



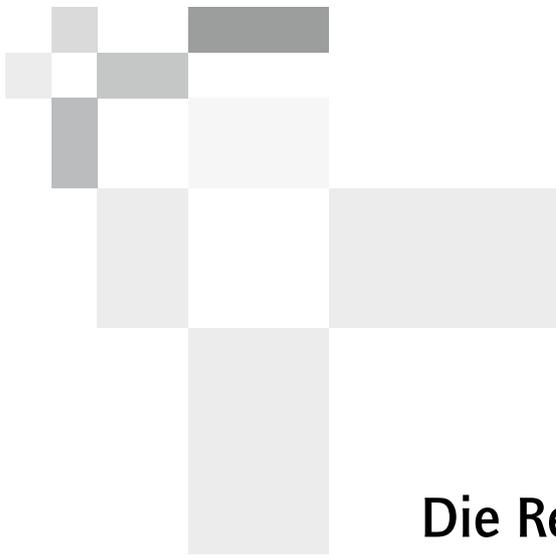
acatech MATERIALIEN

Werkstoffe und Materialien für die Energiewende

Harald Bolt, Isolde Arzberger, Christina Berger
(Hrsg.)

 acatech

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



Die Reihe acatech MATERIALIEN

In dieser Reihe erscheinen Diskussionspapiere, Vorträge und Vorstudien, die im Rahmen der acatech Projektarbeit entstanden sind. Die Bände dieser Reihe liegen in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Herausgeber und Autoren.

Alle bisher erschienenen acatech Publikationen stehen unter www.acatech.de/publikationen zur Verfügung.

Inhalt

1	Einleitung	5
2	Photoelektronische Materialien	6
2.1	Einführung	6
2.2	Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der Beleuchtung	6
2.3	Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre in der Photovoltaik	6
2.4	Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch neue Werkstoffe in der Photovoltaik	7
2.5	Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch neue Werkstoffe für die direkte Wasserspaltung	8
2.6	Fazit	8
	Literatur	9
3	Materialien mit elektrochemischen Eigenschaften für Speichieranwendungen	10
3.1	Einführung	10
3.2	Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre	10
3.3	Horizonte zur Erschließung von Speicheroptionen durch neue Werkstoffe	11
3.4	Fazit	12
	Literatur	13
4	Werkstoffe für lastflexible Kraftwerke	14
4.1	Einführung	14
4.2	Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre	14
4.3	Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch neue Werkstoffe	15
4.4	Fazit	16
	Literatur	17
5	Rolle der Leichtbauwerkstoffe in der Energietechnik	18
5.1	Einführung	18
5.2	Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre	18
5.3	Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch neue Werkstoffe	19
5.4	Fazit	20
	Literatur	20



6 Polymerwerkstoffe für Energieeffizienz und regenerative Energie/Stoff-Technologien	21
6.1 Einführung	21
6.2 Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre	21
6.3 Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch Polymerwerkstoffe	23
6.4 Fazit	24
Literatur	24
7 Materialien für effiziente Energiewandlung	25
7.1 Beispiel 1: Weichmagnetische Werkstoffe	25
7.1.1 Einführung	25
7.1.2 Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen im Hinblick auf Effizienzsteigerung von Generatoren, Transformatoren und Motoren	26
7.1.3 Horizonte zur Erschließung von Effizienzpotenzialen durch neue Werkstoffe und Verarbeitungstechnologien	27
7.1.4 Fazit	28
Literatur	28
7.2 Beispiel 2: Die Rolle der Tribologie für die Energiesysteme der Zukunft	29
7.2.1 Einführung	29
7.2.2 Werkstoff- und verfahrensseitige Möglichkeiten und Herausforderungen	29
7.2.3 Horizonte zur Erschließung	31
7.2.4 Fazit	31
Literatur	31
8 Querschnittsthemen und Methoden	32
Literatur	33

6 Polymerwerkstoffe für Energieeffizienz und regenerative Energie/Stoff-Technologien

Reinhold W. Lang, Institute of Polymeric Materials and Testing, Johannes Kepler Universität (JKU) Linz

Besonderer Dank gilt V. Altstädt (Universität Bayreuth), G. Knör (JKU Linz), A. Rinderhofer (LUMITECH GmbH, Jennersdorf), N. S. Sariciftci (JKU Linz), M. Scharber (JKU Linz), A. Schlarb (TU Kaiserslautern), P. Schöffl (OMV, Wien) und G. M. Waller (JKU Linz).

