



AUF DEM WEG ZUR KREISLAUFWIRTSCHAFT

Eine Zukunfts-Analyse zu ausgewählten Technologie-Trends vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung in Zusammenarbeit mit den Münsterland Denkfabriken

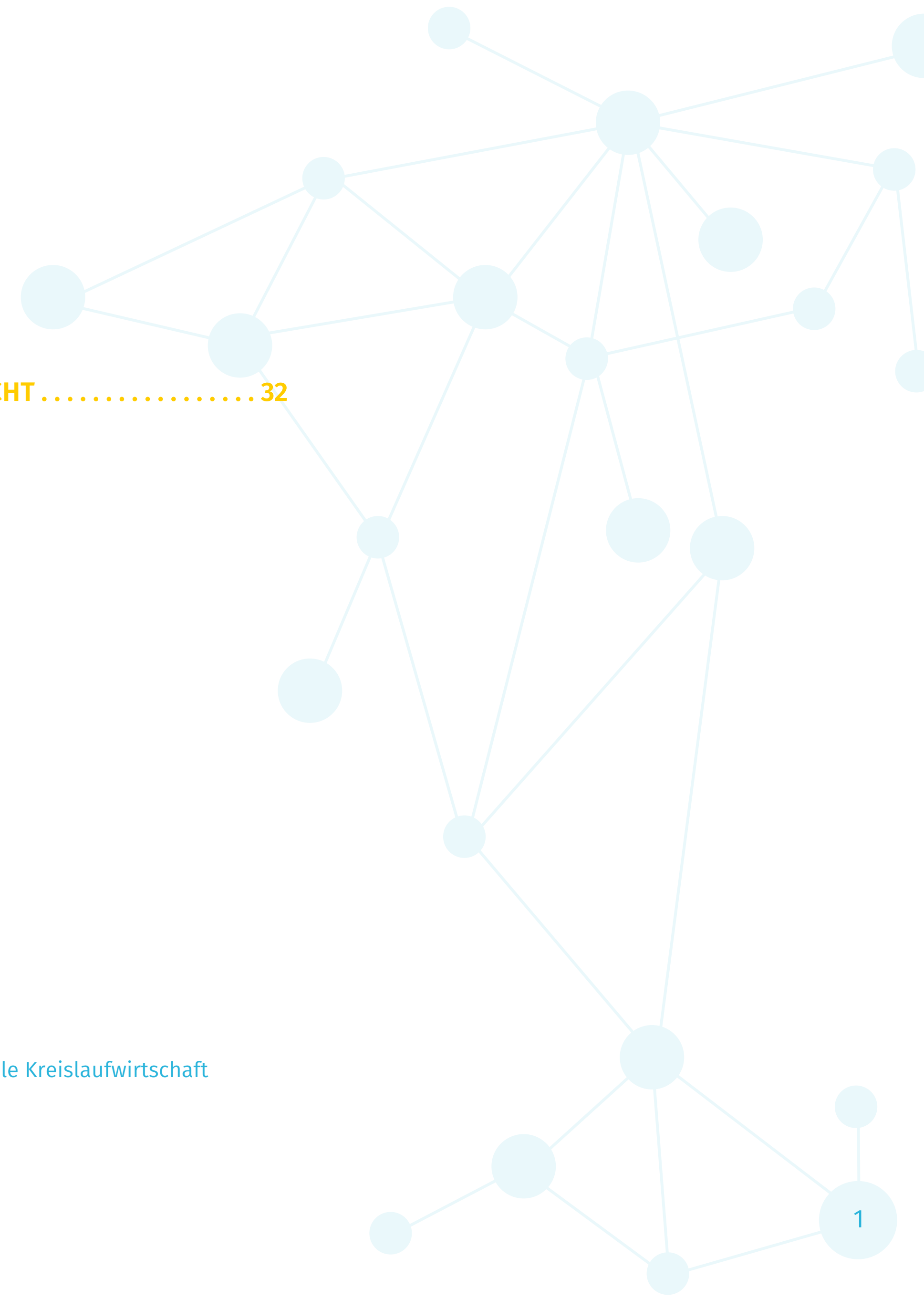
06/2022

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	2
2	Nachhaltige Bauplanung mit Building Information Modeling (BIM)	3
3	Materialsparende Bauweise	5
4	Regionale Kreislaufwirtschaft	7
5	Baustoffrecycling	9
6	Zementinnovationen	11
7	Neue Bindemittel	13
8	Betoninnovationen	15
9	Baustoffe aus Stroh	17
10	Natürliche Dämmmaterialien	19
11	Myzelium Basierte Baustoffe	21
12	Holzbau	23
13	Bewertung für das Münsterland	25
14	Literaturverzeichnis	27

→ **VERTIEFUNGSBERICHT** 32

Anhang:
Vertiefungsbericht Regionale Kreislaufwirtschaft



1 EINLEITUNG

Die Kreislaufwirtschaft dient der Schonung natürlicher Ressourcen einschließlich des Klimaschutzes, dem Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit unter Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips. Darüber hinaus zielt sie auf die Rohstoffsicherung ab. Die Kreislaufwirtschaft soll zur Reduzierung der lebenszyklusweiten negativen Auswirkungen sowohl von Materialien und Produkten – durch Einsparung von Primärmaterialien und deren Substitution mit Sekundärmaterialien – als auch der Abfallerzeugung und Abfallbewirtschaftung beitragen. (Müller et al. 2020). Zentrale Ansatzpunkte sind dabei die Reduktion von Materialeinsatz, die Maximierung der Nutzungsdauer von Materialien und die Bewirtschaftung von Materialien in möglichst gleich- oder höherwertigen Kreisläufen wodurch Primärmaterialien durch Sekundärmaterialien geeigneter Qualität substituiert und eingespart werden.

Dabei rückt auch das Bauwesen zunehmend in den Vordergrund. Baumineralien machen mit über 500 Mio. Tonnen pro Jahr den mit Abstand größten Anteil der in Deutschland abgebauten Rohstoffe aus (Jacob et al. 2021, S. 69). Ihr Abbau ist mit erheblichen Eingriffen in natürliche Ökosysteme und mit erheblichem Landverbrauch verbunden. Außerdem dominiert das Bauwesen das Abfallaufkommen in Deutschland deutlich. Schließlich trägt der am häufigsten verwendete Baustoff Beton erheblich zum Klimawandel bei. Aus der Zementproduktion stammen ca. 7–8% der weltweiten CO₂-Emissionen (Verein Deutscher Zementwerke 2020).

Demgegenüber stehen eine Reihe innovativer Lösungsansätze sowohl in den Bereichen Vermeidung, Lebensdauererlängerung und Recycling als auch bei der Entwicklung neuer Werkstoffe mit besseren Umwelteigenschaften. Wegen der hohen Mengenströme spielt die Regionalität bei der Realisierung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen eine große Rolle. Daher ist die Thematik besonders gut für eine regionale Betrachtung im Rahmen der Münsterland Denkfabriken eignet.

Für die Denkfabrik „Auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft“ wurden Themenschwerpunkte ausgewählt und vertieft analysiert. Ausgangspunkt für die Auswahl der Themen waren zunächst Interviews mit Fraunhofer-Expert:innen. Ergänzend wurden teilautomatisierte Recherchen von News-Sites, inkl. eines Topic-Modelling durchgeführt und wissenschaftliche Veröffentlichungen im jeweiligen Bereich wurden hinsichtlich der Entwicklungsdynamik analysiert.

Bei der Auswahl der Zukunftsthemen wurde betrachtet, ob sich das Thema besonders dynamisch entwickelt und ob erwartet wird, dass es zukünftig große Auswirkungen auf die Bereiche Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft haben wird. Die Zukunftsthemen decken sowohl Themen ab, die bereits heute eine gewisse Relevanz für die Unternehmen in der Region Münsterland haben, als auch Themen, die noch mit einer größeren Unsicherheit behaftet sind, weil sie sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden.

Für alle Zukunftsthemen wird neben einer Kurzbeschreibung jeweils diskutiert, wie die Dynamik der Entwicklung zu bewerten ist, welches die wichtigsten Treiber dieser Entwicklung sind und welche Zukunftsperspektiven gesehen werden. Zur graphischen Veranschaulichung der Dynamik ist für alle Themen eine bibliometrische Auswertung der weltweiten wissenschaftlichen Publikationen auf Basis der Dimensions-Datenbank¹ dargestellt. Ergänzend werden für alle Themen Beispiele für aktuelle Entwicklungen beschrieben. Die Grafiken im Abschnitt „Zukunftspotenzial“ vermitteln eine grobe Einschätzung der Relevanz des jeweiligen Themas für die Bereiche Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft.

Die Zukunftsthemen wurden in der jeweiligen Denkfabrik mit Folien vorgestellt und im Anschluss von den Teilnehmenden hinsichtlich ihrer Relevanz für die Region und des Aufwands für die Erschließung des Themas bewertet.

ANSPRECHPARTNER:INNEN FRAUNHOFER ISI:

Elna Schirrmeister,
Dr. Philine Warnke und
Jan Rörden

¹ → <https://app.dimensions.ai/discover/publication>

2 NACHHALTIGE BAUPLANUNG MIT BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)

KURZBESCHREIBUNG

Um nachhaltig zu sein, müssen bauliche Maßnahmen konsequent auf Energieeinsparung und die Langlebigkeit von Gebäuden ausgerichtet sein. Umweltbelastungen entstehen nicht nur während des Baus, sondern auch während der Nutzung und beim Abbruch von Bauwerken (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) 2016). Demzufolge muss neben den Baustoffen auch der gesamte Lebenszyklus von Gebäuden bereits bei der Planung mitgedacht und optimiert werden. Durch die Nutzung von Building Information Modeling (BIM) ergeben sich diesbezüglich ganz neue Potenziale (Borrmann et al. 2015) und es wird auch von einer Transformation des AEC-Sektors (Architecture, Engineering, Construction) gesprochen (Kovacic et al. 2020). Diese Transformation beinhaltet einen durchgängigen Wechsel auf 3D-Daten, die virtuelle Kooperation aller Akteure über den gesamten Lebenszyklus über Plattformen, die Integration von 3D Gebäudeinformationen in 3D Geographic Information Systems (GIS), die zunehmende Nutzung von modularen Elementen und die Modellierung des gesamten Lebenszyklus (Guy et al. 2006). Allgemein bietet die Transformation eines Sektors die Möglichkeit, Nachhaltigkeitsaspekte einzubringen und die spezifischen Vorteile für eine Kreislaufwirtschaft ergeben sich durch die neuen Interaktionsmöglichkeiten über den gesamten Lebenszyklus.

DYNAMIK

Aktuell werden die Potenziale von BIM-Plattformen noch nicht optimal genutzt. Effektive Plattformstrategien, Zertifizierungsschemata für BIM-Objekte und BIM-Erstellungsprozesse könnten zukünftig die Nutzungsmöglichkeiten über den gesamten Produktlebenszyklus deutlich verbessern und damit auch einen wichtigen Beitrag zur Nachhaltigkeit haben. Es wird erwartet, dass die nächste Generation der Architekt:innen, Ingenieur:innen und Stadtplaner:innen in deutlich größerem Umfang die Potenziale von BIM über virtuelle Kooperationen erschließen wird.

