

Nachhaltige Holzbeschichtungen – nur ein Traum oder realistisch?

Dr. Albert Rössler
ADLER-Werk Lackfabrik
Schwaz, Österreich



Nachhaltige Holzbeschichtungen – nur ein Traum oder realistisch?

**Albert Rössler, ADLER-Werk Lackfabrik
Johann Berghofer GmbH & Co KG, Austria**

1. Einführung

Das Thema «Nachhaltige Beschichtungen» ist derzeit in aller Munde. Dieser Trend wurde durch regulatorische Änderungen wie die chinesische Blue-Sky-Initiative, die 2018 einen Aktionsplan mit dem Ziel festlegte, Chinas Gesamt-VOC-Emissionen um mehr als 10 % im Vergleich zu 2015 zu reduzieren, zusätzlich vorangetrieben [1]. Die Frage, inwieweit eine Farbe oder ein Lack überhaupt nachhaltig sein kann, ist nicht einfach, denn Nachhaltigkeit ist ein unglaublich facettenreiches Thema, das weit über den klassischen Umweltschutz hinausgeht. Dies zeigt sich auch darin, dass die UN 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung definiert hat (<https://sdgs.un.org/>) und damit Impulse für Maßnahmen in unterschiedlichen Bereichen der Nachhaltigkeit gibt.

Drei Säulen der Nachhaltigkeit sind jedoch heute Stand der Technik und bedeuten, eine Balance zwischen Umwelt, wirtschaftlichen Faktoren und Menschen zu erreichen. Alle drei Faktoren (siehe Abbildung 1) müssen gleichermaßen berücksichtigt und gleich bewertet werden – damit unsere Kinder und Enkel ein sicheres Leben führen können [2].

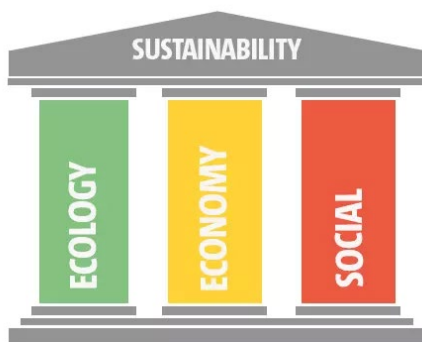


Abbildung 1: Drei Säulen der Nachhaltigkeit

Ökologie sorgt für einen schonenden Umgang mit Ressourcen. Es ist allgemeiner Konsens, die Umwelt zu schützen und Ressourcen zu schonen, insbesondere durch umweltfreundliche Produkte und Verfahren. Ökonomische Faktoren bezeichnet alle Bemühungen um nachhaltiges Wirtschaften. Soziales bedeutet, langfristigen Mehrwert für Kunden und Mitarbeiter sowie für die Gesellschaft zu schaffen. Aspekte wie bestmögliche Rahmenbedingungen und Weiterbildungsmöglichkeiten werden einbezogen und gewinnen immer mehr an Bedeutung.

Bei der stärkeren Fokussierung auf den technischen Bereich sind drei Aspekte wichtig: Umwelt, Gesundheit & Sicherheit und Lebensdauer. Nur Produkte, die in all diesen Bereichen positiv abschneiden, sind im Hinblick auf Nachhaltigkeit von hohem Interesse.

Am Ende des Tages kann als nachhaltig bezeichnet werden, was unsere Umwelt nicht negativ beeinflusst, also nicht schädlich für die Umwelt, unsere Gesundheit, das Klima oder die Menge der zur Verfügung stehenden Ressourcen ist.

Um einen Weg durch den Themenschwung der Nachhaltigkeit zu finden, können wir uns auf die Ausgangspunkte der schädlichen Auswirkungen und auch auf Chancen besinnen:

Welche Auswirkungen haben Beschichtungen auf die Umwelt?

- VOC-Gehalt
- Treibhauspotenzial oder ökologischer Fußabdruck
- Menge an aromatischen Verbindungen und Schwermetallen
- Anteil nachwachsender Rohstoffe

Wie wirken sich Beschichtungsprodukte während und nach der Anwendung auf die Gesundheit der Menschen aus?

