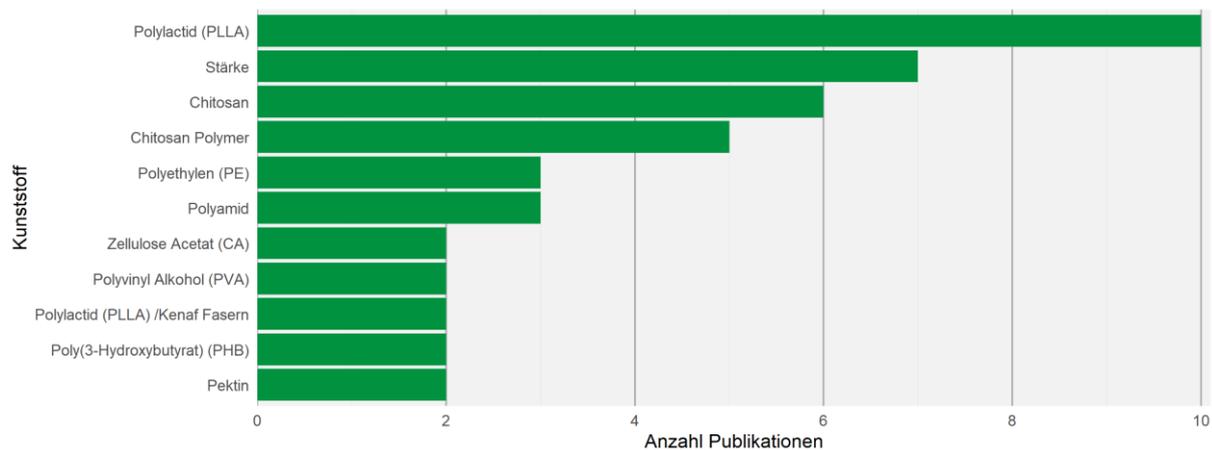


**Abbildung 24** Anzahl der in den Publikationen identifizierten biobasierten Bioziden gegliedert nach Überkategorien

Hinsichtlich der Stoffe, denen die biobasierten Biozide zugesetzt wurden, hatten Polylactid, Stärke und Chitosan die meisten Nennungen (Tabelle 15, Abbildung 25).

**Tabelle 15** In den Biozid-Publikationen identifizierte Kunststoffe

Kategorie	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Poly(lactid) (PLA)	10	11,49%	10	11,49%
Stärke	7	8,05%	17	19,54%
Chitosan	6	6,90%	23	26,44%
Chitosan Polymer	5	5,75%	28	32,18%
Polyamid	3	3,45%	31	35,63%
Polyethylen (PE)	3	3,45%	34	39,08%
Pektin	2	2,30%	36	41,38%
Poly(3-Hydroxybutyrat) (PHB)	2	2,30%	38	43,68%
Poly(lactid) (PLA) /Kenaf Fasern	2	2,30%	40	45,98%
Polyvinyl Alkohol (PVA)	2	2,30%	42	48,28%
Zellulose Acetat (CA)	2	2,30%	44	50,57%
Abbaubare Polyacetale (PANDA)	1	1,15%	45	51,72%
Acryliertes epoxidiertes Leinöl (AELO)	1	1,15%	46	52,87%
Biobasiertes Terpolymer	1	1,15%	47	54,02%
Chitosan basierte Polybenzoxazine	1	1,15%	48	55,17%
Chitosan/HP-Cyclodextrine	1	1,15%	49	56,32%
Chitosan/Polyvinylalkohol	1	1,15%	50	57,47%
Chitosan/Lignin	1	1,15%	51	58,62%
Epoxidiertes Leinöl (AELO)	1	1,15%	52	59,77%
Ethylen-Co-Acrylat	1	1,15%	53	60,92%
Ethylen Vinyl Alkohol (EVOH)	1	1,15%	54	62,07%
Ethylvinylacetat/Polyethylen	1	1,15%	55	63,22%
Gelatine	1	1,15%	56	64,37%
Gelatine/Lignin	1	1,15%	57	65,52%
Glycerin/Kasein Polymere	1	1,15%	58	66,67%
Glycerin/PBAT/NaCAS Glycerin/Poly(butylene adipat-co-terephthalate)/Natrium Kaseinat	1	1,15%	59	67,82%
Glycidyl methacrylate (GMA)	1	1,15%	60	68,97%
Ionomere	1	1,15%	61	70,11%
Lignin/Kokos Fasern	1	1,15%	62	71,26%
Modifizierte Polyisoprene	1	1,15%	63	72,41%
Nylon	1	1,15%	64	73,56%
PLLA	1	1,15%	65	74,71%
Poly(Ethylene Oxide) (PEO)	1	1,15%	66	75,86%
Polycaprolacton (PCL)	1	1,15%	67	77,01%
Polycaprolacton in stärkebasierter Matrix	1	1,15%	68	78,16%
Polyethylen	1	1,15%	69	79,31%
Polyethylenterephthalat	1	1,15%	70	80,46%
Polyethylenglycol (PEG)	1	1,15%	71	81,61%
Polyhydroxybutyrate-co-Valerat	1	1,15%	72	82,76%
Poly(lactid) (PLA)/Polycaprolacton (PCL)	1	1,15%	73	83,91%
Polyolefin	1	1,15%	74	85,06%
Polypropylen	1	1,15%	75	86,21%
Polypyrrol (PPy)	1	1,15%	76	87,36%
Polysaccharide	1	1,15%	77	88,51%
Polystyrol	1	1,15%	78	89,66%
Polythiophene-g-Polyalanine (PT-Pala)	1	1,15%	79	90,80%
Polyurethan	1	1,15%	80	91,95%
Polyvinyl Dichlorid (PVDC)	1	1,15%	81	93,10%
Polyvinylalkohol/Polypropylen	1	1,15%	82	94,25%
PVC	1	1,15%	83	95,40%
Reisstärke/Chitosan	1	1,15%	84	96,55%
Thermoplastisches Polyurethan (TPU)	1	1,15%	85	97,70%
WPI	1	1,15%	86	98,85%
Zellulose Derivat	1	1,15%	87	100,00%



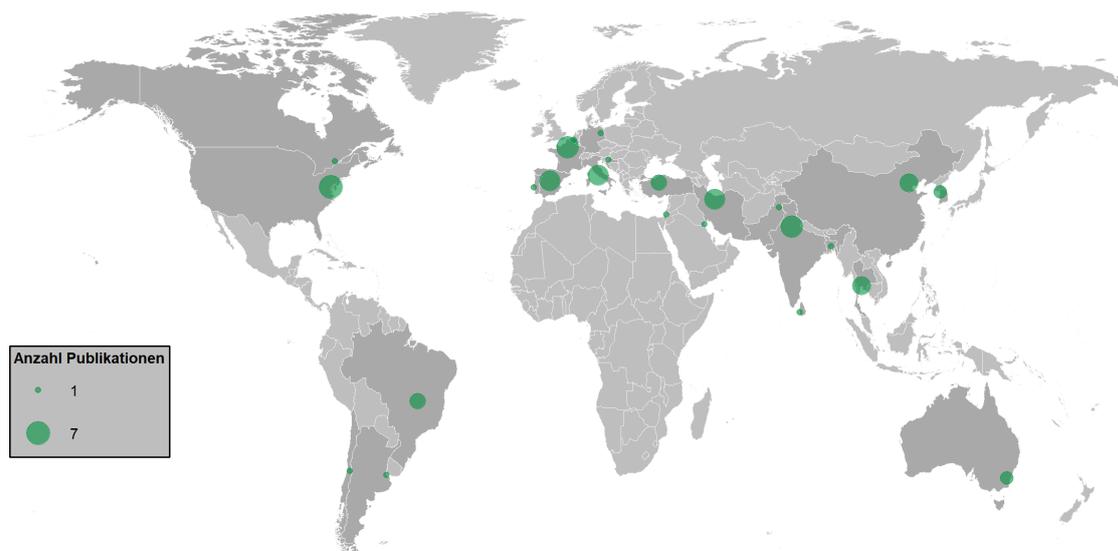
Anmerkung: In dieser Abbildung wurden nur Kunststoffe mit mind. 2 Publikationen eingeschlossen. Demnach fehlen insgesamt 43 Nennungen.

**Abbildung 25** Anzahl der in den Biozid-Publikationen identifizierten Kunststoffe

Die Ursprungsländer der Publikationen sind auffällig gleichmäßig gestreut (Tabelle 16, Abbildung 26).

**Tabelle 16** Ursprungsland der Publikation zu biobasierten Bioziden. Je Publikation wurde nur die Zugehörigkeit des Erstautors berücksichtigt.

Land	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Vereinigte Staaten	7	10,94%	7	10,94%
Frankreich	6	9,38%	13	20,31%
Indien	6	9,38%	19	29,69%
Iran	5	7,81%	24	37,50%
Italien	5	7,81%	29	45,31%
Spanien	5	7,81%	34	53,13%
China	4	6,25%	38	59,38%
Thailand	4	6,25%	42	65,63%
Brasilien	3	4,69%	45	70,31%
Türkei	3	4,69%	48	75,00%
Australien	2	3,13%	50	78,13%
Korea, Republik von	2	3,13%	52	81,25%
Argentinien	1	1,56%	53	82,81%
Bangladesch	1	1,56%	54	84,38%
Belgien	1	1,56%	55	85,94%
Kanada	1	1,56%	56	87,50%
Chile	1	1,56%	57	89,06%
Kroatien	1	1,56%	58	90,63%
Deutschland	1	1,56%	59	92,19%
Israel	1	1,56%	60	93,75%
Kuwait	1	1,56%	61	95,31%
Pakistan	1	1,56%	62	96,88%
Portugal	1	1,56%	63	98,44%
Sri Lanka	1	1,56%	64	100,00%



**Abbildung 26** Ursprungsland der Publikation zu biobasierten Bioziden. Je Publikation wurde nur die Zugehörigkeit des Erstautors berücksichtigt. Die Größe der Kreise ist proportional zur Anzahl der Publikationen. Der Mittelpunkt der Kreise liegt jeweils auf den Koordinaten der Landeshauptstadt.

Die zusätzlich identifizierten 44 Reviews bestätigen bzw. ergänzen die o. a. Tendenzen mit folgenden Kernaussagen:

Muñoz-Bonilla et al. 2019 und Gorrasi et al. 2017 geben einen Überblick zu biobasierten antimikrobiellen Polymeren, eingeteilt nach Polysacchariden (Chitosan, Zellulose, Stärke – jeweils gemischt mit antimikrobiellen organischen Komponenten oder metallischen Nanopartikeln), Proteine/ Polypeptide, Polyester (PLA, PHA, PBS), Polyurethane basierend auf erneuerbaren Ölen).

Aider 2010 betrachtet umfassend den Einsatz von Chitosan in der Lebensmittelindustrie und beschreibt seine antimikrobielle Aktivität gegen pathogene und den Verderb fördernde Mikroorganismen, inklusive Pilze sowie gram-positive und negative Bakterien. Chitosan und seine antimikrobiellen Eigenschaften werden auch umfassend von Raafat und Sahl (2009) diskutiert. In dem Artikel von Wang et al. (2018) werden die jüngsten Fortschritte bei der Herstellung und Anwendung von technischen Folien auf Chitosanbasis in der Lebensmittelverpackung umfassend besprochen.

Delesa 2018 erörtert industrielle Anwendungen traditioneller Heilpflanzen als natürliche Konservierungsmittel (ätherische Öle, Bakteriozine, Proteine, Peptide, bioaktive Moleküle, Kräuter und Gewürze).

Essbare Beschichtungen aus verschiedenen natürlichen Ressourcen wie Agar, Alginat, Stärke, Carrageen, Cellulose, Zein, Gelatine, isoliertes Protein und andere werden als gute Optionen für biobasierte Biozide von da Rocha et al. 2018 betrachtet.

Diblan und Kaya 2018 zeigen die Entwicklung biobasierter Biozide aus Substanzen wie organische Säuren, Parabene, Sulfite, Nitrite, Phosphate, Alkohole, Antibiotika und Bakteriozine. Faustino et al. 2013 betrachten insbesondere Lipoaminsäuren als vielversprechend für die Entwicklung biobasierter oberflächenaktiver Stoffe. Pflanzliche Öle sind generell wegen ihrer antioxidativen, antimikrobiellen, antimykotischen und antinozizeptiven Eigenschaften als erneuerbare Additive zum Einsatz in der Frischhaltung von Lebensmitteln geeignet (Jacob et al. 2017, Sorrentino et al. 2007)

Raj et al. 2011 beschreiben verschiedene Klassen von antimikrobiellen Wirkstoffen: chemisch synthetisierte und biobasierte Bestandteile wie organische Säuren und Salze, anorganische Verbindungen / Gase und Salze sowie biobasierte Bakterien, Enzyme, pflanzliche Ausgangsstoffe usw. sowie synthetische und Biopolymerfilme als Träger antimikrobieller Wirkstoffe als Verpackungsmaterial.

In Kombination mit dem biobasierten Kunststoff PLA ist Nanozellulose besonders geeignet für die Anwendung als biobasiertes Verpackungsmaterial (Gan und Chow 2018).

Als vielversprechende antimikrobielle Stoffe werden auch Bio-Nanomaterialien (u.a. Silber-Nanopartikel, Nanozellulose) gehandelt (Angiolillo et al. 2017; Barros et al. 2018; Castro-Mayorga et al. 2016; Ahmed et al. 2016; Khan et al. 2014; Kuswandi 2017; McMillin 2017; Ramos et al. 2014; Rhim et al. 2013; Upta et al. 2016; Wang und Vermerris 2016).

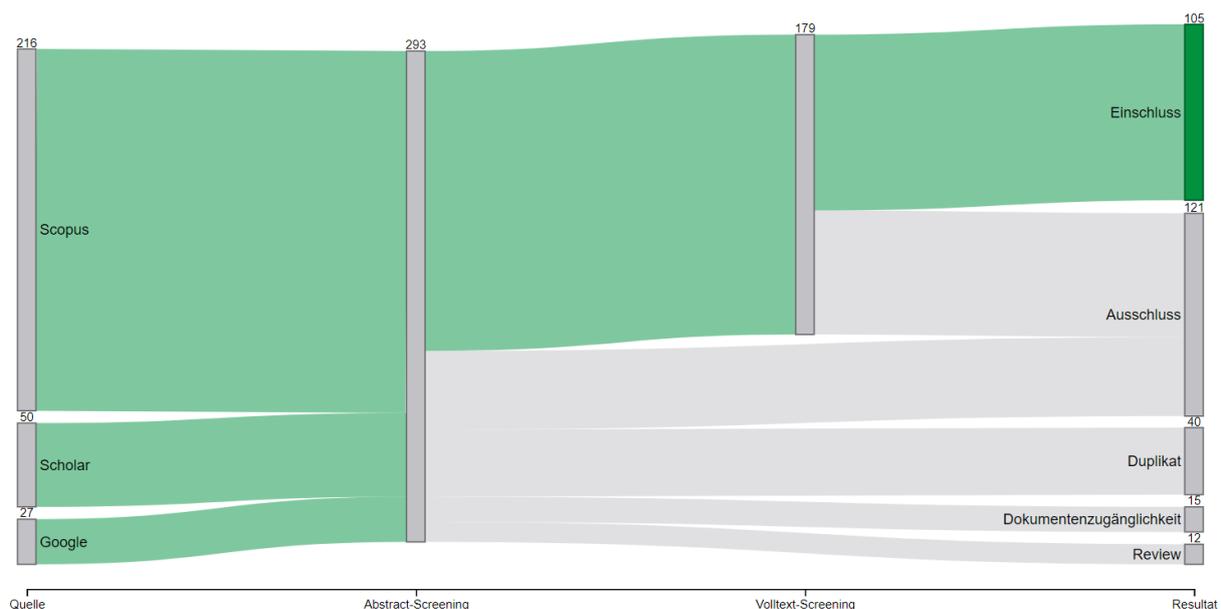
Thallinger et al. 2013 diskutieren den Einsatz antimikrobieller Enzyme.

#### Fazit:

Über biobasierte Biozide wurden in 64 Publikationen berichtet, die in die Datenextraktion eingeschlossen wurden. Darunter Chitosan, Extrakte/Öle aus Zimt, Caracrol, Nisin und Thymol. Biozide werden zum größten Teil in PLA, Stärke und Chitosan eingesetzt. Im Verpackungsbereich werden biobasierte Materialien diskutiert, die unter anderem für den Kontakt mit Lebensmitteln geeignet sein müssen.

#### **5.2.2.4 Flammenschutzmittel**

Die Suche nach wissenschaftlichen Publikationen zu biobasierten Flammenschutzmitteln in drei Suchbereichen lieferte 293 Ergebnisse, von denen letztendlich 105 Publikationen in die Datenextraktion eingeschlossen wurden (Abbildung 27). Die Gesamtübersicht der eingeschlossenen Artikel (Tabelle 43) sowie eine Liste der Reviews (Tabelle 44) befinden sich im Annex.

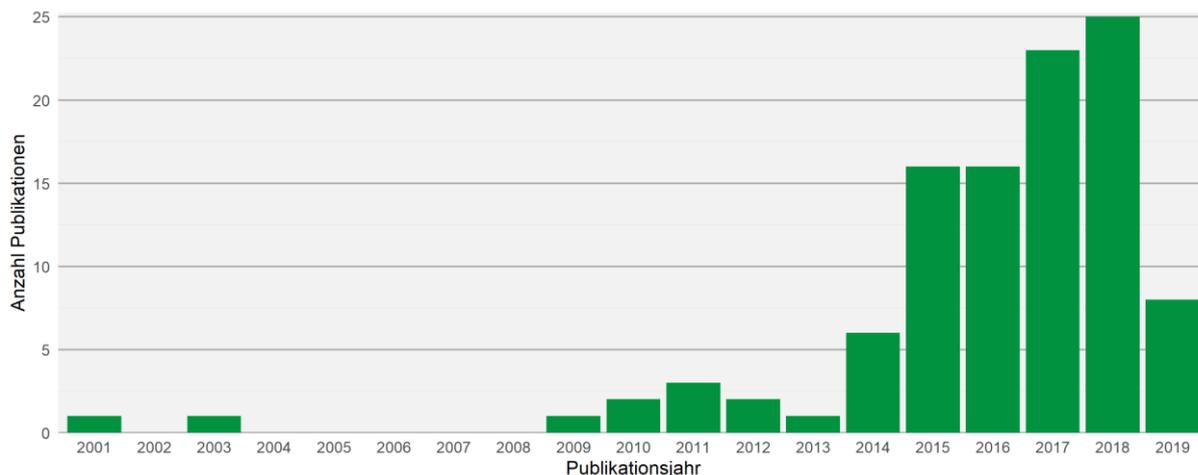


**Abbildung 27** Sankey-Diagramm der Suche nach Publikationen zu biobasierten Flammenschutzmitteln

Der Großteil der identifizierten Publikationen zu biobasierten Flammenschutzmitteln erschien in den Jahren seit 2014 (Tabelle 17 & Abbildung 28).

**Tabelle 17** Jahr der Veröffentlichung der Publikationen zu biobasierten Flammenschutzmitteln

Jahr	Anzahl	Anteil	Jahr	Anzahl	Anteil	Jahr	Anzahl	Anteil
2001	1	0,95%	2008	0	0,00%	2015	16	15,24%
2002	0	0,00%	2009	1	0,95%	2016	16	15,24%
2003	1	0,95%	2010	2	1,90%	2017	23	21,90%
2004	0	0,00%	2011	3	2,86%	2018	25	23,81%
2005	0	0,00%	2012	2	1,90%	2019	8	7,62%
2006	0	0,00%	2013	1	0,95%			
2007	0	0,00%	2014	6	5,71%			



**Abbildung 28** Jahr der Veröffentlichung der Publikationen zu biobasierten Flammschutzmitteln

Es wurden insgesamt 85 verschiedene biobasierte Flammschutzmittel identifiziert, von denen nur Lignin und Phytinsäure mehr als 10-mal genannt wurden (Tabelle 18). Alle Additive wurden in insgesamt 27 Überkategorien eingeteilt, von denen Polymere und Phytate die präsentesten sind (Tabelle 19, Abbildung 29).

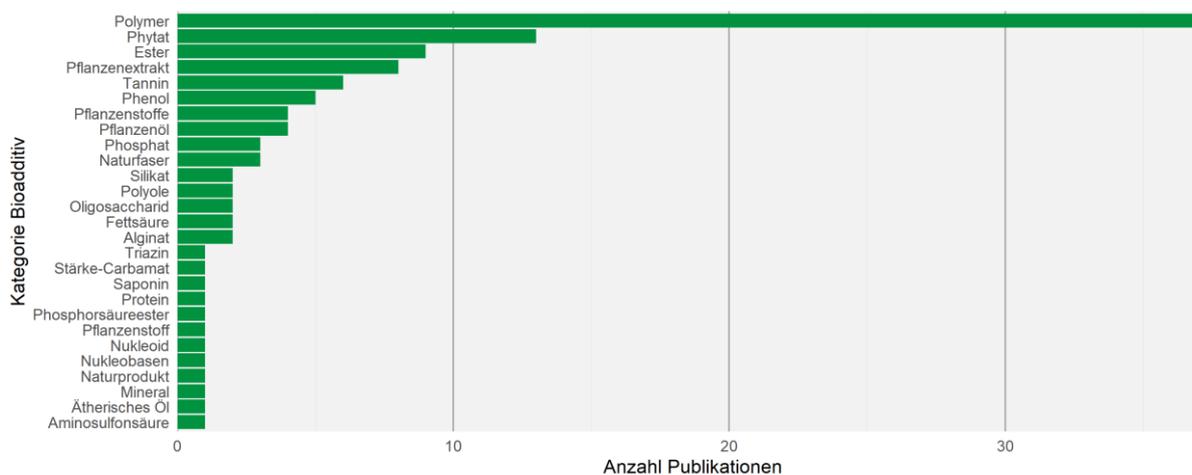
**Tabelle 18** In den Publikationen identifizierte biobasierte Flammschutzmittel

Flammschutzmittel	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Lignin	12	8,16%	12	8,16%
Phytinsäure	11	7,48%	23	15,65%
Chitosan	6	4,08%	29	19,73%
Cellulose	5	3,40%	34	23,13%
Gerbsäure	5	3,40%	39	26,53%
Isosorbidphosphorester	4	2,72%	43	29,25%
Phloroglucinol	4	2,72%	47	31,97%
Stärke	4	2,72%	51	34,69%
Alginat	3	2,04%	54	36,73%
Eugenolderivat	3	2,04%	57	38,78%
Kraft-Lignin	3	2,04%	60	40,82%
Phosphorylierte Cellulose	3	2,04%	63	42,86%
Rizinusöl	3	2,04%	66	44,90%
Biobasiertes Polyphosphonat	2	1,36%	68	46,26%
Cardanol	2	1,36%	70	47,62%
Cyclodextrin	2	1,36%	72	48,98%
Lignosulfonat	2	1,36%	74	50,34%
Maisstärke	2	1,36%	76	51,70%
Montmorillonit	2	1,36%	78	53,06%
Phytate	2	1,36%	80	54,42%
Vanillin	2	1,36%	82	55,78%
10-Undecensäure	1	0,68%	83	56,46%
5-[2-Tetrachlorphthalimido-ethansulfonamido]isophthalsäure	1	0,68%	84	57,14%
Adenin	1	0,68%	85	57,82%
Ammoniumstärkephosphatcarbamaten	1	0,68%	86	58,50%
Aus Biomasse abgeleitetes Metall-Phenol-Netzwerk	1	0,68%	87	59,18%
Austernschalen	1	0,68%	88	59,86%
B-Cyclodextrin	1	0,68%	89	60,54%
Benzoxazin aus Cardanol	1	0,68%	90	61,22%
Biobasierter Hybrid	1	0,68%	91	61,90%
Bis[5-formyl-2-methoxyphenyl] synthetisiert aus Vanillin	1	0,68%	92	62,59%
Cardanolphosphitester	1	0,68%	93	63,27%
Cyanurchlorid	1	0,68%	94	63,95%
Cytosin	1	0,68%	95	64,63%
Dimethylphosphonat	1	0,68%	96	65,31%
Doppelhydroxid modifiziert mit Phytinsäure	1	0,68%	97	66,44%
Fettsäureverbindungen	1	0,68%	98	67,12%
Flachsfasern	1	0,68%	99	67,81%
Gerbsäureterephthalat	1	0,68%	100	68,49%
Guanin	1	0,68%	101	69,18%
Gummi des Meerrettichbaums	1	0,68%	102	69,86%

Halloysit oder Sepiolith	1	0,68%	103	70,55%
Harnstoffmodifiziertes Lignin	1	0,68%	104	71,23%
Hemicellulose	1	0,68%	105	71,92%
Hydroxyapatit	1	0,68%	106	72,60%
Hydroxylapatit-modifizierte Braunkohlecellulose	1	0,68%	107	73,29%
Hydroxypropyl)sulfobutyl- $\beta$ -cyclodextrin-Natrium	1	0,68%	108	73,97%
Kartoffelstärke	1	0,68%	109	74,66%
Kasein	1	0,68%	110	75,34%
Lignin-Silika-Hybride	1	0,68%	111	76,03%
Limonenbasierte Polyole	1	0,68%	112	76,71%
Melaminphosphatmodifiziertes Lignin Reisschalenasche	1	0,68%	113	77,40%
Melasse	1	0,68%	114	78,08%
Mesoporöse Hohlkieselsäure	1	0,68%	115	78,77%
Myrcen	1	0,68%	116	79,45%
Nukleoid intumeszierendes System	1	0,68%	117	80,14%
Orangenschale	1	0,68%	118	80,82%
Pflanzenöl	1	0,68%	119	81,51%
Phosphaphenanthrengruppen-haltiges	1	0,68%	120	82,19%
Triscardanylphosphat				
Phosphatester von Weinsäure	1	0,68%	121	82,88%
Phosphinatester von Weinsäure	1	0,68%	122	83,56%
Phosphorsäureester aus Diol von Isosorbid	1	0,68%	123	84,25%
Phosphorylierte Diallylglucopyranosiden	1	0,68%	124	84,93%
Phosphorylierte Triallylglucopyranosiden	1	0,68%	125	85,62%
Polyelektrolytkomplexe aus Chitosan	1	0,68%	126	86,30%
Polyole aus Rapsöl	1	0,68%	127	86,99%
Polyphosphat auf Isosorbidbasis	1	0,68%	128	87,67%
Polysaccharide	1	0,68%	129	88,36%
Protein	1	0,68%	130	89,04%
Reisstärke	1	0,68%	131	89,73%
Reisstroh	1	0,68%	132	90,41%
Ricinolsäure modifiziert mit Itaconsäureanhydrid	1	0,68%	133	91,10%
Rizinus	1	0,68%	134	91,78%
Schichtsilikat	1	0,68%	135	92,47%
Sojabohnen	1	0,68%	136	93,15%
Sojabohnenölphosphatester	1	0,68%	137	93,84%
Sulfonisiertes Lignin	1	0,68%	138	94,52%
Taurin	1	0,68%	139	95,21%
Tee-Saponine	1	0,68%	140	95,89%
Triazinderivat aus Cytosin	1	0,68%	141	96,58%
Triphenylphosphathaltiges Agens	1	0,68%	142	97,26%
Uracil	1	0,68%	143	97,95%
Weinsäureester	1	0,68%	144	98,63%
Zink-Phytat	1	0,68%	145	99,32%
Zucker	1	0,68%	146	100,00%

**Tabelle 19** In den Publikationen identifizierte biobasierte Flammschutzmittel gegliedert nach Überkategorien

Kategorie	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Polymer	37	32,46%	37	32,46%
Phytat	13	11,40%	50	43,86%
Ester	9	7,89%	59	51,75%
Pflanzenextrakt	8	7,02%	67	58,77%
Tannin	6	5,26%	73	64,04%
Phenol	5	4,39%	78	68,42%
Pflanzenöl	4	3,51%	82	71,93%
Pflanzenstoffe	4	3,51%	86	75,44%
Naturfaser	3	2,63%	89	78,07%
Phosphat	3	2,63%	92	80,70%
Alginat	2	1,75%	94	82,46%
Fettsäure	2	1,75%	96	84,21%
Oligosaccharid	2	1,75%	98	85,96%
Polyole	2	1,75%	100	87,72%
Silikat	2	1,75%	102	89,47%
Aminosulfonsäure	1	0,88%	103	90,35%
Ätherisches Öl	1	0,88%	104	91,23%
Mineral	1	0,88%	105	92,11%
Naturprodukt	1	0,88%	106	92,98%
Nukleobasen	1	0,88%	107	93,86%
Nukleoid	1	0,88%	108	94,74%
Pflanzenstoff	1	0,88%	109	95,61%
Phosphorsäureester	1	0,88%	110	96,49%
Protein	1	0,88%	111	97,37%
Saponin	1	0,88%	112	98,25%
Stärke-Carbamat	1	0,88%	113	99,12%
Triazin	1	0,88%	114	100,00%

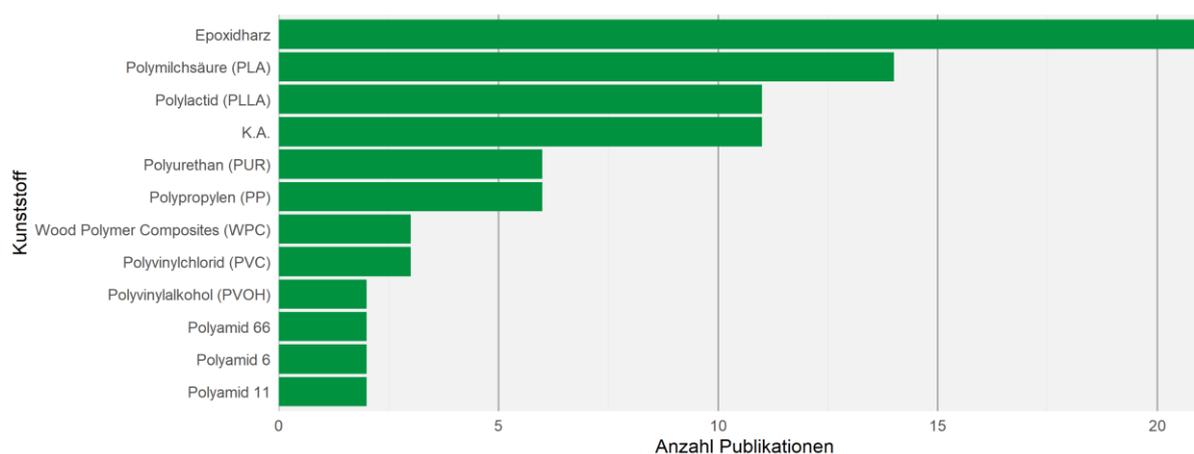


**Abbildung 29** In den Publikationen identifizierte biobasierte Flammschutzmittel gegliedert nach Überkategorien

Insgesamt wurden 34 Kunststoffe identifiziert, denen biobasierte Flammschutzmittel zugesetzt wurden (Tabelle 20 & Abbildung 30). Die zwei häufigsten Nennungen waren dabei PLA und Epoxidharz. In insgesamt 11 Publikationen gab es keine Angabe zu den Kunststoffen.