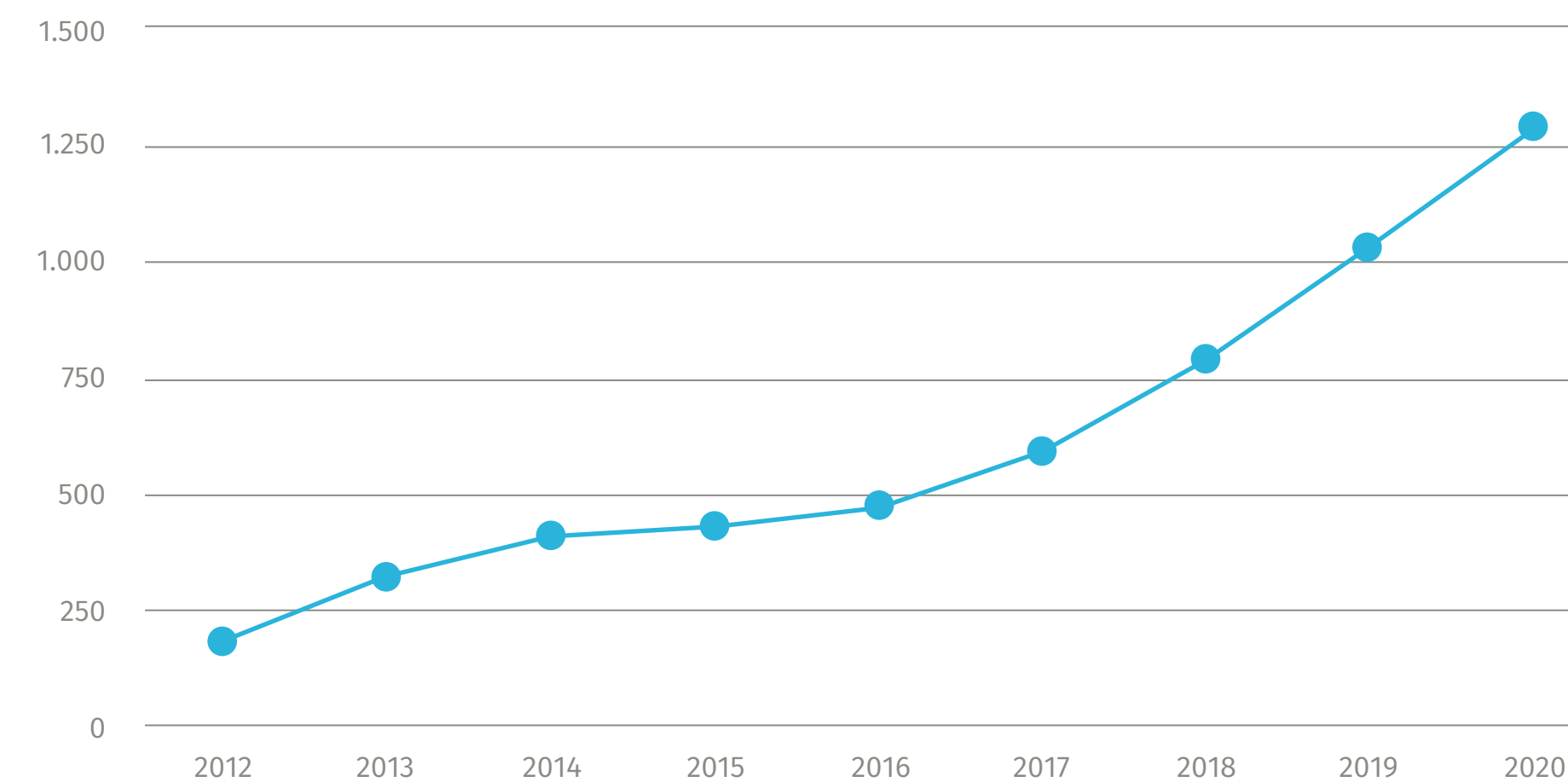


Abbildung 1: Anzahl der Publikationen pro Jahr zu Building Information Modeling²

² search_text = "Building Information Modeling"

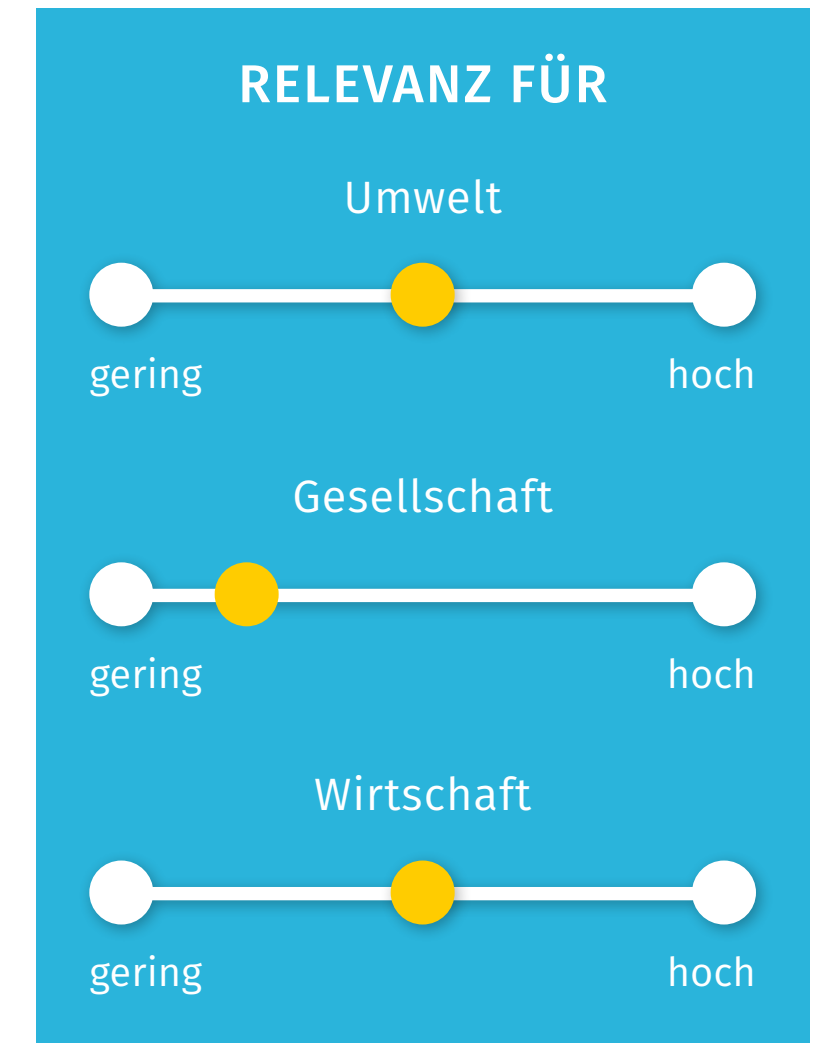


AUSGEWÄHLTE AKTUELLE ENTWICKLUNGEN

- Der Datenzugriff, die Standardisierung und offene Schnittstellen sind erforderlich, sowie die Datenintegration entlang der Wertschöpfungskette. Es fehlen noch Plattformen, die auf eine Zusammenarbeit zur kollektiven Wertschöpfung und zum Wissensmanagement entlang der Wertschöpfungskette in der AEC abzielen.
- Die Erfassung der Bauwerkgeometrie mittels Laserscanning und die Erfassung der Materialzusammensetzung über Ground Penetrating Radar (GPR) kombiniert mit Algorithmen für die halbautomatische Erzeugung einer „as-built“ BIM-Modellgeometrie wird entwickelt. Dabei werden die BIM-Daten durch die vom GPR bewerteten Materialinformationen angereichert und können z.B. für die Energiemodellierung und Energiesimulation verwendet werden.
- Linked Data (LD) ist eine Technologie zur Unterstützung der Veröffentlichung strukturierter Daten im Web, damit diese miteinander verknüpft werden können. LD kann daher einen besseren Zugriff und eine semantisch nützlichere Abfrage von BIM-Daten bieten. Die Integration von BIM in die Geodomäne liefert dringend benötigte Kontextinformationen über das Gebäude und seine Umgebung.

ZUKUNFTSPOTENZIAL

Mit dem rasanten globalen Wachstum der städtischen Ballungsräume und der damit verbundenen zunehmenden Bautätigkeit wird die Ressourcenknappheit sowie die Entstehung von Abfällen zu einem dringenden Problem für die Bauindustrie. Dadurch wird die Umsetzung der Ziele der Kreislaufwirtschaft im Baugewerbe, das als einer der Hauptverbraucher materieller Ressourcen sowie als relevanter Urheber fester Abfälle gilt, immer wichtiger und dringlicher innerhalb der Politik der Europäischen Union. In den USA steigt die Verwendung des building information modeling seit Mitte der 2000er Jahre. Modellprojekte in Norwegen führten dazu, dass das building information modeling ab 2010 verpflichtend wurde. Durch BIM wird deconstruction erleichtert, da sich nachträgliche Änderungen am Bau einfacher lösen lassen, wenn die erforderlichen Daten für alle Akteure zur Verfügung stehen. Allerdings stellt sich die Frage, wie mit bestehenden Gebäuden umgegangen werden kann, die nicht auf Demontage ausgelegt sind oder wesentliche Komponenten besitzt, die nicht für den Rückbau geeignet sind oder gefährliche Materialien wie Asbest oder PCB enthalten. Recyclingfirmen bräuchten geeignete Maschinen, während die Entsorgungskosten für Abbruchabfälle oft keinen finanziellen Nachteil bieten.



- ZUM NACHLESEN**
- Baubranche goes digital: „Grüne“ Gebäude mit BIM und EPDs (umweltdialog.de)
 - BIM, Nachhaltigkeit und Zertifizierung – DGNB Blog
 - Was bringt die Digitalisierung für nachhaltige Gebäude? – BIM World MUNICH (bim-world.de)

Inhaltsverzeichnis



3 MATERIALSPARENDE BAUWEISE

KURZBESCHREIBUNG

Neben der Entwicklung von neuen Werkstoffen, hat auch die Bauweise einen großen Einfluss auf den Ressourcenverbrauch und die CO₂-Emissionen, die beim Bau und bei der Nutzung von Gebäuden entstehen. Oftmals ergänzen sich neue Bauweisen und neue Materialien. Die Einsparung von mineralischen Baustoffen ist neben der Wiederverwendung und dem Ersatz durch nachwachsende Materialien eine der wichtigsten Maßnahmen zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks der Bauwirtschaft. Verschiedene Ansätze werden verfolgt (Streck 2018).

DYNAMIK

Die Publikationen im Bereich der Materialeinsparung steigen kontinuierlich. Nicht nur wegen neuer Technologien im Bereich des 3D-Druck, sondern auch durch die verschiedenen Leichtbaumethoden. Neben der Verwendung von Holz als Baumaterial könne u.a. durch Methoden der Baubionik umfangreich Materialien eingespart werden (siehe aktuelle Entwicklungen).