- Menge an krebserzeugenden und allergenen Stoffen
- Menge an synthetischen Nanomaterialien
- Menge Weichmacher (Phthalate)
- Menge an Rohstoffen, die Organe schädigen können
- Menge an sensibilisierenden und hautätzenden Rohstoffen
- Auswirkungen auf die Gesundheit durch verringerte Umweltbelastung

Wie wirkt sich die Beschichtung auf die Lebensdauer der behandelten Oberflächen aus?

- Haltbarkeit und Elastizität
- Beständigkeit gegen Witterung, Licht, chemische und/oder mechanische Einflüsse
- Farbstabilität und Minimierung von Kreidung
- Wartung, Nassabrieb und Reparierbarkeit
- Ertrag oder Deckkraft

Daher ist es notwendig, großen Wert auf höchstmögliche Sicherheitsstandards und den Schutz der Umwelt zu legen.

2. Produktsicherheit

Produktsicherheit bedeutet, die sichere Handhabung, sorgenfreie Anwendung und sachgerechte Lagerung unserer Produkte zu gewährleisten. Folgende Prozesse sind in diesem Zusammenhang wichtig:

- Der erste Schritt ist immer die Aufnahme von Rohstoffen. Daher spielt die Auswahl geeigneter Rohstoffe eine wichtige Rolle. Jedes neue Ausgangsmaterial muss nach neuestem Wissen und Erkenntnissen geprüft werden. Rohstoffe, die für den Benutzer schädlich sein könnten (toxische oder umweltschädliche Stoffe – also Schwermetalle, Karzinogene usw.), dürfen nicht verwendet werden. Risiko ist jedoch nicht Gefahr! Schutz und Exposition sind immer zu berücksichtigen!
- Nachhaltigkeit und Benutzerfreundlichkeit und Gebrauchssicherheit von Produkten sind von Anfang an relevante Aspekte, bereits während des Entwicklungsprozesses. Umfassende Tests im Labor und laufende Qualitätssicherungsmaßnahmen garantieren bestmögliche und gleichbleibende Qualität. Strenge Auflagen stellen zudem sicher, dass sie die einschlägigen Gesetze zur Verwendung von Chemikalien in den verschiedenen Ländern einhalten.
- Kundenkommunikation: Wichtig ist eine transparente Kommunikation zum Thema Produktsicherheit. Relevant sind Informationen zum Umgang und zur Risikobewertung entlang der gesamten Wertschöpfungskette, wie technische Merkblätter und Sicherheitsdatenblätter, Prüfzeugnisse und Nachhaltigkeitsdatenblätter.

3. Anlagensicherheit – Schutz von Mensch und Umwelt

Ein sehr wichtiger Bestandteil der Nachhaltigkeit ist die Gewährleistung sicherer Anlagen und Geräte, die keine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen, sowie die Schaffung und Erhaltung sicherer Arbeitsplätze für unsere Mitarbeiter an allen unseren Standorten. Als Chemieunternehmen müssen Lackhersteller Verantwortung übernehmen! Die wichtigsten Eckpfeiler dabei sind:

- Planung und Errichtung von modernen und sicheren Anlagen, Einrichtungen und Arbeitsplätzen
- Regelmäßige Überprüfung der Anlagen, Einrichtungen und Arbeitsplätze auf potenzielle Risikofaktoren unter Anwendung standardisierter Bewertungsmethoden
- Regelmäßige Wartung und Instandhaltung der Maschinen, um sichere Prozesse zu gewährleisten
- Laufende Aus- und Weiterbildung der Mitarbeiter und Schaffung eines Bewusstseins für Sicherheit am Arbeitsplatz

- Verbindliche Anweisungen für Arbeitsabläufe und Betriebsabläufe
- Aktions- und Notfallpläne sowie eine Reihe von Brandschutzvorschriften
- Abfallwirtschaft durch Waschen von Tanks, Behältern etc. und Minimierung von Rückständen in Behältern und Rohrleitungen (z. B. durch Molchsysteme) [17]
- Minimierung von Emissionen in die Umwelt (Luft und Abwasser)

Mit diesen Maßnahmen kann die chemische Industrie sicherstellen, dass die Herstellung chemischer Produkte störungsfrei durchgeführt werden kann.