6.1 Einführung

Im Kontext der anstehenden Transformation des globalen Energiesystems und künftiger Energietechnologien weisen synthetische Polymerwerkstoffe als jüngste Gruppe unter den großen Werkstoffklassen ein besonderes Innovations-, Wachstums- und Marktdurchdringungspotenzial auf. Zu den wesentlichen Erfolgsfaktoren der industriell-wirtschaftlichen Entwicklung von Polymerwerkstoffen (die etwa Mitte des letzten Jahrhunderts einsetzte) und damit für ihre heutige gesellschaftliche Bedeutung, zählen

- Werkstoffeigenschaften und multifunktionale Werkstoffeigenschaftenprofile, die in weiten Grenzen variiert und auf spezifische Anforderungen maßgeschneidert werden können,
- eine effiziente, hochflexible Verarbeitbarkeit zu Bauteilen, gepaart mit hoher Designfreiheit und außerordentlichen Möglichkeiten der Funktionsintegration, und
- die gute Wirtschaftlichkeit durch ressourcenschonende Herstellung, Verarbeitung und Anwendung, gekoppelt mit einer hohen, regionalen und globalen Wachstumsfähigkeit.

Es sind diese speziellen Merkmale und Charakteristika sowie die Tatsache, dass viele der bereits bestehenden Märkte und Einsatzbereiche von Polymerwerkstoffen von erheblicher energetischer Bedeutung sind, aus denen sich die besondere Rolle von Polymerwerkstoffen beim Umbau des Energiesystems ableitet. Zudem waren und sind synthetische Polymerwerkstoffe über

ihre Kohlenwasserstoff-Rohstoffbasis von Beginn an nicht nur energetisch, sondern auch stofflich eng verknüpft mit den gegenwärtig dominierenden fossilen Primärrohstoffen (Öl, Gas, Kohle) des Energiesystems. Bezüglich der Rolle von Polymerwerkstoffen in einem künftigen Energiesystem leiten sich daraus drei Themenbereiche beziehungsweise Fragestellungen von vorrangiger Bedeutung ab:

- Welche Beiträge können Polymerwerkstoffe für eine deutlich gesteigerte Energieeffizienz im Bereich von bestehenden und künftigen Produkten und deren Funktionen/Services leisten?
- Welche Beiträge können Polymerwerkstoffe in den wachsenden und neuen Märkten für erneuerbare Energietechnologien (insbesondere Sonne und Wind, aber auch Wasser, Geothermie usw.) leisten?
- Welche Rolle spielen Polymerwerkstoffe in einer künftigen Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) mit kaskadischen und erneuerbaren/regenerativen Energie/Stoff-Nutzungsketten mit stark erhöhten energetischen Wirkungsgraden beziehungsweise stofflichen Regenerationsraten?

6.2 Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre

Energieeffizienz

Zur umfassenden ökologischen Bewertung der durch werkstoffliche Produkte erbrachten Funktionen und Services gibt es in der Literatur und mittlerweile auch in Lehrbuchform für die akademische Werkstoffausbildung eine Reihe von Ansätzen und Methoden mit zugehörigen Software-Werkzeugen für eine sogenannte Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Analysis, LCA).¹ Diese erlauben auch quantitative Rückschlüsse bezüglich einer energetischen Bewertung von Produkten (funktionsbezogener Gesamtlebenszyklus-Energiebedarf) und der zugehörigen Treibhauswirksamkeit über CO₂-Emissionen.

In einer von PlasticsEurope beauftragten Studie wurde anhand repräsentativer Produktfallbeispiele aufgezeigt, dass Kunststoffprodukte im Vergleich zu alternativen Werkstofflösungen für äquivalente Funktionen schon heute einen erheblichen Beitrag zur Energieeffizienz und zur Reduktion von CO₂-Emissionen leisten.² Dies obwohl Energieeffizienz und Treibhauswirksamkeit in der Entwicklung der meisten kommerziellen Kunststoffprodukte aus einer Gesamtlebenszyklusbetrachtung bis heute nicht wirklich im

1 | Vgl. Ashby 2013.