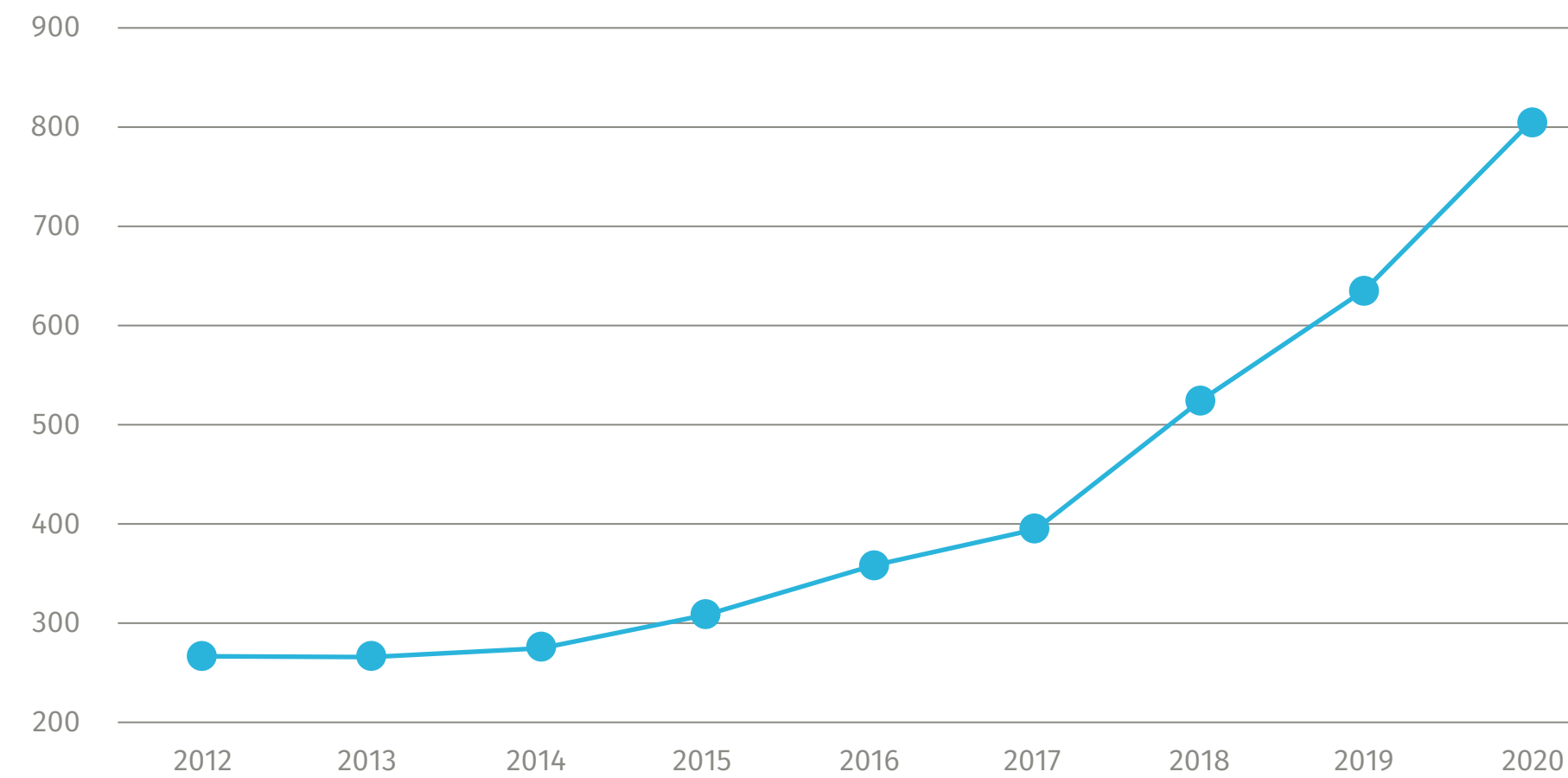
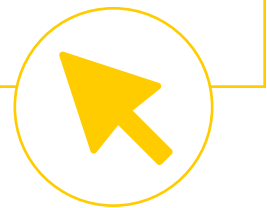


Abbildung 2: Anzahl der Publikationen pro Jahr zu materialsparende Bauweise³

ZUM NACHLESEN

- [Ultraleichtbau mit adaptiven Tragwerkselementen – Ökonomisch, ökologisch und sicher Bauen \(tlb.de\)](#)
- [Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland \(umweltbundesamt.de\)](#)
- [DFG Förderprogramm SPP 1542: Leicht Bauen mit Beton – Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien](#)



³ search_text = (material-savings) AND („construction“ OR „building“)

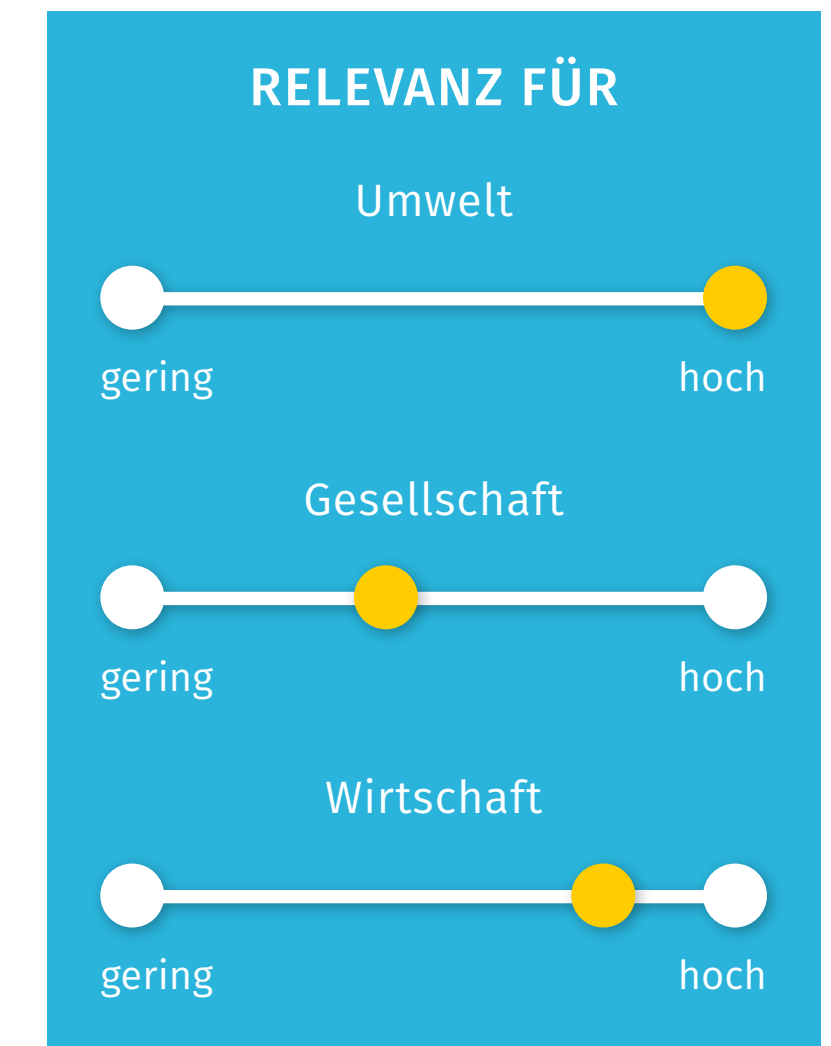
AUSGEWÄHLTE AKTUELLE ENTWICKLUNGEN

- **Gradientenbeton und Leichtbau:** Durch den Einsatz von Leichtbaumethoden und durch die Reduzierung von Überdimensionierung bei Betonteilen können Effizienzgewinne erzielt werden. Im Gradientenbeton wird die Betonzusammensetzung über den Querschnitt eines Bauteils variiert. Bei der Nutzung von Gradientenbeton in Geschossdecken ergibt sich bspw. eine Masseneinsparung von rund 30% gegenüber der konventionellen Betondecke. In Szenarien, die die gängige Bauweise mit einer Umstellung auf Holz-leichtbauweisen ersetzen, wurde berechnet, dass die Massenströme an Baumaterial um bis zu 50% reduziert werden können. Mit hochfesten und ultrahochfesten Betonen lassen sich zudem schlanke Bauteile bei hohen Beanspruchungen erzielen. In Zukunft könnten sogar völlig neue Konstruktionsprinzipien entwickelt werden, wenn man mit baubionischen Strukturen den Prinzipien der Natur folgt (Verein Deutscher Zementwerke 2020; Wörner et al. 2016; Beckmann et al. 2021).
- **Flach- und Hohldecken:** Mit vorgespannten Flach- bzw. Hohldecken besteht zum Beispiel bereits heute die Möglichkeit, den Materialeinsatz zu optimieren. Laut VDZ benötigen Spannbeton-Fertigdecken im Vergleich zu anderen Betondeckensystemen bei vergleichbaren statischen Anforderungen an die Decke bis zu 50% weniger Beton und bis zu 75% weniger Stahl. Diese Möglichkeit wird in der Planung noch nicht ausreichend berücksichtigt (Curbach).
- **Additive Fertigungstechnologien:** 3D-Drucktechnologien bieten neue Möglichkeiten für die Realisierung geometrischer Komplexität. Ein Vorteil ist die hohe Materialeffizienz und die Möglichkeit materialsparende Formen anzuwenden. Die Nachhaltigkeit hängt allerdings auch vom Werkstoff ab. Viele 3D Druck Bauprojekte werden aktuell mit nachwachsenden Materialien wie Biopolymeren oder Recyclingmaterialien durchgeführt (Hager et al. 2016).

ZUKUNFTSPOTENZIAL

Besonderes Potenzial liegt in der Kombination von 3D Druck und Leichtbau zur Materialeinsparung sowie zur Realisierung avancierter materialsparender Designs und in der Integration nachwachsender Rohstoffe. Den additiven Verfahren des 3D-Drucks wird v.a. im Leichtbau ein hohes Potenzial zugesprochen. Dies befindet sich allerdings erst in einem frühen Entwicklungsstadium (Jacob et al. 2021).

Der Ansatz der Einsparung von Material schon in der Planung setzt auf der höchsten Stufe einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft an und ist daher von sehr hoher Relevanz für die Umwelt. Wegen der Veränderung in Planungsprozessen, Technologien und Materialflüssen ist auch die Wirtschaft stark betroffen. Schließlich sind auch gesellschaftliche Aspekte relevant, da eine Veränderung von Bautraditionen und Wohnkultur mit den neuen Ansätzen einhergehen könnte.



4 REGIONALE KREISLAUFWIRTSCHAFT

KURZBESCHREIBUNG

Im Vergleich zu einer allgemeinen Kreislaufwirtschaft, bei der die Materialien oftmals über große Entfernungen transportiert werden müssen, können bei regionalen Stoffkreisläufen die Emissionen durch den Transport erheblich reduziert werden. Regionale Kreislaufwirtschaften können CO₂-Emissionen erheblich mindern und benötigen weniger Energie als die Primärproduktion von Grundstoffen. Die CO₂-Einsparungen und die Wirtschaftlichkeit eines solchen Konzeptes hängt jedoch stark davon ab, dass hohe Recyclingquoten und eine verbesserte Recyclinglogistik realisiert werden. Ergänzend müssen Änderungen am Produktdesign erfolgen, um eine Demontage am Ende der Lebensdauer von Produkten zu vereinfachen (Agora Energiewende und Wuppertal Institut 2019).

DYNAMIK

Da regionale Stoffkreisläufe in Deutschland noch nicht flächendeckend erfasst werden, ist es schwer einschätzbar, wie viele regionale Stoffkreisläufe es hierzulande gibt. Dennoch gelten vor allem die Bundesländer Baden-Württemberg, Berlin und Rheinland-Pfalz als Pionierregionen. Der Berliner Senat unterstützt Modellprojekte, aber auch einzelne Firmen. Wobei es aber auch in den bereits genannten Bundesländern noch keine Datenbanken gibt, die z. B. Recycling-Beton-Lieferanten auflisten, die nach Postleitzahlen sortiert sind, um lokale Wertstoffkreisläufe zu etablieren (Fromm 2020b; Stürmer und Fritz 2020).