4. Natürliche und nachwachsende Rohstoffe

Nachhaltigkeit bedeutet in der Beschichtungstechnik immer noch sehr häufig den Einsatz eines hohen Anteils an natürlichen und nachwachsenden Rohstoffen [3]. Doch nicht immer ist der Austausch nachhaltiger, obwohl je nach Beschichtungstechnologie ein biobasierter Anteil zwischen 30 und 90 % möglich ist. Ob die Belastung geringer ist als bei Petrochemikalien, hängt vom Rohstoff ab. Bei der Anwendung des Mischfrucht- oder Zweitfruchtverfahrens gibt es keine oder nur geringe Konflikte mit der Lebensmittelindustrie. Der Einsatz von Insektiziden und Düngemitteln muss minimiert werden und es werden landwirtschaftliche Methoden benötigt, die Bestäuber (z. B. Bienen) in einer recht blütenarmen Zeit mit Nahrung versorgen. Der Anbau muss die Biodiversität stärken! Regionale Rohstoffe mit kürzeren Transportwegen bieten ebenso wichtige Vorteile wie der Wasserverbrauch. In diesem Zusammenhang sieht man auch die globale Dimension der Nachhaltigkeit. Ein Beispiel ist der Anbau von Leindotter zusammen mit Erbsen oder als Zweitfrucht für die nachhaltige Produktion von Leindotteröl für Alkydfarben [4, 5]. Es gibt Möglichkeiten, aber nicht sehr oft mit Rohstoffen, die aus denselben Bausteinen aufgebaut sind wie fossile Brennstoffe. Daher sind besonders biobasierte Rohstoffe mit unterschiedlicher Struktur interessant, weil wir auch die Synthesekraft der Natur nutzen können. Biopolymere wie Chitin, Chitosan, Stärke, Gelatine und Zein usw. stellen eine praktikable alternative Lösung für Holzbeschichtungsformulierungen dar, sowohl im Hinblick auf die kommerzielle als auch auf die Schutzwirkung (Bulian und Graystone 2009). Ein Vorteil der Verwendung von Biopolymeren im Holzschutz liegt in der hohen Kompatibilität mit polaren Klebstoffen und einer guten Affinität zu proteinbasierten oder zellulosebasierten Biopolymeren [6]. Itaconsäure wird als biobasierte Alternative zu petrochemischen Bausteinen eingesetzt [11]. Auch aromatische Verbindungen sind bereits verfügbar [15]. Sicherlich ist das Portfolio an biobasierten Rohstoffen neben Bindemitteln derzeit noch klein. Aber von Verdickungsmitteln bis hin zu UV-Absorbern und Tensiden sowie Wachsen sind auch immer mehr Zusatzstoffe verfügbar [12]. Neuere Arbeiten zu Pigmenten sind ebenfalls vielversprechend [13, 14], insbesondere die bioinspirierten. Dies erfordert jedoch mehr Innovationsarbeit, bietet aber die Chance, echte Wettbewerbsvorteile zu erzielen. Sicherlich muss die Verfügbarkeit berücksichtigt werden und die Qualitätsschwankungen (z. B. durch unterschiedliche Mengen an natürlichen Nebenprodukten) können problematisch sein.

5. Schlüsselfaktor: Treibhausgase

Eine nachhaltige Farbe ist nicht nur eine Frage biobasierter Rohstoffe. Darüber hinaus ist ein niedriger Gehalt an flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) auch ein Schlüsselmerkmal jeder nachhaltigen Farbe oder jeden Lacks, und wasserbasierte oder Pulverlacke spielen eine wichtige Rolle als Game Changer. Sie belasten die Umwelt – vor allem in Form von Luftverschmutzung (petrochemischer Smog) und in geringerem Maße als Treibhausgase. Darüber hinaus können VOCs auch Atemwegsreaktionen auslösen. Die VOC-Emissionen aus Holzlacken sind jedoch in den letzten Jahrzehnten drastisch zurückgegangen, obwohl der Einsatz von Lacken im gleichen Zeitraum zugenommen hat. Sicherlich sind auch emissionsarme Farben mit niedrigem VOC-Gehalt mit von der Partie und weitere Fortschritte sind notwendig, aber heute sollte der Fokus ganzheitlicher auf der Reduzierung von Treibhausgasen, insbesondere von Kohlendioxid, liegen. Treibhausgase wirken wie das Glas eines Treibhauses und führen zu einer globalen Erwärmung, die sich im schlimmsten Fall zu einer Klimakatastrophe entwickeln kann.