**Tabelle 20** Häufigkeit der in den Flamschutzmittel-Publikationen identifizierten Kunststoffe

Kunststoff	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Polylactid (PLA)	25	23,58%	25	23,58%
Epoxidharz	21	19,81%	46	43,40%
K.A.	11	10,38%	57	53,77%
Polypropylen (PP)	6	5,66%	63	59,43%
Polyurethan (PUR)	6	5,66%	69	65,09%
Polyvinylchlorid (PVC)	3	2,83%	72	67,92%
Wood Polymer Composites (WPC)	3	2,83%	75	70,75%
Polyamid 11	2	1,89%	77	72,64%
Polyamid 6	2	1,89%	79	74,53%
Polyamid 66	2	1,89%	81	76,42%
Polyvinylalkohol (PVOH)	2	1,89%	83	78,30%
Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	1	0,94%	84	79,25%
Bisphenol-A-Diglycidylether (DGEBA)	1	0,94%	85	80,19%
Bisphenol-A-Diglycidylether/Isophorondiamin	1	0,94%	86	81,13%
Epoxidharz (DGEBA/IPDA)				
Cellulose	1	0,94%	87	82,08%
Ethylen-Vinylacetat (EVA)	1	0,94%	88	83,02%
(Ammoniumpolyphosphat APP)				
Harze	1	0,94%	89	83,96%
Phenolharz	1	0,94%	90	84,91%
Polisocyanurat (PIR)	1	0,94%	91	85,85%
Poly(3-hydroxybutyrat-co-4-hydroxybutyrat)	1	0,94%	92	86,79%
Poly(vinylalkohol) (PVA)	1	0,94%	93	87,74%
Polybutylensuccinat (PBS)	1	0,94%	94	88,68%
Polyester	1	0,94%	95	89,62%
Polyester-Baumwollgewebe	1	0,94%	96	90,57%
Polyester (ungesättigt)	1	0,94%	97	91,51%
Polymilchsäure (PLA)	1	0,94%	98	92,45%
Polybutylensuccinat (PBS)				
Polyphenol (Basis: Cardanol)	1	0,94%	99	93,40%
Polyurethan-Weichschaumstoff	1	0,94%	100	94,34%
Polyurethanschaum	1	0,94%	101	95,28%
Polyvinylacetat (PVA)	1	0,94%	102	96,23%
PVC	1	0,94%	103	97,17%
Seide	1	0,94%	104	98,11%
Thermoplastisches Protein Zein	1	0,94%	105	99,06%
Wolle	1	0,94%	106	100,00%



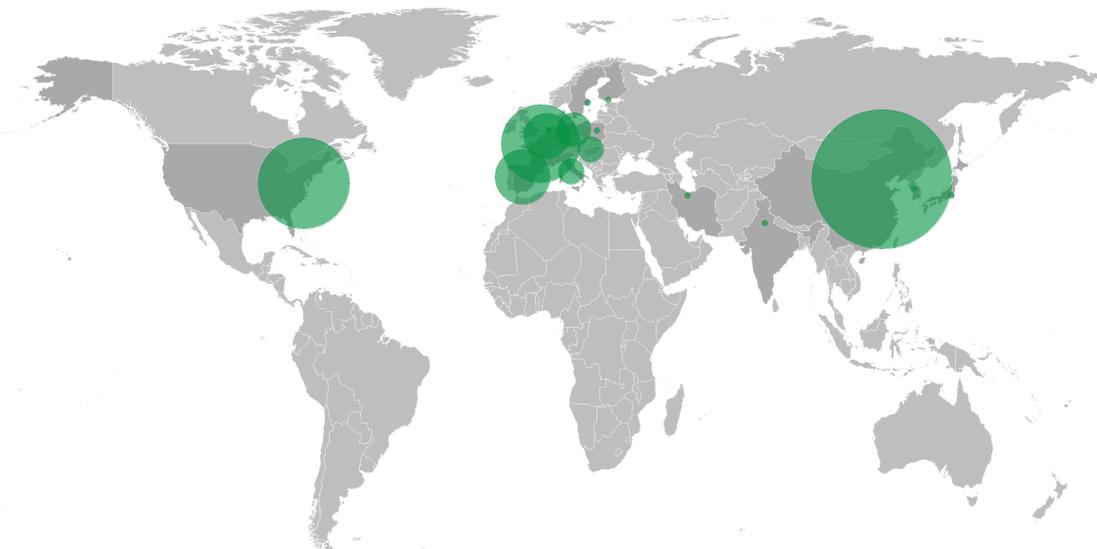
Anmerkung: In dieser Abbildung wurden nur Kunststoffe mit mind. 2 Publikationen eingeschlossen. Demnach fehlen insgesamt 23 Nennungen.

**Abbildung 30** In den Flamschutzmittel-Publikationen identifizierten Kunststoffe

Knapp die Hälfte aller Publikationen stammen aus China. Werden noch die Publikationen aus den USA und Frankreich hinzugefügt, entspricht dies knapp dreiviertel aller Publikationen (Tabelle 21, Abbildung 31).

**Tabelle 21** Ursprungsland der Publikation zu biobasierten Flammschutzmitteln. Je Publikation wurde nur die Zugehörigkeit des Erstautors berücksichtigt.

Land	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil [
China	45	42,86%	45	42,86%
Vereinigte Staaten	19	18,10%	64	60,95%
Frankreich	14	13,33%	78	74,29%
Spanien	7	6,67%	85	80,95%
Belgien	5	4,76%	90	85,71%
Deutschland	3	2,86%	93	88,57%
Ungarn	2	1,90%	95	90,48%
Italien	2	1,90%	97	92,38%
Finnland	1	0,95%	98	93,33%
Indien	1	0,95%	99	94,29%
Iran	1	0,95%	100	95,24%
Japan	1	0,95%	101	96,19%
Niederlande	1	0,95%	102	97,14%
Polen	1	0,95%	103	98,10%
Korea, Republik von	1	0,95%	104	99,05%
Schweden	1	0,95%	105	100,00%



**Abbildung 31** Ursprungsland der Publikation zu biobasierten Flammschutzmitteln. Je Publikation wurde nur die Zugehörigkeit des Erstautors berücksichtigt. Die Größe der Kreise ist proportional zur Anzahl der Publikationen. Der Mittelpunkt der Kreise liegt jeweils auf den Koordinaten der Landeshauptstadt.

Die zusätzlich identifizierten 12 Reviews bestätigen bzw. ergänzen die o. a. Tendenzen mit folgenden Kernaussagen:

Die Übersicht von Beach et al. 2013b) konzentriert sich auf niedermolekulare Alternativen zu Phthalat-Weichmachern und halogenierten Flammschutzmitteln, zwei Kategorien, die zusammen einen bedeutenden Teil des globalen Marktes für Additive und die weltweite Verbreitung von endokrinen wirkenden Chemikalien ausmachen.

Der Review von Costes et al. (2017) befasst sich mit der Identifizierung von Biomasseverbindungen, die aufgrund ihrer hohen Verfügbarkeit und inhärenten Eigenschaften ein Potenzial als Flammschutzmittel für Polymere aufweisen. Pflanzliche Öle als Ausgangsstoff um flammhemmende Duroplaste zu erhalten, werden von Galià et al. (2010) betrachtet.

Der Review von Hobbs (2019) beschäftigt sich mit den aktuellen Entwicklungen biobasierter Flammschutzmittel und betrachtet die Materialien Gerbsäure und verwandte Materialien, Phytinsäure, Isosorbid, Diphenolsäure, Desoxyribonukleinsäure (DNA), Lignin und  $\beta$ -Cyclodextrin (Tabelle 22).

**Tabelle 22** Übersicht aus (Hobbs 2019), PHRR = peak heat release rate

Bio-Based FR	Polymeric Material	PHRR	PHHR of Virgin Material
tannic acid	epoxy	335 kW/m <sup>2</sup>	407 kW/m <sup>2</sup>
phytic acid	EVA/chitosan	552 W/g	801 W/g
isosorbide	PLA	744 kW/m <sup>2</sup>	786 kW/m <sup>2</sup>
diphenolic acid	PLA	388 kW/m <sup>2</sup>	418 kW/m <sup>2</sup>
DNA	EVA	963 kW/m <sup>2</sup>	1588 kW/m <sup>2</sup>
lignin	PPE	405 kW/m <sup>2</sup>	1350 kW/m <sup>2</sup>
β-CD	EVA	254 kW/m <sup>2</sup>	1509 kW/m <sup>2</sup>

Einen Überblick über die Erforschung des Wärmeverhaltens und der Entflammbarkeit von Naturfasern wie Fasern auf Zellulose- und Proteinbasis und Polymeren sowie Verbundwerkstoffen, die mit diesen Materialien gefüllt sind, geben Kim et al. (2018). Sie betrachten auch umweltfreundliche Flammschutzmittelbehandlungen als Alternativen zu herkömmlichen Flammschutzmitteln inklusive ihrer Auswirkungen auf das Brandverhalten von Verbundwerkstoffen.

Ausgehend von den Problemen halogenhaltiger Flammschutzmittel werden die Anforderungen an die Nachhaltigkeit feuersicherer Materialien diskutiert und jüngste biobasierte Entwicklungen dargestellt (u. a. sojaölbasierte Polymere, Zellulose, Lignin, Phloroglukinol). Halogenfreie Flammschutzmittel sind polymerspezifisch, z.B. ist Melanin hervorragend für Polyurethanschaum, aber nicht für Polypropylen geeignet (Richard Hull 2016).

Intumeszierende Systeme stellen eine vielversprechende Möglichkeit dar, umweltfreundliche flammhemmende Materialien zu entwickeln (Duquesne und Futterer 2014).

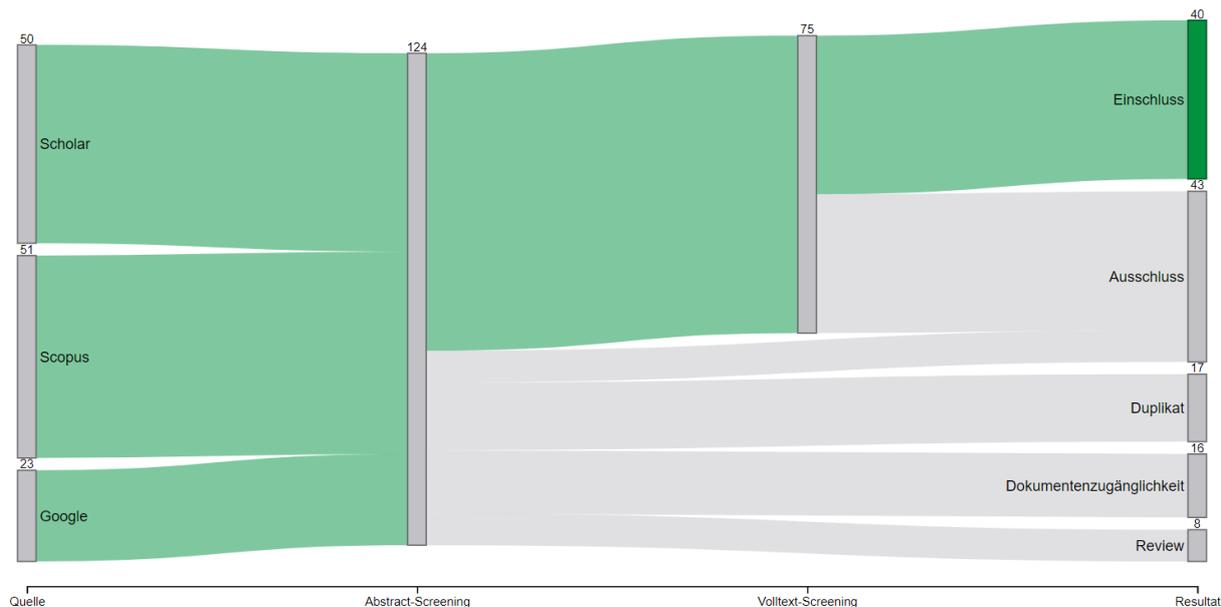
Speziell der Flammschutz von Polylactid (PLA) wird von Bourbigot und Fontaine (2010) untersucht.

#### Fazit:

Biobasierte Flammschutzmittel wurden in 105 Publikationen besprochen, die in die Datenextraktion eingeschlossen wurden, wovon Lignin und Phytinsäure in dem Biokunststoff PLA und in Epoxidharz am häufigsten diskutiert wurden. Es werden weiterhin unterschiedliche Biomassen auf ihre Eignung als Flammschutzmittel untersucht. Da Flammschutzmittel polymerspezifisch wirken, ist hier auch bei bereits identifizierten Flammschutzmitteln Forschung und Entwicklung nötig.

#### **5.2.2.5 Nukleierungsmittel**

Die Suche nach wissenschaftlichen Publikationen zu biobasierten Nukleierungsmitteln in drei Suchbereichen lieferte 124 Ergebnisse, von denen letztendlich 40 Publikationen in die Datenextraktion eingeschlossen wurden (Abbildung 32). Die Gesamtübersicht der eingeschlossenen Artikel (Tabelle 47) sowie eine Liste der Reviews (Tabelle 48) befinden sich im Annex.

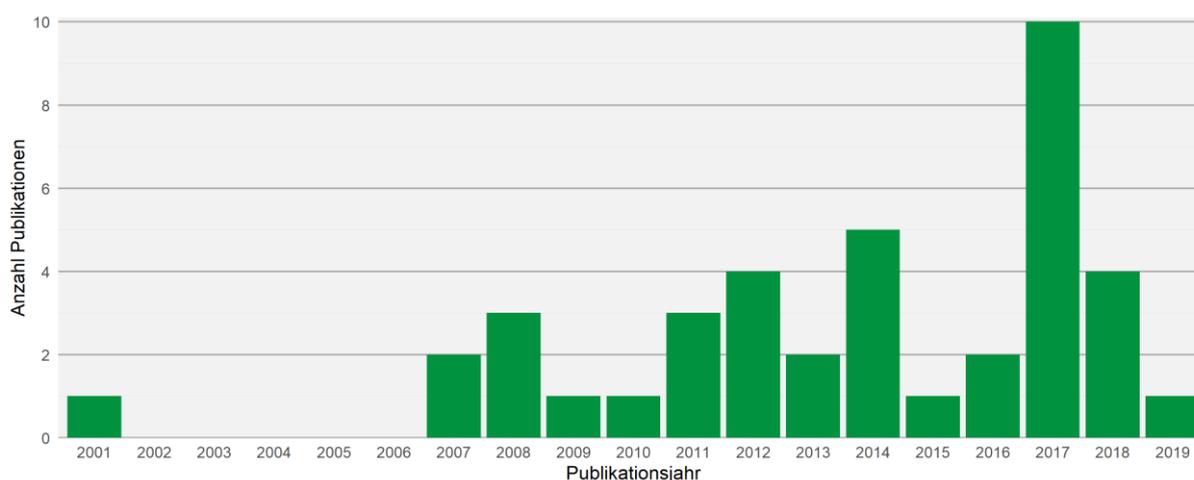


**Abbildung 32** Sankey-Diagramm der Suche nach Publikationen zu biobasierten Nukleierungsmitteln

Bis auf eine identifizierte Publikation aus dem Jahr 2001 sind alle eingeschlossenen Publikationen in den Jahren seit 2007 erschienen (Tabelle 23 & Abbildung 33).

**Tabelle 23** Jahr der Veröffentlichung der Publikationen zu biobasierten Nukleierungsmitteln

Jahr	Anzahl	Anteil	Jahr	Anzahl	Anteil	Jahr	Anzahl	Anteil
2001	1	2,50%	2008	3	7,50%	2015	1	2,50%
2002	0	0,00%	2009	1	2,50%	2016	2	5,00%
2003	0	0,00%	2010	1	2,50%	2017	10	25,00%
2004	0	0,00%	2011	3	7,50%	2018	4	10,00%
2005	0	0,00%	2012	4	10,00%	2019	1	2,50%
2006	0	0,00%	2013	2	5,00%			
2007	2	5,00%	2014	5	12,50%			



**Abbildung 33** Jahr der Veröffentlichung der Publikationen zu biobasierten Nukleierungsmitteln

Insgesamt wurden 30 biobasierte Nukleierungsmittel identifiziert (Tabelle 24), wobei diese in 11 Kategorien zusammengefasst werden konnten (Tabelle 25; Abbildung 34). Die einzigen Nukleierungsmittel, die mehr als zweimal genannt wurden, waren Lignin-beschichtete Cellulose-Nanokristalle und Polylactid (PDLA). Knapp zwei Drittel aller genannten Nukleierungsmittel können

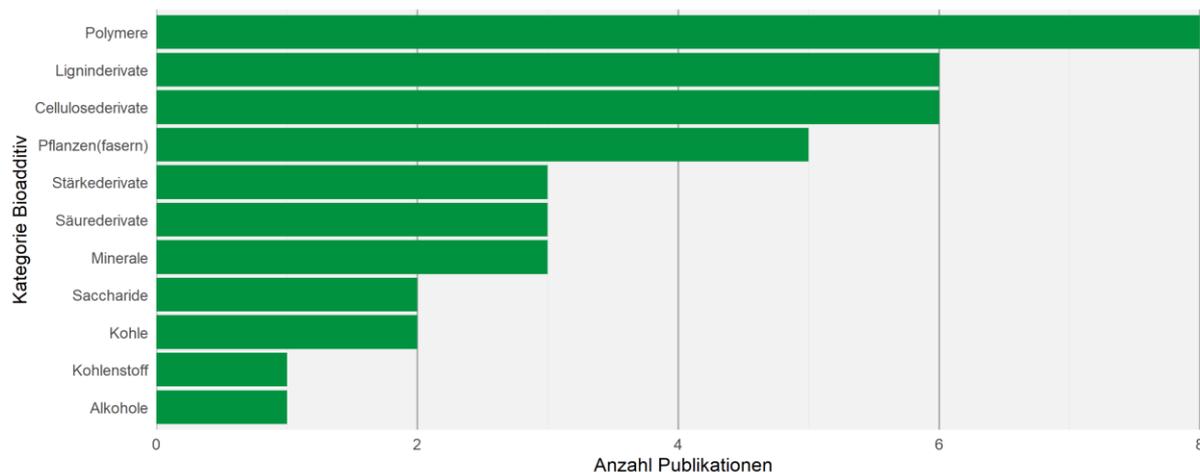
entweder den Polymeren, Cellulosederivaten, Ligninderivaten oder Pflanzen(fasern) zugeordnet werden.

**Tabelle 24** In den Publikationen identifizierte biobasierte Nukleierungsmittel.

Nukleierungsmittel	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Lignin-beschichtete Cellulose-Nanokristalle	4	10,00%	4	10,00%
Polylactid (PDLA)	4	10,00%	8	20,00%
Cellulose-Nanokristalle	2	5,00%	10	25,00%
Hibiskusfaser	2	5,00%	12	30,00%
Miscanthuskohle	2	5,00%	14	35,00%
Orthosäure	2	5,00%	16	40,00%
A-cyclodextrin ( $\alpha$ -CD)-polyester inclusion complex (IC)	1	2,50%	17	42,50%
Argannuss-Schale	1	2,50%	18	45,00%
Cellulose	1	2,50%	19	47,50%
Cellulose-Nanopartikel	1	2,50%	20	50,00%
Chemisch modifizierte thermoplastische Stärke	1	2,50%	21	52,50%
Cyclohexan-cis-1,2,3,5-trans-4,6-hexol	1	2,50%	22	55,00%
Diaminopropane montmorillonite nanoclay	1	2,50%	23	57,50%
Ethylenebishydroxystearamide	1	2,50%	24	60,00%
Holzmehl	1	2,50%	25	62,50%
Kohlenstoff-Nanosphären	1	2,50%	26	65,00%
Kork	1	2,50%	27	67,50%
Lignin	1	2,50%	28	70,00%
Lignocellulose	1	2,50%	29	72,50%
Modifizierte Stärke	1	2,50%	30	75,00%
Nanoclay	1	2,50%	31	77,50%
Polyamid	1	2,50%	32	80,00%
Polyamid 56	1	2,50%	33	82,50%
Polybutylenadipat-terephthalat	1	2,50%	34	85,00%
Polylactid gefropfte Cellulose-Nanokristalle	1	2,50%	35	87,50%
Sepolith / Magnesiumsilikat	1	2,50%	36	90,00%
Silylierte Cellulose-Nanokristalle	1	2,50%	37	92,50%
Thermoplastische Stärke	1	2,50%	38	95,00%
Verzweigtes Polylactid mit Rizinusölkern	1	2,50%	39	97,50%
Xylane	1	2,50%	40	100,00%

**Tabelle 25** In den Publikationen identifizierte biobasierte Nukleierungsmittel gegliedert nach Überkategorien

Kategorie	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Polymere	8	20,00%	8	20,00%
Cellulosederivate	6	15,00%	14	35,00%
Ligninderivate	6	15,00%	20	50,00%
Pflanzen(fasern)	5	12,50%	25	62,50%
Minerale	3	7,50%	28	70,00%
Säurederivate	3	7,50%	31	77,50%
Stärkederivate	3	7,50%	34	85,00%
Kohle	2	5,00%	36	90,00%
Saccharide	2	5,00%	38	95,00%
Alkohole	1	2,50%	39	97,50%
Kohlenstoff	1	2,50%	40	100,00%

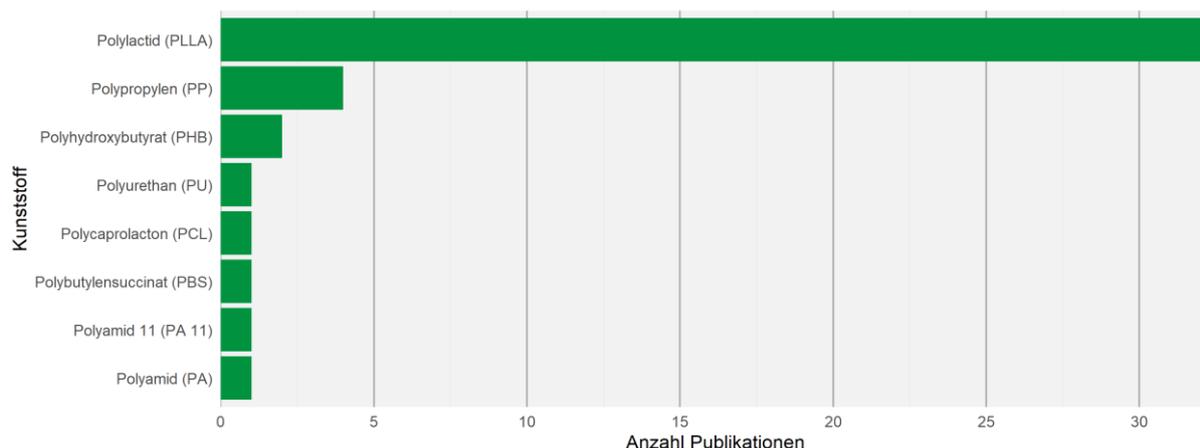


**Abbildung 34** Anzahl der in den Publikationen identifizierten biobasierten Nucleierungsmittel gegliedert nach Überkategorien

Insgesamt wurden 8 Kunststoffe identifiziert, denen die biobasierten Nucleierungsmittel jeweils zugesetzt wurden (Tabelle 26; Abbildung 35). Dabei sticht Polylactid (PLA) mit knapp dreiviertel aller Nennungen klar heraus.

**Tabelle 26** Häufigkeit der in den Nucleierungsmittel-Publikationen identifizierten Kunststoffe

Kunststoff	Anzahl	Anteil]	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Polylactid (PLA)	32	74,42%	32	74,42%
Polypropylen (PP)	4	9,30%	36	83,72%
Polyhydroxybutyrat (PHB)	2	4,65%	38	88,37%
Polyamid (PA)	1	2,33%	39	90,70%
Polyamid 11 (PA 11)	1	2,33%	40	93,02%
Polybutylensuccinat (PBS)	1	2,33%	41	95,35%
Polycaprolacton (PCL)	1	2,33%	42	97,67%
Polyurethan (PU)	1	2,33%	43	100,00%

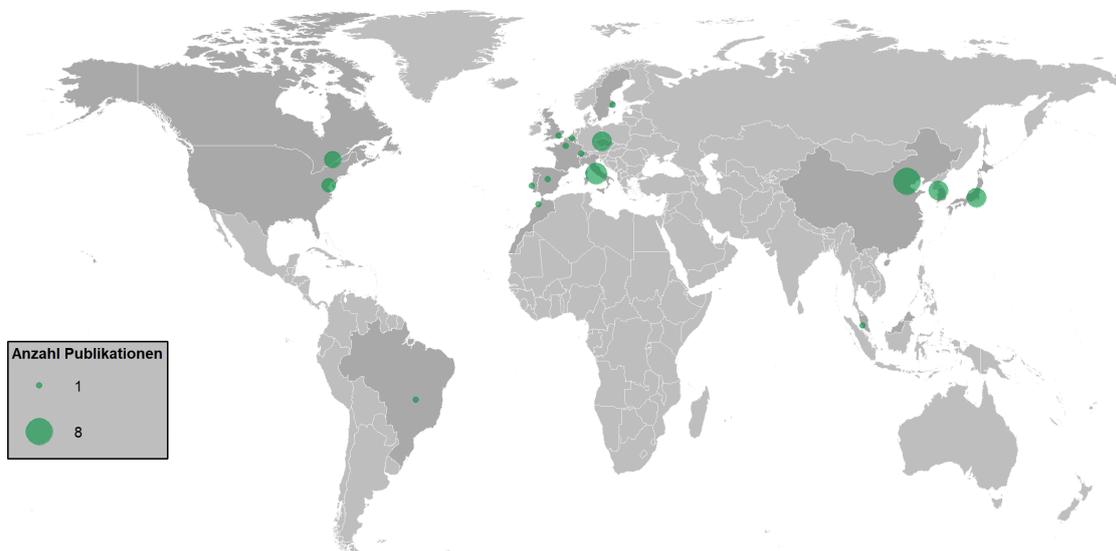


**Abbildung 35** Anzahl der in den Nucleierungsmittel-Publikationen identifizierten Kunststoffe

Knapp ein Drittel aller Publikationen stammen entweder aus China oder Italien (Tabelle 27; Abbildung 36).

**Tabelle 27** Ursprungsland der Publikation zu biobasierten Nukleierungsmitteln. Je Publikation wurde nur die Zugehörigkeit des Erstautors berücksichtigt.

Land	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
China	8	20,00%	8	20,00%
Italien	5	12,50%	13	32,50%
Tschechische Republik	4	10,00%	17	42,50%
Japan	4	10,00%	21	52,50%
Korea, Republik von	4	10,00%	25	62,50%
Kanada	3	7,50%	28	70,00%
Vereinigte Staaten	2	5,00%	30	75,00%
Belgien	1	2,50%	31	77,50%
Brasilien	1	2,50%	32	80,00%
Frankreich	1	2,50%	33	82,50%
Malaysia	1	2,50%	34	85,00%
Marokko	1	2,50%	35	87,50%
Portugal	1	2,50%	36	90,00%
Spanien	1	2,50%	37	92,50%
Schweden	1	2,50%	38	95,00%
Schweiz	1	2,50%	39	97,50%
Großbritannien	1	2,50%	40	100,00%



**Abbildung 36** Ursprungsland der Publikation zu biobasierten Nukleierungsmitteln. Je Publikation wurde nur die Zugehörigkeit des Erstautors berücksichtigt. Die Größe der Kreise ist proportional zur Anzahl der Publikationen. Der Mittelpunkt der Kreise liegt jeweils auf den Koordinaten der Landeshauptstadt.

Die wenigen zu diesem Thema identifizierten Reviews (8) beschäftigen sich vorrangig mit dem Kristallisationsverhalten von PLA:

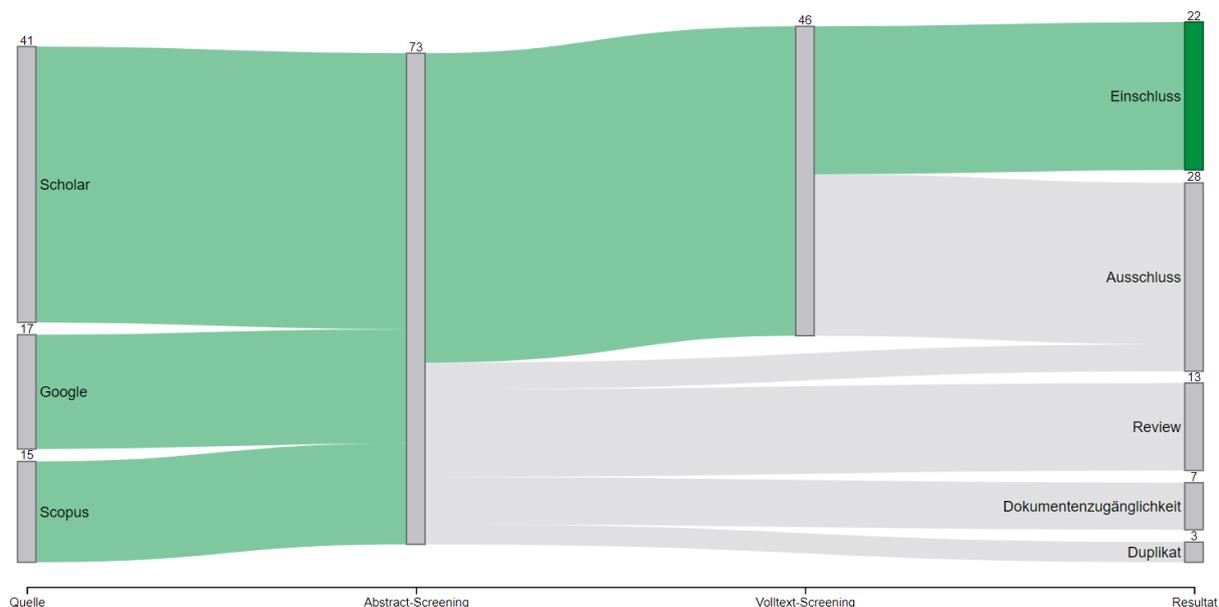
Jiang et al. (2016) geben einen Überblick über den Forschungsfortschritt bei der Kristallisationsmodifizierung von PLA, insbesondere durch Zugabe von Nukleierungsmitteln und Stereokomplexierung. Auch Nagarajan et al. (2016) beschäftigen sich mit dem Kristallisationsverhalten von PLA. Peelman et al. (2015) legen verschiedene Techniken zur Überwindung der schlechten Wärmebeständigkeit von Biopolymeren dar. Sie schlussfolgern, dass die Verwendung von Nukleierungsmitteln (in Kombination mit der Verwendung von Weichmachern) und eine hohe Formtemperatur, um eine langsamere Abkühlrate zu induzieren, die beste Lösung zu sein scheint, um eine höhere Kristallinität und damit eine höhere Hitzebeständigkeit des verarbeiteten Materials zu erhalten. Speziell für PLA ist Stereokomplexierung eine vielversprechende Technik, um hitzeresistente Produkte zu erzeugen. Das bestätigt auch Tsuji (2016): PLA Stereokomplex kann als Nukleierungsmittel für das biobasierte Polymer PLA fungieren und dadurch die Wärmebeständigkeit von PLA-basierten Materialien verbessern.

**Fazit:**

Von biobasierten Nukleierungsmitteln wurde in 40 Publikationen berichtet, die in die Datenextraktion eingeschlossen wurden, wobei häufig cellulose-, lignin- und holzfaserhaltige Materialien diskutiert wurden. Am häufigsten wurde die Anwendung in PLA beschrieben. Für dieses Polymer besteht großer Forschungsbedarf hinsichtlich der Kristallisation, um beispielsweise eine höhere Wärmeformbeständigkeit zu erzielen.

**5.2.2.6 Schlagzähmodifikatoren**

Die Suche nach wissenschaftlichen Publikationen zu biobasierten Schlagzähmodifikatoren in drei Suchbereichen lieferte 73 Ergebnisse, von denen letztendlich 22 Publikationen in die Datenextraktion eingeschlossen wurden (Abbildung 37). Die Gesamtübersicht der eingeschlossenen Artikel (Tabelle 49) sowie eine Liste der Reviews (Tabelle 50) befinden sich im Annex.