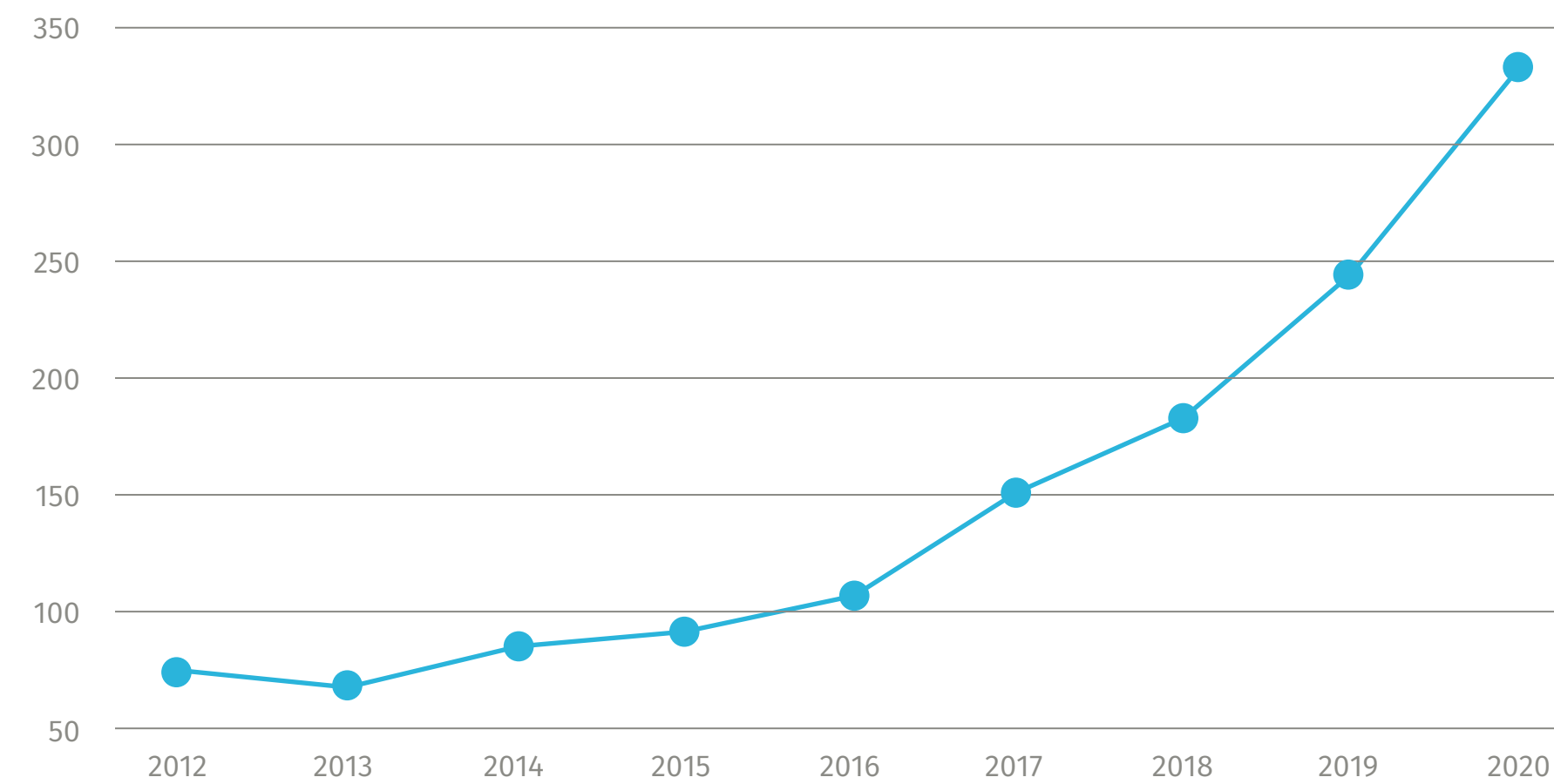
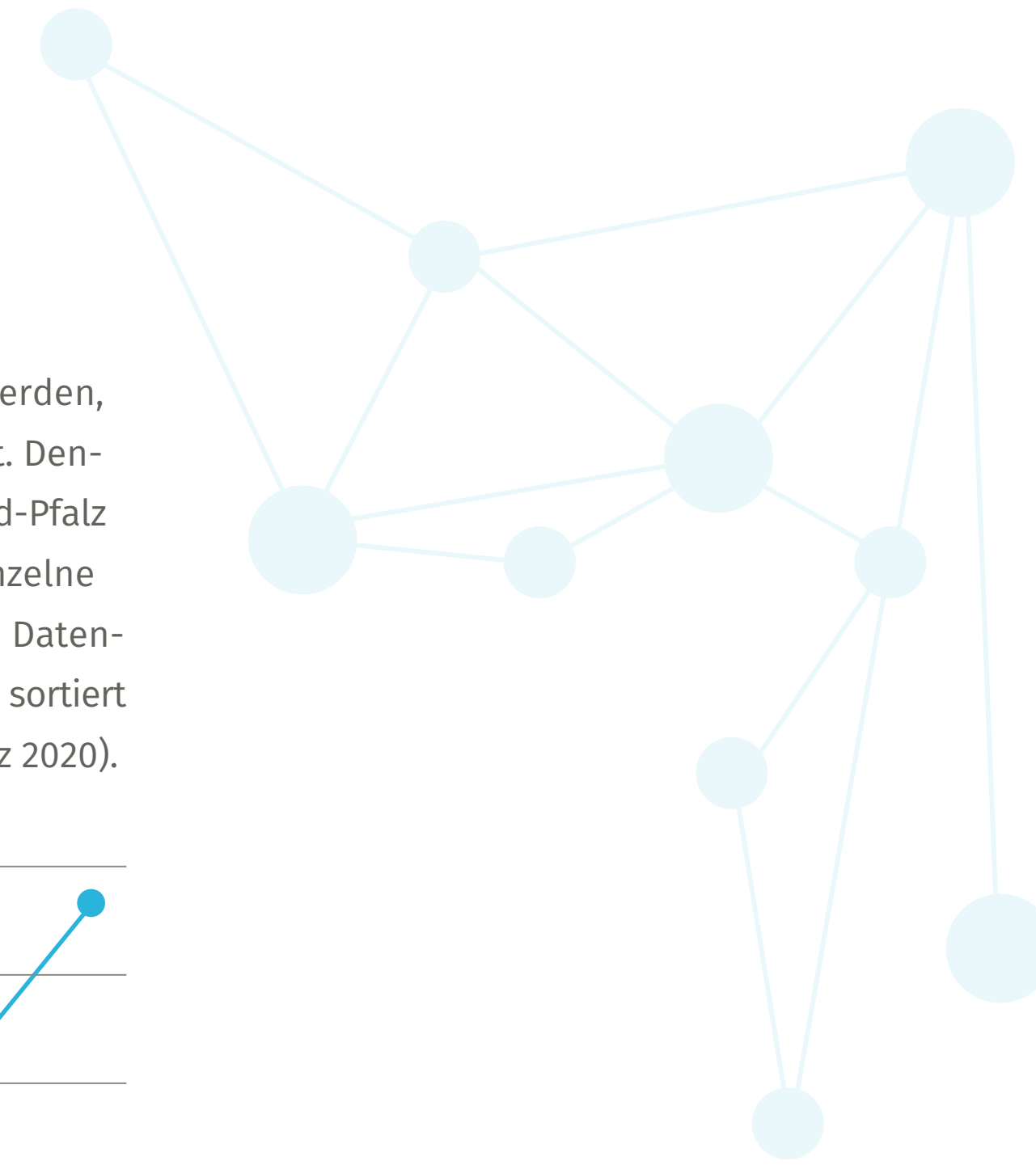


Abbildung 3: Anzahl der Publikationen pro Jahr zu regionalen Stoffkreisläufen⁴

⁴ search_text = (regional material cycle) OR (Stoffkreislauf) OR (Kreislaufwirtschaft) OR (regional circular economy)



AUSGEWÄHLTE AKTUELLE ENTWICKLUNGEN

- **BioBall:** Ansässig in der Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main ist BioBall ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Projekt, um die „Entwicklung bioökonomischer Innovationen als Treiber des Strukturwandels hin zu einer nachhaltigen biobasierten Wirtschaft zu beschleunigen“ (BioBall).
- **Circular Valley:** Ein Projekt des Vereins Wuppertal Bewegung e.V. Ziel des Circular Valley ist es, einen regionalen Stoffkreislauf im Rhein-Ruhr-Gebiet zu etablieren (Kupfer 2020; Circular Valley).
- **K3 Kompetenzzentrum Kreislaufwirtschaft Kirchheim/T.:** Zentraler Akteur ist die Recycling Firma Feess. Mineralische Bauabfälle werden direkt am Ort der Baustelle wiederaufbereitet, wenn dies möglich ist. Aktuell beträgt deren Recyclingquote 80%. Dies spart Ressourcen, Deponievolumen und den Transport. Aus den Bauabfällen stellt die Firma zum Teil Produkte wie die Öko-Stones her. In Verbindung mit dem K3-Kompetenzzentrum als Ort des Lernens und der Umsetzung des regionalen Stoffkreislaufes hat die Firma ein hohes Zukunftspotential, vor allem durch die Unterstützung der Stadt Kirchheim unter Teck (Fromm 2020c). Diese schreibt bei kommunalen Bauvorhaben Recycling-Beton vor. Mehrere Projekte wurden schon realisiert. Ob weitere Firmen sich die teuren Siebanlagen anschaffen werden, hängt maßgeblich mit der Politik zusammen, die den Einsatz von Recyclingstoffen aktuell nur für wenige Bauarbeiten zulässt (Fromm 2020a).

ZUKUNFTSPOTENZIAL

Durch die deutschlandweite Entstehung neuer Kreislaufwirtschafts-Regionen und dem hohen Interesse der verschiedenen Akteure daran, ist davon auszugehen, dass regionale Stoffkreisläufe in Zukunft einen Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen leisten werden. Die Zukunftspotenzial könnten jedoch auch dadurch entstehen, dass Synergiepotenzial zwischen den Unternehmen in einer Region besser genutzt werden und eine engere Vernetzung in der Region gefördert wird. Aus diesem Grund werden neben den Umwelt-Potenzialen auch Potenziale für die Gesellschaft und die Wirtschaft gesehen.