Betrachtet man den CO₂-Fußabdruck (CFP) oder das Treibhauspotenzial (GWP) von Lacken (siehe Abbildung 2), so sieht man, dass die CFP von wasserbasierten Lacken geringer sind

als bei lösemittelhaltigen Systemen. Es ist jedoch wichtig zu erwähnen, dass dieses Ergebnis immer von der jeweiligen Anwendungs- und Trocknungssituation sowie der Lösungsmittelverbrennung abhängt. Aber es zeigt sich immer wieder, dass mehr als 80 % des CO₂-Fußabdrucks auf die Rohstoffe zurückzuführen sind. Kein Unternehmen ist also grüner als seine Lieferanten.

6. Ökologischer Fußabdruck und Farben

Der Fußabdruck soll den Höhepunkt der jahrzehntelangen Fokussierung auf Nachhaltigkeit und die Messung von Umweltauswirkungen darstellen. In den letzten Jahren hat sich die Lebenszyklusanalyse (LCA) zu einem wichtigen Instrument entwickelt, um die Umweltauswirkungen von Produkten und industriellen Prozessen zu quantifizieren. Es bietet ein vollständiges Bild der Auswirkungen, um die besten Hebel für Verbesserungen zu finden.

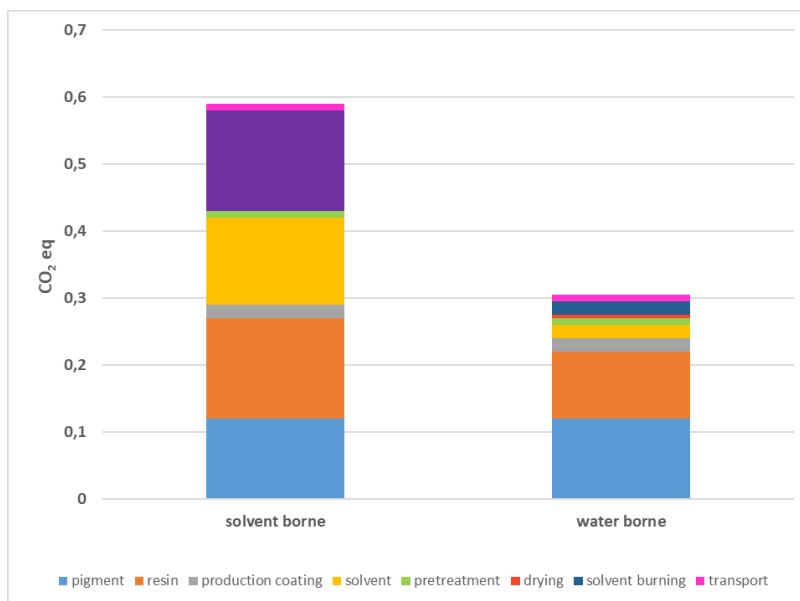


Abbildung 2: CO₂-Fußabdruck von wasser- und lösemittelbasierten Lacken (aufgeteilt nach Rohstoffen sowie Produktions- und Applikationsschritt)

Treibhausgase sind nur ein Teil der Geschichte und Diskussionen sollten nicht nur in Bezug auf VOCs stattfinden, die Luftverschmutzung verursachen, sondern auch in Bezug auf Wasserverbrauch, Ozonabbau, Toxizität für Boden und Wasser und eine Vielzahl anderer Parameter. Moderne Analysen konzentrieren sich also auf [16, 18]:

- Global Warming Potential (GWP) – allgemein bekannt als CO₂-Fußabdruck (CFP), der sich auf den Klimawandel bezieht (Einheit: kg CO₂-Äquivalent).
- Abiotisches Abbaupotenzial, fossil (ADP fossil) – bewertet den fossilen abiotischen Ressourcenverbrauch, wobei die Ressourcenknappheit das Hauptkriterium ist (Einheit: MJ).
- Versauerungspotenzial (AP) – Wirkungskategorie, die sich mit Emissionen befasst, die zur Versauerung von Boden und Wasser beitragen, was zu Waldsterben und Versauerung von Seen führt (Einheit: kg SO₂-Äquivalent).
- Eutrophierungspotenzial (EP) – Eutrophierung umfasst alle potenziellen Auswirkungen von Nährstoffen (hauptsächlich Stickstoff und Phosphor) auf die Umwelt, die zu einer unerwünschten Verschiebung der Artenzusammensetzung und einer erhöhten Biomasseproduktion in Ökosystemen führen können (Einheit: kg Phosphat-Äq).
- Photochemisches Ozonbildungspotenzial (POCP) – berücksichtigt die Bildung von Ozon am Boden der Troposphäre, verursacht durch photochemische Oxidation von VOC und Kohlenmonoxid (CO) in Gegenwart von Stickoxiden (NO_x) und Sonnenlicht (Einheit: kg Ethen -Äq).

7. Reduzierung des Produkt-Fußabdrucks durch Effizienz

Neben der Frage, den CO₂-Fußabdruck durch Effizienzsteigerung zu reduzieren, müssen wir uns darüber im Klaren sein, dass unsere Rohstoffe begrenzt sind. Daher ist die Reduzierung des Abfall-, Material- und Energieverbrauchs entlang der Wertschöpfungskette für die Nachhaltigkeit unerlässlich. Dies wurde bereits im Kapitel Produktsicherheit bei der Lackherstellung erwähnt, ist aber auch am Einsatzort notwendig. Die Definition von Effizienz bietet die Möglichkeiten:

$$\frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \text{Effizienz}$$

Wir können den Input, also Rohstoffe und Energie, minimieren und den Output (wie die Lebensdauer) maximieren. Einige Beispiele in diesem Bereich sind Ansätze wie digitale oder Overspray-freie Anwendungen (siehe Abbildung 3) [8] oder einfach die Optimierung automatischer Sprühstraßen.

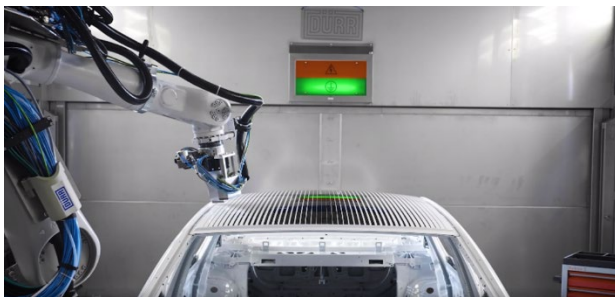


Abbildung 3: Overspray-freies Auftragen von Lacken [7]

Darüber hinaus ist auch das Recycling von Lacken im Applikationsprozess heute Stand der Technik und reduziert den Abfall deutlich [9].

Eine weitere Möglichkeit, Abfall während der Anwendung zu reduzieren, besteht darin, die im Trocknungsschritt gebildeten Gase zu behandeln [16].

8. Von einer linearen zu einer zirkulären Betrachtungsweise – hin zu Circular Economy

In den letzten 10 bis 15 Jahren hat sich jedoch ein ganzheitlicherer Ansatz durchgesetzt, der weniger das Produkt selbst als vielmehr den gesamten Lebenszyklus – von den Rohstoffen über die Herstellungsverfahren und die Produktsicherheit bis hin zur Anwendung – in den Mittelpunkt stellt zu Abbauprodukten. Daher muss die gesamte Lieferkette von der Herstellung der Rohstoffe bis zum Transport berücksichtigt werden, indem der Kohlenstoff- und Umweltfußabdruck des gesamten Produktlebenszyklus betrachtet wird.

State of the Art ist das «Cradle to Cradle»-Konzept, das die Idee beinhaltet, dass ein Produkt am Ende seines Lebenszyklus wieder in die Kreislaufwirtschaft gelangt. Abfall soll kein Müll, sondern eine wertvolle Ressource sein – eine faszinierende Idee.