2 | Vgl. Pilz et al. 2010.



Fokus waren und sind. Anders ausgedrückt, bei umfassender technischer, ökonomischer und ökologischer Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus sind für viele Anwendungsbereiche von Kunststoffen noch erhebliche zusätzliche energetische Einsparungspotenziale realisierbar. Damit leitet sich für den Bereich Energieeffizienz unmittelbar folgender Forschungsbedarf ab:

- Weiterentwicklung von LCA-Methoden/Werkzeugen für eine integrierte, funktionsorientierte energetische Gesamtlebenszyklusanalyse (Herstellung, Nutzung, Wiederverwertung/Entsorgung), die als „easy-to-use tools“ anwendungsspezifisch und über geeignete Sensitivitätsanalysen das Aufspüren weiterer Optimierungspotenziale für Werkstoffeigenschaftenprofile mit besonderer Hebelwirkung auf den Produktlebenszyklus-Gesamtenergiebedarf und CO₂-Ausstoß erlauben.
- Nutzung derartiger LCA-Tools zur systematischen Erschließung der werkstoffenergetischen Optimierungspotenziale und damit zur kontinuierlichen und signifikanten Steigerung der LCA-Energieeffizienz für die nächste Generation von Produkten aus Polymerwerkstoffen durch wissenschaftsgetriebene Forschung basierend auf fortschrittlichen Zusammenhängen („material synthesis-structure-property-processing-performance & product re-utilization (ms²p³&pru)“).

Aufgrund der niedrigen Dichte und des damit inhärenten Leichtbaupotenzials von Polymerwerkstoffen wird mit zunehmender Energieeffizienz-Orientierung die Einteilung der derzeitigen auch für Polymere üblichen Werkstoffklassifizierung in Strukturwerkstoffe, bei denen die mechanischen Eigenschaften einsatzbestimmend sind, und in Funktionswerkstoffe, bei denen die nicht-mechanischen Eigenschaften einsatzbestimmend sind, zunehmend unschärfer und in Richtung stärkerer, auch systemischer Multifunktionalität verschwinden. So sind durch neue multifunktionale Polymerwerkstoffe mit komplexeren molekularen und morphologisch-hierarchischen Strukturen erhebliche weitere Energieeffizienz-Verbesserungen zu erwarten. Wie bei nahezu allen Polymeranwendungen gilt es auch hier, durch gezielte und systematische Werkstoffforschung das Energieeffizienz-Potenzial über gesteigerte Multifunktionalität weiter auszureizen. Beispielfolgend angeführt werden können:

- Polymer-Nanocomposites, bei denen durch Einbringung anorganischer oder organischer Partikel/Additive unterschiedlichster Geometrien im Nano-Skalenbereich in eine Polymermatrix völlig neuartige Eigenschaftsprofile ermöglicht werden. Dazu gehören neue Kombinationen mechanischer Eigenschaften (zum Beispiel Modul, Festigkeit, Zähigkeit,

Reibung/Verschleiß) und nicht-mechanischer Eigenschaften (zum Beispiel optische, elektrische, thermische, magnetische Eigenschaften inklusive selektive Strahlungs- und Stofftransfer-Eigenschaften) sowie ein gegebenenfalls gleichzeitig erweiterter Einsatztemperaturbereich, eine erhöhte Medienbeständigkeit und ein verbesserter Flammschutz

- Polymere Partikelschäume als Kernwerkstoff im Sandwich-Leichtbau, für innovative Verpackungen und für moderne Wärmedämmsysteme. Die Materialien können energieeffizient ohne Heißdampf zu komplexen Geometrien geformt und in vielfältige Anwendungsgebiete übertragen werden
- Polymere Optikwerkstoffe für die gezielte Lichtleitung/-lenkung unter Minimierung der Lichtverluste sowie für Diffusor-anwendungen mit hoher Wirkeffizienz (hohe Transmission und Diffusorwirkung)
- Polymere Einkapselungsmaterialien für opto-elektronische Bauteile wie LEDs/OLEDs mit besserer Energieeffizienz und Performance; Optimierung photometrischer Eigenschaften, des Wärmetransports, der Barrierewirkung und des Zeitstandverhaltens (Reduzierung der Degradation)
- Thermoplastische Substratmaterialien für Leiterplatten mit gleichwertiger beziehungsweise verbesserter elektrischer und thermischer Performance und inhärentem Brandschutz bei gleichzeitiger Energieeinsparung im Herstellprozess sowie verbesserter Rezyklierbarkeit.