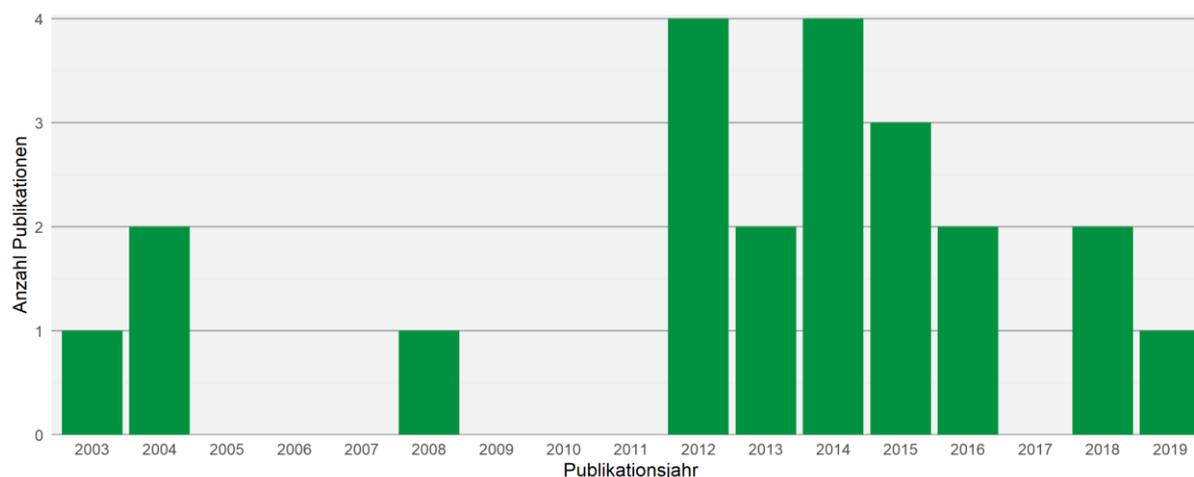


**Abbildung 37** Sankey-Diagramm der Suche nach Publikationen zu biobasierten Schlagzähmodifikatoren

Die eingeschlossenen Publikationen sind größtenteils in den Jahren seit 2012 erschienen. Die erste identifizierte Publikation stammt aus dem Jahr 2003 (Tabelle 28; Abbildung 38).

**Tabelle 28** Jahr der Veröffentlichung der Publikationen zu biobasierten Schlagzähmodifikatoren

Jahr	Anzahl	Anteil	Jahr	Anzahl	Anteil	Jahr	Anzahl	Anteil
2003	1	4,55%	2009	0	0,00%	2015	3	13,64%
2004	2	9,09%	2010	0	0,00%	2016	2	9,09%
2005	0	0,00%	2011	0	0,00%	2017	0	0,00%
2006	0	0,00%	2012	4	18,18%	2018	2	9,09%
2007	0	0,00%	2013	2	9,09%	2019	1	4,55%
2008	1	4,55%	2014	4	18,18%			



**Abbildung 38** Jahr der Veröffentlichung der Publikationen zu biobasierten Schlagzähmodifikatoren

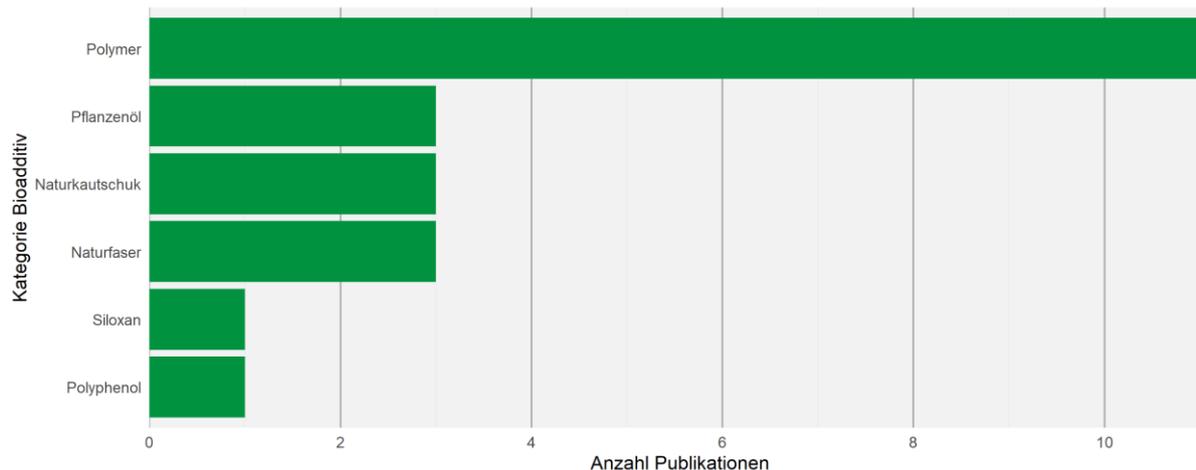
Insgesamt wurden 20 biobasierte Schlagzähmodifikatoren identifiziert (Tabelle 29), wobei diese in 6 Kategorien zusammengefasst werden konnten (Tabelle 30; Abbildung 39). Die einzigen Schlagzähmodifikatoren, die zweimal genannt wurden waren Epoxidiertes Sojabohnenöl, Naturkautschuk, Polyhydroxyalkanoat und Polyhydroxybutyrat, sodass sie zusammengenommen ein Drittel aller genannten Schlagzähmodifikatoren ausmachen. Außerdem können die Hälfte aller genannten Schlagzähmodifikatoren den Polymeren zugeordnet werden.

**Tabelle 29** Häufigkeit der in den Publikationen identifizierten biobasierten Schlagzähmodifikatoren

Schlagzähmodifikator	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Epoxidiertes Sojabohnenöl	2	8,33%	2	8,33%
Naturkautschuk	2	8,33%	4	16,67%
Polyhydroxyalkanoat	2	8,33%	6	25,00%
Polyhydroxybutyrat	2	8,33%	8	33,33%
(epoxidierter) Naturkautschuk	1	4,17%	9	37,50%
Aliphatisches Polyesterelastomer	1	4,17%	10	41,67%
Epoxidiertes Leinsamenöl	1	4,17%	11	45,83%
Eugenolhaltige Methyl- & Phenylsiloxane	1	4,17%	12	50,00%
Hanf Fasern	1	4,17%	13	54,17%
Jute Fasern	1	4,17%	14	58,33%
Jutegarn	1	4,17%	15	62,50%
Phenylsiloxane	1	4,17%	16	66,67%
Polybutylensuccinat	1	4,17%	17	70,83%
Polybutylensuccinat-co-butylene furandicarboxylat	1	4,17%	18	75,00%
Polycaprolactonvalerolacton (PCLVL)	1	4,17%	19	79,17%
Polyesteramide	1	4,17%	20	83,33%
Poly lactid-co-10-hydroxydecanoat	1	4,17%	21	87,50%
Poly lactid (PDLA)/Thermoplastische Polyurethane	1	4,17%	22	91,67%
Polypropylensuccinat	1	4,17%	23	95,83%
Tanninsäure	1	4,17%	24	100,00%

**Tabelle 30** Häufigkeit der in den Publikationen identifizierten biobasierten Schlagzähmodifikatoren gegliedert nach Überkategorien

Kategorie	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Polymer	11	50,00%	11	50,00%
Naturfaser	3	13,64%	14	63,64%
Naturkautschuk	3	13,64%	17	77,27%
Pflanzenöl	3	13,64%	20	90,91%
Polyphenol	1	4,55%	21	95,45%
Siloxan	1	4,55%	22	100,00%

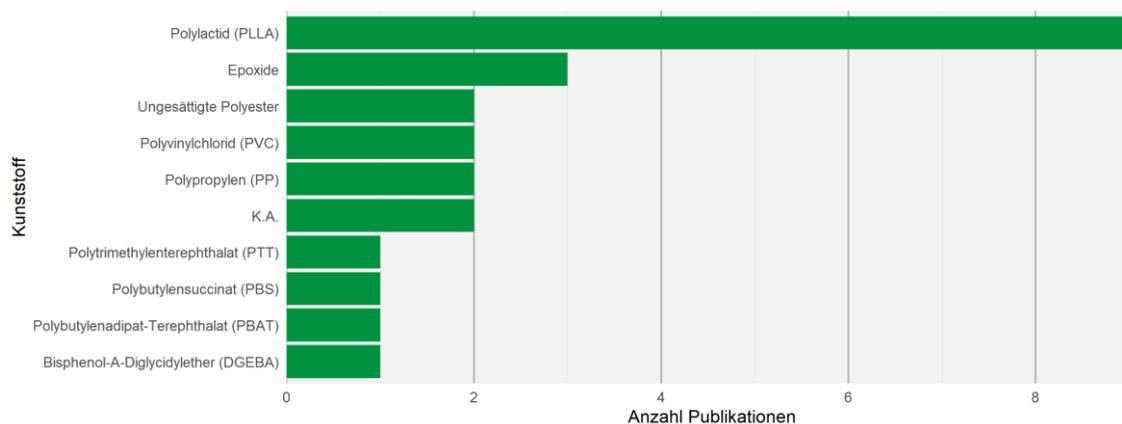


**Abbildung 39** Anzahl der in den Publikationen identifizierten biobasierten Schlagzähmodifikatoren gegliedert nach Überkategorien

Insgesamt wurden 9 Kunststoffe identifiziert, denen die biobasierten Schlagzähmodifikatoren jeweils zugesetzt wurden (Tabelle 31; Abbildung 40). Dabei macht Polylactid ein Drittel aller Nennungen aus. In zwei Fällen wurde in der Publikation keine Angabe dazu gemacht in Kombination mit welchem Kunststoff der jeweilige biobasierte Schlagzähmodifikator eingesetzt wurde.

**Tabelle 31** Häufigkeit der in den Schlagzähmodifikatoren-Publikationen identifizierten Kunststoffe

Kunststoff	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
Polylactid (PLLA)	9	37,50%	9	37,50%
Epoxide	3	12,50%	12	50,00%
K.A.	2	8,33%	14	58,33%
Polypropylen (PP)	2	8,33%	16	66,67%
Polyvinylchlorid (PVC)	2	8,33%	18	75,00%
Ungesättigte Polyester	2	8,33%	20	83,33%
Bisphenol-A-Diglycidylether (DGEBA)	1	4,17%	21	87,50%
Polybutylenadipat-Terephthalat (PBAT)	1	4,17%	22	91,67%
Polybutylensuccinat (PBS)	1	4,17%	23	95,83%
Polytrimethylenterephthalat (PTT)	1	4,17%	24	100,00%



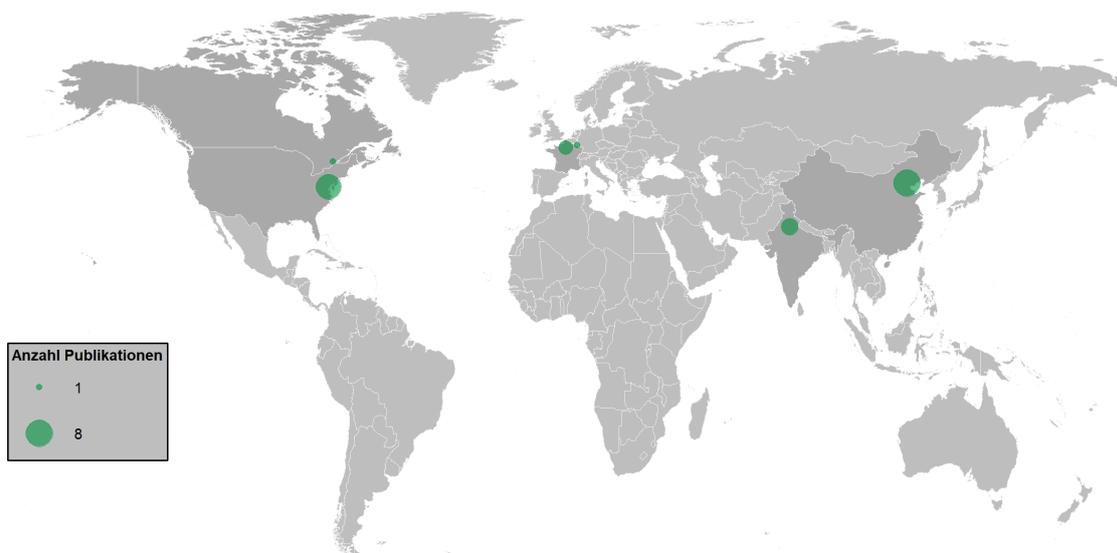
Anmerkung: In dieser Abbildung wurden nur Kunststoffe mit mind. 1 Publikationen eingeschlossen. Demnach fehlen insgesamt 0 Nennungen.

**Abbildung 40** Anzahl der in den Schlagzähmodifikatoren-Publikationen identifizierten Kunststoffe

Gut zwei Drittel aller Publikationen stammen entweder aus den USA oder China (Tabelle 32; Abbildung 41).

**Tabelle 32** Ursprungsland der Publikation zu biobasierten Schlagzähmodifikatoren. Je Publikation wurde nur die Zugehörigkeit des Erstautors berücksichtigt.

Land	Anzahl	Anteil	Kumulierte Anzahl	Kumulierter Anteil
China	8	36,36%	8	36,36%
Vereinigte Staaten	7	31,82%	15	68,18%
Indien	3	13,64%	18	81,82%
Frankreich	2	9,09%	20	90,91%
Kanada	1	4,55%	21	95,45%
Luxemburg	1	4,55%	22	100,00%



**Abbildung 41** Ursprungsland der Publikation zu biobasierten Schlagzähmodifikatoren. Je Publikation wurde nur die Zugehörigkeit des Erstautors berücksichtigt. Die Größe der Kreise ist proportional zur Anzahl der Publikationen. Der Mittelpunkt der Kreise liegt jeweils auf den Koordinaten der Landeshauptstadt.

Es wurden keine Reviews identifiziert, die sich spezifisch mit biobasierten Schlagzähmodifikatoren beschäftigen.

#### Fazit:

Über biobasierte Schlagzähmodifikatoren wurde in 22 Publikationen berichtet, die in die Datenextraktion eingeschlossen wurden, wobei Schlagzähmodifikatoren meist selbst Polymere sind. Am häufigsten finden Schlagzähmodifikatoren Einsatz in PLA.

## 6. Ergebnisse

### 6.1 Marktzahlen zu biobasierten Additiven

Die weltweite Kapazität zur Produktion von Kunststoffen betrug im Jahr 2016 etwa 335 Mio. t (Tabelle 33).

Die weltweite Nachfrage nach Kunststoff-Additiven lag im Jahr 2016 bei etwa 15 Mio. t (Tabelle 35).

In Deutschland betrug der Kunststoffverbrauch im Jahr 2016 etwa 12 Mio.t (Tabelle 34) und der Verbrauch an Kunststoff-Additiven etwa 1,34 Mio. t (Tabelle 35).

**Tabelle 33** Produktionskapazitäten für Kunststoffe (in 1.000 t)

Bezug	Welt	Welt	Europa	Europa	Deutschland	Deutschland
Jahr	2016	2017	2016	2017	2015	2017
Quelle	Plastics Europe	nova	Plastics Europe	nova	BKV Consulting	BKV Consulting
<b>Total</b>	<b>335.000</b>	<b>348.000</b>	<b>60.000</b>	<b>65.000</b>	<b>10.150</b>	<b>11.015</b>
PA					615	670
PE					2.800	2.970
PP					2.000	2.250
PS					535	590
PVC					1.550	1.640
andere					2.650	2.895

**Tabelle 34** Verbrauch von Kunststoffen (in 1.000 t)

Bezug	Europa	Deutschland	Deutschland
Jahr	2016	2015	2017
Quelle	Plastics Europe	BKV Consulting	BKV Consulting
<b>Total</b>	<b>49.900</b>	<b>12.226</b>	<b>12.060</b>
Verpackung	19.910	4.250	3.150
Bau	9.830	2.740	2.650
Fahrzeuge	4.990	1.260	1.100
Elektro/ Elektronik	3.094	725	950
Haushaltswaren	2.096	355	
Möbel		475	
Landwirtschaft	1.647	375	
Medizin		280	
Sonstiges	8.333	1.600	3.980

**Tabelle 35** Verbrauch von Kunststoff-Additiven (in 1.000 t)

Bezug	Welt	Welt	Welt	Welt	Europa	Europa	Europa	Europa	Deutschland	Deutschland
Jahr	2017	2016	2010	2017	2017	2011	2010	2017	2016	2016
Quelle	Townsend	Allied Res.	Kopitzky	European Plasticisers	Townsend	Schiller	Kopitzky	European Plasticisers	Ceresana	Schiller
<b>Total</b>		<b>14.846</b>							<b>1.340</b>	
Füllstoffe									710	
Weichmacher	7.982		6.000	7.500	1.099		1.000	1.350	279	
Pigmente									117	
Flammschutzmittel									62	
Stabilisatoren	1.126				163	219			60	49
Schlagzähmodifikatoren	1.250				192				30	
Gleitmittel	1.217				243				22	
Antioxidantien									14	
Treibmittel									18	
Sonstige									25	

Die Produktionskapazitäten für neuartige Biokunststoffe betragen weltweit etwa 2 Mio. t (Tabelle 36). Das ist ein Anteil an den Gesamtproduktionskapazitäten für Kunststoffe von unter 1%.

**Tabelle 36** Produktionskapazitäten für Bio-Kunststoffe (in 1.000 t)

Bezug	Welt	Welt	Welt	Deutschland
Jahr	2016	2017	2016	2011
Quelle	IfBB	European Bioplastics	FNR	FNR
<b>Total</b>	<b>2.048</b>	<b>2.050</b>	<b>2.039</b>	<b>79</b>
nicht abbaubar	1.291	1.171	1.177	
abbaubar	757	879	862	

Der weltweite Verbrauch von Bio-Kunststoffen betrug etwas mehr als 2 Mio. t (Tabelle 37).

**Tabelle 37** Verbrauch von Bio-Kunststoffen (in 1.000 t)

Bezug	Welt	Welt
Jahr	2016	2017
Quelle	IfBB	European Bioplastics
<b>Total</b>		
Verpackung	1.430	1.189
Bau	21	82
Fahrzeuge	116	144
Elektro/ Elektronik	18	41
Haushaltswaren	139	144
Möbel		
Landwirtschaft	114	103
Medizin		
Sonstiges	201	349

Zum Verbrauch von Bio-Kunststoff-Additiven gibt es Schätzungen (Tabelle 38) für Weichmacher und Stabilisatoren.

**Tabelle 38** Verbrauch von Bio-Kunststoff-Additiven (in 1.000 t)

Bezug	Europa	Europa	Deutschland
Jahr	2016	2016	2016
Quelle	Schiller	European Plasticisers	Schiller
<b>Total</b>			
Füllstoffe			
Weichmacher	45*	135**	10*
Pigmente			
Flammschutzmittel			
Stabilisatoren	48		13
Schlagzähmodifikatoren			
Gleitmittel			
Antioxidantien			
Treibmittel			
Sonstige			

\* bezieht sich nur auf Einsatzmenge epoxidierten Pflanzenöle

\*\* epoxidierte Pflanzenöle: 121.000 t + Citrate 13.500 t

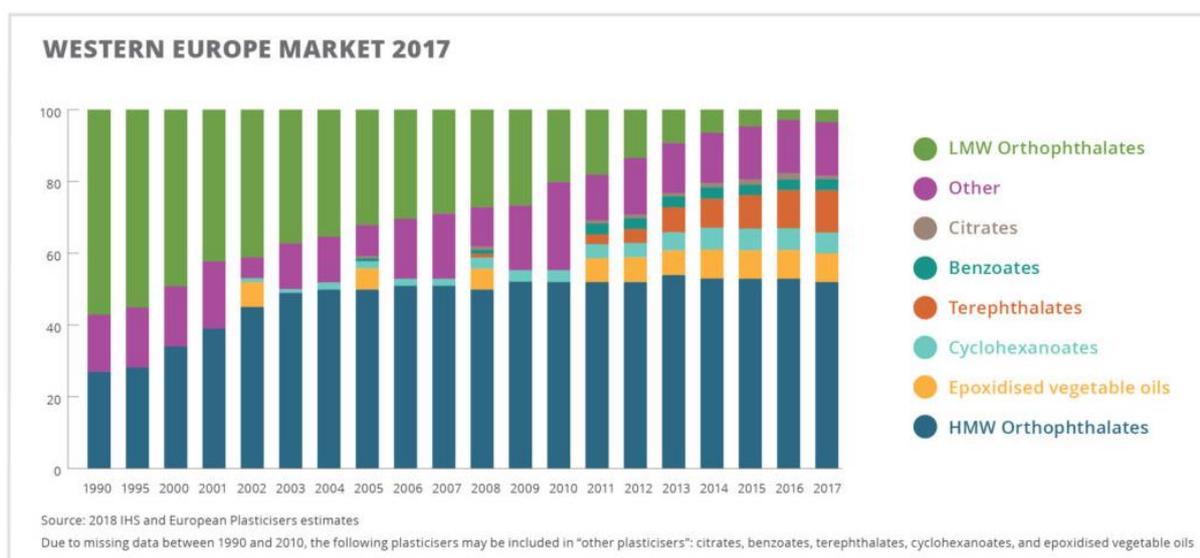
Diese beruhen auf folgenden Überlegungen:

Schiller hat den Verbrauch auf der Basis der Produktion von epoxidierten Pflanzenölen für den Einsatz als Weichmacher in PVC hergeleitet (siehe Abschnitt 5.1.3).

Die Zahlen von European Plasicisers basieren auf der Annahme, dass ca. 80-90 % der Weichmacher in (Weich-) PVC-Anwendungen eingesetzt werden. Phthalate bilden mit 85 % den Großteil der Weichmacher. Dabei werden diese eingeteilt in hoch- und niedermolekulare Orthophthalate, Terephthalate und andere Weichmacher (Aliphate, Cyclohexanoate, Trimelitate, Benzoate und andere). Die von European Plasicisers dargelegte europäische Marktentwicklung (Abbildung 42) zeigt für 2016 die in Tabelle 39 dargestellten Marktanteile. Werden nur die biobasierten Weichmacher-Typen betrachtet (epoxidierende Pflanzenöle und Citrate), so beläuft sich die in Europa im Jahr 2016 produzierte Menge auf ca. 135 Tsd. t (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)

**Tabelle 39** Marktanteile unterschiedlicher Weichmacher-Typen am europäischen Gesamtverbrauch von 1.350 Tsd. t (Quelle: European Plasicisers)

Typ	HMW	Epox. Pflanzenöle	Cyclohexanoate	Terephthalate	Benzoate	Citrate	andere	LMW
<b>Anteil</b>	51%	9%	6%	12%	3%	1%	14%	4%
<b>Menge (in 1.000 t)</b>	688,5	121,5	81	162	40,5	13,5	189	54



**Abbildung 42** Entwicklung der prozentualen Marktanteile unterschiedlicher Weichmacher-Typen am europäischen Gesamtverbrauch (Quelle: European Plasicisers)

## 6.2 Aktueller Einsatz biobasierter Additive

Ein Teil der eingesetzten Additive ist (und war) biobasiert: u.a. auf Basis von Stearinsäure, Citraten oder epoxidierten Pflanzenölen.

Für viele Additive wie Antiblock, Antifogging, Antistatika, Gleitmittel, Säurefänger sowie Schmier- und Verarbeitungshilfsstoffe werden Stoffe verwendet, die sehr häufig auf Fettsäuren basieren (Metallseifen, Fettsäureamide, Glycerinester). Die Rohstoffquellen für die Herstellung dieser Materialien sind Pflanzen oder tierische Fette und sind daher biobasiert.

In Deutschland und in Europa wurden im Jahr 2016 Stabilisatoren verarbeitet, die zu etwa einem Viertel auf nachwachsenden Rohstoffen basierten.

Für PVC werden etwa 10% biobasierte Weichmacher in Form von Citraten oder epoxidierten Pflanzenölen verwendet.

Unter den endothermen chemischen Teibmitteln finden häufig Zitronensäure und Soda Anwendung.

Bei Rheologie-Modifizieren handelt es sich teilweise um biobasierte Fettsäureester.

Für die Anwendung als Biozid steht eine Vielfalt biogener Stoffe zur Verfügung.

Ein stickstoffhaltiges, nicht halogeniertes Flammschutzmittel, das durch die Trimerisierung von Harnstoff dargestellt werden kann, ist Melamin. Harnstoff ist eine großtechnisch hergestellte Chemikalie, deren Ausgangsstoffe teilweise natürliche Rohstoffe sind.

Einige Nukleierungsmittel organischer Natur zählen zu den Sorbitolacetalen, wobei das Sorbitol-Rückgrat aus Mais- oder Weizenstärke gewonnen werden kann.

Auf dem Markt sind derzeit bereits wenige biobasierte Farbmittel vertreten, die aber nicht die notwendige thermische Stabilität bei den üblichen Verarbeitungstemperaturen von thermoplastischen Kunststoffen haben.

## 6.3 Aktuelle Forschung und Entwicklung

In einer systematischen Literaturrecherche wurden zu fünf Additiv-Typen (Weichmacher, Biozide, Flammschutzmittel, Nukleierungsmittel, Schlagzähmodifikatoren) 404 Studien und 100 Reviews zu zum Einsatz und Potential biobasierter Additive in Kunststoffen identifiziert. Pflanzenbasierte Additive (u.a. aus Pflanzenölen, natürlichen Polymeren, Polysacchariden, Citraten, Lignin) spielen in der Forschung zu biobasierten Kunststoff-Additiven eine große Rolle. Ein Großteil der identifizierten Literatur beschäftigt sich mit dem Einsatz biobasierter Additive im Biokunststoffen (insbesondere PLA).

Zur Verbesserung von Performance und Eigenschaften biobasierter Polymere werden Glycerin, Zuckerderivate und Pflanzenöle untersucht. Biobasierte Weichmacher zeigen mit konventionellen Weichmachern vergleichbare Eigenschaften, viele Entwicklungen und Überprüfungen stehen jedoch noch aus, wie etwa die biologische Toxizität.

Die biobasierten Biozide Chitosan, Extrakte/Öle aus Zimt, Caracrol, Nisin und Thymol. werden im Einsatz in PLA, Stärke und Chitosan analysiert. Im Verpackungsbereich werden biobasierte Materialien diskutiert, die insbesondere für den Kontakt mit Lebensmitteln geeignet sein müssen.

Als biobasierte Flammschutzmittel in dem Biokunststoff PLA und in Epoxidharz werden am häufigsten Lignin und Phytinsäure diskutiert. Da Flammschutzmittel polymerspezifisch wirken, ist hier auch bei bereits identifizierten Flammschutzmitteln Forschung und Entwicklung nötig.

Als biobasierten Nukleierungsmitteln werden in den Studien häufig cellulose-, lignin- und holzfaserhaltige Materialien untersucht, am häufigsten deren Anwendung in PLA. Für dieses Polymer besteht großer Forschungsbedarf hinsichtlich der Kristallisation, um beispielsweise eine höhere Wärmeformbeständigkeit zu erzielen.

Biobasierte Schlagzähmodifikatoren sind meist selbst Polymere. Auch hier wurde am häufigsten deren Einsatz in PLA erforscht.

## 7. Handlungsempfehlungen

### 7.1 Priorisierung von Entwicklungen biobasierter Kunststoff-Additive

Die unter Abschnitt 3.2.2 identifizierten Additiv-Typen können unter Berücksichtigung ähnlicher Definitionen in die in Tabelle 40 aufgeführten Kategorien eingeteilt werden. Diese Kategorien wurden im Hinblick auf den sinnvollen Einsatz von biobasierten Additiven und einen anwendungsnahen Entwicklungsbedarf gewichtet (Relevanz gekennzeichnet durch +(hoch) und -(niedrig)). Die Priorisierung erfolgte anhand zweier Kriterien: die angenommene grundsätzliche Machbarkeit einer biobasierten Substitution aufgrund des chemischen Aufbaus und die Einsatzhäufigkeit bzw. der angenommene Bedarf der verschiedenen Additiv-Typen.

**Tabelle 40** Kategorisierung von Additiv-Typen mit Priorisierung von zur Substitution durch biobasierte Rohstoffe geeigneter Additiv-Typen

Oberbegriff	Kategorie	Relevanz
Oberflächenaktive Stoffe	Antiblock-Additive	-
	Antifogging-Additive / Antitau-Additive	-
	Antistatika	-
	Haftvermittler	-
	Rheologie-Modifizierer	-
	Schmierstoffe	-
	Trennmittel / Gleitmittel	-
Stabilisatoren	Antioxidantien / UV- und Thermostabilisatoren	-
	Säurefänger	-
Verarbeitungshilfsmittel	Verarbeitungshilfsstoffe	-
	Weichmacher	+
Funktionelle Additive*	Biozide / Biozide Wirkstoffe	+
	Farbmittel / Pigmente	-
	Flammschutzmittel	+
	Netz- und Dispergieradditive	-
	Nukleierungsmittel	+
	Quervernetzer	-
	Schlagzähmodifikatoren	+
	Schleppmittel	-
	Treibmittel	-

\* andere Begriffe: Funktionsadditive, Feature-Additive, Gebrauch-/ Anwendungszusatzstoffe

Für viele Additive wie **Antiblock**, **Antifogging**, **Antistatika**, **Gleitmittel**, **Säurefänger** sowie **Schmier- und Verarbeitungshilfsstoffe** werden Stoffe verwendet, die sehr häufig auf Fettsäuren basieren (Metallseifen, Fettsäureamide, Glycerinester). Die Rohstoffquellen für die Herstellung dieser Materialien sind Pflanzen oder tierische Fette und sind daher biobasiert. Der Bereich dieser Additiv-Gruppen bietet bereits eine Vielzahl an unterschiedlichen biobasierten Produkten, weshalb der Entwicklungsbedarf neuer biobasierter Alternativen niedrig eingestuft wird. (niedrig)

**Weichmacher** sind überwiegend in PVC-Materialien verarbeitet, finden aber auch in anderen Kunststoffen Anwendung. Der Bedarf an Weichmachern ist relativ hoch, da im Jahr 2016 allein in Deutschland etwa 279 Tsd. T verarbeitet wurden. Einen Großteil der Weichmacher stellen Phthalate dar, die aus dem fossilbasierten Xylol hergestellt werden. Phthalate stehen in der Kritik gesundheitsgefährdend zu sein und kanzerogene Eigenschaften zu besitzen. Unter den Weichmachern findet sich aber auch eine Vielzahl an biogenen Stoffen. Sojabohnenöl, Palmöl oder Leinsamenöl werden von zahlreichen Herstellern als Rohstoff zur Herstellung von Weichmachern verwendet. In der Vergangenheit gab es bereits Versuche, biobasierte Weichmacher zu etablieren. Daher scheint eine Substitution der Phthalate durch biobasierte Alternativen realistisch, da der Markt viele Substituenten bietet und bereits Forschungsaktivitäten von Seiten der Industrie und von Forschungsinstituten stattgefunden haben. Der Entwicklungsbedarf wird entsprechend als hoch eingestuft. (hoch)

**Schlagzähmodifikatoren** sind meist selbst polymere Werkstoffe. In diesen sogenannten Terpolymeren ist häufig Acrylsäure verarbeitet. Bisher wird Acrylsäure aus dem petrobasierten Rohstoff Propen hergestellt. Die Universität Erlangen-Nürnberg entwickelte ein Verfahren (NADA – Nucleophile Assisted Dehydration to Acrylates) bei dem im Labormaßstab Acrylsäure ausgehend von Milchsäure hergestellt werden kann. Hier scheint eine Substitution des Propens realistisch, weshalb der Entwicklungsbedarf als hoch eingestuft wird. (hoch)

**Treibmittel** können stickstoffhaltige Mittel wie Azoverbindungen und Hydrazine oder aber CO<sub>2</sub>-bildende Stoffe wie Carbonate sein. Ziel ist es bei einer gewünschten Temperatur eine Zersetzung des Treibmittels zu induzieren, sodass ein Gas entsteht, das den Schaum bilden kann.