Die bisher übliche lineare Betrachtungsweise eines Produkts (siehe Abbildung 4) endet an dem Punkt, an dem sein Lebenszyklus endet. Das Produkt wird entsorgt und wertvolle Ressourcen werden zerstört.



Abbildung 4: Lineare Ökonomie

Im Gegensatz dazu betrachtet die Kreislaufwirtschaft das Produkt als Teil eines permanent zirkulierenden Systems (siehe Abbildung 5). Ziel eines solchen Systems ist es, Materialien und Produkte so lange wie möglich zu teilen, zu leasen, wiederzuverwenden, zu reparieren, zu überholen und zu recyceln, um die Lebensdauer der verwendeten Produkte und Materialien zu verlängern.



Abbildung 5: Kreislaufwirtschaft

Am Ende des Produktlebenszyklus werden die Ressourcen nicht vernichtet, sondern gehen zurück in den Kreislauf. Sowohl der Ressourcenverbrauch als auch die Abfallentstehung werden daher so weit wie möglich minimiert. Dieses Konzept einer Kreislaufwirtschaft oder «Cradle to Cradle» wurde Ende der 1990er Jahre vom deutschen Chemiker Michael Braungart und dem amerikanischen Architekten William McDonough entwickelt [10].

Für die Beschichtungsbranche bedeutet dies einen Ansatz, der auf den Prinzipien der Reduzierung, Wiederverwendung und des Recyclings basiert. Es ist notwendig, den gesamten Entstehungs- und Nutzungsprozess eines Produktes genau zu betrachten: von der Verwendung und Auswahl nachwachsender Rohstoffe über die Wahl umwelt- und ressourcenschonender Herstellungsverfahren bis hin zur Sicherstellung der Recyclingfähigkeit. Dies ist bei Verpackung und Transport sowie beim Auftragen der Beschichtungen fortzusetzen. Abfall ist eine wertvolle Sekundärressource, das ist die Devise. In der Praxis bedeutet dies beispielsweise, dass ein ausrangiertes Möbelstück oder Holzbauteil nicht im Müll landet, sondern nach dem Prinzip der Kaskadenverwertung wiederverwendet wird – durch Upcycling mit einem Anstrich oder durch Nutzung, um andere Holzwerkstoffe oder sogar Dämmstoffe herzustellen. Nicht zuletzt kann sich diese Ökonomie auch auf die Geschäftsmodelle auswirken.

Umweltsiegel und Nachhaltigkeitszertifikate gibt es viele – aber wenige sind so umfassend oder haben so hohe Standards wie «Cradle to Cradle», das Gütesiegel für die innovative Kreislaufwirtschaft. Solche Zertifizierungen bestätigen, dass ein Unternehmen umweltverträgliche, gesunde und recycelbare Materialien verwendet, dass es Solarenergie oder eine andere Form erneuerbarer Energie nutzt, dass es einen verantwortungsvollen Umgang mit Wasser annimmt und dass es Strategien hat für soziale Verantwortung. Damit sind die Ambitionen in Sachen Nachhaltigkeit für den Kunden transparent und nachvollziehbar.

9. Zusammenfassung

Beschichtungen sind für die meisten Massivholz- oder Holzwerkstoffprodukte, die in Außenanwendungen verwendet werden, unerlässlich. Neben der Verleihung der gewünschten ästhetischen Eigenschaften (Farbe, Glanz, Glätte) sind Beschichtungen von entscheidender Bedeutung für den Schutz des Holzes vor Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit, Sonneneinstrahlung, Temperaturschwankungen, biologischer Fäulnis und Schäden an der strukturellen Integrität, die dadurch entstehen mechanische oder chemische Prozesse.