Erneuerbare Energietechnologien

Die oben gelisteten Erfolgsfaktoren und Merkmale von Polymerwerkstoffen für traditionelle Märkte gilt es auch für die neuen Märkte erneuerbarer Energietechnologien zu nutzen und diese durch Werkstoffforschung voranzutreiben.³ Dies wird in der Folge anhand von Beispielen für die Bereiche Solarthermie, Photovoltaik und Windkraft aufgezeigt.

Für die Solarthermie (etwa dreißig Prozent des Endenergiebedarfs weltweit entfallen auf Niedertemperatur-Wärme) sind aus der Perspektive der Polymerwerkstoffforschung folgende Themen von besonderer Relevanz:⁴

- Entwicklung von Polyolefin-Compounds (PE-, PP-basierend) für thermische Absorber und Speicher mit einer Langzeit-Temperaturbeständigkeit unter den jeweils relevanten Betriebs- und Umgebungsbedingungen (solare Einstrahlung und Wetterbeständigkeit; Medieneinwirkungen wie Frostschutzmittelhaltiges und/oder chloriertes Wasser usw.) von über zwanzig Jahren. Als Forschungsziel kann eine Anhebung der Dauergebrauchstemperatur unter

3 | Vgl. Lang 2013, S. 70-73.

4 | Vgl. Lang et al. 2013, S. 1-13, S. 7-11.

Betriebsbedingungen von derzeit etwa siebzig bis 75 auf 95 Grad Celsius definiert werden.

- Entwicklung von neuen Compounds aus technischen Kunststoffen mit einer Dauergebrauchstemperatur unter Betriebsbedingungen von zumindest 135 Grad Celsius und im Vergleich zu existierenden kommerziellen Produkten halben Kosten/Preisen.

Im Bereich Windkraft liegt der Polymerfokus bei Rotorblättern, die für moderne Windenergieanlagen ausnahmslos aus Polymermatrix/Faser-Verbundwerkstoffen gefertigt werden. Für die Polymerwerkstoffforschung sind künftig unter anderem folgende Themenbereiche von Interesse:

- Verbesserte Regelwerke und Werkzeuge zur Modellierung, Simulation und Absicherung (Nachweisführung, Qualifikation) des Langzeit-Ermüdungsverhaltens der eingesetzten Hochleistungs-Verbundwerkstoffe unter Betriebsbedingungen (on-shore, off-shore) inklusive der Bereitstellung von geeigneten Werkstoffmodellen und Versagenskriterien, (beschleunigter) Prüfkonzepte und der erforderlichen Werkstoffgesetze (Kennwerte und Kennwertfunktionen)
- Kostenreduzierungen bei den derzeit etablierten Materialsystemen für Rotorblätter (vorwiegend Epoxidharz-Matrices) durch Ökonomisierung/Automatisierung der Fertigungsprozesse mit entsprechender Anpassung der Materialsysteme. Neue Matrixwerkstoffe auf Polyurethanbasis mit im Vergleich zu Epoxidharzsystemen erhöhter Leistungsfähigkeit bei gleichzeitig geringeren Kosten durch automatisierte Fertigungsprozesse. Neue Polymerschäume für diese Prozessautomatisierung
- Polymerlacksysteme für Rotorblätter mit verbesserter Witterungs- und Langzeitbeständigkeit