Unter den endothermen chemischen Treibmitteln finden Zitronensäure und Soda häufig Anwendung, die beide biologischen Ursprungs sind. Weiterhin gingen aus dem branchenübergreifenden Netzwerk „Kunststoff-Cluster“ Untersuchungen zur Verwendung von Gips als Basis für chemische Treibmittel hervor, in denen herausgestellt wurde, dass sich Gips grundsätzlich als Basis für chemische Treibmittel eignet. Für exotherme Treibmittel sind bislang weder biobasierte Alternativen noch Forschungsvorhaben in diese Richtung bekannt. Aufgrund der chemischen Struktur exothermer Treibmittel, scheint eine biobasierte Alternative sehr unrealistisch. Zudem ist der Verbrauch chemischer Treibmittel gegenüber Weichmachern oder Flammschutzmitteln relativ gering. Der Entwicklungsbedarf wird daher als niedrig eingestuft. (niedrig)

Hauptbestandteil der **Haftvermittler** ist meist Maleinsäureanhydrid, das aus dem petrobasierten n-Butan hergestellt wird. DuPont entwickelte biobasierte Haftvermittler, womit die klassische petrobasierte Produktreihe Fusabond um biobasierte Produkte erweitert wurde. Einsatzgebiete sind WPC-Composites, PE/Stärke-Compounds und glasfaserverstärktes PE. Der Verbrauch von Haftvermittlern gegenüber Weichmachern oder Flammschutzmitteln ist relativ gering. Der Entwicklungsbedarf wird daher als niedrig eingestuft. (niedrig)

Bei **Rheologie-Modifizierern** handelt es sich sowohl um polymere Werkstoffe als auch um biobasierte Fettsäureester. Diese Additive stellen vergleichsweise einen relativ geringen Anteil der Gesamtmenge an verwendeten Additiven dar, weshalb der Entwicklungsbedarf daher als niedrig eingestuft. (niedrig)

Unter den zahlreichen konventionellen **Bioziden** wurden im Zuge nachhaltiger Entwicklungen von verschiedenen Forscherteams biobasierte Alternativen untersucht. Dabei wurden Chitosan, antimikrobielle Peptide (Poly-Lysin) oder Enzyme (Peroxidasen) auf ihre Eignung als Biozide geprüft. Die Verwendung biobasierter Rohstoffe liefert den Vorteil, dass komplexe Molekülstrukturen bereits vorliegen und diese ggf. modifiziert werden können. Konventionelle Biozide besitzen molekulare Strukturen, die aus teilweise sehr giftigen Chemikalien über aufwändige Syntheserouten hergestellt werden, bei denen hohe Sicherheitsstandards erfüllt werden müssen. Ausgehend von der Vielfalt biogener Stoffe und ihren unterschiedlichen molekularen Strukturen, wird die Entwicklung biobasierter Biozide als realistisch eingeschätzt, weshalb der Entwicklungsbedarf als hoch eingestuft wird. (hoch)

**Flammschutzmittel** enthielten in der Vergangenheit häufig Halogene wie Brom, wobei der Einsatz bromhaltiger Flammschutzmittel heutzutage verboten ist. Unter den organischen Flammschutzmitteln stellt Melamin ein stickstoffhaltiges, nicht halogeniertes Flammschutzmittel dar, das durch die Trimerisierung von Harnstoff dargestellt werden kann. Harnstoff wiederum ist eine großtechnisch hergestellte Chemikalie, deren Ausgangsstoffe teilweise natürliche Rohstoffe sind. Das Einsatzgebiet für stickstoffhaltige Flammschutzmittel liegt hauptsächlich bei den Polyamiden und den Polyurethanen. Neben den konventionellen Flammschutzmitteln werden viele Naturstoffe wie etwa Cellulose, Stärke, Proteine, verschiedene Lipide sowie Lignin auf ihre Eigenschaften als Flammschutzmittel untersucht. Eine Substitution mancher Flammschutzmittel durch biobasierte Stoffe steckt noch in der Forschung und Entwicklung, wobei bereits viele Untersuchungen in diese Richtung unternommen wurden. Flammschutzmittel werden in mittleren bis großen Mengen in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen verarbeitet, weshalb eine Substitution durch biobasierte Stoffe von großem Interesse ist. Der Entwicklungsbedarf wurde entsprechend hoch eingestuft. (hoch)

**Netz- und Dispergieradditive** bestehen größtenteils aus petrobasierten Polymeren. Evonik hat für diese Anwendung aber auch biobasierte Fettsäureester im Portfolio. Der Verbrauch von Netz- und Dispergieradditiven gegenüber Weichmachern oder Flammschutzmitteln ist relativ gering. Der Entwicklungsbedarf wird daher als niedrig eingestuft. (niedrig)

**Nukleierungsmittel** müssen für jeden Kunststofftyp ein geeignetes Kristallisationsverhalten aufweisen, wodurch das Portfolio unterschiedlichster Stoffe relativ groß ist. Nukleierungsmittel können sowohl anorganischer als auch organischer Natur sein. Einige der organischen Stoffe zählen zu den Sorbitolacetalen, wobei das Sorbitol-Rückgrat aus Mais- oder Weizenstärke gewonnen werden kann. Die Substituenten besitzen häufig aromatische Strukturen und gehen in der Wertschöpfungskette auf

einen petrochemischen Ursprung zurück. Dies trifft auch auf die meisten anderen organischen Nukleierungsmittel zu. Im Bereich der Biokunststoffe ist L-Polylactid (PLLA) ein sehr gefragtes und vielversprechendes Polymer. Um Eigenschaften wie Mechanik oder Permeabilität zu beeinflussen, ist die Kristallisation des Materials entscheidend. Das D-Isomer der Polymilchsäure (PDLA) ist für diese Zwecke effektiv, aber relativ teuer. Um die Kristallisation von PLLA mit anderen biobasierten Keimbildnern zu kontrollieren, müssen geeignete Materialien identifiziert und auf ihre nukleierenden Eigenschaften hin untersucht werden. Die Forschung und Entwicklung von Nukleierungsmitteln im Allgemeinen wird seit der Jahrtausendwende wieder stark vorangetrieben und das Potential neuer Strukturen ist angeblich noch lange nicht ausgeschöpft. Aufgrund des großen Interesses und der Vielfältigkeit biobasierter Stoffe, scheint eine Substitution realistisch. Der Entwicklungsbedarf wird daher als hoch eingestuft. (hoch)

**Quervernetzer** dienen dazu das Molekulargewicht der Polymerketten zu erhöhen, indem sie diese miteinander vernetzen. Dafür muss in manchen Fällen eine Zerteilung der Polymerketten im Vorfeld erfolgen. Um diesen Effekt zu erzielen, müssen die entsprechenden Additive gewisse funktionelle Gruppen aufweisen. Hierbei handelt es sich um Silane (Vernetzung) und Peroxide (Zerteilung). Diese Funktionellen Gruppen werden synthetisch generiert und sind in der Natur so nicht zu finden. Eine Substitution durch einen biobasierten Stoff wird hier als sehr unwahrscheinlich vermutet, weshalb der Entwicklungsbedarf als niedrig eingestuft wird. (niedrig)

**Schleppmittel** sind petrochemische Polymere, die einen recht geringen Anteil der verwendeten Additive darstellen. Der Entwicklungsbedarf wird daher als niedrig eingestuft. (niedrig)

Die Aufgabe der **Stabilisatoren** besteht darin, sämtliche irreversiblen physikalischen und chemischen Vorgänge, die als „Alterung“ bezeichnet werden sowie den Abbau von Polymeren und Additiven zu unterdrücken. Um die komplexen Vorgänge der Alterung zu unterbinden, benötigen Stabilisatoren eine entsprechend wirksame molekulare Struktur. Für die Anwendung von Antioxidationsmitteln sind H-Donoren notwendig, die stabile Radikale bilden. Der Schutz vor Photooxidation kann durch verschiedene Mechanismen ablaufen, wobei die Stabilisatoren polymerspezifisch wirken. Die Vielfalt der Stabilisatoren ist sehr groß und auf Grund der komplexen Wirkmechanismen wurden die molekularen Strukturen maßgeschneidert entwickelt. Eine Synthese bereits etablierter Stabilisatoren ausgehend von biobasierten Bausteinen erscheint sehr aufwändig, vorausgesetzt diese Bausteine können aus biobasierten Rohstoffen gewonnen werden. Der Entwicklungsbedarf für biobasierte Stabilisatoren wird daher als niedrig eingestuft. (niedrig)

Für manche Additive wird das Potential einer direkten Substitution durch biobasierte Stoffe als realistisch eingeschätzt. Andere Additive wiederum weisen bereits biogene Anteile auf, besitzen aber Bausteine, die auf fossilen Rohstoffen beruhen. An dieser Stelle kann die Forschung und Entwicklung ansetzen, um beispielsweise mithilfe von Bioraffinerien die Produktion an Grund- und Feinchemikalien zu fördern. Weiterhin gibt es Bestrebungen mittels geeigneter Katalysatoren aus Glycerin aromatische Verbindungen zu gewinnen.

### **7.1.1 Entwicklung und Etablierung biobasierter Weichmacher**

Eine klare Handlungsempfehlung ist die Entwicklung und Etablierung biobasierter Weichmacher. In diesem Bereich erfolgten in der Vergangenheit bereits Grundlagenforschungen in Industrie und Forschungsinstituten, worauf aufbauend anwendungsorientierte Produktforschung stattfinden sollte. Entwicklungsbedarf besteht hier in der Prüfung auf eine vergleichbare Performance mit konventionellen, phthalathaltigen Weichmachern, wobei ggf. Modifikationen erforderlich sind. Dies könnte hinsichtlich der Verwendung im Automobil- oder Lebensmittelbereich relevant sein, da in diesen Anwendungsfeldern strenge Auflagen und Materialprüfungen erforderlich sind.

Weichmacher nehmen unter den Additiven ein großes Marktvolumen ein. Die Verarbeitung biobasierter Weichmacher würde hier einen deutlichen Minderverbrauch fossiler Rohstoffe ausmachen. Zudem können Hersteller und Verarbeiter die Verwendung biobasierter Additive für Marketing- und Imagezwecke nutzen. „Bio“-Label haben längst einen gesellschaftlichen Standard

erreicht und sind für viele Firmen ein wichtiges Aushängeschild. Nicht nur die Bezeichnung „Bio“, sondern auch die Angabe eines Verzichts auf gesundheitsgefährdende Phthalate könnte beim Verbraucher positiv wahrgenommen werden. Ein Beispiel hierfür ist der Einsatz von Bisphenol-A freien Materialien bei Kinderspielzeug, bei dem explizit mit „BPA-free“ geworben wird.

### **7.1.2 Entwicklung von Drop-In-Lösungen, z.B. für Schlagzähmodifikatoren**

Eine Maßnahme zur Förderung biobasierter Additive im Kunststoffsektor ist die Entwicklung von Drop-Ins. Hierbei werden Chemikalien und Zwischenprodukte aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen, unterscheiden sich jedoch in ihrer chemischen Struktur nicht zu den konventionellen Stoffen. Somit muss nicht die gesamte Prozesskette der Additivherstellung angepasst werden, sondern lediglich der Prozessschritt der Herstellung einer Chemikalie. Ein Beispiel hierfür ist die Umsetzung von Milchsäure zu Acrylsäure. Diese wird bislang aus dem fossilen Rohstoff Propen gewonnen und ist für die Herstellung von Schlagzähmodifikatoren notwendig. Der Verbrauch dieses Additivs ist zwar im Vergleich zu anderen Additiven wie Weichmachern eher gering. Allerdings scheint die Umstellung auf biogene Rohstoffe in diesem Fall realistisch, da die Gewinnung biobasierter Acrylsäure im Pilotmaßstab bereits erfolgreich durchgeführt wurde. Hier bedarf es weiterhin einem Upscaling-Prozess. Zudem beschränkt sich der Bedarf an Acrylsäure nicht nur auf die Herstellung von Kunststoff-Additiven, sondern geht weit darüber hinaus. Acrylsäure ist eine niedermolekulare Substanz, die für viele verschiedene Anwendungen Verwendung findet. Das Interesse an biobasierter Acrylsäure ist daher für viele Industriezweige von großem Interesse.

### **7.1.3 Grundlagenforschung an biobasierten Nukleierungsmitteln, Flammenschutzmitteln und Bioziden**

Für grundsätzlich alle Additiv-Typen besteht Bedarf in der Identifizierung geeigneter biobasierter Substanzen, etwa über ein Screening pflanzlicher Inhaltsstoffe, um geeignete Molekülstrukturen für beispielsweise biobasierte Antioxidantien, Biozide oder UV-Stabilisatoren zu finden. In Vergleichsstudien könnten konventionelle und biobasierte Additive in ihrer Funktionalität, Verarbeitbarkeit und der Performance in ihren Anwendungsgebieten gegenübergestellt werden.

Aus der Liste der Additiv-Typen wurden neben den Weichmachern und den Schlagzähmodifikatoren zusätzlich Nukleierungsmittel, Flammenschutzmittel und Biozide als potenzielle Kandidaten für biobasierte Substituenten ausgewählt. Bislang sind in diesen Bereichen noch keine bis wenige kommerziell verfügbaren Bio-Alternativen bekannt. Von Forschungsvorhaben, die sich mit biologischen Alternativen zu den oben genannten Additiven befassen, wurden in verschiedenen Veröffentlichungen berichtet.

Hinsichtlich des Marktvolumens kommt den Flammenschutzmitteln an dieser Stelle die größte Bedeutung zu. In Deutschland wurden im Jahr 2016 etwa 62 kT Flammenschutzmittel verarbeitet. Sie finden in Bereichen wie Automobil, Aviation, Elektrotechnik & Elektronik, Bauwesen oder im Textilbereich Anwendung, wodurch die Anforderungen an die Brandschutzeigenschaften sehr unterschiedlich sind. Die Aufgabe des Flammenschutzmittels ist es, den Verbrennungsprozess zu hemmen bzw. zu unterbinden, wobei verschiedene, komplexe Wirkmechanismen ablaufen. Das Anforderungsprofil eines idealen Flammenschutzmittels kann in der Praxis nicht erreicht werden, da die gewünschten Eigenschaften zu umfangreich sind. Ein reales Flammenschutzmittel verschlechtert die Kunststoffeigenschaften und es bleibt immer ein Kompromiss aus notwendiger Flammwirkung und Materialperformance des Kunststoffs. Zudem wirken Flammenschutzmittel polymerspezifisch. Um eine biobasierte Alternative zu konventionellen Flammenschutzmitteln zu entwickeln, müssen Grundlagenforschungen angestellt werden, die potenzielle Materialien identifizieren und auf ihre Brandschutzeigenschaften prüfen. Dazu zählen unter anderem Struktur-Eigenschaftsbeziehungen, Wirkmechanismus, Alterungsbeständigkeit, ein dem Kunststoff angepassten Zersetzungsbereich, geringe bis keine Entwicklung toxischer Gase oder Rauch, Wechselwirkungen mit Polymermatrix und anderen Additiven, uvm. Da Flammenschutzmittel ihrer konkreten Anwendung weitestgehend

maßgeschneidert angepasst werden müssen, ist der Forschungsumfang sehr groß. Eine industrienähe Forschung scheint hier notwendig zu sein, um die gewünschten Anforderungsprofile gezielt erfüllen zu können.

Nukleierungsmittel werden teilkristallinen Kunststoffen, bevorzugt den Polyolefinen, beigelegt, um den Kristallisationsprozess zu beschleunigen. Dadurch werden Zykluszeiten erheblich verkürzt sowie morphologische Parameter wie Transparenz, Wärmeformbeständigkeit usw. beeinflusst. Abhängig vom Polymertyp, belaufen sich die Konzentrationen des Nukleierungsmittels auf 0,01 - 3 %. Dies scheinen relativ geringe Mengen zu sein, wobei im Jahr 2007 weltweit immerhin 12 kT verbraucht wurden. Der Großteil wurde im erdölbasierten Polypropylen verwendet. Polylactid (PLA), ein biobasierendes und bioabbaubares Polymer, zählt zu den teilkristallinen Polyestern. PLA besitzt hervorragende mechanische Eigenschaften, die den Einsatz des Materials für viele technische Anwendungen interessant und zu einem der derzeit vielversprechendsten Biopolymere macht. Um eine ausreichende Wärmeformstabilität oberhalb der Glasübergangstemperatur von PLA zu erreichen, muss dessen Kristallisationsgeschwindigkeit jedoch deutlich erhöht werden. Als effizientes Nukleierungsmittel mit einer Nukleierungseffizienz von bis zu 66 % hat sich das D-Isomer der Polymilchsäure (PDLA) erwiesen. Dieses D-Isomer ist im Vergleich zum häufiger vorkommenden L-Isomer mit einem etwa 2-3-fachen Marktpreis verhältnismäßig teurer. Dennoch ist der Kristallisationsprozess für manche Anwendungen noch nicht ausreichend entwickelt und hat Optimierungsbedarf. Um die Kristallisation von PLA mit anderen biobasierten Keimbildnern zu kontrollieren, müssen geeignete Materialien identifiziert und auf ihre nukleierenden Eigenschaften hin untersucht werden. Eine kostengünstige Alternative auf Basis biogener Rohstoffe bedarf weiterer Forschung und Entwicklung. Hierbei handelt es sich um Grundlagenforschung, die sowohl an Unternehmen aus der Industrie als auch an Universitäten und entsprechende Forschungsinstitute gerichtet werden kann.

Biozide sind synthetische oder natürliche chemische Stoffe, deren Aufgabe es ist, entweder das Wachstum von Mikroorganismen zu hemmen oder diese abzutöten. Abhängig vom Anwendungsbereich müssen Biozide gegen Algen, Pilze, Bakterien u.a. Mikroorganismen wirksam sein. Konventionelle Biozide besitzen molekulare Strukturen, die aus teilweise sehr giftigen Chemikalien über aufwändige Syntheserouten hergestellt werden. Dabei müssen hohe Sicherheitsstandards erfüllt werden. Die Verwendung biobasierter Rohstoffe liefert den Vorteil, dass komplexe Molekülstrukturen bereits vorliegen und diese ggf. modifiziert werden können. Die Bezeichnung „Bio“ assoziiert häufig die Annahme, dass es sich um ungefährliche Stoffe handelt. Doch Bio bedeutet nicht automatisch ungefährlich. Verschiedene biobasierte Substanzen können eine abtötende bzw. wachstumshemmende Wirkung auf Mikroorganismen haben, wie etwa Peptide, Enzyme oder das natürliche Polymer Chitosan. Um biobasierte Alternativen für konventionelle Biozide zu etablieren, sind Grundlagenforschungen notwendig, in denen potenzielle Stoffe identifiziert und auf ihre Eignung als Biozid geprüft werden. Wichtig ist hierbei ein Verständnis über Struktur-Eigenschaftsbeziehungen zu erhalten. Ausgehend von der Vielfalt biogener Stoffe und ihren unterschiedlichen molekularen Strukturen, wird die Entwicklung biobasierter Biozide als realistisch eingeschätzt. Der Forschungsbedarf richtet sich sowohl an Unternehmen aus der Industrie als auch an Universitäten und entsprechende Forschungsinstitute.

## 7.2 Weitere Forschungsfragestellungen

Momentan gibt es bereits einige biobasierte Additive auf dem Markt, wobei sich vieles auf Fettsäuren fokussiert. Mengenmäßig wäre es sehr interessant Weichmacher, Flammschutzmittel aber auch Schlagzähmodifikatoren verstärkt biobasiert auf den Markt zu bringen. Speziell bei den Schlagzähmodifikatoren als auch den Flammschutzmitteln besteht dabei noch erheblicher Forschungsbedarf hinsichtlich der Langzeitstabilität. Generell lässt sich sagen, dass Langzeitstudien zum Einsatz neuer biobasierter Additive notwendig sind, um deren Akzeptanz auf dem Markt für hochwertige Produkte zu erhöhen, sodass diese auch tatsächlich für einen Einsatz in einem hochwertigen Produkt in Erwägung gezogen werden. Dies umfasst beispielsweise das Witterungsverhalten, die Oberflächenstabilität, mechanische Stabilität oder auch Temperaturstabilität.

Um biobasierte Additive beispielsweise im Automobilbereich einsetzen zu können, sind aufwändige Zulassungsverfahren notwendig. Viele der befragten Firmen haben genannt, dass anwendungsnahe Forschung wünschenswert wäre. Umgekehrt hat die Auswertung wissenschaftlicher Veröffentlichungen gezeigt, dass bereits viele Themen sehr grundlegend erforscht werden. Hier ist ein wichtiger nächster Schritt die Forschung Richtung Anwendung zu bringen. Dafür sind anwendungsnahe Forschungsarbeiten notwendig. Auch die Normierung spielt eine wichtige Rolle für die Akzeptanz neuer biobasierter Additive auf dem Markt. Aber auch die Kommunikation zwischen der Forschung und dem Markt muss erhöht werden, um bedarfsgerechte Entwicklungen voranzutreiben. Es braucht demnach Institutionen und Förderprogramme um die Erkenntnisse aus der Wissenschaft in anwendbare Technologien zu übersetzen.

Neu entwickelte Additive müssen für unterschiedliche Verarbeitungsprozesse geeignet sein. Auch hier besteht noch Forschungsbedarf, sodass ein Additiv idealerweise in langsamen Prozessen (z. B. Extrusion) als auch Prozessen mit hohen Scherraten (z. B. Spritzguss) eingesetzt werden kann. Auch mehrmaliger Wärmeeintrag muss möglich sein, ohne dass das Additiv Schaden nimmt (z. B. Folienextrusion mit anschließendem Tiefziehen, Recycling-Prozesse).

Neben der Untersuchung von Vorläuferstrukturen für Weichmacher besteht auch Bedarf an Rezepturenentwicklungen. Es werden in der Industrie bspw. auf dem Markt übliche Stabilisatoren verwendet, die geläufig sind und die erforderliche Performance aufweisen. Möglicherweise können durch eine geeignete Rezepturenentwicklung und einem Material mit guter Performance neue biobasierte Additive etabliert werden.

## 8. Literaturverzeichnis

- Ahmed, Shakeel; Ahmad, Mudasir; Swami, Babu Lal; Ikram, Saiqa (2016): A review on plants extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications: A green expertise. In: *Journal of advanced research* 7 (1), S. 17–28. DOI: 10.1016/j.jare.2015.02.007.
- Aider, Mohammed (2010): Chitosan application for active bio-based films production and potential in the food industry: Review. In: *LWT - Food Science and Technology* 43 (6), S. 837–842. DOI: 10.1016/j.lwt.2010.01.021.
- Ambroggi, V.; Carfagna, C.; Cerruti, P.; Marturano, V. (2016): Additives in Polymers. In: *Modification of Polymer Properties*. DOI: 10.1016/B978-0-323-44353-1.00004-X.
- Angiolillo, L.; Spinelli, S.; Conte, A.; Del Nobile, M. A. (2017): Recent advances in food packaging with a focus on nanotechnology. In: *Recent Patents on Engineering* 11 (3), S. 174–187. DOI: 10.2174/1872212111666170303110527.
- Azeredo, H.M.C. de; Rosa, M. F.; Sá, M. de; Souza Filho, M.; Waldron, K. (2014): The use of biomass for packaging films and coatings. In: *Advances in Biorefineries: Biomass and Waste Supply Chain Exploitation*. DOI: 10.1533/9780857097385.2.819.
- Babu, Ramesh P.; O'Connor, Kevin; Seeram, Ramakrishna (2013): Current progress on bio-based polymers and their future trends. In: *Progress in biomaterials* 2 (1), S. 8. DOI: 10.1186/2194-0517-2-8.
- Baroncini, Elyse A.; Yadav, Santosh Kumar; Palmese, Giuseppe R.; Stanzione, Joseph F. (2016): Recent advances in bio-based epoxy resins and bio-based epoxy curing agents. In: *Journal of Applied Polymer Science* (45). DOI: 10.1002/app.44103.
- Barros, C.H.N.; Fulaz, S.; Stanisic, D.; Tasic, L. (2018): Biogenic nanosilver against multidrug-resistant bacteria (MDRB). In: *Antibiotics* 7 (3). DOI: 10.3390/antibiotics7030069.
- Beach, E. S.; Weeks, B. R.; Stern, R.; Anastas, P. T. (2013a): Plastics additives and green chemistry. In: *Pure and Applied Chemistry* 85 (8), S. 1611–1624. DOI: 10.1351/PAC-CON-12-08-08.
- Beach, E. S.; Weeks, B. R.; Stern, R.; Anastas, P. T. (2013b): Plastics additives and green chemistry. In: *Pure and Applied Chemistry* 85 (8), S. 1611–1624. DOI: 10.1351/PAC-CON-12-08-08.
- BKV Kunststoff Konzepte Verwertung (Hg.) (2016): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015, zuletzt geprüft am 10.12.2018.
- Bocqué, M.; Voirin, C.; Lapinte, V.; Caillol, S.; Robin, J.-J. (2016): Petro-based and bio-based plasticizers: Chemical structures to plasticizing properties. In: *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry* 54 (1), S. 11–33. DOI: 10.1002/pola.27917.
- Bourbigot, Serge; Fontaine, Gaëlle (2010): Flame retardancy of polylactide: an overview. In: *Polym. Chem.* 1 (9), S. 1413. DOI: 10.1039/C0PY00106F.
- Brentin, R. P. (2014): Soy-based chemicals and materials: Growing the value chain. In: *ACS Symposium Series* 1178, S. 1–23. Online verfügbar unter <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84927518768&partnerID=40&md5=1184b03055220b51f18476723352f32a>.
- Caroline H. N. Laufer: 2010 - Performance Analysis of Bio-based vs. Non-bio-based Plasticizers for PVC. Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/publication/267202830\\_Performance\\_Analysis\\_of\\_Bio-based\\_vs\\_Non-bio-based\\_Plasticizers\\_for\\_PVC](https://www.researchgate.net/publication/267202830_Performance_Analysis_of_Bio-based_vs_Non-bio-based_Plasticizers_for_PVC), zuletzt geprüft am 12.10.2018.
- Castro-Mayorga, J. L.; Martínez-Abad, A.; Fabra, M. F.; Lagarón, J. M.; Ocio, M. J.; Sánchez, G. (2016): Silver-Based Antibacterial and Virucide Biopolymers: Usage and Potential in Antimicrobial Packaging. In: *Antimicrobial Food Packaging*, S. 407–416. Online verfügbar unter <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84967321414&doi=10.1016%2fB978-0-12-800723-5.00032-2&partnerID=40&md5=f3bd1adab58fa82ef33a017bc39bca92>.

- Ceresana (2017): Marktstudie Kunststoff-Additive, zuletzt geprüft am 18.09.2018.
- Costes, L.; Laoutid, F.; Brohez, S.; Dubois, P. (2017): Bio-based flame retardants: When nature meets fire protection. In: *Materials Science and Engineering R: Reports* 117, S. 1–25. DOI: 10.1016/j.mser.2017.04.001.
- da Rocha, M.; Lima, K. O.; Quadros, C. C. de; Prentice, C. (2018): Active films and coatings: An alternative to extending food shelf-life. In: *Edible Films and Coatings: Advances in Research and Applications*, S. 1–54. Online verfügbar unter <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85044366877&partnerID=40&md5=acfdcd79980c979a898bc9833870082>.
- Delesa, Desalegn Amenu (2018): Traditional Medicinal Plants for Industrial Application as Natural Food Preservatives. In: *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research* 6 (1), S. 1–10. Online verfügbar unter [http://www.ijabbr.com/article\\_31539\\_6da16ea3760967eda42ee520d39161f3.pdf](http://www.ijabbr.com/article_31539_6da16ea3760967eda42ee520d39161f3.pdf), zuletzt geprüft am 23.04.2019.
- Diblan, Sevgin; Kaya, Sevim (2018): Antimicrobials used in active packaging films. In: *Food Health*, S. 63–79. DOI: 10.3153/JFHS18007.
- Duquesne, S.; Futterer, T. (2014): Intumescent Systems. In: Alexander B. Morgan und Charles A. Wilkie (Hg.): *Non-Halogenated Flame Retardant Handbook*, S. 293–346. Online verfügbar unter <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84923812594&doi=10.1002%2f9781118939239.ch8&partnerID=40&md5=f5c3c5f14dfdbb8c14abc184fca1487c>.
- Endres, Hans-Josef; Siebert-Raths, Andrea (2009): Technische Biopolymere. Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. München: Hanser. Online verfügbar unter [http://sub-hh.ciando.com/book/?bok\\_id=30958](http://sub-hh.ciando.com/book/?bok_id=30958).
- European Bioplastics (2017): Bioplastics market data 2017, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- European Bioplastics (2018): Bioplastics - facts and figures, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- European Plasticisers (2018): Weichmacher. Online verfügbar unter [https://www.plasticisers.org/wp-content/uploads/2018/10/EP\\_Factsheet\\_OCT2018\\_DE\\_FINAL.pdf](https://www.plasticisers.org/wp-content/uploads/2018/10/EP_Factsheet_OCT2018_DE_FINAL.pdf), zuletzt geprüft am 25.02.2019.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2016): Biokunststoffe. 3. Auflage. Gülzow.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2014): Marktanalyse nachwachsende Rohstoffe. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, 34).
- Faustino, C.; Calado, A.; Garcia-Rio, L. (2013): Micelles from lipoamino acids. In: *Micelles: Structural Biochemistry, Formation and Functions and Usage*, S. 227–261. Online verfügbar unter <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84949661241&partnerID=40&md5=958be03985e899fb62b9ec708b8a0536>.
- Galià, M.; Espinosa, L. M. de; Ronda, J. C.; Lligadas, G.; Cádiz, V. (2010): Vegetable oil-based thermosetting polymers. In: *European Journal of Lipid Science and Technology* 112 (1), S. 87–96. DOI: 10.1002/ejlt.200900096.
- Gan, I.; Chow, W. S. (2018): Antimicrobial poly(lactic acid)/cellulose bionanocomposite for food packaging application: A review. In: *Food Packaging and Shelf Life* 17, S. 150–161. DOI: 10.1016/j.fpsl.2018.06.012.
- Geert Bleys (2015): Technology watch: plasticizers. Online verfügbar unter <http://www.essenscia.be/fr/Document/Download/15338>, zuletzt geprüft am 12.10.2018.
- Gorrasi, G.; Bugatti, V.; Sorrentino, A. (2017): Nanohybrid active fillers in food contact bio-based materials. In: *Bionanocomposites for Packaging Applications*, S. 71–94. Online verfügbar unter

[https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85043672249&doi=10.1007%2f978-3-319-67319-6\\_4&partnerID=40&md5=6f97c267e34411a9bfaadcf4a153f50f](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85043672249&doi=10.1007%2f978-3-319-67319-6_4&partnerID=40&md5=6f97c267e34411a9bfaadcf4a153f50f).

Hahladakis, John N.; Velis, Costas A.; Weber, Roland; Iacovidou, Eleni; Purnell, Phil (2018): An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. In: *Journal of Hazardous Materials* 344, S. 179–199. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.10.014.

Hobbs, C. E. (2019): Recent advances in bio-based flame retardant additives for synthetic polymeric materials. In: *Polymers* 11 (2). DOI: 10.3390/polym11020224.

Hosney, H.; Nadiem, B.; Ashour, I.; Mustafa, I.; El-Shibiny, A. (2018): Epoxidized vegetable oil and bio-based materials as PVC plasticizer. In: *Journal of Applied Polymer Science* 135 (20). DOI: 10.1002/app.46270.

ifeu; Fraunhofer IVV; narocon (2018): Biobasierte Kunststoffe als Verpackung von Lebensmitteln, zuletzt geprüft am 10.09.2018.

Institute for Bioplastics and Biocomposites (Hg.) (2017): Biopolymers. Facts and statistics 2017. Production capacities, processing routes, feedstock, land and water use, zuletzt geprüft am 07.12.2018.