Es gibt mehrere wichtige Faktoren für den ökologischen Fußabdruck von Beschichtungen – die Produktion der Rohstoffe, die Kosten für den Transport der Farbe vom Werk zum

Kunden und wie lange die lackierte Oberfläche hält, bis sie neu lackiert werden muss, d.h. wie haltbar der Lackfilm ist. Dieser letzte Aspekt ist von besonderem Interesse – eine haltbare, länger haltbare Farbe ist besser für die Umwelt. Die Reduzierung von Abfall ist eine weitere Möglichkeit, die Nachhaltigkeit des Systems während der Anwendung zu verbessern. Eine Möglichkeit, dieses Problem anzugehen, besteht darin, Overspray zu reduzieren, möglicherweise durch die Verwendung von Overspray-freien Auftragsleitungen. Durch die Kombination von Themen der Kreislaufwirtschaft und nachhaltigem Design mit der Verlängerung der (Lebens-)Lebensdauer von Beschichtungen durch Hochtechnologie entsteht eine klassische Win-Win-Situation für die Kunden – sie betreiben ihr Geschäft nachhaltig und sparen gleichzeitig Energie- und Servicekosten. Daher wird es auch immer wichtiger, dass die einzelnen Bereiche eng zusammenarbeiten. Viele wichtige Innovationen sind aus gemeinsamen Projekten mit Kunden, mit Herstellern von Rohstoffen oder Anlagen und natürlich mit akademischen und wissenschaftlichen Einrichtungen entstanden. Solche Innovationsworkshops werden in Zukunft immer wichtiger. Schließlich ist es auch eine Frage der Einstellung: Wir alle wissen, dass wir eine Mitverantwortung für Klima und Umwelt tragen – diese Verantwortung sollten wir auch im Berufsleben wahrnehmen.

10. Referenzen

- [1] <https://chinadialogue.net/en/pollution/10711-china-releases-2-2-actionplan-for-air-pollution> (01/10/2020)
- [2] M.F. Cunningham, J.D. Campbell, Z. Fu, J. Bohling, J.G. Leroux, W. Mabee, T. Robert, *Green Chem.* 2019, 21, 4919–4926. DOI: 10.1039/C9GC02462J
- [3] C. Teacă, D. Roşu, F. Mustăţă, T. Rusu, L. Roşu, I. Roşca, C. Varganici, *Bioresources* 2019 14(2):4873–4901, DOI:10.15376/biores.14.2.Teaca
- [4] <https://www.worlee.de/nc/en/pressnews/news/detail/datum/2018/04/11/worlee-develops-new-binder-based-on-camelina-oil/> (01.09.2022)
- [5] S. Kasetaitė, J. Ostrauskaite, V. Grazulevičienė, J. Svedienė, D. Bridziuvienė, *J. Appl. Polym. Sci* 2014, 2014, 131, 40683, DOI: 10.1002/APP.40683
- [6] F. Bulian, J.A. Graystone, *Industrial Wood Coatings, Theory and Practice*, First Edition, 2009, Elsevier, Amsterdam
- [7] <https://www.durr.com/de/produkte/lackieranlagen-applikationstechnik/lackapplikation/oversprayfreie-lackapplikation>, 01.09.2022
- [8] *Besser Lackieren* 2019, 13.12.2019, 11
- [9] U. Hoffmann, *JOT* 2009, 3, 10
- [10] W. McDonough, M. Braungart, *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, Farrar, Straus and Giroux, 2010
- [11] P. Li, M. Songqi, D. Jinyue, L. Xiaoqing, J. Yanhua, W. Sheng, W. Jingjing, C. Jing, Z. Jin, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2017, 5, 1, 1228–1236, DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b02654
- [12] M. Wundlechner, P. Kratzer, *European Coatings Journal* 2021, 10, 20
- [13] A. Büngeler, F. Kollmann, K. Huber, O. Strube, *Biomacromolecules* 2022, 23(3):1020-1029 DOI:10.1021/acs.biomac.1c01390
- [14] S. Vignolini, E. Moyroud, B.J. Glover, U Steiner, *J. R. Soc Interface* 2013, 10 (87), DOI: 10.1098/rsif.2013.0394
- [15] E. Mahmoud, D.A. Watsonb, R.F. Lobo, *Green Chem.* 2014, 6, 167, DOI: 10.1039/C3GC41655K
- [16] B.V. Sánchez, D. Steinke, K. Schenk, E.T. Rosales, S.A. Thomsen, *European Coatings Journal* 2021, 1
- [17] <https://www.pcimag.com/articles/109362-how-paint-manufacturers-can-reduce-waste-improve-sustainability> (01.09.2022)
- [18] Guinée J B, *Handbook on Life Cycle Assessment*, Springer Science & Business Media, 2002