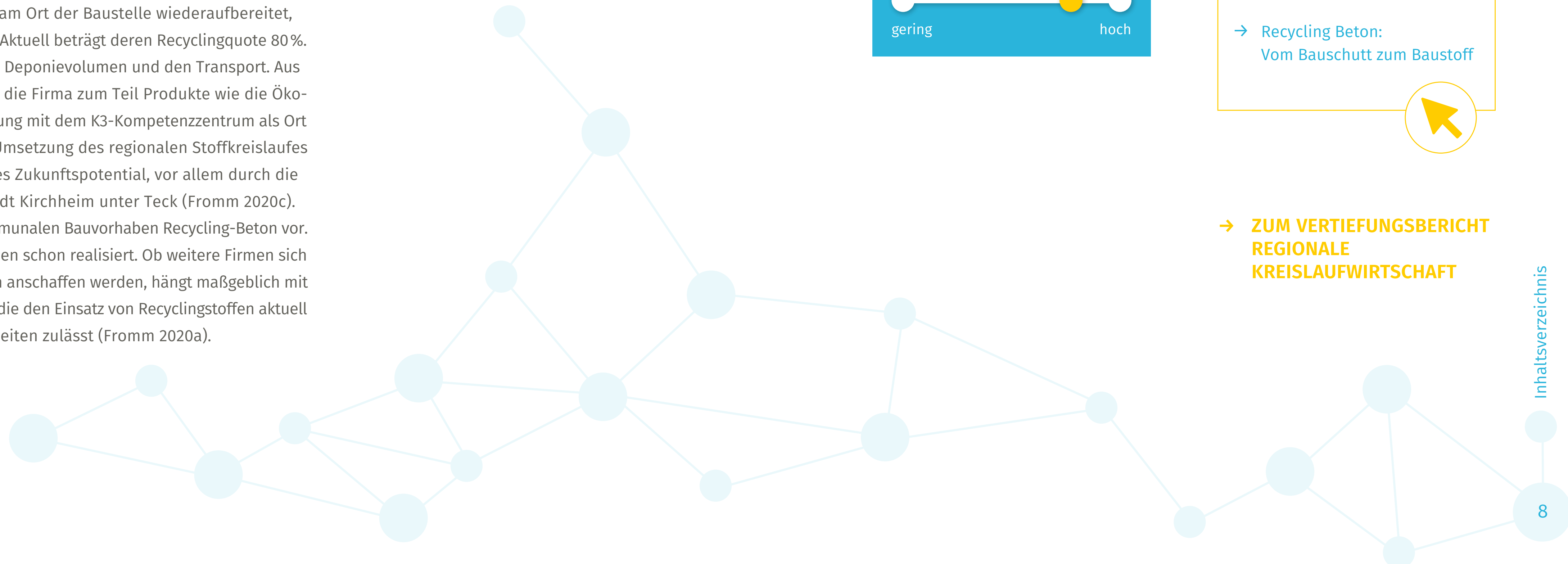


ZUM NACHLESEN

- Stoffkreisläufe und Stoffströme auf der regionalen und lokalen Ebene optimieren: Handlungsfelder, Fallbeispiele und Empfehlungen für Kommunen | Umweltbundesamt
- RegioRes: Optimierung regionaler Stoffkreisläufe und Stoffströme | Deutsches Institut für Urbanistik (difu.de)
- Recycling Beton: Vom Bauschutt zum Baustoff



→ ZUM VERTIEFUNGSBERICHT REGIONALE KREISLAUFWIRTSCHAFT



5 BAUSTOFFRECYCLING

KURZBESCHREIBUNG

Recycling-Baustoffe werden aus mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in einem mehrstufigen Aufbereitungsverfahren hergestellt. Blickt man auf das Baustoffrecycling, liegt die Verwertungsquote bei mineralischen Bau- und Abbruchabfällen zwar hoch, aber mit ca. 13 % wird nur ein kleiner Bruchteil der Abbruchabfälle zur gezielten Ersetzung des Primärmaterials genutzt (Potrykus et al. 2021). Dies ist wegen der hohen ökologischen Kosten und des Flächenverbrauchs für Abbau und Deponierung von Baumaterialien problematisch. Insgesamt wird das Potential zur Einsparung von Primärbaustoffen durch hochwertiges Recycling auf ca. 11 Mio. Tonnen pro Jahr geschätzt (Jacob et al. 2021).

DYNAMIK

Verschiedene Forschungs- und Förderprogramme sollen in den nächsten Jahren dafür sorgen, dass Recycling-Baustoffe als wirkliche Alternative wahrgenommen werden. Obwohl z.B. die Verwendung von RC-Beton, bei dem ein Teil der mineralischen Zuschlagsstoffe aus sekundären Rohstoffquellen wie der Aufbereitung von Altbetonen bezogen wird, im Hochbau zunimmt, wird er in Deutschland – im Vergleich zu anderen Ländern wie etwa der Schweiz, Belgien und den Niederlanden – immer noch zögerlich eingesetzt. Es wird gefordert, dass RC-Beton gegenüber Beton mit natürlicher Körnung in den Ausschreibungen von Neubauten bevorzugt wird.

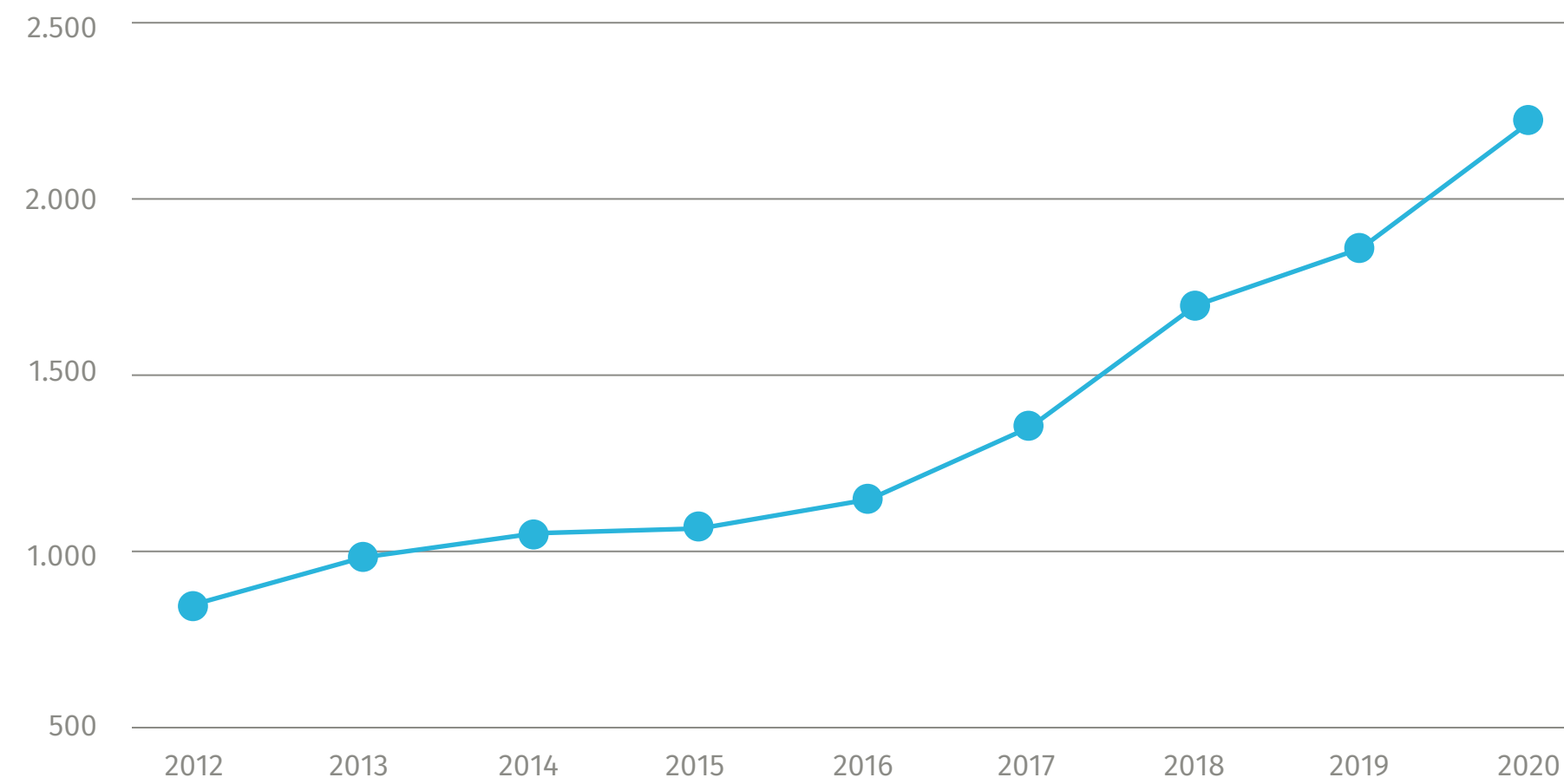


Abbildung 4: Anzahl der Publikationen pro Jahr zu RC-Beton⁵

ZUM NACHLESEN

- Umweltbundesamt Bauabfälle/Baustoffrecycling
- Baustoffrecycling: Was gibt es Neues? (umweltdialog.de)
- Recycling | Baustoffrecycling lohnt sich | springerprofessional.de
- Pilotprojekt Einsatz von Recyclingbeton für Wohnanlage



⁵ search_text = (recycling concrete) OR (RC concrete) OR (Recycling Beton) OR (RC Beton)