Institute for Bioplastics and Biocomposites (Hg.) (2018): Biopolymers. Facts and statistics 2018, zuletzt geprüft am 13.02.2019.

Jacob, R. G.; Oliveira, D. H.; Dias, I.F.C.; Schumacher, R. F.; Savegnago, L. (2017): Essential oils as a sustainable raw material for the preparation of products with higher value-added. In: *Revista Virtual de Quimica* 9 (1), S. 294–316. DOI: 10.21577/1984-6835.20170019.

Jia, P.; Xia, H.; Tang, K.; Zhou, Y. (2018): Plasticizers derived from biomass resources: A short review. In: *Polymers* 10 (12). DOI: 10.3390/polym10121303.

Jiang, Long; Shen, Tianfeng; Xu, Pengwu; Zhao, Xiyuan; Li, Xiaojie; Dong, Weifu et al. (2016): Crystallization modification of poly(lactide) by using nucleating agents and stereocomplexation. In: *e-Polymers* 16 (1), S. 1–13. DOI: 10.1515/epoly-2015-0179.

Johansson, Caisa; Bras, Julien; Mondragon, Inaki; Nechita, Petronela; Plackett, David; Simon, Peter et al. (2012): RENEWABLE FIBERS AND BIO-BASED MATERIALS FOR PACKAGING APPLICATIONS – A REVIEW OF RECENT DEVELOPMENTS. In: *BioResources* 7 (2). DOI: 10.15376/biores.7.2.2506-2552.

Khan, Avik; Huq, Tanzina; Khan, Ruhul A.; Riedl, Bernard; Lacroix, Monique (2014): Nanocellulose-based composites and bioactive agents for food packaging. In: *Critical reviews in food science and nutrition* 54 (2), S. 163–174. DOI: 10.1080/10408398.2011.578765.

Kim, N. K.; Dutta, S.; Bhattacharyya, D. (2018): A review of flammability of natural fibre reinforced polymeric composites. In: *Composites Science and Technology* 162, S. 64–78. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.04.016.

Kuswandi, B. (2017): Environmental friendly food nano-packaging. In: *Environmental Chemistry Letters* 15 (2), S. 205–221. DOI: 10.1007/s10311-017-0613-7.

Lörcks, Jürgen (2005): Biokunststoffe. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Gülzow.

Lowell Center for Sustainable Production (2011): Phthalates and their alternatives: health and environmental concerns. Online verfügbar unter <https://www.sustainableproduction.org/downloads/PhthalateAlternatives-January2011.pdf>, zuletzt geprüft am 25.02.2019.

Maier, Ralph-Dieter; Schiller, Michael (2016): Handbuch Kunststoff-Additive. 4., vollständig neu bearbeitete Auflage. München: Hanser. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.3139/9783446432918>.

- Marturano, Valentina; Cerruti, Pierfrancesco; Ambrogi, Veronica (2017): Polymer additives. In: *Physical Sciences Reviews* 2 (6), S. 1579. DOI: 10.1515/psr-2016-0130.
- McMillin, K. W. (2017): Advancements in meat packaging. In: *Meat science* 132, S. 153–162. DOI: 10.1016/j.meatsci.2017.04.015.
- Menges, Georg; Haberstroh, Edmund; Michaeli, Walter; Schmachtenberg, Ernst (2014): Menges Werkstoffkunde Kunststoffe. 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.3139/9783446443532>.
- Menne, Andreas (2015): BIO statt FOSSIL. Neue Weichmacher auf dem Vormarsch. In: *Werkstoffe* (5). Online verfügbar unter [http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-3663540.pdf](http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3663540.pdf), zuletzt geprüft am 11.10.2018.
- Moore, Stephen (2018): Global Trends in PVC Resin Applications and Additive Usage. PVC Australia 2018. Townsend Solutions, 15.03.2018. Online verfügbar unter [https://www.vinyl.org.au/images/vinyl/Events/PVCAUS2018-presentations/Stephen-Moore\\_Townsend-r1.pdf](https://www.vinyl.org.au/images/vinyl/Events/PVCAUS2018-presentations/Stephen-Moore_Townsend-r1.pdf).
- Mülhaupt, Rolf (2013): Green Polymer Chemistry and Bio-based Plastics: Dreams and Reality. In: *Macromol. Chem. Phys.* 214 (2), S. 159–174. DOI: 10.1002/macp.201200439.
- Muñoz-Bonilla, Alexandra; Echeverria, Coro; Sonseca, Águeda; Arrieta, Marina P.; Fernández-García, Marta (2019): Bio-Based Polymers with Antimicrobial Properties towards Sustainable Development. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 12 (4). DOI: 10.3390/ma12040641.
- Nagarajan, V.; Mohanty, A. K.; Misra, M. (2016): Perspective on Polylactic Acid (PLA) based Sustainable Materials for Durable Applications: Focus on Toughness and Heat Resistance. In: *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 4 (6), S. 2899–2916. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b00321.
- Pecht, M. G.; Ali, I.; Carlson, A. (2018): Phthalates in Electronics: The Risks and the Alternatives. In: *IEEE Access* 6, S. 6232–6242. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2778950.
- Peelman, Nanou; Ragaert, Peter; Ragaert, Kim; Meulenaer, Bruno de; Devlieghere, Frank; Cardon, Ludwig (2015): Heat resistance of new biobased polymeric materials, focusing on starch, cellulose, PLA, and PHA. In: *J. Appl. Polym. Sci.* 132 (48), n/a-n/a. DOI: 10.1002/app.42305.
- PlasticsEurope (2017): Geschäftsbericht 2016. Frankfurt am Main, zuletzt geprüft am 07.09.2018.
- PlasticsEurope (2018): Plastics - the Facts 2017. An analysis of European plastics production, demand and waste data.
- Raafat, Dina; Sahl, Hans-Georg (2009): Chitosan and its antimicrobial potential--a critical literature survey. In: *Microbial biotechnology* 2 (2), S. 186–201. DOI: 10.1111/j.1751-7915.2008.00080.x.
- Raj, B.; Matche, R. S.; Jagadish, R. S. (2011): Incorporation of chemical antimicrobial agents into polymeric films for food packaging. In: *Multifunctional and Nanoreinforced Polymers for Food Packaging*, S. 368–420. Online verfügbar unter <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84882857880&doi=10.1533%2f9780857092786&partnerID=40&md5=c4d0a662ffe40fe299d0c8e8f020de47>.
- Ramos, O. L.; Pereira, R. N.; Rodrigues, R.; Teixeira, J. A.; Vicente, A. A.; Xavier Malcata, F. (2014): Physical effects upon whey protein aggregation for nano-coating production. In: *Food Research International* 66, S. 344–355. DOI: 10.1016/j.foodres.2014.09.036.
- Rhim, Jong-Whan; Park, Hwan-Man; Ha, Chang-Sik (2013): Bio-nanocomposites for food packaging applications. In: *Progress in Polymer Science* 38 (10-11), S. 1629–1652. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008.
- Richard Hull, T. (2016): The development of sustainable fire retardant materials. In: *Materials China* 35 (5), S. 321–332. DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.05.01.

- Shen, Li; Haufe, Juliane; Patel, Martin K (2009): Product overview and market projection of emerging bio-based plastics. PRO-BIP 2009. Final report. Utrecht University, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- Sorrentino, Andrea; Gorrasi, Giuliana; Vittoria, Vittoria (2007): Potential perspectives of bio-nanocomposites for food packaging applications. In: *Trends in Food Science & Technology* 18 (2), S. 84–95. DOI: 10.1016/j.tifs.2006.09.004.
- Thallinger, Barbara; Prasetyo, Endry N.; Nyanhongo, Gibson S.; Guebitz, Georg M. (2013): Antimicrobial enzymes: an emerging strategy to fight microbes and microbial biofilms. In: *Biotechnology journal* 8 (1), S. 97–109. DOI: 10.1002/biot.201200313.
- Tsuji, H. (2016): Poly(lactic acid) stereocomplexes: A decade of progress. In: *Advanced Drug Delivery Reviews* 107, S. 97–135. DOI: 10.1016/j.addr.2016.04.017.
- Upta, Akash; Landis, Ryan F.; Rotello, Vincent M. (2016): Nanoparticle-Based Antimicrobials: Surface Functionality is Critical. In: *F1000Research* 5 (364). Online verfügbar unter [https://f1000researchdata.s3.amazonaws.com/manuscripts/8178/90c6e2c6-caf4-4b99-b3e3-ca8b14dbb279\\_7595\\_-\\_vincent\\_rotello.pdf?doi=10.12688/f1000research.7595.1&numberOfBrowsableCollections=16&numberOfBrowsableGateways=23](https://f1000researchdata.s3.amazonaws.com/manuscripts/8178/90c6e2c6-caf4-4b99-b3e3-ca8b14dbb279_7595_-_vincent_rotello.pdf?doi=10.12688/f1000research.7595.1&numberOfBrowsableCollections=16&numberOfBrowsableGateways=23), zuletzt geprüft am 23.04.2019.
- van den Oever, Martien; Molenveld, Karin; van der Zee, Maarten; Bos, Harriëtte (2017): Bio-based and biodegradable plastics - Facts and Figures. Focus on food packaging in the Netherlands. Wageningen Food & Biobased Research, zuletzt geprüft am 31.08.2018.
- Vieira, Melissa Gurgel Adeodato; da Silva, Mariana Altenhofen; dos Santos, Lucielen Oliveira; Beppu, Marisa Masumi (2011): Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review. In: *European Polymer Journal* 47 (3), S. 254–263. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2010.12.011.
- Wang, H.; Qian, J.; Ding, F. (2018): Emerging Chitosan-Based Films for Food Packaging Applications. In: *Journal of agricultural and food chemistry* 66 (2), S. 395–413. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b04528.
- Wang, Ji; Vermerris, Wilfred (2016): Antimicrobial Nanomaterials Derived from Natural Products-A Review. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 9 (4). DOI: 10.3390/ma9040255.
- Witten, Elmar; Kraus, Thomas; Kühnel, Michael (2016): Der Composites-Markt Europa: Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen. Composites-Marktbericht 2016. Composites Germany, zuletzt geprüft am 31.08.2018.

## Anhang 1

**Tabelle 41** Übersicht aller eingeschlossenen Publikationen zu bioziden Wirkstoffen

Autor	Titel	Jahr	Land	Bioadditiv	Kategorie	Kunststoff
Rhim, J.-W. et al.	Preparation and characterization of chitosan-based nanocomposite films with antimicrobial activity	2006	Korea, Republik von	Cloisit 30 B	Bentonit	Chitosan Polymer
Min, B.	Antimicrobial powders and bio-based films	2007	Vereinigte Staaten	Nisin	Peptid	Stärke
Torres-Giner, S. et al.	Development of active antimicrobial fiber based chitosan polysaccharide nanostructures using electrospinning	2008	Spanien	Chitosan	Polymer	Polylactid (PLA)
Liu, L. et al.	Preparation of antimicrobial membranes: coextrusion of poly(lactic acid) and Nisaplin in the presence of Plasticizers	2009	Vereinigte Staaten	Nisin	Peptid	PLA
Hosseini, M. H. et al.	ANTIMICROBIAL, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CHITOSAN-BASED FILMS INCORPORATED WITH THYME, CLOVE AND CINNAMON ESSENTIAL OILS	2009	Iran	Thymian- Zimt-, Nektlenöl	Pflanzenöle	Chitosan Polymer
Dutta, P. K. et al.	Perspectives for chitosan based antimicrobial films in food applications	2009	Indien	Chitosan	Polymer	Stärke
Coons, R.	Elevance and stepan sign development deal	2010	Vereinigte Staaten	9-Decen Ester	Ester	Nylon
Deka, H. et al.	Bio-based thermostable, biodegradable and biocompatible hyperbranched polyurethane/Ag nanocomposites with antimicrobial activity	2010	Indien	Mesusa ferrea Samen Öl	Pflanzenöl	Polyurethan
Theinsathid, P. et al.	Antimicrobial effectiveness of biobased film against Escherichia coli 0157:H7, Listeria monocytogenes and Salmonella typhimurium	2011	Thailand	Milchsäure, Natriumlaktat	organische Säure	Polylactid (PLA)
Germinara, G. S. et al.	Electrophysiological and behavioral activity of (E)-2-hexenal in the granary weevil and its application in food packaging	2012	Italien	(E)-2-Hexenal	Aldehyd	Polycaprolacton (PCL)
Shalev, T. et al.	Non-leaching antimicrobial surfaces through polydopamine bio-inspired coating of quaternary ammonium salts or an ultrashort antimicrobial lipopeptide	2012	Israel	Dopamin	Katecholamin	Polystyrol, Polyolefin
España, J. M. et al.	Antioxidant and antibacterial effects of natural phenolic compounds on green composite materials	2012	Spanien	Thymol, Carvacrol, $\alpha$ -Tocopherol, Tanninsäure	Terpenoide	Lignin/Kokos Fasern
Audic, J.-L. et al.	Characterization of biodegradable poly(butylene adipate-co-terephthalate)/ sodium caseinate films loaded with an alkyl furanoside as antimicrobial agent	2012	Frankreich	Octyl- $\beta$ -D-Galactofuranosid	Zucker Derivat	Glycerin/PBAT/NaCAS Glycerin/Poly(butylene adipat-co-terephthalate)/Natrium Kaseinat
Corrales, M. et al.	Antimicrobial Packaging Systems	2013	Bangladesch	Benzoessäure, Para-Benzoat, Sorbat, Essigsäure, Amonibenzoessäure, Natriumlaktat, Kaliumsorbat, Natrium Diacetat, Lysozym, Nisin, Propyl Paraben, Citrat, Sakacin, Laurinsäure, Chitosan, Grapefruit Samen Extrakt, Nelkenextrakt, Limonenextrakt, Zimtaldehyd, Eugenol, Catechin, Meerrettich Extrakt, Allyl Isothiocyanat, Basilikum Extrakt	Ester, Terpenoide, ätherische Öle, Enzyme, Polymere, Aldehyde	Polyethylen, Polyethylen Terephthalat, WPI, Polypropylen, Stärke, Chitosan, PVC, Ethylen-Co-Acrylat, Polyamid,

Ai-Tang, R. et al.	Fabrication and antifungal activity of cellulose acetate-based fibers encapsulating natural neem seed oil	2013	Thailand	Niemöl	pflanzliches Öl	Zellulose Acetate (CA), Poly(Ethylene Oxide) (PEO)
Alix, S. et al.	Active pseudo-multilayered films from polycaprolactone and starch based matrix for food-packaging applications	2013	Frankreich	Chitosan	Polymer	Polycaprolakton in stärkebasierter Matrix
Kurek, M. et al.	Carvacrol affects interfacial, structural and transfer properties of chitosan coatings applied onto polyethylene	2013	Frankreich	Chitosan	Polymer	Polyethylen (PE)
Otoni, C. G. et al.	Antimicrobial and physical-mechanical properties of pectin/papaya puree/cinnamaldehyde nanoemulsion edible composite films	2014	Brasilien	Zimtaldehyd	Aldehyd	Pektin
DeGruson, M. L.	Synthesis of bio-based Nanocomposites for controlled release of antimicrobial agents in food packaging	2014	Vereinigte Staaten	Natriumbenzoat (Bz), Natamycin (Nat)	Aromat, Makrolid-Polyen	Stärke
Rodríguez, F. J. et al.	Development of an antimicrobial material based on a nanocomposite cellulose acetate film for active food packaging	2014	Chile	Thymol	Ätherisches Öl	Zellulose Acetat (CA)
Tawakkal, I.S.M.A. et al.	Characteristics of active natural fibre reinforced poly(lactic acid) composites	2014	Australien	Thymol	Ätherisches Öl	Poly(lactid) (PLA) /Kenaf Fasern
Chauhan, N.P.S.	Preparation and characterization of bio-based terpolymer derived from vanillin oxime, formaldehyde, and p-hydroxyacetophenone	2014	Indien	Vanillin Oxim-formaldehyd-p-hydroxyacetophenon	Ätherisches Öl	biobasiertes Terpolymer
Akbulut, H. et al.	Electrochemical deposition of polypeptides: Bio-based covering materials for surface design	2014	Türkei	polythiophene-g-polyalanine (PT-Pala)	Polymer	Polythiophene-g-Polyalanine (PT-Pala)
Liu, R. et al.	Synthesis of new biobased antibacterial methacrylates derived from tannic acid and their application in UV-cured coatings	2014	China	Tanninsäure	Tannin	glycidyl methacrylate (GMA)
Arrieta, M. P. et al.	Functional properties of sodium and calcium caseinate antimicrobial active films containing carvacrol	2014	Spanien	Carvacrol	Terpenoid	Glycerin/Kasein Polymere
Costa, S. S. et al.	Bi-functional biobased packing of the cassava starch, glycerol, licuri nanocellulose and red propolis	2014	Brasilien	Zellulose Nanokristalle	Zellulose	Stärke
Qin, Y. et al.	Effect of PLA/PCL/cinnamaldehyde antimicrobial packaging on physicochemical and microbial quality of button mushroom ( <i>Agaricus bisporus</i> )	2015	China	Zimtaldehyd	Aldehyd	Poly(lactid) (PLA)/Polycaprolacton (PCL)
Wang, H. et al.	Kinetics and functional effectiveness of nisin loaded antimicrobial packaging film based on chitosan/poly(vinyl alcohol)	2015	China	Nisin	Peptid	Chitosan/Polyvinylalkohol
Morelli, C. L. et al.	Natural copaiba oil as antibacterial agent for bio-based active packaging	2015	Frankreich	Copaiba Öl	Pflanzenöl	Poly(lactid) (PLA)
Hosseini, S. F. et al.	Bio-based composite edible films containing <i>Origanum vulgare</i> L. essential oil	2015	Iran	<i>Origanum vulgare</i>	Pflanzenöl	Chitosan, Gelatine
Badawy, H. et al.	Assessing the antimicrobial activity of polyisoprene based surfaces	2015	Frankreich	modifizierte Polyisoprene	Polymer	modifizierte Polyisoprene
Armentano, I. et al.	Bio-based PLA_PHB plasticized blend films: Processing and structural characterization	2015	Italien	Carvacrol	Terpenoid	Poly(lactid) (PLA), Poly(3-Hydroxybutyrat) (PHB)
CenTexBel	Biobased additives in coating and fishing of textiles: Cornet Success Story	2015	Belgien	Thymol, Carvacrol, Monolaurin, Tanninsäure	Terpenoide	Chitosan
Cerqueira, M. A. et al.	Use of Electrospinning to Develop Antimicrobial Biodegradable Multilayer Systems: Encapsulation of	2016	Portugal	Zimtaldehyd	Aldehyd	Polyhydroxybutyrate-co-Valerat

Ahmed, J. et al.	Cinnamaldehyde and Their Physicochemical Characterization Antimicrobial, Rheological, and Thermal Properties of Plasticized Poly(lactide) Films Incorporated with Essential Oils to Inhibit <i>Staphylococcus aureus</i> and <i>Campylobacter jejuni</i>	2016	Kuwait	Knoblauch, Zimt, Nelke	Ätherische Öle	Poly(lactid) (PLA), Polyethylenglycol (PEG)
Rawdkuen, S. et al.	Antimicrobial Packaging for Meat Products	2016	Thailand	Zimtöl, Rhabarber Extrakt, Knoblauchöl, Milchsäure, Chitosan, Oreganoöl, Grüntee Extrakt	Ätherische Öle, Pflanzenextrakte	Polyvinylalkohol/Polypropylen, Ethylvinylacetat/Polyethylen, Polyamid, Ionomere, Polyvinyl Dichlorid (PVDC), Zellulose Derivat
Jagus, R. J. et al.	Combinational Approaches for Antimicrobial Packaging: Natamycin and Nisin	2016	Argentinien	Natamycin, Nisin	Peptid	Polyvinyl Dichlorid (PVDC), Zellulose Derivat
Wickramarachchi, P.A.S.R. et al.	Activity of chitosan films enriched with the essential oil of <i>alpinia malaccensis</i> rhizome against <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> and <i>C. musae</i>	2016	Sri Lanka	<i>Alpinia malaccensis</i> rhizome Öl	Pflanzenöl	Chitosan Polymer
Jamil, B. et al.	Encapsulation of cardamom essential oil in chitosan nano-composites: In-vitro efficacy on antibiotic-resistant bacterial pathogens and cytotoxicity studies	2016	Pakistan	Kardamom Öl	Pflanzenöl	Chitosan Polymer
Javidi, Z. et al.	Development of flexible bactericidal films based on poly(lactic acid) and essential oil and its effectiveness to reduce microbial growth of refrigerated rainbow trout	2016	Iran	<i>Origanum vulgare</i> L. Öl	Pflanzenöl	Poly(lactid) (PLA)
Turalija, M. et al.	Antimicrobial PLA films from environment friendly additives	2016	Kroatien	Chitosan	Polymer	Poly(lactid) (PLA)
Yang, W. et al.	Effect of cellulose and lignin on disintegration, antimicrobial and antioxidant properties of PLA active films	2016	Italien	Zellulose Nanokristalle, Lignin nanokristalle	Zellulose	Poly(lactid) (PLA)
Tawakkal, I.S.M.A. et al.	Effect of Poly(Lactic Acid)/Kenaf Composites Incorporated with Thymol on the Antimicrobial Activity of Processed Meat	2017	Australien	Thymol	Ätherisches Öl	Poly(lactid) (PLA) /Kenaf Fasern
Kurek, M. et al.	A mathematical model for tailoring antimicrobial packaging material containing encapsulated volatile compounds	2017	Frankreich	allyl isothiocyanat (AITC)	Isothiocyanat	Polyethylen (PE)
Rollini, M. et al.	Propolis and chitosan as antimicrobial and polyphenols retainer for the development of paper based active packaging materials	2017	Italien	Propolis Extrakt	Pflanzenextrakt	Chitosan
Lalitha, K. et al.	Intrinsic Hydrophobic Antibacterial Thin Film from Renewable Resources: Application in the Development of Anti-Biofilm Urinary Catheters	2017	Indien	Cardanol	Pflanzenstoff	Acrylisiertes, epoxidiertes Leinöl (AELO)
Rai, S. et al.	Lignin incorporated antimicrobial chitosan film for food packaging application	2017	Indien	Chitosan	Polymer	Chitosan/Lignin
Burgos, N. et al.	Functional Properties of Plasticized Bio-Based Poly(Lactic Acid)-Poly(Hydroxybutyrate) (PLA-PHB) Films for Active Food Packaging	2017	Spanien	Carvacrol	Terpenoid	Poly(lactid) (PLA), Poly(3-Hydroxybutyrat) (PHB)
Bideau, B. et al.	Polypyrrole/nanocellulose composite for food preservation: Barrier and antioxidant characterization	2017	Kanada	Oxidierter Nanocellulose (TOCN)	Zellulose	Polypyrrol (PPy)
Karavana, H. A. et al.	Thermal and antimicrobial characterization of <i>olea Europaea</i> leaf reinforced TPU-based bio-composites	2017	Türkei	Olivenbaum Blätter		Thermoplastisches Polyurethan (TPU)

Thirukumaran, P. et al.	Sustainability and antimicrobial assessments of bio based polybenzoxazine film	2018	Korea, Republik von	Benzoazin	Aromat	Chitosan basierte Polybenzoxazine
Amato, D. V. et al.	A bio-based pro-antimicrobial polymer network via degradable acetal linkages	2018	Vereinigte Staaten	p-Anisaldehyde (pA)	Aromat	Abbaubare Polyacetale (PANDA)
Degruson, M. I.N. et al.	Mechanical and Barrier Properties of Bio-based Antimicrobial Nanocomposite Films for Food Packaging Applications	2018	Vereinigte Staaten	Natriumbenzoat (Bz), Natamycin (Nat)	Aromat, Makrolid-Polyen	Stärke
Bugatti, V. et al.	Antimicrobial membranes of bio-based pa 11 and hnts filled with lysozyme obtained by an electrospinning process	2018	Italien	Lysozym	Enzym	Polyamid 11 (PA11)
Team Stuttgart	The Anti Germ Coating	2018	Deutschland	Nisin, Rhamnolipid	Peptid, Lipid	Chitosan
Suriyatem, R. et al.	Biodegradable rice starch/carboxymethyl chitosan films with added propolis extract for potential use as active food packaging	2018	Thailand	Propolis Extrakt	Pflanzenextrakt	Reisstärke/Chitosan
Gursoy, M. et al.	False flax (Camelina sativa) seed oil as suitable ingredient for the enhancement of physicochemical and biological properties of chitosan films	2018	Türkei	Leindotter Saat Öl	Pflanzenöl	Chitosan Polymer
Nisar, T. et al.	Characterization of citrus pectin films integrated with clove bud essential oil: Physical, thermal, barrier, antioxidant and antibacterial properties	2018	China	Nelkenöl	Pflanzenöl	Pektin
Gómez-Mascaraque, L. G. et al.	Nanostructuring Biopolymers for Improved Food Quality and Safety	2018	Spanien	Zimtöl, Cyclodextrin	Pflanzenöl, Saccharide	Polysaccharide, Polylactide (PLA), Polyvinyl Alkohol (PVA)
Mousavi Khaneghah, A. et al.	Antimicrobial agents and packaging systems in antimicrobial active food packaging: An overview of approaches and interactions	2018	Brasilien	Basilikumöl, Carvacrol	Pflanzenöle	Polyethylen (PE), Ethylen Vinyl Alkohol (EVOH), Chitosan/HP-Cyclodextrine
McInnis, B. M. et al.	Bio-based Antimicrobial Food Packaging Coatings	2018	Vereinigte Staaten	Chitosan	Polymer	Polyvinyl Alkohol (PVA)
Mohsenabadi, N. et al.	Physical and antimicrobial properties of starch-carboxy methyl cellulose film containing rosemary essential oils encapsulated in chitosan nanogel	2018	Iran	Chitosan	Polymer	Stärke
Vahedikia, N. et al.	Biodegradable zein film composites reinforced with chitosan nanoparticles and cinnamon essential oil: Physical, mechanical, structural and antimicrobial attributes	2019	Iran	Zimtöl	Ätherisches Öl	Chitosan
Mehta, M. J. et al.	Ionic Liquid Stabilized Gelatin–Lignin Films: A Potential UV-Shielding Material with Excellent Mechanical and Antimicrobial Properties	2019	Indien	Cholin Citrat	ilonische Flüssigkeit	Gelatine/Lignin

**Tabelle 42** Übersicht aller in der Suche nach bioziden Wirkstoffen gefundenen Reviews

Autor	Jahr	Titel
Kenawy, El-Refaie; Worley, S. D.; Broughton, Roy	2007	The Chemistry And Applications Of Antimicrobial Polymers: A State-Of-The-Art Review
Sorrentino, Andrea; Gorrasi, Giuliana; Vittoria, Vittoria	2007	Potential Perspectives Of Bio-Nanocomposites For Food Packaging Applications
Raafat, Dina; Sahl, Hans-Georg	2009	Chitosan And Its Antimicrobial Potential--A Critical Literature Survey
Ruban, Wilfried, S.	2009	Biobased Packaging - Application In Meat Industry
Van Der Steen, M.; Stevens, C. V.	2009	Undecylenic Acid: A Valuable And Physiologically Active Renewable Building Block From Castor Oil
	2009	Edana International Nonwovens Symposium 2009
Aider, M.	2010	Chitosan Application For Active Bio-Based Films Production And Potential In The Food Industry:

Aider, Mohammed	2010	Review Chitosan Application For Active Bio-Based Films Production And Potential In The Food Industry: Review
Raj, B.; Matche, R. S.; Jagadish, R. S.	2011	Incorporation Of Chemical Antimicrobial Agents Into Polymeric Films For Food Packaging
Faustino, C.; Calado, A.; Garcia-Rio, L.	2013	Micelles From Lipoamino Acids
Rhim, J.-W.; Park, H.-M.; Ha, C.-S.	2013	Bio-Nanocomposites For Food Packaging Applications
Thallinger, Barbara; Prasetyo, Endry N.; Nyanhongo, Gibson S.; Guebitz, Georg M.	2013	Antimicrobial Enzymes: An Emerging Strategy To Fight Microbes And Microbial Biofilms
Khan, Avik; Huq, Tanzina; Khan, Ruhul A.; Riedl, Bernard; Lacroix, Monique	2014	Nanocellulose-Based Composites And Bioactive Agents For Food Packaging
Pinto, R.j.b.; Carlos, L. D.; Marques, P.a.a.p.; Silvestre, A.j.d.; Freire, C.s.r.	2014	An Overview Of Luminescent Bio-Based Composites
Ramos, O. L.; Pereira, R. N.; Rodrigues, R.; Teixeira, J. A.; Vicente, A. A.; Xavier Malcata, F.	2014	Physical Effects Upon Whey Protein Aggregation For Nano-Coating Production
Kok, E. T.; Jong, M. C.; Gravendeel, B.; Van Leeuwen, W. B.; Baars, E. W.	2015	Resistance To Antibiotics And Antifungal Medicinal Products: Can Complementary And Alternative Medicine Help Solve The Problem In Common Infection Diseases? The Introduction Of A Dutch Research Consortium
Kügler, J. H.; Le Roes-Hill, M.; Syladat, C.; Hausmann, R.	2015	Surfactants Tailored By The Class Actinobacteria
Malhotra, Bhanu; Keshwani, Anu; Kharkwal, Harsha	2015	Antimicrobial Food Packaging: Potential And Pitfalls
Patil, Siddappa A.; Patil, Shivaputra A.; Patil, Renukadevi; Keri, Rangappa S.; Budagumpi, Srinivasa; Balakrishna, Geetha R.; Tacke, Matthias	2015	N-Heterocyclic Carbene Metal Complexes As Bio-Organometallic Antimicrobial And Anticancer Drugs
Sherman, L. M.	2015	Spotlight On Performance, Economy, And Sustainability
Ahmed, Shakeel; Ahmad, Mudasar; Swami, Babu Lal; Ikram, Saiqa	2016	A Review On Plants Extract Mediated Synthesis Of Silver Nanoparticles For Antimicrobial Applications: A Green Expertise
Castro-Mayorga, J. L.; Martínez-Abad, A.; Fabra, M. F.; Lagarón, J. M.; Ocio, M. J.; Sánchez, G.	2016	Silver-Based Antibacterial And Virucide Biopolymers: Usage And Potential In Antimicrobial Packaging
Negro, V.; Mancini, G.; Ruggeri, B.; Fino, D.	2016	Citrus Waste As Feedstock For Bio-Based Products Recovery: Review On Limonene Case Study And Energy Valorization
Upta, Akash; Landis, Ryan F.; Rotello, Vincent M.	2016	Nanoparticle-Based Antimicrobials: Surface Functionality Is Critical
Wang, Ji; Vermerris, Wilfred	2016	Antimicrobial Nanomaterials Derived From Natural Products-A Review
Zia, Khalid Mahmood; Noreen, Aqdas; Zuber, Mohammad; Tabasum, Shazia; Mujahid, Mohammad	2016	Recent Developments And Future Prospects On Bio-Based Polyesters Derived From Renewable Resources: A Review
Angiolillo, L.; Spinelli, S.; Conte, A.; Del Nobile, M. A.	2017	Recent Advances In Food Packaging With A Focus On Nanotechnology
Gorrasi, G.; Bugatti, V.; Sorrentino, A.	2017	Nanohybrid Active Fillers In Food Contact Bio-Based Materials
Jacob, R. G.; Oliveira, D. H.; Dias, I.f.c.; Schumacher, R. F.; Savegnago, L.	2017	Essential Oils As A Sustainable Raw Material For The Preparation Of Products With Higher Value-Added
Kuswandi, B.	2017	Environmental Friendly Food Nano-Packaging
Mcmillin, K. W.	2017	Advancements In Meat Packaging
Silva, F.; Domingues, F. C.	2017	Antimicrobial Activity Of Coriander Oil And Its Effectiveness As Food Preservative
Barros, C.h.n.; Fulaz, S.; Stanisic, D.; Tasic, L.	2018	Biogenic Nanosilver Against Multidrug-Resistant Bacteria (Mdrb)
Da Rocha, M.; Lima, K. O.; Quadros, C. C. De; Prentice, C.	2018	Active Films And Coatings: An Alternative To Extending Food Shelf-Life
Delesa, Desalegn Amenu	2018	Traditional Medicinal Plants For Industrial Application As Natural Food Preservatives
Diblan, Sevgin; Kaya, Sevim	2018	Antimicrobials Used In Active Packaging Films
Gan, I.; Chow, W. S.	2018	Antimicrobial Poly(Lactic Acid)/Cellulose Bionanocomposite For Food Packaging Application: A Review
Martins, V. G.; Romani, V. P.; Martins, P. C.	2018	Active Compounds Incorporated In Agro-Based Films: The Efficacy And Effect In Film Properties For Food Packaging
Padil, V.v.t.; Wacławek, S.; Černík, M.; Varma, R. S.	2018	Tree Gum-Based Renewable Materials: Sustainable Applications In Nanotechnology, Biomedical And Environmental Fields
Popović, S. Z.; Lazić, V. L.; Hromiš, N. M.; Šuput, D. Z.; Bulut, S. N.	2018	Biopolymer Packaging Materials For Food Shelf-Life Prolongation
Soares, R.m.d.; Siqueira, N. M.; Prabhakaram, M. P.; Ramakrishna, S.	2018	Electrospinning And Electrospray Of Bio-Based And Natural Polymers For Biomaterials Development
Wang, H.; Qian, J.; Ding, F.	2018	Emerging Chitosan-Based Films For Food Packaging Applications
Muñoz-Bonilla, Alexandra; Echeverría, Coro; Sonseca, Águeda; Arrieta, Marina P.; Fernández-García, Marta	2019	Bio-Based Polymers With Antimicrobial Properties Towards Sustainable Development
Tribot, A.; Amer, G.; Abdou Alio, M.; Baynast, H. De; Delattre, C.; Pons, A.; Mathias, J.-D.; Callois, J.-M.; Vial, C.; Michaud, P.; Dussap, C.-G.	2019	Wood-Lignin: Supply, Extraction Processes And Use As Bio-Based Material