Zur Realisierung weiterer Kostenreduktionen und zur Aufrechterhaltung hoher Wachstumsraten besteht eine wesentliche technologische Herausforderung in der Photovoltaik (PV) im Einsatz neuartiger Materialien für die PV-Zelleneinkapselung und in zugehörigen Verfahren zur Produktion von PV-Modulen. Dies gilt sowohl für die derzeit marktdominierende Si-basierende (SiPV) als auch für die aufstrebende organische Photovoltaik (oPV). Zu erwarten ist, dass diese werkstofflichen und verfahrenstechnischen Innovationen vielfältiger gestaltbare, architektonisch attraktive und multifunktional in beliebige Oberflächen integrierbare Modul-Designs ermöglichen, die auch neue Impulse für die Modulfertigung in Europa bewirken. Daraus leiten sich unter anderem folgende werkstoffrelevante Forschungsfelder für Polymere ab:

- Polymerwissenschaftlich fundierte Definition quantitativer Leistungsanforderungen und zugehöriger Prüfmethode für polymere Einkapselungsmaterialien für starre und flexible PV-Zellen; umfassende Definition von Soll-Eigenschaftsprofilen; Entwicklung von Prüf- und Analysemethoden zur Charakterisierung relevanter Performance- und Barriere-Eigenschaften (Sauerstoff, Feuchte/Wasserdampf) inklusive der Alterung von Einkapselungsmaterialien auf Probekörper-ebene (Werkstoffebene) und PV-Modulebene
- Entwicklung von polymerwissenschaftlich fundierten Konzepten und Modellen zur Lebensdauerabschätzung von PV-Modulen, deren Leistungsfähigkeit stark von Alterungsvorgängen in den polymeren Einkapselungsmaterialien abhängt (jeweils für SiPV- und oPV-Modulen)
- Entwicklung neuartiger kostengünstiger, thermoplastischer Elastomer-Einbettfolien (zum Beispiel Polyolefin-basierend) als Ersatz von EVA, dem derzeit dominierenden Einbettmaterial in SiPV-Modulen, das bei 130 bis 140 Grad Celsius über etwa zwölf bis 15 Minuten (beziehungsweise teilweise bis zu dreißig Minuten) peroxidisch gehärtet wird und damit bestimmend für die Verarbeitungszeit und -kosten bei der Modulfertigung ist; verbesserte Performance und Verarbeitbarkeit (von diskontinuierlichen zu kontinuierlichen Prozessen)
- Kostengünstige Anpassung der Rückseiten- und Frontseitenfolien auf (neue) thermoplastische Elastomer-Einbettfolien bei gleichzeitiger Verbesserung der Modul-Performancewerte (jeweils für starre, semi-flexible oder flexible SiPV- und oPV-Module).

6.3 Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch Polymerwerkstoffe

Von zentraler Bedeutung für die rasche Transformation des Energiesystems und die damit einhergehenden technologischen Veränderungen inklusive der damit verbundenen Rolle von Werkstoffen ist das Aufspüren und Ableiten von umfassenden und detaillierten Werkstoffanforderungsprofilen mit besonderer Hebelwirkung auf Energieeffizienz beziehungsweise das Marktwachstumspotenzial von erneuerbaren Energietechnologien bei gesamtsystemischer Betrachtung (siehe auch Kapitel 6.2). Auch wenn dies nicht Kerngebiet der Werkstoffforschung ist, gilt es diesen gesamtsystemischen Zugang in Kooperation und Arbeitsteilung mit anderen Disziplinen weiterzuentwickeln und auszubauen. Darauf kann dann die Werkstoffforschung zielgerichtet aufsetzen.