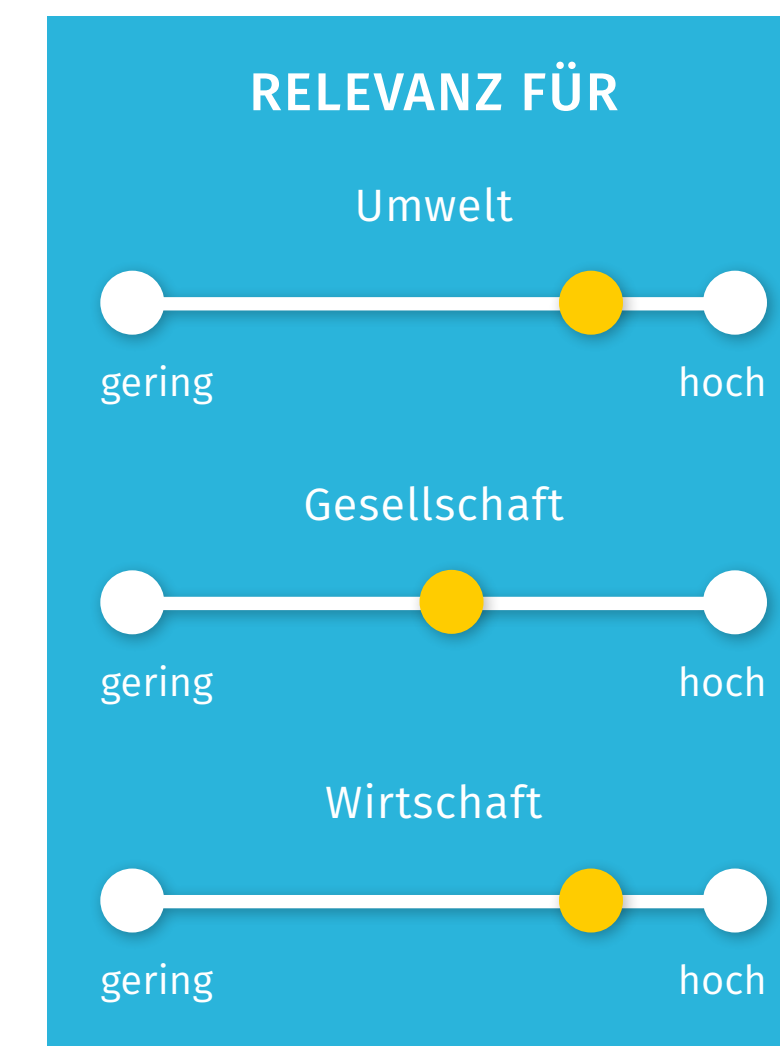
AUSGEWÄHLTE AKTUELLE ENTWICKLUNGEN

- **Recycling Beton:** Laut SN EN 206-1:2000 ist RC-Beton als Beton definiert, dessen Gehalt an Gesteinskörnung zu mindestens 25% aus Betongranulat und/oder Mischabbruchgranulat besteht. Sinnvoll ist der Einsatz von RC-Betonen in der Regel nur, wenn die Transportwege der rezyklierten Körnung vom Ort der Aufbereitung zum Betonwerk nicht zu lang sind. Die Mengen an Bauschutt, der wiederaufbereitet werden könnte, sind mehr als ausreichend, doch die Zahl der Entsorgungsbetriebe, die in der Lage sind, rezyklierte Körnungen für RC-Beton bereitzustellen, ist noch verhältnismäßig gering und auch die Akzeptanz und die Vergabvorgaben sind noch Hemmnisse.
- **Smart Liberator Technologie:** Mit dieser Technologie wird in den Niederlanden nicht nur Gesteinskörnung, sondern auch Zement wiedergewonnen. Dies ist möglich, da immer ein gewisser Überschuss an Zement in Beton vorkommt, d.h. der Zement nicht zu 100% mit Wasser gebunden wird. Dieser Rest Zement wird mit der Smart Liberator Technologie wiedergewonnen (Jacob et al. 2021, S. 71).
- **Elektrodynamische Fragmentierung:** Mit der elektrodynamischen Fragmentierung ist es möglich, verschiedenste Verbundmaterialien (z. B. Altbeton) selektiv aufzutrennen und somit die einzelnen Komponenten effizient in Primärqualität zurückzugewinnen. Das Verfahren beruht auf dem Prinzip, dass ultrakurze (< 500 nsec) Unterwasserimpulse Festkörper selektiv fragmentieren, indem die Blitzentladungen bevorzugt durch den Festkörper entlang von Phasengrenzen verlaufen. Ein elektrischer Durchschlag erzeugt dabei Druckwellen ($p = 10 \text{ GPa}$), wodurch das Verbundmaterial in seine Komponenten zerlegt wird. Diese Technologie wird derzeit industriell nur für spezielle Anwendungen eingesetzt. Für den Einsatz im Recyclingbereich muss diese Technologie für größere Volumenströme weiterentwickelt sowie für einen kontinuierlichen Betrieb angepasst werden (Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP).

- **Sortierung von Bauschutt Feinfraktion:** Im Fraunhofer MAVO Projekt BauCycle, wird eine ganzheitliche Verwertungsstrategie für Bauschutt und dessen Feinfraktion erforscht. Bei dem innovativen Lösungsansatz für das Baustoffrecycling kann mittels eines optischen Sortierungsverfahrens auch heterogenes Bauschuttmaterial für hochwertige Produkte wiederverwendet werden. Damit wird der Anteil von Materialien, der auf Deponien landet, reduziert – ein wichtiger Nachhaltigkeitsbeitrag im Sinne einer Circular Economy.

ZUKUNFTSPOTENZIAL

Die Weiterentwicklung des Baustoffrecyclings hängt maßgeblich von der Politik ab, die den Einsatz von Recyclingstoffen nicht durch die entsprechenden rechtlichen Rahmenbedingungen unterstützt. In anderen Ländern wie der Schweiz ist das Recycling von Baustoffen bereits seit 2010 gesetzlich verankert (Fromm 2020a). Die vom Bundeskabinett beschlossene aktuelle Mantel- bzw. Ersatzbaustoffverordnung und darin festgelegte neue Grenzwerte für die Verwertung von Recyclingbaustoffen werden sich auf zukünftige Einsatzmöglichkeiten von mineralischen Reststoffen deutlich auswirken, z.B. im Straßen- und Landschaftsbau. Die energetische Sanierung des Wohngebäudebestandes nach Energieeinsparverordnung (EnEV) wird künftig ebenfalls zusätzliche Stoffströme generieren, die schadlos und ordnungsgemäß zu verwerten sind. Wenn keine sinnvollen Verwertungsoptionen für mineralische Reststoffe erschlossen werden können, wird sich dies auf die Deponiekapazitäten in Deutschland auswirken. Aktuell besteht starker Handlungsdruck, so dass ein verstärkter Einsatz des Baustoffrecyclings wahrscheinlich ist. Eine Reihe aktueller Fördermaßnahmen (z.B. FONA) zielen auf das Baustoffrecycling. Die Einsparung von Primärressourcen wirkt sich positiv auf die Umwelt aus, es können aber auch zusätzliche Belastungen etwa durch Feinstäube entstehen, zudem bestehen an manchen Stellen Zielkonflikte zwischen Recycling und Klimaschutz. Für die Wirtschaft ergeben sich Ersparnisse bei den Rohstoffen aber auch die Herausforderung neuer Stoffströme und Verfahren. Schließlich ist mit der Wiederverwertung von Komponenten oder Werkstoffen auch ein Kulturwandel verbunden. Je stärker diese Werkstoffe aktiv von den Bauherr:innen nachgefragt werden desto eher werden sie sich durchsetzen.



6 ZEMENTINNOVATIONEN

KURZBESCHREIBUNG

Aus der Zementproduktion stammen ca. 7% der weltweiten CO₂-Emissionen. Hintergrund ist, dass bei der Herstellung von Zement bzw. seinem Vorprodukt Zementklinker große Mengen an CO₂ freigesetzt werden. Auf die Zementklinkerherstellung entfallen insgesamt 94% der gesamten CO₂-Emissionen der Zementherstellung. Rund zwei Drittel davon entfallen auf rohstoffbedingte Prozessemissionen aus der Entsäuerung des Kalksteins und rund ein Drittel auf energiebedingte CO₂-Emissionen aus dem Einsatz der Brennstoffe. Ein weiteres Problem ist der hohe Flächenverbrauch und die ökologischen Schäden durch Abbau von Rohstoffen wie Kalk und Sand.

DYNAMIK

Aus den oben genannten Gründen besteht ein hoher Druck von Gesellschaft und Politik die Umweltauswirkungen von Beton und Zement zu reduzieren was sich in einer Reihe von Politikmaßnahmen wie Regulation und Förderung niederschlägt. Forschung und Industrie arbeiten daher mit Hochdruck an neuen Lösungen für Zemente mit geringerem CO₂-Fußabdruck (Verein Deutscher Zementwerke 2020; Jacob et al. 2021).

ZUM NACHLESEN

- [Grüne Produktion des Klima-Sünders Beton – Spektrum der Wissenschaft](#)
- [5 innovative Baustoffe der Zukunft \(lead-innovation.com\)](#)
- [Dekarbonisierung von Zement und Beton – Eine CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie](#)

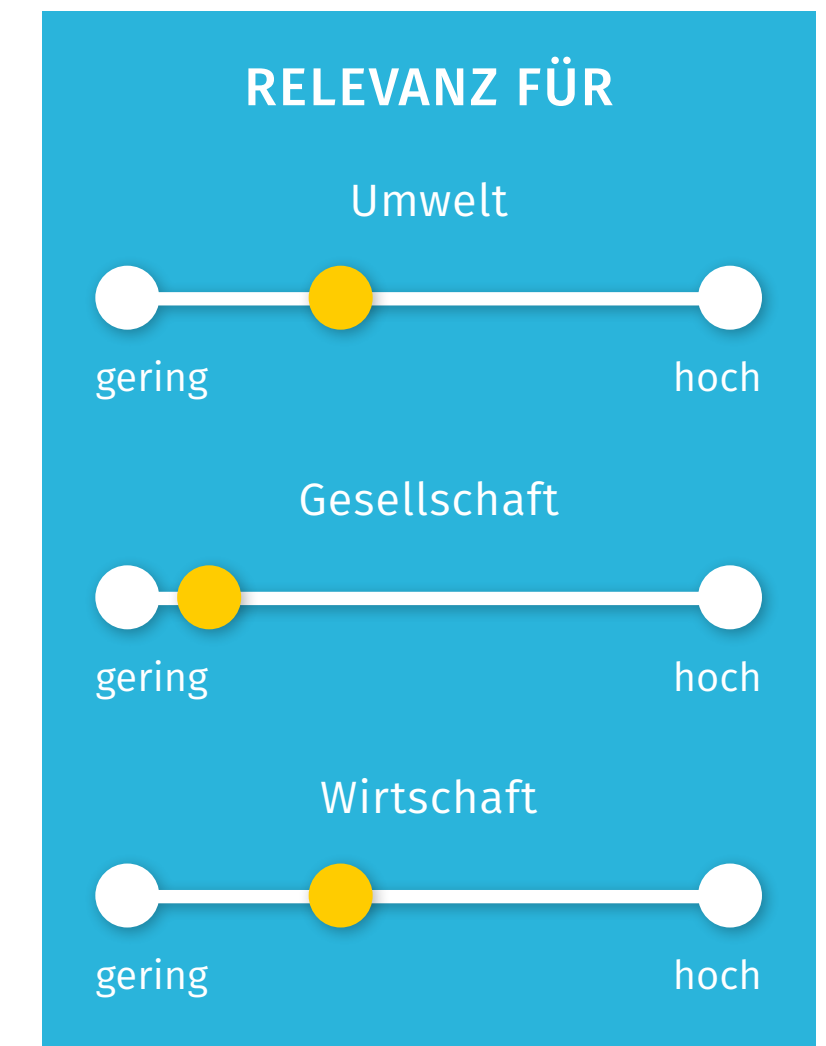


AUSGEWÄHLTE AKTUELLE ENTWICKLUNGEN

- Klinkereffiziente Zemente: Der Klinkeranteil ist entscheidend für den CO₂-Fußabdruck von Zement. Daher liegt in der Herstellung und Verwendung von Zementen mit ungebrauntem Kalkstein, die sich derzeit in der Normung befinden, ein wichtiger Ansatz, die CO₂-Emissionen weiter zu senken. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung calcinierter Tone im Zement (Verein Deutscher Zementwerke, Müller 2019).
- Als weiterer Stoffstrom bietet sich die Verwendung von gemahlene Brechanden an. Diese entstehen beim Abbruch von (Beton-) Bauwerken und dürfen im Gegensatz zu den dabei ebenfalls anfallenden groben Recyclinggesteinskörnungen, derzeit nicht zur Herstellung von Beton verwendet werden. Insbesondere aus dem Gedanken der Kreislaufwirtschaft heraus wäre es für die Zementindustrie interessant, diese Stoffe wieder zur Herstellung von Zement einzusetzen. Da Brechsand aber weitgehend inert ist, bietet er sich nicht ohne Weiteres als Substitut für Klinker, Hüttensand oder Flugasche an. Brechsand könnte allerdings – zumindest teilweise – Kalkstein ersetzen und zur Einsparung dieser natürlichen Ressource beitragen (BFT International 02/2019).
- Bio-Beton Zementherstellung durch Biomineralisierung (Hydrolyse von Harnstoff): Bakterien können Harnstoff als Stickstoffquelle mit Hilfe des Enzyms Urease nutzen. Dabei werden Carbonat-Ionen freigesetzt, die in Anwesenheit von Calciumionen als Calciumcarbonat ausfallen können. Allerdings entstammt der Kohlenstoff der Carbonationen dem Harnstoff und nicht CO₂ aus der Atmosphäre bzw. aus Emissionen (Eden 2020).
- Rekarbonatisierung: Durch Rekarbonatisierung wird CO₂ aus den Ofenabgasen aufgefangen und zur Herstellung von hochwertigem Beton verwendet (Lehigh Hanson – Heidelberg Cement Group 2021; Agora Energiewende und Wuppertal Institut 2019, S. 49).