**Tabelle 43** Übersicht aller eingeschlossen Publikationen zu biobasierten Flammenschutzmitteln

Autor	Titel	Jahr	Land	Bioadditiv	Kategorie	Kunststoff
-------	-------	------	------	------------	-----------	------------

Zammarano, M.	Sustainable Flame Retardants	2001	Vereinigte Staaten	Lignin (modifiziert)	Polymer	Epoxidharz
Blount, D. H.	Flame Retardant Urea-Bio Based Urethane Compositions	2003	Vereinigte Staaten	Pflanzenöl, Melasse, Zucker, Lignin, Hemicellulose	Pflanzenöl, Polymer	Polyurethan (PUR)
Reti, C. et al.	Intumescent Biobased-Poly lactide Films to Flame Retard Nonwovens	2009	Frankreich	Lignin oder Stärke (+ Ammoniumpolyphosphat)	Polymer	Polymilchsäure (PLA)
Howell, B. A. et al.	Thermal stability of phosphinated diethyl tartrate	2010	Vereinigte Staaten	Weinsäureester	Ester	k.A.
Bourbigot, S. et al.	Intumescence for the flame retardancy of poly lactide	2010	Frankreich	Schichtsilikat, Stärke, Phytinsäure	Silikat, Polymer, Phytat	Poly lactid (PLA)
Lligadas, G. et al.	Thermoplastic and thermosetting polymers from vegetable oils	2011	Spanien	Fettsäureverbindungen	Fettsäure	Epoxidharz
Feng, J.-X. et al.	An intumescent flame retardant system using $\beta$ -cyclodextrin as a carbon source in poly lactic acid (PLA)	2011	China	b-Cyclodextrin	Oligosaccharid	Poly lactid (PLA)
Ravichandran, S. et al.	A renewable waste material for the synthesis of a novel non-halogenated flame retardant polymer	2011	Vereinigte Staaten	Cardanol	Pflanzenstoffe	Polyphenol (Basis: Cardanol)
Karimi Zarchi, M. A. et al.	Synthesis, characterization and in vitro antimicrobial study of bioactive polyesters derived from new biobased flame retardant aromatic diacid monomer containing taurine moiety	2012	Iran	5-(2-Tetrachlorphthalimido)ethansulfonamido)isophthalsäure (6), basierend auf Taurin	Aminosulfonsäure	Polyester
Zhang, R. et al.	Modification of lignin and its application as char agent in intumescent flame-retardant poly(lactic acid)	2012	China	Harnstoffmodifiziertes Lignin (+ Ammoniumpolyphosphat)	Polymer	Polymilchsäure (PLA)
Li, C. et al.	Preparation of P-and S-Containing UV-cured cardanol polymers via Thiol-ene click chemistry	2013	China	Cardanolphosphitester	Ester	k.A.
Tolinski, M.	Additives annual 2014: Feeling the heat	2014	Vereinigte Staaten	Austernschalen	Naturprodukt	Polypropylen (PP)
Ménard, R. et al.	Synthesis of biobased phosphate flame retardants	2014	Frankreich	Phloroglucinol (funktionalisiert mit Phosphatgruppen)	Phenol	Epoxidharz
Pan, H. et al.	Preparation of a novel biobased flame retardant containing phosphorus and nitrogen and its performance on the flame retardancy and thermal stability of poly(vinyl alcohol)	2014	China	phosphorylierte Cellulose (+Ammoniumhydroxid)	Polymer	Poly(vinylalkohol) (PVA)
Mauldin, T. C. et al.	Synthesis and characterization of isosorbide-based polyphosphonates as biobased flame-retardants	2014	Vereinigte Staaten	Polyphosphat auf Isosorbidbasis	Polymer	Polymilchsäure (PLA)
Morgan, A. B. et al.	Other Non-Halogenated Flame Retardant Chemistries and Future Flame Retardant Solutions	2014	Vereinigte Staaten	Stärke, Cyclodextrin, Chitosan, Cellulose, Polysaccharide, Lignin, Alginat, Protein	Polymer	k.A.
Wang, X. et al.	An eco-friendly way to fire retardant flexible polyurethane foam: layer-by-layer assembly of fully bio-based substances	2014	Spanien	Chitosan, Alginat	Polymer, Alginat	Polyurethan-Weichschaumstoff
Howell, B. A. et al.	Thermal degradation of phosphorus esters derived from isosorbide and 10-undecenoic acid	2015	Vereinigte Staaten	Phosphorsäureester aus Diol von Isosorbid (aus Stärke), 10-Undecensäure (aus Rizinusöl)	Ester	k.A.
Jia, P. et al.	Properties of poly(vinyl chloride) incorporated with a novel soybean oil based secondary plasticizer containing a flame retardant group	2015	China	Sojabohnenölyphosphatester	Ester	Polyvinylchlorid (PVC)
Carosio, F. et al.	Oriented Clay Nanopaper from Biobased Components - Mechanisms for Superior Fire Protection Properties	2015	Schweden	Cellulosefasern, Montmorillonit	Naturfaser	k.A.
Li, C. et al.	Synthesis and characterization of functional eugenol derivative based layered double hydroxide and its use as a nanoflame-retardant in epoxy resin	2015	China	Eugenolderivat	Pflanzenextrakt	Epoxidharz
Hazarika, A. et al.	Bio-based wood polymer nanocomposites: A sustainable high-performance material for future	2015	Indien	Gummi des Meerrettichbaums (Moringa oleifera)	Pflanzenextrakt	Wood Polymer Composites (WPC)
Wang, X. et al.	Renewable Cardanol-Based Surfactant Modified Layered Double Hydroxide as a Flame Retardant for Epoxy Resin	2015	Spanien	Cardanol	Pflanzenstoffe	Epoxidharz
Ferry, L. et al.	Synthesis and flame retardancy characterizations of new bio-based phosphorus-containing epoxy thermosets	2015	Frankreich	Phloroglucinol	Phenol	Bisphenol-A-Diglycidylether/Isophorondiamin Epoxidharz (DGEBA/IPDA) Epoxidharz
Ménard, R. et al.	Synthesis of biobased phosphorus-containing flame retardants for epoxy thermosets comparison of additive and reactive approaches	2015	Frankreich	Phloroglucinol	Phenol	Epoxidharz
Ménard, R. et al.	From a bio-based phosphorus-containing epoxy monomer to fully bio-based flame-retardant thermosets	2015	Frankreich	Phloroglucinol	Phenol	Epoxidharz
Keglevich, G. et al.	The Synthesis of bio-based flame-retarded epoxy-precursors	2015	Ungarn	phosphorylierten Di-, Triallylglucopyranosiden	Phosphat	Epoxidharz
Costes, L. et al.	Metallic phytates as efficient bio-based phosphorous flame retardant additives for poly(lactic acid)	2015	Belgien	Phytate (Lanthan, Eisen, Aluminium, Natrium)	Phytat	Poly lactid (PLA)
Kim, Y. S. et al.	Environmental friendly flame resistant coatings for soft furnishing	2015	Vereinigte Staaten	Kartoffelstärke (+ Natriumpolyborat, Natrium-Montmorillonit)	Polymer	Polyurethan (PUR)
Ferry, L. et al.	Chemical modification of lignin by phosphorus molecules to improve the fire behavior of polybutylene succinate	2015	Frankreich	Lignin	Polymer	Polybutylsuccinat (PBS)
Battegazzore, D. et al.	Bulk vs. surface flame retardancy of fully bio-based polyamide 10,10	2015	Italien	Maisstärke	Polymer	Poly lactid (PLA)
Wang, Q. et al.	Facile construction of cellulose/montmorillonite nanocomposite biobased plastics with flame retardant and gas barrier properties	2015	China	Montmorillonit	Silikat	Cellulose
Xia, Z. et al.	Unraveling the mechanism of thermal and thermo-oxidative degradation of Tannic acid	2015	Vereinigte Staaten	Gerbsäure	Tannin	Polyamid 6

Wang, Z. et al.	Preparation of nucleotide-based microsphere and its application in intumescent flame retardant polypropylene	2016	China	Nukleoid (eingebettet in Melamin-Formaldehydharz) + intumeszierendes System	Nukleoid	Polypropylen (PP)
Li, C. et al.	Sustainable, Biobased Silicone with Layered Double Hydroxide Hybrid and Their Application in Natural-Fiber Reinforced Phenolic Composites with Enhanced Performance	2016	China	Eugenolderivat	Pflanzenextrakt	Phenolharz
Kalali, E. N. et al.	Synthesis of a Fe3O4 Nanosphere@Mg-Al Layered-Double-Hydroxide Hybrid and Application in the Fabrication of Multifunctional Epoxy Nanocomposites	2016	Spanien	Doppelhydroxid (LHD) modifiziert mit Phytinsäure, Hydroxypropyl)sulfobutyl-β-cyclodextrin-Natrium	Phytat	Epoxidharz
Cheng, X.-W. et al.	Phytic acid as a bio-based phosphorus flame retardant for poly(lactic acid) nonwoven fabric	2016	China	Phytinsäure	Phytat	Polylactid (PLA)
Feng, X. et al.	Studies on Synthesis of Electrochemically Exfoliated Functionalized Graphene and Poly(lactic acid)/Ferric Phytate Functionalized Graphene Nanocomposites as New Fire Hazard Suppression Materials	2016	China	Phytinsäure	Phytat	Polylactid (PLA)
Cheng, X.-W. et al.	Adsorption and Flame Retardant Properties of Bio-Based Phytic Acid on Wool Fabric	2016	China	Phytinsäure (+Titandioxid+Butantetracarbonsäure)	Phytat	Wolle
Jing, J. et al.	Synthesis of a highly efficient phosphorus-containing flame retardant utilizing plant-derived diphenolic acids and its application in poly(lactic acid)	2016	China	biobasiertes Polyphosphonat (aus pflanzlicher Diphenolsäure + bicyclischem Phosphor, Phenylphosphondichlorid)	Polymer	Polymilchsäure (PLA)
Costes, L. et al.	Cellulose/phosphorus combinations for sustainable fire retarded poly(lactide)	2016	Belgien	Cellulose (+Phosphorsäure)	Polymer	Poly(lactid) (PLA)
Pan, Y. et al.	Effect of Fully Biobased Coatings Constructed via Layer-by-Layer Assembly of Chitosan and Lignosulfonate on the Thermal, Flame Retardant, and Mechanical Properties of Flexible Polyurethane Foam	2016	China	Chitosan, Lignosulfonat	Polymer	Polyurethanschaum
Verdolotti, L. et al.	Fire retardant zein-based materials	2016	Italien	Lignin	Polymer	Thermoplastisches Protein Zein
Cayla, A. et al.	PLA with intumescent system containing lignin and ammonium polyphosphate for flame retardant textile	2016	Frankreich	Lignin (+Ammoniumpolyphosphat)	Polymer	Poly(lactid) (PLA)
Liu, L. et al.	Fabrication of Green Lignin-based Flame Retardants for Enhancing the Thermal and Fire Retardancy Properties of Polypropylene/Wood Composites	2016	China	Lignin (modifiziert mit Phosphor-, Stickstoff-, Kupferelementen)	Polymer	Wood Polymer Composites (WPC)
Prieur, B. et al.	Phosphorylation of lignin to flame retard acrylonitrile butadiene styrene (ABS)	2016	Frankreich	Phosphoryliertes Lignin	Polymer	Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)
Cai, L. et al.	Ultra-low density fibreboard with improved fire retardance and thermal stability using a novel fire-resistant adhesive	2016	China	Stärke	Polymer	Polyvinylalkohol (PVOH)
Kurańska, M. et al.	Bio-based polyurethane-polyisocyanurate composites with an intumescent flame retardant	2016	Polen	Polyole aus Rapsöl	Polyole	Polyurethan (PUR), Polyisocyanurat (PIR)
Kiratitanavit, W. et al.	Tannic acid: A bio-based intumescent char-forming additive for nylon 6	2016	Vereinigte Staaten	Gerbsäure	Tannin	Polyamid 6
Pan, Y. et al.	Effect of calcium ion crosslinked alginate based coating on flame retardancy of polyester-cotton fabric	2017	China	Alginat (+ Polyethylenimin)	Alginat	Polyester-Baumwollgewebe
Daniel, Y. G. et al.	Flame retardant properties of isosorbide bis-phosphorus esters	2017	Vereinigte Staaten	Isosorbidphosphorester	Ester	Epoxidharz
Daniel, Y. G. et al.	Synthesis and characterization of isosorbide bis-phosphorus esters	2017	Vereinigte Staaten	Isosorbidphosphorester	Ester	k.A.
Mao, W. et al.	Preparation of a flame-retardant epoxy curing agent based on castor oil and study on the curing reaction kinetics	2017	China	Ricinsäure modifiziert mit Itaconsäureanhydrid	Fettsäure	Epoxidharz
Chen, J. et al.	Self-assembly of hydroxyapatite with polyelectrolyte as a green flame retardant for poly(vinyl alcohol)	2017	China	Hydroxyapatit, Chitosan, Lignosulfonat	Mineral, Polymer	k.A.
Dahy, H.	Efficient Fabrication of Sustainable Building Products from Annually Generated Non-wood Cellulosic Fibres and Bioplastics with Improved Flammability Resistance	2017	Deutschland	Reisstroh	Naturfaser	Poly(lactid) (PLA)
Wang, Z. et al.	Regulating Effects of Nitrogenous Bases on the Char Structure and Flame Retardancy of Polypropylene/Intumescent Flame Retardant Composites	2017	China	Adenin, Guanin, Cytosin, Uracil (+ intumeszierendes Flammenschutzmittel)	Nukleobasen	Polypropylen (PP)
Zhao, X. et al.	Inclusion complex between beta-cyclodextrin and phenylphosphonicdiamide as novel bio-based flame retardant to epoxy: Inclusion behavior, characterization and flammability	2017	Spanien	Cyclodextrin (aus Stärke) (+ N, N'-Diamyl-phenylphosphondiamid)	Oligosaccharid	Epoxidharz
Wang, S. et al.	Vanillin-Derived High-Performance Flame Retardant Epoxy Resins: Facile Synthesis and Properties	2017	China	Vanillin	Pflanzenextrakt	Epoxidharz
Ding, H. et al.	Synthesis of a novel phosphorus and nitrogen-containing bio-based polyol and its application in flame retardant polyurethane foam	2017	China	Rizinusöl	Pflanzenöl	Polyurethan (PUR)
Jia, P. et al.	Phosphorus containing castor oil based derivatives: Potential non-migratory flame retardant plasticizer	2017	China	Rizinusölderivate (+ 9,10-Dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthren-10-oxid)	Pflanzenöl	PVC
Yang, X. et al.	Study on synthesis of novel phosphorus-containing flame retardant epoxy curing agents from renewable resources and the comprehensive properties of their combined cured products	2017	China	Rizinusöl, Myrcen	Pflanzenöl, Ätherisches Öl	Epoxidharz
Wang, X. et al.	Renewable Cardanol-Based Phosphate as a Flame Retardant Toughening Agent for Epoxy Resins	2017	Spanien	Phosphaphenanthrengruppen-haltiges Triscardanylphosphat (aus Cardanol)	Phosphorsäureester	Epoxidharz
Cheng, X.-W. et al.	Improvement of flame retardancy of silk fabric by bio-based phytic acid, nano-TiO2, and polycarboxylic acid	2017	China	Phytinsäure (+Titandioxid+Butantetracarbonsäure)	Phytat	Seide
Kalali, E. N. et al.	Flame-retardant wood polymer composites (WPCs) as potential fire safe bio-based materials for building products: Preparation, flammability and mechanical properties	2017	Spanien	Phytinsäure modifiziertes Doppelhydroxid (LDH) (+ APP)	Phytat	Wood Polymer Composites (WPC)

Ma, D. et al.	Effects of Zinc Phytate on Flame Retardancy and Thermal Degradation Behaviors of Intumescent Flame-retardant Polypropylene	2017	China	Zink-Phytat (+ intumescierendes Flammenschutzsystem)	Phytat	Polypropylen (PP)
Jing, J. et al.	Layer by layer deposition of polyethylenimine and bio-based polyphosphate on ammonium polyphosphate: A novel hybrid for simultaneously improving the flame retardancy and toughness of polylactic acid	2017	China	Biobasierter Hybrid (Kern: Ammoniumpolyphosphat, Schale: biobasierter Polyelektrolyt, Polyethylenimin)	Polymer	Polymilchsäure (PLA)
Matsushita, Y. et al.	A Biobased Flame-Retardant Resin Based on Lignin	2017	Japan	Kraft-Lignin (Modifiziert mit Phosphorylchlorid, 3-Amino-1,2,4-triazol)	Polymer	Harze
Mandlekar, N. et al.	Thermal Stability and Fire Retardant Properties of Polyamide 11 Microcomposites Containing Different Lignins	2017	Frankreich	Kraft-Lignin, Sulfonisiertes Lignin	Polymer	Polyamid 11
Mandlekar, N. et al.	Intumescent formulations based on lignin and phosphinates for the bio-based textiles	2017	Frankreich	Lignin (+Phosphinate)	Polymer	Polyamid 11
Wang, W. et al.	Phosphorylated cellulose applied for the exfoliation of LDH: An advanced reinforcement for polyvinyl alcohol	2017	China	Phosphorylierte Cellulose + Doppelhydroxide	Polymer	Polyvinylalkohol (PVOH)
Fontaine, G. et al.	From green to greener fire retarded biobased polymers	2017	China	Reisstärke	Polymer	Poly lactid (PLA)
Costes, L. et al.	Phytic acid–lignin combination: A simple and efficient route for enhancing thermal and flame retardant properties of polylactide	2017	Belgien	Lignin, Phytinsäure	Polymer, Phytat	Poly lactid (PLA)
Daniel, Y. G. et al.	Phosphorus flame retardants from isosorbide bis-acrylate	2018	Vereinigte Staaten	Isosorbidphosphorester	Ester	Bisphenol-A-Diglycidylether (DGEBA) k.A.
Daniel, Y. G. et al.	Thermal degradation of bis-phosphorus esters of isosorbide	2018	Vereinigte Staaten	Isosorbidphosphorester	Ester	Epoxidharz
Howell, B. A. et al.	Biobased flame retardants from tartaric acid and derivatives	2018	Vereinigte Staaten	Phosphinat-, Phosphatester von Weinsäure	Ester	Epoxidharz
Farooq, M. et al.	Eco-friendly Flame-Retardant Cellulose Nanofibril Aerogels by Incorporating Sodium Bicarbonate	2018	Finnland	Cellulose Nanofibrillen	Naturfaser	Polyvinylacetat (PVA)
Zhao, P. et al.	Renewable vanillin based flame retardant for poly(lactic acid): A way to enhance flame retardancy and toughness simultaneously	2018	Deutschland	Bis(5-formyl-2-methoxyphenyl) synthetisiert aus Vanillin	Pflanzenextrakt	Polymilchsäure (PLA)
Li, C. et al.	Biobased Epoxy Resin with Low Electrical Permissivity and Flame Retardancy: From Environmental Friendly High-Throughput Synthesis to Properties	2018	China	Eugenolderivat	Pflanzenextrakt	Epoxidharz
Li, D.-F. et al.	Tough and flame-retardant poly(lactic acid) composites prepared via reactive blending with biobased ammonium phytate and in situ formed crosslinked polyurethane	2018	China	Phytinsäure (+1,6-Hexandiamin)	Pflanzenextrakt	Polymilchsäure (PLA)
Bhoyate, S. et al.	Sustainable flame-retardant polyurethanes using renewable resources	2018	Vereinigte Staaten	Sojabohnen, Orangenschale, Rizinus	Pflanzenstoffe	Polyurethan (PUR)
Bocqué, M. et al.	Phosphonated Lipids as Primary Plasticizers for PVC with Improved Flame Retardancy	2018	Frankreich	Demethyl(methyloleat)phosphonat, Dimethyl(dimethyloleat)phosphonat	Phosphat	Polyvinylchlorid (PVC)
Chu, F. et al.	Construction of Hierarchical Natural Fabric Surface Structure Based on Two-Dimensional Boron Nitride Nanosheets and Its Application for Preparing Biobased Toughened Unsaturated Polyester Resin Composites	2018	China	Triphenylphosphathaltiges Agens	Phosphat	Polyester (ungesättigt)
Cheng, L. et al.	Application of metallic phytates to poly(vinyl chloride) as efficient biobased phosphorous flame retardants	2018	China	Phytate (Kupfer, Zink, Aluminium, Zinn)	Phytat	Polyvinylchlorid (PVC)
Jing, J. et al.	Combination of a bio-based polyphosphonate and modified graphene oxide toward superior flame retardant polylactic acid	2018	China	biobasiertes Polyphosphonat (+ polyethyleniminmodifiziertes Graphenoxid)	Polymer	Polymilchsäure (PLA)
Vadas, D. et al.	Flame retardancy of microcellular poly(lactic acid) foams prepared by supercritical CO <sub>2</sub> -assisted extrusion	2018	Ungarn	Cellulose (+Ammoniumpolyphosphat)	Polymer	Polymilchsäure (PLA)
Vahabi, H. et al.	Inclusion of modified lignocellulose and nano-hydroxyapatite in development of new bio-based adjuvant flame retardant for poly(lactic acid)	2018	Frankreich	Hydroxylapatit-modifizierte Braunkohlecellulose	Polymer	Polymilchsäure (PLA)
Sonnier, R. et al.	Flame Retardant Biobased Polymers	2018	Frankreich	Kraft-Lignin, Stärke (+ Ammoniumpolyphosphat), Lignin-Silika-Hybride	Polymer	Polymilchsäure (PLA)
						Polybutylensuccinat (PBS)
Maqsood, M. et al.	Investigation of the flammability and thermal stability of halogen-free intumescent system in biopolymer composites containing biobased carbonization agent and mechanism of their char formation	2018	Niederlande	Flachsfasern, Lignin, Halloisyt oder Sepiolith (+ Ammoniumpolyphosphat)	Polymer	Polymilchsäure (PLA)
Jiang, S.-D. et al.	Biobased polyelectrolyte multilayer-coated hollow mesoporous silica as a green flame retardant for epoxy resin	2018	China	Maisstärke (+Ammoniumpolyphosphat)	Polymer	Polymilchsäure (PLA)
Shi, X.-H. et al.	Carbon Fibers Decorated by Polyelectrolyte Complexes Toward Their Epoxy Resin Composites with High Fire Safety	2018	China	Mesoporöse Hohlkieselsäure, Chitosan, phosphorylierte Cellulose	Polymer	Epoxidharz
Wu, W. et al.	Synergetic enhancement on flame retardancy by melamine phosphate modified lignin in rice husk ash filled P34HB biocomposites	2018	China	Polyelektrolytkomplexe aus Chitosan (+ Ammoniumpolyphosphat)	Polymer	k.A.
Bhoyate, S. et al.	Highly flame-retardant polyurethane foam based on reactive phosphorus polyol and limonene-based polyol	2018	Vereinigte Staaten	melaminphosphatmodifiziertes Lignin + Reisschalenasche	Polymer, Pflanzenstoff	Poly(3-hydroxybutyrat-co-4-hydroxybutyrat)
Zhang, S. et al.	The preparation of fully bio-based flame retardant poly(lactic acid) composites containing casein	2018	China	Limonenbasierte Polyole	Polyole	Polyurethan (PUR)
						Polymilchsäure (PLA)

Laoutid, F. et al.	Novel Bio-based Flame Retardant Systems Derived from Tannic Acid	2018	Belgien	Gerbsäure	Tannin	Polymilchsäure (PLA)
Laoutid, F. et al.	A new direction in design of bio-based flame retardants for poly(lactic acid)	2018	Belgien	Gerbsäure, Phytinsäure (+Polyethylenimin, PEI)	Tannin	Polymilchsäure (PLA)
Xia, Z. et al.	Fire resistant polyphenols based on chemical modification of bio-derived tannic acid	2018	Vereinigte Staaten	Gerbsäureterephthalat	Tannin	Polyamid 66
Ma, D. et al.	Synthesis of a bio-based triazine derivative and its effects on flame retardancy of polypropylene composites	2018	China	Triazinderivat aus Cytosin, Cyanurchlorid (+Ammoniumpolyphosphat)	Triazin	Polypropylen (PP)
Xu, X. et al.	Vanillin-derived phosphorus-containing compounds and ammonium polyphosphate as green fire-resistant systems for epoxy resins with balanced properties	2019	China	Vanillin (+ Ammoniumpolyphosphat)	Pflanzenextrakt	Epoxidharz
Guo, W. et al.	Cardanol derived benzoxazine in combination with boron-doped graphene toward simultaneously improved toughening and flame retardant epoxy composites	2019	China	Benzoxazin aus Cardanol	Pflanzenstoffe	Epoxidharz
Hu, Z.-Y. et al.	Metal-phenolic networks: A biobased synergist for EVA/APP composites toward enhanced thermal stability and flame retardancy	2019	China	Aus Biomasse abgeleitetes Metall-Phenol-Netzwerk	Phenol	Ethylen-Vinylacetat (EVA) (+ Ammoniumpolyphosphat APP)
Gao, Y.-Y. et al.	A novel bio-based flame retardant for polypropylene from phytic acid	2019	China	Phytinsäure	Phytat	Polypropylen (PP)
Kundu, C. K. et al.	Few layer deposition and sol-gel finishing of organic-inorganic compounds for improved flame retardant and hydrophilic properties of polyamide 66 textiles: A hybrid approach	2019	China	Chitosan, Phytinsäure	Polymer, Phytat	Polyamid 66
Qian, W. et al.	High synergistic effects of natural-based tea saponin in intumescent flame-retardant coatings for enhancement of flame retardancy and pyrolysis performance	2019	China	Tee-Saponine (+intumeszierendes Flammenschutzsystem)	Saponin	k.A.
Passauer, L.	Thermal characterization of ammonium starch phosphate carbamates for potential applications as bio-based flame-retardants	2019	Deutschland	Ammoniumstärkephosphatcarbamaten (Kartoffelstärke-derivat)	Stärke-Carbamat	k.A.
Kim, Y.-O. et al.	Flame Retardant Epoxy Derived from Tannic Acid as Biobased Hardener	2019	Korea, Republik von	Gerbsäure (+ Diglycidylether von Bisphenol A)	Tannin	Epoxidharz

**Tabelle 44** Übersicht aller in der Suche nach biobasierten Flammenschutzmitteln gefundenen Reviews

Autor	Jahr	Titel
Bourbigot, Serge; Fontaine, Gaëlle	2010	Flame Retardancy Of Poly lactide: An Overview
Galià, Marina; Espinosa, Lucas Montero De; Ronda, Joan Carles; Ligadas, Gerard; Cádiz, Virginia	2010	Vegetable Oil-Based Thermosetting Polymers
Beach, E. S.; Weeks, B. R.; Stern, R.; Anastas, P. T.	2013	Plastics Additives And Green Chemistry
Duquesne, S.; Futterer, T.	2014	Intumescent Systems
Ma, Songqi; Li, Tingting; Liu, Xiaoping; Zhu, Jin	2016	Research Progress On Bio-Based Thermosetting Resins
Richard Hull, T.	2016	The Development Of Sustainable Fire Retardant Materials
Costes, L.; Laoutid, F.; Brohez, S.; Dubois, P.	2017	Bio-Based Flame Retardants: When Nature Meets Fire Protection
Shah, A.u.r.; Prabhakar, M. N.; Song, J.-I.	2017	Current Advances In The Fire Retardancy Of Natural Fiber And Bio-Based Composites – A Review
Zhang, C.; Garrison, T. F.; Madbouly, S. A.; Kessler, M. R.	2017	Recent Advances In Vegetable Oil-Based Polymers And Their Composites
Jia, P.; Xia, H.; Tang, K.; Zhou, Y.	2018	Plasticizers Derived From Biomass Resources: A Short Review
Kim, N. K.; Dutta, S.; Bhattacharyya, D.	2018	A Review Of Flammability Of Natural Fibre Reinforced Polymeric Composites
Hobbs, Christopher E.	2019	Recent Advances In Bio-Based Flame Retardant Additives For Synthetic Polymeric Materials

**Tabelle 45** Übersicht aller eingeschlossenen Publikationen zu biobasierten Weichmachern

Autor	Titel	Jahr	Land	Bioadditiv	Kategorie	Kunststoff
Lai, H.-M. et al.	Properties and Microstructure of Zein Sheets Plasticized with Palmitic and Stearic Acids	1997	Vereinigte Staaten	Palmitinsäure, Stearinsäure	Carbonsäurederivate	Zein (Protein)
Cuq, B. et al.	Selected Functional Properties of Fish Myofibrillar Protein-Based Films As Affected by Hydrophilic Plasticizers	1997	Frankreich	Glycerin, Sorbitol, Saccharose	Glycerin, Zuckerderivat	Proteinbasiertes Polymerharz
Labrecque L. V. et al.	Citrate esters as plasticizers for poly(lactic acid)	1998	Vereinigte Staaten	Citrate	Citrat	Poly lactid (PLA)
Van Soest, J. J. G. et al.	Influence of glycerol and water content on the structure and properties of extruded starch plastic sheets during aging	1998	Niederlande	Glycerin, Wasser	Glycerin, Wasser	Thermoplastische Stärke (TPS)
Mohanty, A. K. et al.	Development of renewable resource-based cellulose acetate bioplastic: Effect of process engineering on the performance of cellulosic plastics	2003	Vereinigte Staaten	Triethylcitrate	Citrat	Celluloseacetat (CA)
Park, H.-M. et al.	"Green" Nanocomposites from Cellulose Acetate Bioplastic and Clay: Effect of Eco-Friendly Triethyl Citrate Plasticizer	2004	Vereinigte Staaten	Triethylcitrate	Citrat	Celluloseacetat (CA)