Aufgrund ihrer derzeit überwiegend fossilen Rohstoffbasis betreffen weitere wichtige Thematiken im Kontext Energiewende und Polymerwerkstoffe einerseits die Wiederverwertung von Polymerwerkstoff-Abfällen nach Gebrauch („post-use plastics waste“) und andererseits die Herstellung neuartiger Polymere auf Basis regenerativer Ressourcen. Abgesehen davon, dass Kunststoffabfälle weltweit zu zahlreichen gravierenden Problemen führen (unter anderem „marine litter“), die es zu beseitigen und zu vermeiden gilt, stellt sich die Frage nach adäquaten Lösungsansätzen für deren Wiederverwertung auch vor dem Hintergrund der Energie- und Stoffeffizienz in einem künftigen Energiesystem. Aus energetisch-entropischer Sicht und aufgrund von Ökoeffizienz-Überlegungen ist für die sinnvolle „werkstoffliche“ Wiederverwertung von Kunststoffen nach Gebrauch ein oberer Grenzwert bei etwa dreißig bis vierzig Prozent des Kunststoffabfallvolumens zu erwarten. Da die Deponie von Kunststoffabfällen als Option längerfristig ausscheidet, kommen für die Verwertung der restlichen Polymerabfallfraktion „chemisch-rohstoffliche“ und „energetisch-thermische“ Verfahren (Verbrennung), das heißt eine kaskadische Stoff/Energie-Nutzung infrage. Mittlerweile existieren weltweit intensive Forschungsanstrengungen zur Nutzung von CO₂ als Baustein für unterschiedlichste organische Synthesen.⁵ Damit eröffnet sich eine realistische, den Leitprinzipien und Kriterien einer Nachhaltigen Entwicklung (Sustainable Development) entsprechende Perspektive für künftig aus erneuerbaren Energieüberschüssen energetisch gespeiste Power-to-Feedstock-Technologien (Herstellung gasförmiger/flüssiger Kohlenwasserstoffe) und somit für einen vollständig regenerativen Energie/Stoff-Kreislauf für Polymerwerkstoffe („all-inclusive, full-circular economy for polymeric materials via CO₂ utilization“). Ein besonderer Vorteil dieser Technologien besteht unter anderem in der Nutzbarkeit bestehender Infrastrukturen (zum Beispiel Gasnetz) für die Feedstock-Speicherung.

6.4 Fazit

Polymerwerkstoffe bieten ein hohes Innovationspotenzial für ein breites Spektrum von Energieeffizienztechnologien und erneuerbaren Energietechnologien (Solarthermie, Photovoltaik, Wind, Geothermie, Gezeiten). Sie werden damit zu einer

bedeutenden Materialklasse und treibenden Kraft künftiger energietechnologischer Entwicklungen und zu einem Motor ihrer steigenden Marktdurchdringung.

Die Schöpfung und Ausreizung der Innovationspotenziale erfordert eine verstärkte Integration gesamtsystemischer Zusammenhänge und Abhängigkeiten, um daraus jene werkstofflichen Entwicklungspotenziale für eine zielgerichtete Werkstoffforschung abzuleiten, welche die größtmöglichen Hebelwirkungen in Bezug auf gesamtsystemische Energieeffizienzeffekte und die rasche Marktimplementierung sowie ein beschleunigtes Marktwachstum von erneuerbaren Energietechnologien ermöglichen.

Aufgrund der großen Bedeutung gesamtsystemischer Aspekte sind die notwendigen Voraussetzungen für eine zielgerichtete und effektive Polymerwerkstoffforschung in enger Kooperation und Arbeitsteilung mit anderen Fachdisziplinen und der Wirtschaft entsprechend zu entwickeln und auszubauen.

Literatur

Ashby, M.F. (Hrsg.): *Materials and the Environment*, 2. Auflage, Elsevier Inc., 2013.

Lang, R.W.: „Die Energiewende – Welchen Beitrag leisten Kunststoffe“. In: ALPHA GmbH (Hrsg.): *Jahresmagazin Ingenieurwissenschaften, Im Fokus WAK – Kunststofftechnik*, 2013, S. 70–73.

Lang, R.W./Wallner, G.M./Fischer, J.: „Solarthermische Systeme aus Polymerwerkstoffen: Das Großforschungsvorhaben“. In: SolPol (Hrsg.): *Zeitschrift Erneuerbare Energie*, 2013, S. 1–13, 7–11.

Liu, Q./Wu, L./Jackstell, R./Beller, M.: „Using Carbon Dioxide as a Building Block in Organic Synthesis“. In: *Review in Nature Communications*, DOI: 10.1038/ncomms6933, 2015.

Pilz, H./Brandt, B./Fehring, R., denkstatt GmbH (Hrsg.): *Die Auswirkungen von Kunststoffen auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen in Europa*, Wien, 2010.

5 | Vgl. Liu et al. 2015.