Fernandes, E. G. et al.	Thermal behavior of composites based on poly(vinyl alcohol) and sugar cane bagasse	2004	Italien	Glycerin	Glycerin	Polyvinylalkohol (PVA)
Parra, D. F. et al.	Mechanical properties and water vapor transmission in some blends of cassava starch edible films	2004	Brasilien	Glycerin	Glycerin	Polysaccharide
Gil, N. et al.	Evaluation of the effects of biobased plasticizers on the thermal and mechanical properties of poly(vinyl chloride)	2006	Vereinigte Staaten	Acetyltributylcitrate, Tributylacconat, Tributylcitrate	Citrat	Polyvinylchlorid (PVC)
Negulescu, I. et al.	Flame retarded biobased nonwoven composites prepared entirely from annual plants	2006	Vereinigte Staaten	Tributylcitrate	Citrat	Polyvinylalkohol (PVA)
Uyama, H. et al.	Plasticization of poly (lactic acid) by bio-based resin modifiers	2006	Japan	Polyglycerin	Polymer	Polylactid (PLA)
van Haveren, J. et al.	How biobased products contribute to the establishment of sustainable, phthalate free, plasticizers and coatings	2006	Niederlande	Isosorbiddiester	Zuckerderivat	Polyvinylchlorid (PVC)
Veiga-Santos, P. et al.	Sucrose and inverted sugar as plasticizer. Effect on cassava starch-gelatin film mechanical properties, hydrophilicity and water activity	2007	Brasilien	Saccharose, Invertzucker	Zuckerderivat	Thermoplastische Stärke (TPS)
Sailaja, R.R.N. et al.	Effect of compatibilization on mechanical and thermal properties of polypropylene-soy flour composites	2008	Indien	Glycerin	Glycerin	Polypropylen (PP)
Okieimen, F. E. et al.	The effect of bio-based plasticizer on the permanence and water vapour transport properties of PVC plastigels	2008	Nigeria	epoxidiertes Gummibaumsamenöl	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)
Martinz, D. et al.	Compounding PVC with renewable materials	2008	Brasilien	Pflanzenöl	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)
Lu, J. et al.	Additive toughening effects on new bio-based thermosetting resins from plant oils	2008	Vereinigte Staaten	Epoxidiertes Soja-Flüssig-Kautschuk	Sonstige	Triglyceridbasierte Duroplastharze
Souza, A. C. et al.	Packaging properties of cassava starch nanocomposite films	2009	Brasilien	Glycerin	Glycerin	Thermoplastische Stärke (TPS)
Hassan-Nejad, M. et al.	Bio-based nanocomposites of cellulose acetate and nano-clay with superior mechanical Properties	2009	Deutschland	Glycerintriacetat	Glycerinderivat	Celluloseacetat (CA)
Imran, M. et al.	Cellulose derivative based active coatings: Effects of nisin and plasticizer on physico-chemical and antimicrobial properties of hydroxypropyl methylcellulose films	2010	Frankreich	Glycerin	Glycerin	Hydroxypropylmethylcellulose (HPMC)
Chivrac, F. et al.	Starch-based nano-biocomposites: Plasticizer impact on the montmorillonite exfoliation process	2010	Malaysia	Glycerin, Sorbit	Glycerin, Zuckerderivat	Thermoplastische Stärke (TPS)
Nejad, M. H. et al.	Starch esters with improved mechanical properties through melt compounding with nanoclays	2010	Deutschland	Glycerintriacetat	Glycerinderivat	Stärkeacetat, Stärkepropionat
Benaniba, M. T. et al.	Evaluation effects of biobased plasticizer on the thermal, mechanical, dynamical mechanical properties, and permanence of plasticized PVC	2010	Algerien	epoxidiertes Sonnenblumenöl	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)
McKeon, T. A.	Industrial applications of castor oil and the castor plant	2010	Vereinigte Staaten	Rizinusöl	Pflanzenöle	k.A.
Stuart, A. et al.	Poly(vinyl chloride) plasticized with succinate esters: Synthesis and characterization	2010	Vereinigte Staaten	Diocylsuccinat, Dihexylsuccinat, Dibutylsuccinat, Diethylsuccinat	Succinat	Polyvinylchlorid (PVC)
Valverde, M. et al.	Rubbers based on conjugated soybean oil: Synthesis and characterization	2011	Vereinigte Staaten	Biodiesel	Biodiesel	Naturkautschuk
Courgneau, C. et al.	Analysis of the Structure-Properties Relationships of Different Multiphase Systems Based on Plasticized Poly(Lactic Acid)	2011	Frankreich	Acetyltributylcitrate	Citrat	Polylactid (PLA)
Liu, B. et al.	Preparation and Properties of Water and Glycerol-plasticized Sugar Beet Pulp Plastics	2011	Vereinigte Staaten	Glycerin, Wasser	Glycerin, Wasser	Zuckerbasiertes Polymer
Gupta, A. P. et al.	Modification of novel bio-based resin-epoxidized soybean oil by conventional epoxy resin	2011	Indien	Epoxidiertes Sojabohnenöl	Pflanzenöle	Bisphnol-A-Diglycidylether (BADGE)
K Portal	LANXESS: Biobasierte Weichmacher	2011	Deutschland	Bernsteinsäure	Succinat	k.A.
Kunststoff Magazin	Grüne Werkstoffe - Biobasierte Weichmacher	2011	Deutschland	Bernsteinsäure	Succinat	k.A.
Li, H. et al.	Triticale starch based bioplastics	2011	Kanada	Sorbitol, Glycerin	Zuckerderivat, Glycerin	Thermoplastische Stärke (TPS)
Peter Frenkel	Bio-based plasticizer	2012	Vereinigte Staaten	Diglyceride	Glycerinderivat	Polyvinylchlorid (PVC)
Sommer, I. et al.	Preparation of bio-based films and coatings by spraying of native, fibrous and viscous collagen suspensions	2012	Deutschland	Lecithin	Phospholipid	Kollagen
da Silva, J. B. A. et al.	Cassava Starch-Based Films Plasticized with Sucrose and Inverted Sugar and Reinforced with Cellulose Nanocrystals	2012	Brasilien	Saccharose, Fruktose/Glukose	Zuckerderivat	Thermoplastische Stärke (TPS)

Burgos, N. et al.	Characterization and ageing study of poly(lactic acid) films plasticized with oligomeric lactic acid	2013	Spanien	Oligolactid	Carbonsäurederivate	Polylactid (PLA)
Iman, M. et al.	Effect of crosslinker and nanoclay on jute fabric reinforced soy flour green composite	2013	Indien	Glycerin	Glycerin	k.A.
Newson, W. R. et al.	Oilseed meal based plastics from plasticized, hot pressed crambe abyssinica and brassica carinata residuals	2013	Schweden	Glycerin	Glycerin	Ölsamenmehlbasierte Kunststoffe
Pang, J. et al.	Fabrication of cellulose film with enhanced mechanical properties in ionic liquid 1-allyl-3-methylimidazolium chloride (AmimCl)	2013	China	Glycerin	Glycerin	Cellulose
Smet, D. et al.	Biobased materials in textile finishing and coating	2013	Belgien	Glycerin	Glycerin	Sojabasiertes Polymer
Azwar, E. et al.	Liquefied biomass derived plasticizer for polylactide	2013	Schweden	flüssiges Holz	Holz	Polylactid (PLA)
Xiong, Z. et al.	Preparation and characterization of poly(lactic acid)/starch composites toughened with epoxidized soybean oil	2013	China	Epoxidiertes Sojabohnenöl	Pflanzenöle	Polylactid (PLA)
Lardjane, N. et al.	Migration of new bio-based additives from rigid and plasticized PVC stabilized with epoxidized sunflower oil in soil	2013	Algerien	epoxidiertes Sonnenblumenöl, epoxidiertes Sojabohnenöl	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)
Lardjane, N. et al.	Soil burial degradation of new bio-based additives. Part II. plasticized poly(vinyl chloride) films	2013	Algerien	epoxidiertes Sonnenblumenöl, epoxidiertes Sojabohnenöl	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)
Kann, Y.	Modification of PVC with bio-based PHA rubber. Part 2	2013	Vereinigte Staaten	Polyhydroxalkanoate (PHA)	Polymer	Polyvinylchlorid (PVC)
Kann, Y.	Modifying PVC with bio-based PHA rubber	2013	Vereinigte Staaten	Polyhydroxalkanoate (PHA)	Polymer	Polyvinylchlorid (PVC)
Mikkonen, K. S. et al.	Crosslinking with ammonium zirconium carbonate improves the formation and properties of spruce galactoglucomannan films	2013	Finnland	Sorbitol	Zuckerderivat	Fichte O-Acetyl-Galactoglucomannane
Nafchi, A. M. et al.	Thermoplastic starches: Properties, challenges, and prospects	2013	Iran	Zucker, Wasser, Glycerin	Zuckerderivat, Wasser, Glycerin	Thermoplastische Stärke (TPS)
Burgos, N. et al.	Synthesis and Characterization of Lactic Acid Oligomers: Evaluation of Performance as Poly(Lactic Acid) Plasticizers	2014	Spanien	Oligolactid	Carbonsäurederivate	Polylactid (PLA)
Arrieta, M. P. et al.	Plasticized poly(lactic acid)-poly(hydroxybutyrate) (PLA-PHB) blends incorporated with catechin intended for active food-packaging applications	2014	Spanien	Acetyltributylcitrate	Citrat	Polylactid (PLA)/Polyhydroxybutyrat (PHB) Blend
Tanrattanakul, V. et al.	Effect of different plasticizers on the properties of bio-based thermoplastic elastomer containing poly(lactic acid) and natural rubber	2014	Thailand	Tributylacetylacrylate, Tributylcitrate, Glycerintriacetat, Triethyl-2-acetylacrylate	Citrat	Polylactid (PLA)/Naturkautschuk Blend
Hooshmand, S. et al.	Melt spun cellulose nanocomposite fibres: Comparison of two dispersion techniques	2014	Schweden	Triethylcitrate	Citrat	Celluloseacetatbutyrat (CAB)
Baishya, P. et al.	Studies on effects of different cross-linkers on the properties of starch-based wood composites	2014	Indien	Glycerin	Glycerin	Methylmethacrylat gepfropfte Stärke
Sherafati, M. et al.	Evaluating the effects of different plasticizers on mechanical properties of starch/ clay nanocomposites	2014	Iran	Glycerin	Glycerin	Thermoplastische Stärke (TPS)
Abbott, A. P. et al.	Glycol based plasticisers for salt modified starch	2014	Großbritannien	Glycerin	Glycerin	Thermoplastische Stärke (TPS)
Pang, M.-M. et al.	Carbon footprint calculation for thermoformed starch-filled polypropylene biobased materials	2014	Malaysia	Glycerin	Glycerin	Polypropylen (PP)
Shi, W. et al.	Processing and physical properties of canola protein isolate-based films	2014	Kanada	Glycerin, Stearinsäure	Glycerin, Carbonsäurederivate	Canolaproteinbasiertes Polymer
Félix, M. et al.	Development of albumen/soy biobased plastic materials processed by injection molding	2014	Spanien	Glycerin, Sorbitol	Glycerin, Zuckerderivat	Proteinbasiertes Polymerharz
Rahman, M. M. et al.	Bio-based polymeric resin from agricultural waste, neem (azadirachta indica) seed cake, for green composites	2014	Vereinigte Staaten	Glycerin, Sorbitol	Glycerin, Zuckerderivat	Proteinbasiertes Polymerharz
Jia, P. et al.	Application review of biological glyceryl and castor oil based polyester plasticizer	2014	China	Rizinusöl-derivate, Glycerinderivate	Glycerinderivat, Pflanzenöle	k.A.
Yin, B. et al.	Green Plasticizers from Liquefied Wood	2014	Schweden	flüssiges Holz	Holz	Polyvinylchlorid (PVC)
Mehta, B. et al.	Benzyl ester of dehydrated castor oil fatty acid as plasticizer for poly(vinyl chloride)	2014	Indien	Dehydrierte Rizinusölfettsäuren	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)
Audic, J.-L. et al.	Thermal and mechanical properties of a polyhydroxyalkanoate plasticized with biobased epoxidized broccoli oil	2014	Frankreich	epoxidiertes Brokkoliöl	Pflanzenöle	Polyhydroxyalkanoat (PHA)
Bhakti Mehta, M. K., J. M.	Bio-Based Co-Plasticizer für PVC in Addition with Epoxidised Soybean Oil to Replace Phthalates	2014	Indien	Fettsäurebenzylester (aus Rizinusöl)	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)

Mehta, B. et al.	Diester based on castor oil fatty acid as plasticizer for poly(vinyl chloride)	2014	Indien	Rizinusölfettsäuren	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)
Xie, Z. et al.	Effects of bio-based plasticizers on mechanical and thermal properties of PVC/wood flour composites	2014	China	Cardanolacetat, epoxidierete Fettsäuremethylester	Pflanzenstoffe	Polyvinylchlorid (PVC)
Rejaibi, M. et al.	Elaboration of novel biosourced AA-BB polyamides with dangling chains from methyl ricinoleate	2014	Frankreich	biobasiertes Polyamid	Polymer	Polyamid (PA)
Andreeßen, B. et al.	Poly(3-hydroxypropionate): A promising alternative to fossil fuel-based materials	2014	Deutschland	poly(3-hydroxybutyrate)	Polymer	k.A.
Wu, Y. et al.	Synthesis and characterization of a novel aliphatic polyester based on itaconic acid	2014	China	Poly(butylene 2-methylsuccinate)	Polymer	Polyvinylchlorid (PVC)
Xie, T. et al.	Application of Poly(butylenes 2-methylsuccinate) as Migration Resistant Plasticizer for Poly(vinyl chloride)	2014	China	Poly(butylenes 2-methylsuccinate)	Polymer	Polyvinylchlorid (PVC)
Yu, R.-L. et al.	Improvement in toughness of polylactide by melt blending with bio-based poly(ester)urethane	2014	China	Polyesterurethane	Polymer	Polylactid (PLA)
Sin, M. C. et al.	Viscoelastic, spectroscopic, and microscopic characterization of novel bio-based plasticized poly(vinyl chloride) compound	2014	Malaysia	Polyhydroxalkanoate (PHA)	Polymer	Polyvinylchlorid (PVC)
Schutysen, W. et al.	Regioselective synthesis of renewable bisphenols from 2,3-pentanedione and their application as plasticizers	2014	Belgien	2,3-Pentadionbasierte Bisphenole	Sonstige	Polyethylenterephthalat (PET)
Medizin & Technik	Additiv für polare Thermoplaste	2014	Deutschland	Bernsteinsäuredialkanoate	Succinat	Polyvinylchlorid (PVC), Polylactid (PLA), Polyhydroxybutyrat (PHB), Celluloseacetat (CA), Polystyrol (PS) k.A.
	Oxea produziert biobasierte Weichmacher	2014	Deutschland	Diocylsuccinat, Acetyltributylcitrate	Succinat	k.A.
	Oxea bringt biobasierte Weichmacher auf den Markt	2014	Deutschland	Diocylsuccinat, Acetyltributylcitrate	Succinat	k.A.
K-aktuell	Oxea: Biobasierte Weichmacher „Oxblue“ auf dem Markt	2014	Deutschland	Diocylsuccinat, Acetyltributylcitrate	Succinat, Citrat	k.A.
Yu, Z. et al.	Evaluating effects of biobased 2,5-furandicarboxylate esters as plasticizers on the thermal and mechanical properties of poly (vinyl chloride)	2014	China	2,5-Furandicarboxylester	Zuckerderivat	Polyvinylchlorid (PVC)
Yin, B. et al.	Glucose esters as biobased PVC plasticizers	2014	Schweden	Glucosehexanoatester	Zuckerderivat	Polyvinylchlorid (PVC)
Le Normand, M. et al.	The bark biorefinery: a side-stream of the forest industry converted into nanocomposites with high oxygen-barrier properties	2014	Schweden	Sorbit	Zuckerderivat	Polysaccharide/Cellulose Composites
Rahman, M. M. et al.	Green resin from forestry waste residue "karanja (Pongamia pinnata) Seed cake" for biobased composite structures	2014	Vereinigte Staaten	Sorbitol	Zuckerderivat	Proteinbasiertes Polymerharz
Bouchoul, B. et al.	Effect of biobased plasticizers on thermal, mechanical, and permanence properties of poly (vinyl chloride)	2014	Algerien	Isosorbid, epoxidierete Sonnenblumenöl	Zuckerderivat, Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)
Isikgor, F. H. et al.	Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers	2015	Türkei	1,5-Pentandiol, Levulinsäurebasierte Ketale	Carbonsäurederivate	Polyvinylchlorid (PVC)
Yang, S. et al.	Characterization and biodegradation behavior of bio-based poly(lactic acid) and soy protein blends for sustainable horticultural applications	2015	Vereinigte Staaten	Adipinsäureanhydrid	Carbonsäurederivate	Sojabasiertes Polymer
Winkler, H. et al.	Synthesis of hydrophobic whey protein isolate by acylation with fatty acids	2015	Deutschland	Ölsäure	Carbonsäurederivate	Weizenproteinbasierte Polymere
Howell, B. A. et al.	Thermal degradation of esters/ethers derived from tartaric acid	2015	Vereinigte Staaten	Tartarsäureester / Tartarsäureether	Carbonsäurederivate	Polyvinylchlorid (PVC)
Arrieta, M. P. et al.	Bionanocomposite films based on plasticized PLA-PHB/cellulose nanocrystal blends	2015	Spanien	Acetyltributylcitrate	Citrat	Polylactid (PLA)/Polyhydroxybutyrat (PHB) Blend
bioplastics magazine	Citrate plasticizers offer biobased plasticizer solution for polymers	2015	Deutschland	Acetyltributylcitrate	Citrat	k.A.
Notta-Cuvier, D. et al.	Tailoring polylactide properties for automotive applications: Effects of co-addition of halloysite nanotubes and selected plasticizer	2015	Frankreich	Tributylcitrate	Citrat	Polylactid (PLA)
Maiza, M. et al.	Biobased additive plasticizing Poly(lactic acid) (PLA)	2015	Algerien	Triethylcitrate, Acetyltributylcitrate	Citrat	Polylactid (PLA)
Jost, V. et al.	Effect of different plasticisers on the mechanical and barrier properties of extruded cast PHBV films	2015	Deutschland	Glycerin, Triethylcitrate, Rizinusöl, epoxidierete Sojabohnenöl	Glycerin, Citrat, Pflanzenöle	Poly[(3-hydroxybutyrate)-co-(3-hydroxyvalerate)] (PHBV)
Herrera, N. et al.	Plasticized polylactic acid/cellulose nanocomposites prepared using melt-extrusion and liquid feeding: Mechanical, thermal and optical properties	2015	Schweden	Glycerintriacetat	Glycerinderivat	Poly(lactid (PLA)
Meszynska, A. et al.	Effect of Oligo-Hydroxyalkanoates on Poly(3-Hydroxybutyrate-co-4-Hydroxybutyrate)-Based Systems	2015	Frankreich	Monoglyceridacetat	Glycerinderivat	Polyhydroxybutyrat (PHB)

Chaudhary, B.	Use of bio-based plasticisers for polyvinyl chloride [Einsatz von Bioweichmachern für Polyvinylchlorid]	2015	Vereinigte Staaten	Epoxidiertes Sojabohnenöl	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)
Mao, D. et al.	Absorption and migration of bio-based epoxidized soybean oil and its mixtures with tri(2-ethylhexyl) trimellitate in poly(vinylchloride)	2015	China	Epoxidiertes Sojabohnenöl	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)
Chaudhary, B. I. et al.	Dialkyl furan-2,5-dicarboxylates, epoxidized fatty acid esters and their mixtures as bio-based plasticizers for poly(VInylchloride)	2015	Vereinigte Staaten	Epoxidiertes Sojabohnenöl, epoxidierte Fettsäuremethylester	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)
Haney, P. et al.	Exploring coconut shell reinforced polypropylene in olefin blends	2015	Vereinigte Staaten	Kokosöl	Pflanzenöle	Polypropylen (PP)
Lim, K. et al.	Effect of Palm Oil Bio-Based Plasticizer on the Morphological, Thermal and Mechanical Properties of Poly(Vinyl Chloride)	2015	Malaysia	Palmölbasiertes Alkyd	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)
Chaudhary, B. I. et al.	Bis(2-ethylhexyl) succinate in mixtures with epoxidized soybean oil as bio-based plasticizers for poly(vinylchloride)	2015	Vereinigte Staaten	Epoxidiertes Sojabohnenöl, Bis(2-ethylhexyl)succinat	Pflanzenöle, Succinat	Polyvinylchlorid (PVC)
Chen, J. et al.	A novel biobased plasticizer of epoxidized cardanol glycidyl ether: synthesis and application in soft poly(vinyl chloride) films	2015	China	Epoxidierter Cardanoglycidylether	Pflanzenstoffe	Polyvinylchlorid (PVC)
Rejaibi, M. et al.	Synthesis and physicochemical properties of new fatty (co)polyamides as potential UV powder coating	2015	Frankreich	biobasiertes Polyamid	Polymer	Polyamid (PA)
Jia, P. et al.	Synthesis and characterization of glyceryl monooleate-based polyester	2015	China	Poly(Bernsteinsäure-glycerylmonooleat)	Polymer	Polyvinylchlorid (PVC)
Yang, X. et al.	Two step extrusion process: From thermal recycling of PHB to plasticized PLA by reactive extrusion grafting of PHB degradation products onto PLA chains	2015	Schweden	Polyhydroxybutyrat (PHB)	Polymer	Polylactid (PLA)
Mary Kate Davis, D. T.	Biobased plasticizer and surface covering employing same	2015	Vereinigte Staaten	Furfuralderivate	Zuckerderivat	Polyvinylchlorid (PVC)
Yang, X. et al.	Migration resistant glucose esters as bioplasticizers for polylactide	2015	Schweden	Glucosepentaacetat, Saccharoseoctaacetat, Glucosehexanoatester	Zuckerderivat	Polylactid (PLA)
Battegazzore, D. et al.	Isosorbide, a green plasticizer for thermoplastic starch that does not retrograde	2015	Italien	Isosorbid	Zuckerderivat	Thermoplastische Stärke (TPS)
Mikkonen, K. S. et al.	Combination of internal and external plasticization of hydroxypropylated birch xylan tailors the properties of sustainable barrier films	2015	Finnland	Sorbitol	Zuckerderivat	Polysaccharide
Ruellan, A. et al.	Solubility factors as screening tools of biodegradable toughening agents of polylactide	2015	Frankreich	Isosorbidester, Squalen	Zuckerderivat, Pflanzenstoffe	Polylactid (PLA)
Requena, R. et al.	Effect of plasticizers on thermal and physical properties of compression-moulded poly[(3-hydroxybutyrate)-co-(3-hydroxyvalerate)] films	2016	Spanien	Laurinsäure, Stearinsäure	Carbonsäurederivate	Poly[(3-hydroxybutyrate)-co-(3-hydroxyvalerate)] (PHBV)
Wang, Y. et al.	Synthesis and characterization of novel pentaerythritol ester as PVC plasticizer	2016	China	Levulinsäure-Pentaerythritol-Ketalester	Carbonsäurederivate	Polyvinylchlorid (PVC)
Ferri, J. M. et al.	Plasticizing effect of biobased epoxidized fatty acid esters on mechanical and thermal properties of poly(lactic acid)	2016	Spanien	Octyl 9,10-epoxystearate	Carbonsäurederivate	Polylactid (PLA)
Arrieta, M. P. et al.	Biodegradable electrospun bionanocomposite fibers based on plasticized PLA–PHB blends reinforced with cellulose nanocrystals	2016	Spanien	Acetyltributylcitrate	Citrat	Polylactid (PLA)/Polyhydroxybutyrat (PHB) Blend
Fonseca, J. D. et al.	Dynamic Simulation and Optimisation of an Industrial Process for Tributyl Citrate Production	2016	Kolumbien	Acetyltributylcitrate	Citrat	k.A.
Chai, M. N. et al.	Novel Proton Conducting Solid Bio-polymer Electrolytes Based on Carboxymethyl Cellulose Doped with Oleic Acid and Plasticized with Glycerol	2016	Malaysia	Glycerin	Glycerin	Solid Biopolymer Electrolytes (SBE)
Félix, M. et al.	Development of rice protein bio-based plastic materials processed by injection molding	2016	Spanien	Glycerin	Glycerin	Reisproteinbasiertes Polymer
Perez, V. et al.	Characterization of pea protein-based bioplastics processed by injection moulding	2016	Spanien	Glycerin	Glycerin	Erbsenproteinbasiertes Polymer
Posada, J. C. et al.	Bio-based composites from agricultural wastes: Polylactic acid and bamboo Guadua angustifolia	2016	Kolumbien	Glycerin	Glycerin	Polylactid (PLA)
D'Amico, D. A. et al.	Fully bio-based and biodegradable polylactic acid/poly(3-hydroxybutyrate) blends: Use of a common plasticizer as performance improvement strategy	2016	Argentinien	Tributtersäureglycerinester	Öl	Polylactid (PLA)
Sammaiah, A. et al.	Effect of epoxidized jatropha oil on the cure, thermal, morphological and viscoelastic properties of epoxy resins	2016	Indien	Epoxidiertes Jatrophaöl	Pflanzenöle	Epoxidharze
Balart, J. F. et al.	Processing and characterization of high environmental efficiency composites based on PLA and hazelnut shell flour (HSF) with biobased plasticizers derived from epoxidized linseed oil (ELO)	2016	Spanien	epoxidiertes Leinsamenöl	Pflanzenöle	Polylactid (PLA)
Ruellan, A. et al.	Palm oil deodorizer distillate as toughening agent in polylactide packaging films	2016	Frankreich	Palmölbasiertes Desodorierungsdestillat	Pflanzenöle	Polylactid (PLA)
Jia, P. et al.	A novel biobased polyester plasticizer prepared from palm oil and its plasticizing effect on poly (vinyl chloride)	2016	China	Palmölmonoglyceridpolyester	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)

Frollini, E. et al.	Polymeric materials from renewable resources	2016	Brasilien	Rizinusöl	Pflanzenöle	Lignopolyphenol, Lignopolyurethan
Bétron, C. et al.	Control of diffusion and exudation of vegetable oils in EPDM copolymers	2016	Frankreich	Tungöl	Pflanzenöle	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM)
Carbonell-Verdu, A. et al.	A new biobased plasticizer for poly(vinyl chloride) based on epoxidized cottonseed oil	2016	Spanien	Baumwollsamensöl	Pflanzenstoffe	Polyvinylchlorid (PVC)
Greco, A. et al.	Cardanol derivatives as innovative bio-plasticizers for poly-(lactic acid)	2016	Italien	Cardanolacetat	Pflanzenstoffe	Polylactid (PLA)
Arrigo, R. et al.	Biopolyester-based systems containing naturally occurring compounds with enhanced thermooxidative stability	2016	Italien	Ferulasäure, Vanillinsäure, Quercetin, Tocopherol/Tocotrienol	Pflanzenstoffe	Polylactid (PLA)
Hassourma, F. et al.	Design of New Cardanol Derivative: Synthesis and Application as Potential Biobased Plasticizer for Poly(lactide)	2016	Tschechische Republik	Methoxyliertes Hydroxyethylcardanol	Pflanzenstoffe	Polylactid (PLA)
Jia, P. et al.	Synthesis of a novel polyester plasticizer based on glyceryl monooleate and its application in poly(vinyl chloride)	2016	China	Poly(glutarsäure-glyceryl-monooleat)	Polymer	Polyvinylchlorid (PVC)
Rowe, M. D. et al.	Bio-based plasticizer and thermoset polyesters: A green polymer chemistry approach	2016	Vereinigte Staaten	Poly(trimethylene malonate), Poly(trimethylene itaconat)	Polymer	k.A.
Lee, K. W. et al.	Synthesis and characterization of bio-based alkyl terminal hyperbranched polyglycerols: A detailed study of their plasticization effect and migration resistance	2016	Korea, Republik von	Polyglycerin	Polymer	Polyvinylchlorid (PVC)
Omrani, I. et al.	Synthesis of a bio-based plasticizer from oleic acid and its evaluation in PVC formulations	2016	Iran	methyl 10-(2-methoxy-2-oxoethansulfonyl) octadecanoate, ethyl 10-(2-ethoxy-2-oxoethansulfonyl) octadecanoate	Sonstige	Polyvinylchlorid (PVC)
Satavalekar, S. D. et al.	Triester-amide based on thiophene and ricinoleic acid as an innovative primary plasticizer for poly(vinyl chloride)	2016	Indien	Triesteramid von Tiophen	Sonstige	Polyvinylchlorid (PVC)
He, M. et al.	Preparation of bio-based polyamide elastomer by using green plasticizers	2016	Tschechische Republik	Wasser, Sojabohnenöl, Glycerin	Wasser, Pflanzenöle, Glycerin	Polyamid (PA)
Yang, Y. et al.	Isosorbide dioctoate as a "green" plasticizer for poly(lactic acid)	2016	China	Isosorbiddioctoate	Zuckerderivat	Polylactid (PLA)
Rahman, M. M. et al.	Micro-fibrillated cellulose reinforced eco-friendly polymeric resin from non-edible 'Jatropha curcas' seed waste after biodiesel production	2016	Vereinigte Staaten	Sorbitol	Zuckerderivat	Proteinbasiertes Polymerharz
Lhamo, D. et al.	Effect of protein addition on properties of guayule natural rubber	2017	Vereinigte Staaten	Aminosäuren	Aminosäuren	Guayule Naturkautschuk
Liu, T. et al.	Performance testing of a green plasticizer based on lactic acid for PVC	2017	China	Acetylierte Milchsäure 1,4-Cyclohexandimethylester	Carbonsäurederivate	Polyvinylchlorid (PVC)
Li, M. et al.	Tung oil based plasticizer and auxiliary stabilizer for poly(vinyl chloride)	2017	China	Epoxidierte Dicarbonsäuredimethylester	Carbonsäurederivate	Polyvinylchlorid (PVC)
Gallos, A. et al.	Microstructural and Chemical Approach to Highlight How a Simple Methyl Group Affects the Mechanical Properties of a Natural Fibers Composite	2017	Frankreich	Ferulasäurederivate	Carbonsäurederivate	Polycaprolacton (PCL)
Herrera, N. et al.	Triethyl citrate (TEC) as a dispersing aid in poly(lactic acid)/chitin nanocomposites prepared via liquid-assisted extrusion	2017	Schweden	Triethylcitrate	Citrat	Polylactid (PLA)
Jia, P. et al.	PVC materials without migration obtained by chemical modification of azide-functionalized PVC and triethyl citrate plasticizer	2017	China	Triethylcitrate	Citrat	Polyvinylchlorid (PVC)
Muhammad, A. et al.	Development of bio based plastic materials for packaging from soybeans waste	2017	Malaysia	Glycerin	Glycerin	Thermoplastische Stärke (TPS)
Seoane, I. T. et al.	Effect of Cellulose Nanocrystals and Bacterial Cellulose on disintegrability in composting conditions of Plasticized PHB Nanocomposites	2017	Argentinien	Tributtersäureglycerinester	Glycerinderivat	Polyhydroxybutyrat (PHB)
Lardjane, N. et al.	Soil burial degradation of new bio-based additive plasticized poly (vinyl chloride) films and the biodegradation of di octyl phthalate and di isononyl adipate plasticizers	2017	Algerien	epoxidiertes Sonnenblumenöl, epoxidiertes Sojabohnenöl	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)
Bouchoul, B. et al.	Thermal and mechanical properties of bio-based plasticizers mixtures on poly (vinyl chloride)	2017	Algerien	epoxidiertes Sonnenblumenöl, epoxidiertes Sonnenblumenöl Methyl Ester, Acetyltributylcitrate, Isosorbiddiester	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)
Ferri, J. M. et al.	The effect of maleinized linseed oil as biobased plasticizer in poly(lactic acid)-based formulations	2017	Spanien	Maleiniertes Leinsamenöl	Pflanzenöle	Polylactid (PLA)
Chieng, B. W. et al.	Bioplasticizer epoxidized vegetable oils-based poly(lactic acid) blends and nanocomposites	2017	Malaysia	Palmoil, Sojabohnenöl, Sonnenblumenöl, Purgiernussöl	Pflanzenöle	Polylactid (PLA)
Greco, A. et al.	Mechanical and durability properties of soft PVC plasticized by cardanol derivatives	2017	Italien	Cardanolderivate	Pflanzenstoffe	Polyvinylchlorid (PVC)

Li, X. et al.	Synthesis and application of a novel epoxidized plasticizer based on cardanol for poly(vinyl chloride)	2017	China	Epoxidiertes Cardanollaurat	Pflanzenstoffe	Polyvinylchlorid (PVC)
Rozaki, N. Z. et al.	Environmentally Friendly Oil-Modified Polyesters as Polymeric Plasticizers for Poly(vinyl chloride)	2017	Malaysia	Palmölbasierte Polyester	Polymer	Polyvinylchlorid (PVC)
Pyeon, H. B. et al.	Non-phthalate plasticizer from camphor for flexible PVC with a wide range of available temperature	2017	Korea, Republik von	(1',7',7'-trimethyldispiro [1,3]dioxolane-2,2'-bicyclo [2.2.1]heptane-3',2'- [1,3]dioxolane)-4,4"-diyl)bis (methylene) dioctanoate	Sonstige	Polyvinylchlorid (PVC)
Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. FNR	Biobasierte PET-Flaschen, Weichmacher und andere Produkte künftig aus Zucker? Forscher entwickeln neues Verfahren	2017	Deutschland	5-Hydroxymethylfurfural	Zuckerderivat	k.A.
Yang, Y. et al.	Grüne Chemie: Biobasierte PEF-Flaschen, Weichmacher und andere Produkte künftig aus Biomasse?	2017	Deutschland	5-Hydroxymethylfurfural	Zuckerderivat	k.A.
Yang, Y. et al.	Designing bio-based plasticizers: Effect of alkyl chain length on plasticization properties of isosorbide diesters in PVC blends	2017	China	Isosorbiddiester	Zuckerderivat	Polyvinylchlorid (PVC)
Lv, N. et al.	Epoxidation of Methyl Oleate and Subsequent Ring-Opening Catalyzed by Lipase from <i>Candida</i> sp. 99–125	2018	China	Epoxidiertes Methyloleat	Carbonsäurederivate	Polyvinylchlorid (PVC)
Cui, C. et al.	Lipase immobilization on high water adsorbing capacity bagasse: applications in bio-based plasticizer synthesis	2018	China	Ölsäure	Carbonsäurederivate	Polyvinylchlorid (PVC)
Wang, Y. et al.	Preparation and evaluation of acetylated mixture of citrate ester plasticizers for poly(vinyl chloride)	2018	China	Acetyl(dibutyl-monoisooctyl)citrate, Acetyl(monobutyl-diisooctyl)citrate, Acetyltributylcitrate, Acetyltriisooctylcitrate	Citrat	Polyvinylchlorid (PVC)
Feng, G. et al.	An efficient bio-based plasticizer for poly (vinyl chloride) from waste cooking oil and citric acid: Synthesis and evaluation in PVC films	2018	China	Acetylierter Fettsäuremethylester-Zitronensäureester	Citrat	Polyvinylchlorid (PVC)
Aouachria, K. et al.	Evaluation of the effects of acetyl tributyl citrate as bio-based plasticizer on the physical, thermal, and dynamical mechanical properties of poly(vinyl chloride)/polymethyl methacrylate blends	2018	Algerien	Acetyltributylcitrate	Citrat	Polyvinylchlorid (PVC)/Polymethylmethacrylat (PMMA) Blends
Seggiani, M. et al.	Novel sustainable composites based on poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) and seagrass beach-CAST fibers: Performance and degradability in marine environments	2018	Italien	Acetyltributylcitrate	Citrat	Poly[(3-hydroxybutyrate)-co-(3-hydroxyvalerate)] (PHBV)
Melo, P. G. et al.	Bio-based cellulose acetate films reinforced with lignin and glycerol	2018	Brasilien	Glycerin	Glycerin	Celluloseacetat (CA)
Peltzer, M. A. et al.	Use of Residual Yeast Cell Wall for New Biobased Materials Production: Effect of Plasticization on Film Properties	2018	Argentinien	Glycerin	Glycerin	Polysaccharide
Schäfer, D. et al.	Mechanical and barrier properties of potato protein isolate-based films	2018	Deutschland	Glycerin	Glycerin	Kartoffelproteinisolat
Lee, S. Y. et al.	A novel vegetable oil nanoemulsion-plasticized natural rubber latex compound: Effect of ingredient blending sequence on crosslink density and tensile strengths	2018	Malaysia	Pflanzenöl	Pflanzenöle	Naturkautschuk
Li, J. et al.	Sustainable plasticizer for butyl rubber cured by phenolic resin	2018	Vereinigte Staaten	Sojabohnenöl, norbornyliertes Sojabohnenöl	Pflanzenöle	Isobuten-Isopren-Kautschuk
Bétron, C. et al.	EPDM crosslinking from bio-based vegetable oil and Diels–Alder reactions	2018	Frankreich	Tungöl	Pflanzenöle	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM)
Wang, M. et al.	Plasticization and thermal behavior of hydroxyl and nitrogen rich group-containing tung-oil-based ester plasticizers for PVC	2018	China	Tungölbasierte Weichmacher	Pflanzenöle	Polyvinylchlorid (PVC)
Briou, B. et al.	Cardanol-Based and Formaldehyde-Free Flexible Phenolic Networks	2018	Frankreich	Cardanol	Pflanzenstoffe	Phenolisches Duromer
Lee, S. et al.	Effect of the individual and combined use of cardanol-based plasticizers and epoxidized soybean oil on the properties of PVC	2018	Korea, Republik von	Cardanolacetat, epoxidiertes Cardanolacetat	Pflanzenstoffe	Polyvinylchlorid (PVC)
Mihai, I. et al.	Reactive plasticization of poly(lactide) with epoxy functionalized cardanol	2018	Luxemburg	Glycidylether Epoxidcardanol	Pflanzenstoffe	Poly(lactid) (PLA)
van Duin, M. et al.	Green EPDM compounds	2018	Niederlande	Squalen, Faktis (Ölkautschuk)	Pflanzenstoffe	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM)
Petrucci, R. et al.	Life Cycle Analysis of Extruded Films Based on Poly(lactic acid)/Cellulose Nanocrystal/Limonene: A Comparative Study with ATBC Plasticized PLA/OMMT Systems	2018	Italien	Limonen, Acetyltributylcitrate	Pflanzenstoffe, Citrat	Poly(lactid) (PLA)

**Tabelle 46** Übersicht aller in der Suche nach biobasierten Weichmachern gefundenen Reviews

Autor	Jahr	Titel
Mohanty, A. K.; Misra, M.; Hinrichson, G. Rahman, M.; Brazel, C.	2000 2004	Biofibres, Biodegradable Polymers And Biocomposites: An Overview The Plasticizer Market: An Assessment Of Traditional Plasticizers And Research Trends To Meet New Challenges
Sorrentino, Andrea; Gorrasi, Giuliana; Vittoria, Vittoria John, M.; Thomas, S. Octave, Stéphane; Thomas, Daniel Caroline H. N. Laufer	2007 2008 2009	Potential Perspectives Of Bio-Nanocomposites For Food Packaging Applications Biofibres And Biocomposites Biorefinery: Toward An Industrial Metabolism
Pandey, Jitendra K.; Ahn, S. H.; Lee, Caroline S.; Mohanty, Amar K.; Misra, Manjusri Raquez, J.-M.; Deléglise, M.; Lacrampe, M.-F.; Krawczak, P. Verbeek, Casparus J. R.; Van Den Berg, Lisa E. Kalia, Susheel; Dufresne, Alain; Cherian, Bibin Mathew; Kaith, B. S.; Avérous, Luc; Njuguna, James; Nassiopoulou, Elias Lowell Center For Sustainable Production Mukherjee, Tapasi; Kao, Nhol Vieira, Melissa Gurgel Adeodato; Da Silva, Mariana Altenhofen; Dos Santos, Lucielen Oliveira; Beppu, Marisa Masumi Johansson, Caisa; Bras, Julien; Mondragon, Inaki; Nechita, Petronela; Plackett, David; Simon, Peter; Gregor Svetec, Diana; Virtanen, Sanna; Giacinti Baschetti, Marco; Breen, Chris; Aucejo, Susana Babu, Ramesh P.; O'connor, Kevin; Seeram, Ramakrishna Beach, E. S.; Weeks, B. R.; Stern, R.; Anastas, P. T. Mekonnen, T.; Mussone, P.; Khalil, H.; Bressler, D. Mülhaupt, Rolf	2010 2010 2010 2010 2011 2011 2011 2011 2012 2013 2013 2013 2013 2014 2014 2014 2014 2015 2015	Performance Analysis Of Bio-Based Vs. Non-Bio-Based Plasticizers For Pvc Recent Advances In The Application Of Natural Fiber Based Composites Thermosetting (Bio)Materials Derived From Renewable Resources: A Critical Review Extrusion Processing And Properties Of Protein-Based Thermoplastics Cellulose-Based Bio- And Nanocomposites: A Review Phthalates And Their Alternatives: Health And Environmental Concerns Pla Based Biopolymer Reinforced With Natural Fibre: A Review Natural-Based Plasticizers And Biopolymer Films: A Review Renewable Fibers And Bio-Based Materials For Packaging Applications – A Review Of Recent Developments Current Progress On Bio-Based Polymers And Their Future Trends Plastics Additives And Green Chemistry Progress In Bio-Based Plastics And Plasticizing Modifications Green Polymer Chemistry And Bio-Based Plastics: Dreams And Reality Biobased Plastics And Bionanocomposites: Current Status And Future Opportunities The Use Of Biomass For Packaging Films And Coatings Soy-Based Chemicals And Materials: Growing The Value Chain Review: Bio-Based Films From Zein, Keratin, Pea, And Rapeseed Protein Feedstocks Bio Statt Fossil Processing, Performance, And Applications Of Plant And Animal Protein-Based Blends And Their Biocomposites Bio-Based Coatings For Paper Applications Modified Vegetable Oil Based Additives As A Future Polymeric Material—Review Additives In Polymers Recent Advances In Bio-Based Epoxy Resins And Bio-Based Epoxy Curing Agents Petro-Based And Bio-Based Plasticizers: Chemical Structures To Plasticizing Properties Valorization Of Organic Residues For The Production Of Added Value Chemicals: A Contribution To The Bio-Based Economy
Rastogi, Vibhore; Samyn, Pieter Samarth, Nikesh B.; Mahanwar, Prakash A. Ambrogio, V.; Carfagna, C.; Cerruti, P.; Marturano, V. Baroncini, Elyse A.; Yadav, Santosh Kumar; Palmese, Giuseppe R.; Stanzione, Joseph F. Bocqué, M.; Voirin, C.; Lapinte, V.; Caillol, S.; Robin, J.-J. Pleissner, D.; Qi, Q.; Gao, C.; Rivero, C. P.; Webb, C.; Lin, C.s.k.; Venus, J.	2015 2015 2016 2016 2016 2016	Use Of Starch In Food Packaging An Overview Of Chemical Additives Present In Plastics: Migration, Release, Fate And Environmental Impact During Their Use, Disposal And Recycling Epoxidized Vegetable Oil And Bio-Based Materials As Pvc Plasticizer Plasticizers Derived From Biomass Resources: A Short Review A Review On Present Status And Future Challenges Of Starch Based Polymer Films And Their Composites In Food Packaging Applications Phthalates In Electronics: The Risks And The Alternatives
Samsudin, H.; Hani, N. M. Hahladakis, John N.; Velis, Costas A.; Weber, Roland; Iacovidou, Eleni; Purnell, Phil	2017 2018	
Hosney, H.; Nadiem, B.; Ashour, I.; Mustafa, I.; El-Shibiny, A. Jia, P.; Xia, H.; Tang, K.; Zhou, Y. Niranjana Prabhu, T.; Prashantha, K.	2018 2018 2018	
Pecht, M. G.; Ali, I.; Carlson, A.	2018	

**Tabelle 47** Übersicht aller eingeschlossenen Publikationen zu biobasierten Nukleierungsmitteln

Autor	Titel	Jahr	Land	Bioadditiv	Kategorie	Kunststoff
Schmidt, S. C. et al.	Poly lactide stereocomplex crystallites as nucleating agents for isotactic poly lactide	2001	Vereinigte Staaten	Poly lactid (PDLA)	Polymere	Poly lactid (PLA)
Pan, P. et al.	Crystallization behavior and mechanical properties of bio-based green composites based on poly(L-lactide) and kenaf fiber	2007	Japan	Hibiskusfaser	Pflanzen(fa sern)	Poly lactid (PLA)
Dong, T. et al.	Effects of host-guest stoichiometry of $\alpha$ -cyclodextrin-aliphatic polyester inclusion complexes and molecular weight of guest polymer on the crystallization behavior of aliphatic polyesters	2007	Japan	$\alpha$ -cyclodextrin ( $\alpha$ -CD)-polyester inclusion complex (IC)	Saccharide	Polycaprolacton (PCL), Polybutylensuccinat (PBS)
Sobkowicz, M. J. et al.	Renewable Cellulose Derived Carbon Nanospheres as Nucleating Agents for Poly lactide and Polypropylene	2008	Vereinigte Staaten	Kohlenstoff-Nanosphären	Kohlenstoff	Poly lactid (PLA), Polypropylen (PP)
Biotti, E. et al.	Polymer nanocomposites based on needle-like sepiolite clays: Effect of functionalized polymers on the dispersion of nanofiller, crystallinity, and mechanical properties	2008	Großbritannien	Sepolith / Magnesiumsilikat	Minerale	Polypropylen (PP)
Kang, K. S. et al.	Effect of biobased and biodegradable nucleating agent on the isothermal crystallization of poly(lactic acid)	2008	Korea, Republik von	Thermoplastische Stärke	Stärkederivate	Poly lactid (PLA)
Lee, B.-H. et al.	Bio-composites of kenaf fibers in poly lactide: Role of improved interfacial adhesion in the carding process	2009	Korea, Republik von	Hibiskusfaser	Pflanzen(fa sern)	Poly lactid (PLA)

Pei, A. et al.	Functionalized cellulose nanocrystals as biobased nucleation agents in poly(l-lactide) (PLA) – Crystallization and mechanical property effects	2010	Schweden	Silylierte Cellulose-Nanokristalle	Cellulosed erivate	Polylactid (PLA)
Goffin, A.-L. et al.	From interfacial ring-opening polymerization to melt processing of cellulose nanowhisker-filled polylactide-based nanocomposites	2011	Belgien	Cellulose	Cellulosed erivate	Polylactid (PLA)
Qiu, Z. et al.	Effect of Orotic Acid on the Crystallization Kinetics and Morphology of Biodegradable Poly( l -lactide) as an Efficient Nucleating Agent	2011	China	Orotsäure	Säurederiv ate	Polylactid (PLA)
Shin, B. Y. et al.	Thermal, morphological, and mechanical properties of biobased and biodegradable blends of poly(lactic acid) and chemically modified thermoplastic starch	2011	Korea, Republik von Italien	Chemisch modifizierte thermoplastische Stärke Cellulose-Nanokristalle	Stärkederiv ate	Polylactid (PLA)
Fortunati, E. et al.	Microstructure and nonisothermal cold crystallization of PLA composites based on silver nanoparticles and nanocrystalline cellulose	2012	Italien	Cellulose-Nanokristalle	Cellulosed erivate	Polylactid (PLA)
Sliwa, F. et al.	Mechanical and interfacial properties of wood and bio-based thermoplastic composite	2012	Frankreich	Holzmehl	Pflanzen(fa sern)	Polyamid (PA)
Uyama, H.	Bio-based polymeric materials based on plant oils	2012	Japan	Verzweigtes Polylactid mit Rizinusölkern	Polymere	Polylactid (PLA)
Tang, Z. et al.	The crystallization behavior and mechanical properties of polylactic acid in the presence of a crystal nucleating agent	2012	China	Ethylenebishydroxystearamide	Säurederiv ate	Polylactid (PLA)
Bitinis, N. et al.	Poly(lactic acid)/natural rubber/cellulose nanocrystal bionanocomposites. Part II: Properties evaluation	2013	Spanien	Polylactid gefropfte Cellulose-Nanokristalle	Cellulosed erivate	Polylactid (PLA)
Fundador, N. G. V. et al.	Xylan esters as bio-based nucleating agents for poly (l-lactic acid)	2013	Japan	Xylane	Saccharide	Polylactid (PLA)
Angelini, S. et al.	From biowaste to bioresource: Effect of a lignocellulosic filler on the properties of poly(3-hydroxybutyrate)	2014	Italien	Lignin	Ligninderiv ate	Polyhydroxybutyrat (PHB)
Nik Pauzi, N. N. P. et al.	Development of rigid bio-based polyurethane foam reinforced with nanoclay	2014	Malaysia	Diaminopropane montmorillonite nanoclay	Minerale	Polyurethan (PU)
Nuzzo, A. et al.	Heat-Resistant Fully Bio-Based Nanocomposite Blends Based on Poly(lactic acid)	2014	Italien	Nanoclay	Minerale	Polylactid (PLA), Polyamid 11 (PA 11)
Fernandes, E. M. et al.	Polypropylene-based cork-polymer composites: Processing parameters and properties	2014	Portugal	Kork	Pflanzen(fa sern)	Polypropylen (PP)
Xiong, Z. et al.	Surface hydrophobic modification of starch with bio-based epoxy resins to fabricate high-performance polylactide composite materials	2014	China	Modifizierte Stärke	Stärkederiv ate	Polylactid (PLA)
Auriemma, M. et al.	Effect of natural phenolics on the thermal and processing behaviour of poly(3-hydroxybutyrate)	2015	Italien	Lignocellulose	Ligninderiv ate	Polyhydroxybutyrat (PHB)
Essabir, H. et al.	Biocomposites based on Argan nut shell and a polymer matrix: Effect of filler content and coupling agent	2016	Marokko	Argannuss-Schale	Pflanzen(fa sern)	Polypropylen (PP)
BiBi, G. et al.	Fully biobased robust biocomposites of PLA with assisted nucleation by monodispersed stereocomplexed polylactide particles	2016	Korea, Republik von China	Polylactid (PDLA)	Polymere	Polylactid (PLA)
Shi, H. et al.	Crystallization behavior, heat resistance, and mechanical performances of PLA/myo-inositol blends	2017	China	Cyclohexan-cis-1,2,3,5-trans-4,6-hexol	Alkohole	Polylactid (PLA)
dos Santos, F. A. et al.	Development and properties evaluation of bio-based PLA/PLGA blend films reinforced with microcrystalline cellulose and organophilic silica	2017	Brasilien	Cellulose-Nanokristalle	Cellulosed erivate	Polylactid (PLA)
Snowdon, M. et al.	Determination of the poly(lactic acid) crystallization through a synergistic approach, containing a biobased carbon nucleant	2017	Kanada	Miscanthuskohle	Kohle	Polylactid (PLA)
Snowdon, M. R. et al.	Examination of a Biobased Carbon Nucleating Agent on Poly(lactic acid) Crystallization	2017	Kanada	Miscanthuskohle	Kohle	Polylactid (PLA)
Borůvka, M. et al.	Crystallization and thermal degradation of green nanocomposites based on lignin coated cellulose nanocrystals and poly(lactic Acid)	2017	Tschechische Republik	Lignin beschichtete Cellulose-Nanokristalle	Ligninderiv ate	Polylactid (PLA)
Borůvka, M. et al.	Properties of injection molded nanocomposites and blends based on PLA, PHBV and L-CNC	2017	Tschechische Republik	Lignin beschichtete Cellulose-Nanokristalle	Ligninderiv ate	Polylactid (PLA)
Kakroodi, A. R. et al.	Tailoring poly(lactic acid) for packaging applications via the production of fully bio-based in situ microfibrillar composite films	2017	Kanada	Polyamid	Polymere	Polylactid (PLA)
Liu, W. et al.	Effects of poly(butyleneadipate-co-terephthalate) as a macromolecular nucleating agent on the crystallization and foaming behavior of biodegradable poly(lactic acid)	2017	China	Polybutylenadipat-terephthalat	Polymere	Polylactid (PLA)
Aliotta, L. et al.	Effect of nucleating agents on crystallinity and properties of poly (lactic acid) (PLA)	2017	Italien	Polylactid (PDLA)	Polymere	Polylactid (PLA)
Song, P. et al.	Insight into the role of bound water of a nucleating agent in polymer nucleation: A comparative study of anhydrous and monohydrated orotic acid on crystallization of poly(l-lactic acid)	2017	China	Orotsäure	Säurederiv ate	Polylactid (PLA)
Tan, H. et al.	Preparation of functionalized cellulose nanoparticles and their effect on the crystallization behaviors of poly(l-lactide) based nanocomposites	2018	China	Cellulose-Nanopartikel	Cellulosed erivate	Polylactid (PLA)
Borůvka, M. et al.	The effect of nucleating agents, blending and annealing on crystallization, impact properties and heat deflection temperature of PLA/PHBV/L-CNC bionanocomposites	2018	Tschechische Republik	Lignin beschichtete Cellulose-Nanokristalle	Ligninderiv ate	Polylactid (PLA)
Yan, Y. et al.	Morphology and Crystallization of Biobased Polyamide 56 Blended with Polyethylene Terephthalate	2018	Schweiz	Polyamid 56	Polymere	Polylactid (PLA)
Lv, T. et al.	New insight into the mechanism of enhanced crystallization of PLA in PLA/PDLA mixture	2018	China	Polylactid (PDLA)	Polymere	Polylactid (PLA)
Borůvka, M. et al.	Structure-related properties of bionanocomposites based on poly(lactic acid), cellulose nanocrystals and organic impact modifier	2019	Tschechische Republik	Lignin beschichtete Cellulose-Nanokristalle	Ligninderiv ate	Polylactid (PLA)

**Tabelle 48** Übersicht aller in der Suche nach biobasierten Nukleierungsmitteln gefundenen Reviews

Autor	Jahr	Titel
Avella, Maurizio; Buzarovska, Aleksandra; Errico, Maria; Gentile, Gennaro; Grozdanov, Anita Emblem, A.	2009	Eco-Challenges Of Bio-Based Polymer Composites
Reddy, Murali M.; Vivekanandhan, Singaravelu; Misra, Manjusri; Bhatia, Sujata K.; Mohanty, Amar K.	2012	Plastics Properties For Packaging Materials
Bugnicourt, E.; Cinelli, P.; Lazzeri, A.; Alvarez, V.	2013	Biobased Plastics And Bionanocomposites: Current Status And Future Opportunities
Peelman, Nanou; Ragaert, Peter; Ragaert, Kim; Meulenaer, Bruno De; Devlieghere, Frank; Cardon, Ludwig	2014	Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review Of Synthesis, Characteristics, Processing And Potential Applications In Packaging
Jiang, Long; Shen, Tianfeng; Xu, Pengwu; Zhao, Xiyuan; Li, Xiaojie; Dong, Weifu; Ma, Piming; Chen, Mingqing	2015	Heat Resistance Of New Biobased Polymeric Materials, Focusing On Starch, Cellulose, Pla, And Pha
Nagarajan, V.; Mohanty, A. K.; Misra, M.	2016	Crystallization Modification Of Poly(Lactide) By Using Nucleating Agents And Stereocomplexation
Tsuji, H.	2016	Perspective On Polylactic Acid (Pla) Based Sustainable Materials For Durable Applications: Focus On Toughness And Heat Resistance
	2016	Poly(Lactic Acid) Stereocomplexes: A Decade Of Progress

**Tabelle 49** Übersicht aller eingeschlossenen Publikationen zu biobasierten Schlagzähmodifikatoren

Autor	Titel	Jahr	Land	Bioadditiv	Kategorie	Kunststoff
Rana, A.K. et al.	Short jute fiber reinforced polypropylene composites: effect of compatibiliser, impact modifier and fiber loading	2003	Indien	Jutefasern	Naturfaser	Polypropylen (PP)
Mehta, G. et al.	Biobased resin as a toughening agent for biocomposites	2004	Vereinigte Staaten	Hanf Fasern	Naturfaser	Ungesättigte Polyester
Miyagawa, H. et al.	Thermo-Physical and Impact Properties of Epoxy Containing Epoxidized Linseed Oil, 1	2004	Vereinigte Staaten	Epoxidiertes Leinsamenöl	Pflanzenöl	Epoxide
Haq, M. et al.	Hybrid bio-based composites from blends of unsaturated polyester and soybean oil reinforced with nanoclay and natural fibers	2008	Vereinigte Staaten	Epoxidiertes Sojabohnenöl	Pflanzenöl	Ungesättigte Polyester
George, G. et al.	Novel bio-commingled composites based on jute/polypropylene yarns: Effect of chemical treatments on the mechanical properties	2012	Indien	Jutegarn	Naturfaser	Polypropylen (PP)
Wu, L. et al.	High molecular weight poly(butylene succinate-co-butylene furandicarboxylate) copolyesters: From catalyzed polycondensation reaction to thermomechanical properties	2012	China	Polybutylensuccinat-co-butylenfurandicarboxylat	Polymer	k.A.
Odent, J. et al.	Random aliphatic copolyesters as new biodegradable impact modifiers for polylactide materials	2012	Frankreich	Polycaprolactonvalerolacton (PCLVL)	Polymer	Polylyctid (PLA)
Additives for Polymers Journal	Metabolix offers new bio-based PHA polymeric modifiers to improve PVC performance	2012	Vereinigte Staaten	Polyhydroxyalkanoat	Polymer	Polyvinylchlorid (PVC)
Kann, Y.	Modification of PVC with bio-based PHA rubber. Part 2	2013	Vereinigte Staaten	Polyhydroxyalkanoat	Polymer	Polyvinylchlorid (PVC)
Krishnaswamy, R. K. et al.	Impact modification of PLA using biobased, biodegradable mirel™ PHB copolymers	2013	Vereinigte Staaten	Polyhydroxybutyrat	Polymer	Polylyctid (PLA), Polybutylensuccinat (PBS), Polybutylenadipat-Terephthalat (PBAT)
Chen, Y. et al.	Dynamically vulcanized biobased polylactide/natural rubber blend material with continuous cross-linked rubber phase	2014	China	Naturkautschuk	Naturkautschuk	Polylyctid (PLA)
Yuan, D. et al.	Crosslinked bicontinuous biobased polylactide/natural rubber materials: Super toughness, "net-like"-structure of NR phase and excellent interfacial adhesion	2014	China	Naturkautschuk	Naturkautschuk	Polylyctid (PLA)
Liu, G.-C. et al.	Fully biobased and supertough polylactide-based thermoplastic vulcanizates fabricated by peroxide-induced dynamic vulcanization and interfacial compatibilization	2014	China	Aliphatisches Polyesterelastomer	Polymer	Polylyctid (PLA)
Ghassemi, H. et al.	Thermoplastic elastomers derived from bio-based monomers	2014	Vereinigte Staaten	Polypropylensuccinat, Polybutylensuccinat	Polymer	k.A.
Sahoo, S. K. et al.	Synthesis and characterization of bio-based epoxy blends from renewable resource based epoxidized soybean oil as reactive diluent	2015	Indien	Epoxidiertes Sojabohnenöl	Pflanzenöl	Bisphenol-A-Diglycidylether (DGEBA)
Lebarbé, T. et al.	Fatty acid-based thermoplastic poly(ester-amide) as toughening and crystallization improver of poly(L-lactide)	2015	Frankreich	Polyesteramide	Polymer	Polylyctid (PLA)
Shi, D. et al.	Synthesis of bio-based poly(lactic acid-co-10-hydroxy decanoate) copolymers with high thermal stability and ductility	2015	China	Polylyctid-co-10-hydroxydecanoat	Polymer	Polylyctid (PLA)
Liu, Z. et al.	Remarkably Enhanced Impact Toughness and Heat Resistance of poly(L-lactide)/Thermoplastic Polyurethane Blends by Constructing Stereocomplex Crystallites in the Matrix	2016	China	Polylyctid (PDLA)/Thermoplastische Polyurethane	Polymer	Polylyctid (PLA)
Fei, X. et al.	Tannic Acid as a Bio-Based Modifier of Epoxy/Anhydride Thermosets	2016	China	Tanninsäure	Polyphenol	Epoxide
Snowdon, M. R. et al.	Effect of Compatibilization on Biobased Rubber-Toughened Poly(trimethylene terephthalate): Miscibility, Morphology, and Mechanical Properties	2018	Kanada	(epoxidierter) Naturkautschuk	Naturkautschuk	Polytrimethylenterephthalat (PTT)
Benetto, E. et al.	Designing sustainable technologies, products and policies	2018	Luxemburg	Polyhydroxybutyrat	Polymer	Polylyctid (PLA)
Aziz, T. et al.	Synthesis of Starch Ether Grafted, Bio-Based Epoxy Resin and Their Impact on Mechanical Property	2019	China	Eugenolhaltige Methyl-, Phenylsiloxane	Siloxan	Epoxide

**Tabelle 50** Übersicht aller in der Suche nach biobasierten Schlagzähmodifikatoren gefundenen Reviews

Autor	Jahr	Titel
Markarian, Jennifer	2008	Biopolymers Present New Market Opportunities For Additives In Packaging
Avella, Maurizio; Buzarovska, Aleksandra; Errico, Maria; Gentile, Gennaro; Grozdanov, Anita	2009	Eco-Challenges Of Bio-Based Polymer Composites
Chen, Biqiong; Evans, Julian R. G.	2009	Impact Strength Of Polymer-Clay Nanocomposites
Pandey, Jitendra K.; Ahn, S. H.; Lee, Caroline S.; Mohanty, Amar K.; Misra, Manjusri	2010	Recent Advances In The Application Of Natural Fiber Based Composites
Tan, S. G.; Chow, W. S.	2010	Biobased Epoxidized Vegetable Oils And Its Greener Epoxy Blends: A Review
Jong, Ed De; Higson, Adrian; Walsh, Patrick; Wellisch, Maria	2012	Product Developments In The Bio-Based Chemicals Arena
Imre, B.; Pukánszky, B.	2013	Compatibilization In Bio-Based And Biodegradable Polymer Blends
Khalil, H. Abdulp.s.; Tehrani, M. A.; Davoudpour, Y.; Bhat, A. H.; Jawaid, M.; Hassan, A.	2013	Natural Fiber Reinforced Poly(Vinyl Chloride) Composites: A Review
Zeng, Jian-Bing; Li, Kun-Ang; Du, An-Ke	2015	Compatibilization Strategies In Poly(Lactic Acid)-Based Blends
Ambrogio, V.; Carfagna, C.; Cerruti, P.; Marturano, V.	2016	Additives In Polymers
Nagarajan, Vidhya; Mohanty, Amar K.; Misra, Manjusri	2016	Perspective On Polylactic Acid (Pla) Based Sustainable Materials For Durable Applications: Focus On Toughness And Heat Resistance
Ramesh, M.	2016	Kenaf (Hibiscus Cannabinus L.) Fibre Based Bio-Materials: A Review On Processing And Properties
Nakajima, Hajime; Dijkstra, Peter; Loos, Katja	2017	The Recent Developments In Biobased Polymers Toward General And Engineering Applications: Polymers That Are Upgraded From Biodegradable Polymers, Analogous To Petroleum-Derived Polymers, And Newly Developed