ZUKUNFTSPOTENZIAL

Bei kalksparenden Zementherstellungsprozessen stehen noch werkstofftechnische Prüfungen aus, sodass eine tiefe Marktdurchdringung noch nicht gegeben ist. Die neuen Zementsorten kämpfen u. a. damit, dass sie bisher nicht die gleiche Funktionalität erfüllen und sich z.B. bzgl. Langlebigkeit erst noch beweisen müssen. Ein weiteres Hemmnis ist der Wegfall von Hüttensand und Schlacke durch die Dekarbonisierung der Stahlindustrie. Durchbrüche in den Märkten scheitern bisher auch an mangelnden Preisvorteilen, dennoch wird das längerfristige Potenzial sehr hoch bewertet, da davon ausgegangen wird, dass die Forderung nach CO₂-Einsparungen im Bau sehr viel größere Relevanz bekommen wird. Innovative Materialien könnten auch für die Wirtschaft ein Zukunftspotenzial haben. Für die Bauwirtschaft ergeben sich Herausforderungen durch die Neuordnung der Prozesse auf der Baustelle.



7 NEUE BINDEMittel

KURZBESCHREIBUNG

Weltweit wird – zum Teil bereits seit langem – daran gearbeitet, alternative Klinker bzw. Bindemittelsysteme möglichst mit geringen spezifischen CO₂-Emissionen und vergleichbarer Leistungsfähigkeit sowie Verfügbarkeit wie Portlandzementklinker herzustellen (Verein Deutscher Zementwerke 2020, S. 29; Winnefeld und Leemann 2017). Die Forschungen befinden sich jedoch vielfach noch im Laborstadium. Laut VDZ kommen unter Berücksichtigung des derzeitigen Standes der Technik und der Forschung für Deutschland mittelfristig folgende alternative Klinker-/Bindemittelsysteme in Frage: Calcium-Sulfoaluminat-Zemente (CSA-Zemente), Calciumhydrosilicate (CHS) sowie die Carbonatisierung von Calcium-Silicat(hydraten).

DYNAMIK

Bislang können Portlandzementklinker noch nicht in größerem Umfang ersetzt werden. Dennoch zeigt sich seit 2017 ein deutlicher Anstieg der Publikationen zu diesem Thema.

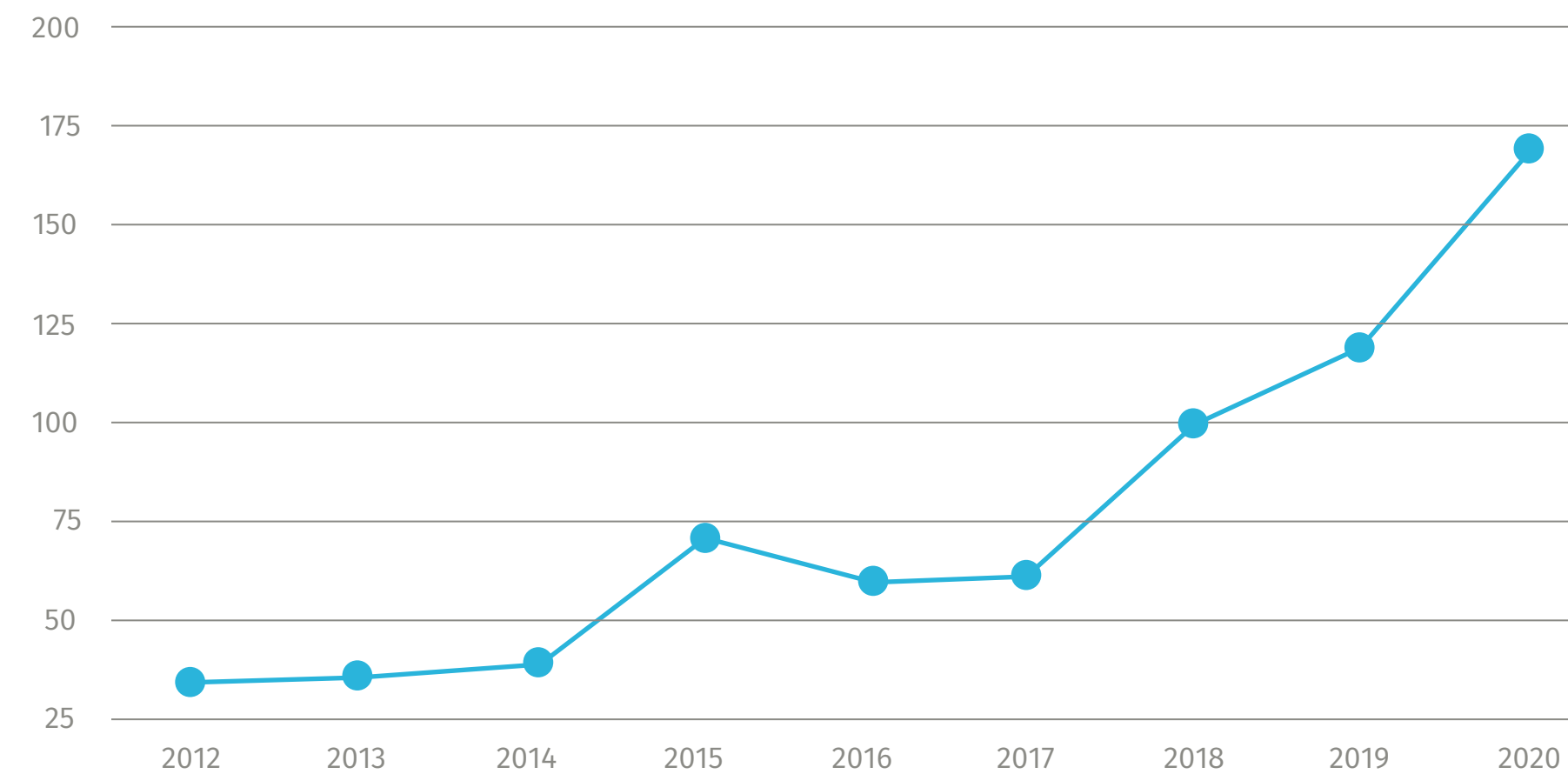
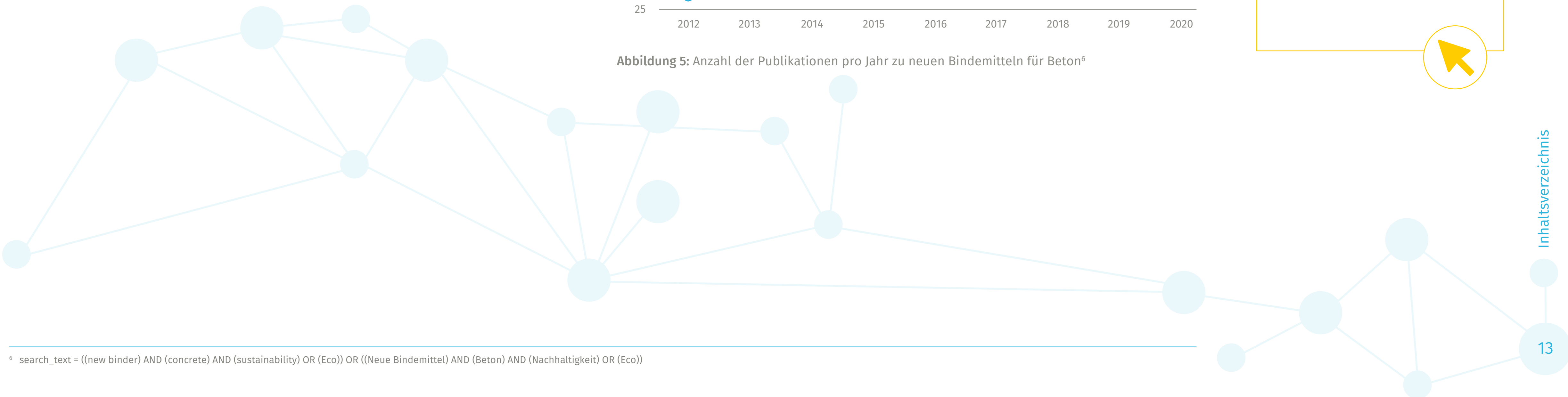


Abbildung 5: Anzahl der Publikationen pro Jahr zu neuen Bindemitteln für Beton⁶

ZUM NACHLESEN

- (PDF) Nachhaltige Betone mit alternativen Bindemittelsystemen – was wird die Zukunft bringen? (researchgate.net)
- Emissionsarmer Zement? – baustoffwissen
- Dekarbonisierung von Zement und Beton – Eine CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie



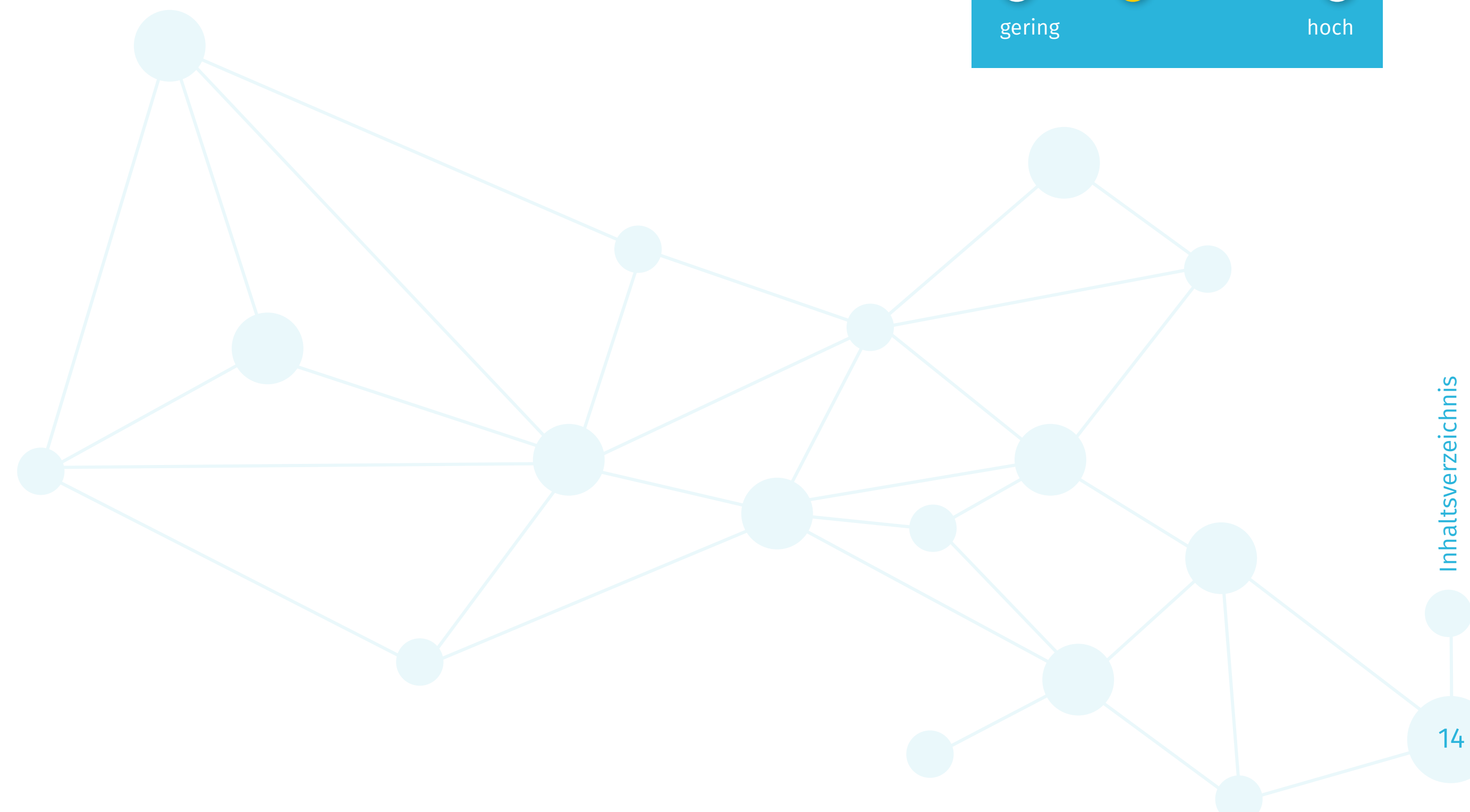
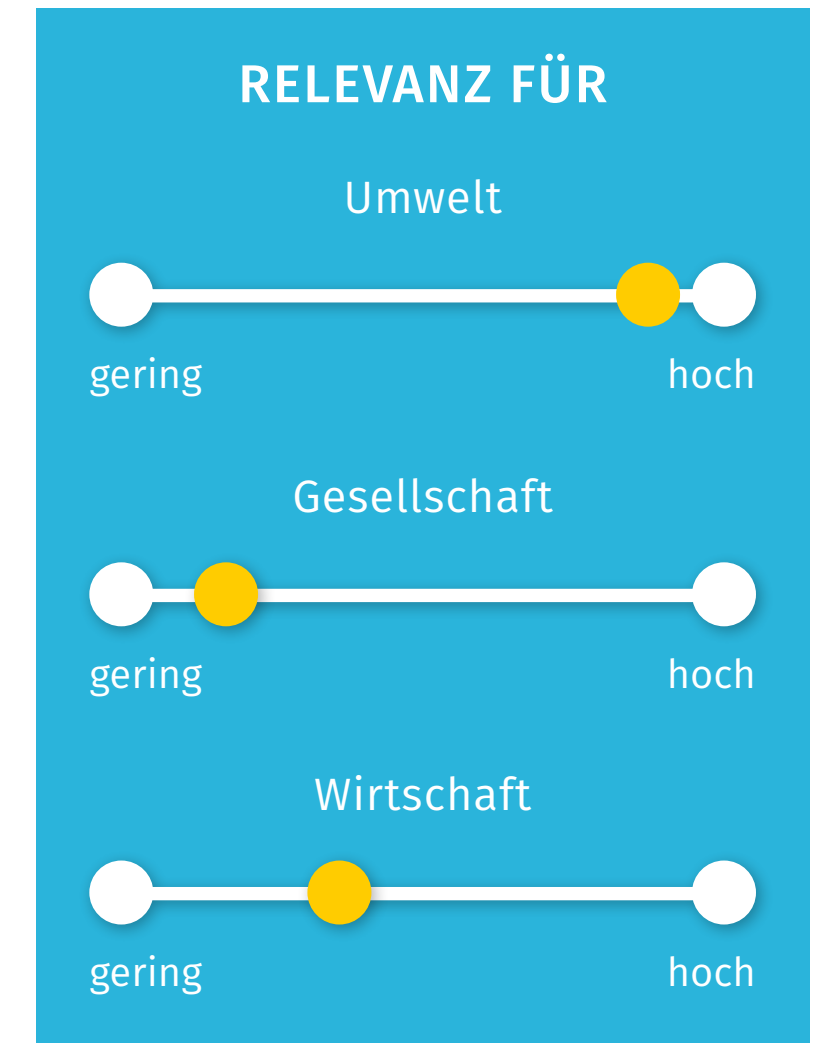
⁶ search_text = ((new binder) AND (concrete) AND (sustainability) OR (Eco)) OR ((Neue Bindemittel) AND (Beton) AND (Nachhaltigkeit) OR (Eco))

AUSGEWÄHLTE AKTUELLE ENTWICKLUNGEN

- Celitement (Karlsruhe, Deutschland), Schwenk Baustoff-Gruppe, KIT. Status quo: seit 2011 Pilotanlage in Karlsruhe, bis 100 kg/Tag, industrielle Referenzanlage in Planung CO₂-Minderungspotenzial: bis zu 50% ggü. Portlandzement. Das Bindemittel Celitement hat annähernd gleiche Hydratationseigenschaften, Festigkeitsentwicklung und Endfestigkeit wie herkömmlicher Zement. Auch die gleiche Rohstoffbasis kann in der Produktion verwendet werden, nur der Produktionsprozess ist komplexer (Celitement GmbH & Co. KG; Agora Energiewende und Wuppertal Institut 2019).
- Ternomcerm, HeidelbergCement. Im Rahmen des EU-Projekts EU-Binder wurden erfolgreich Wandplatten aus Ternocem produziert. CO₂-Minderungspotenzial: 20–30% ggü. PLZ. Ternocerm ist ein vor allem aus Belite bestehender Zement und beinhaltet – im Vergleich zu Portlandzement – mehr aluminiumhaltige Ausgangsstoffe und Ferrit. Weil weniger Kalkstein verarbeitet wird, können die prozessbedingten Emissionen gesenkt werden (Agora Energiewende und Wuppertal Institut 2019).
- Solidia Cement®, Solidia Technologies (Piscataway, New Jersey). Seit Kurzem auf dem Markt für nicht tragfähige Bauteile wie Pflastersteine und Dachziegel. CO₂-Minderungspotenzial: 30–70% ggü. Portlandzement. Weil die Aushärtung nicht durch Kontakt mit Wasser, sondern in einer CO₂-reichen Atmosphäre stattfindet, funktionieren die Produkte als CO₂-Speicher. Das bedeutet aber auch, dass sich die Technologie vor allem für Fertigteilelemente eignet, die dünn genug sind, um vom CO₂ durchdrungen zu werden (Agora Energiewende und Wuppertal Institut 2019).
- Geopolymere: Ein Geopolymer ist ein festes Alumosilikatmaterial, das normalerweise durch die Aktivierung von Alkalihydroxid oder Alkalisilikat eines festen Vorläufers wie Kohleflugasche, kalziniertem Ton und/oder Hüttenschlacke gebildet wird. Heute liegt die Hauptanwendung der Geopolymertechnologie in der Entwicklung von CO₂-reduzierten Baumaterialien als Alternative zu Zementen auf Portlandbasis (Provis und van Deventer 2009). Dem Einsatz von Geopolymeren als Massenbaustoff werden nennenswerte CO₂-Emissionsreduktionspotentiale zugeschrieben.

ZUKUNFTSPOTENZIAL

Der VDZ schätzt, dass neue Bindemittel Portlandzementklinker bis 2050 nur in geringem Umfang – schätzungsweise nicht mehr als 5% – ersetzen und eher in Nischenprodukten mit regionaler Bedeutung (z. B. Schnell- und Reparaturzemente) und im Bereich der Bauchemie eingesetzt werden. Es besteht noch ein erheblicher Forschungsbedarf (Winnefeld und Leemann 2017), so dass die Auswirkungen auf die Wirtschaft mittelfristig eher gering einzuschätzen sind. Dennoch kann wegen der hohen Emissionen bei der Zementherstellung und der weltweit wachsenden Bautätigkeit die Relevanz für den Klimaschutz sehr hoch sein.



8 BETONINNOVATIONEN

KURZBESCHREIBUNG

Nach Wasser ist Beton der weltweit am meisten verwendete Stoff. Betonherstellung geht mit hohen ökologischen Schäden beim Rohstoffabbau sowie hohen Treibhausgasemissionen einher. Gleichzeitig nimmt die Bautätigkeit weltweit zu. Daher zielen Innovationen darauf, die Lebensdauer von Beton zu verlängern, den Rohstoffeinsatz zu vermindern und die Wiederverwertbarkeit zu verbessern.

DYNAMIK

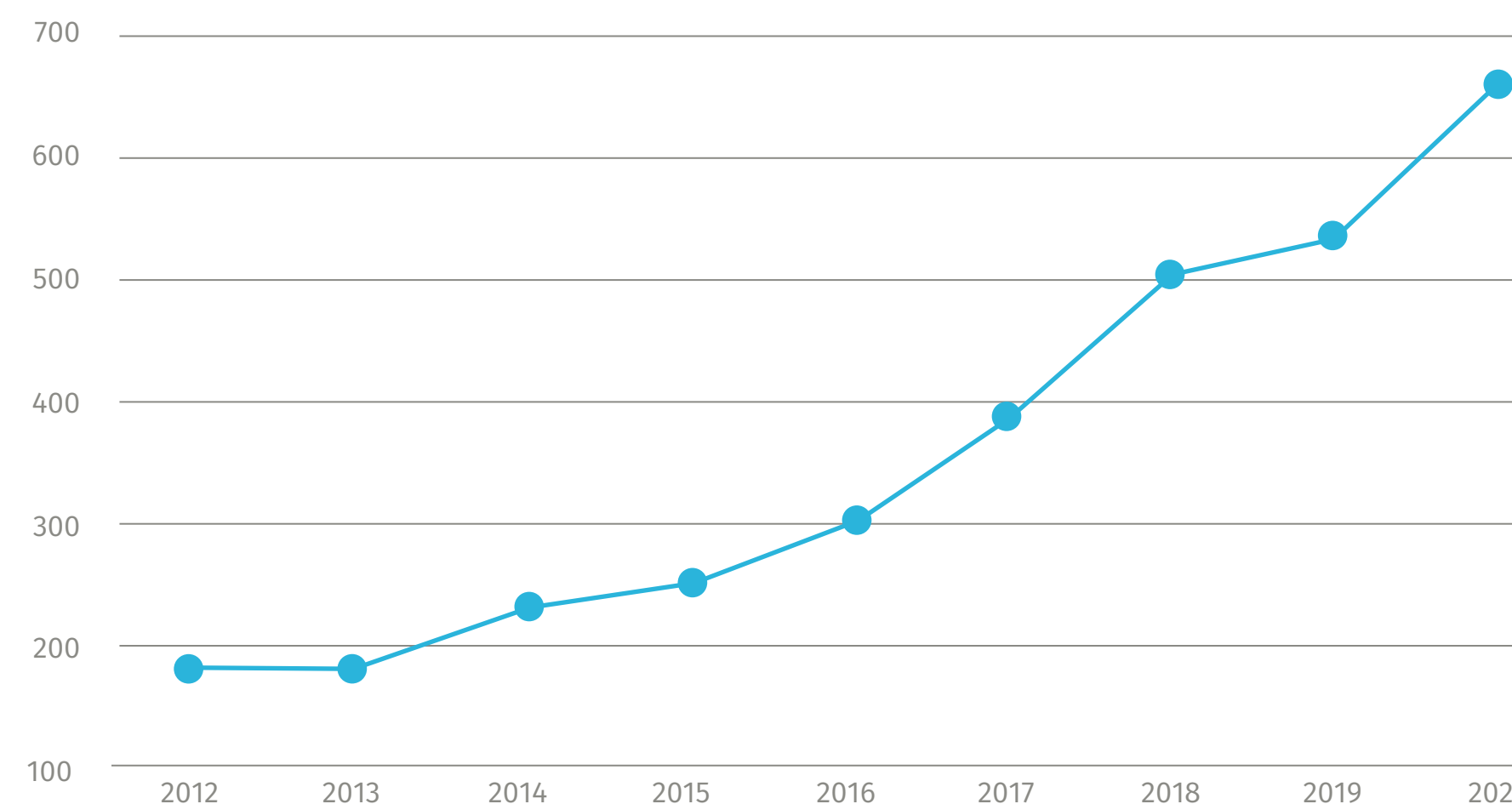
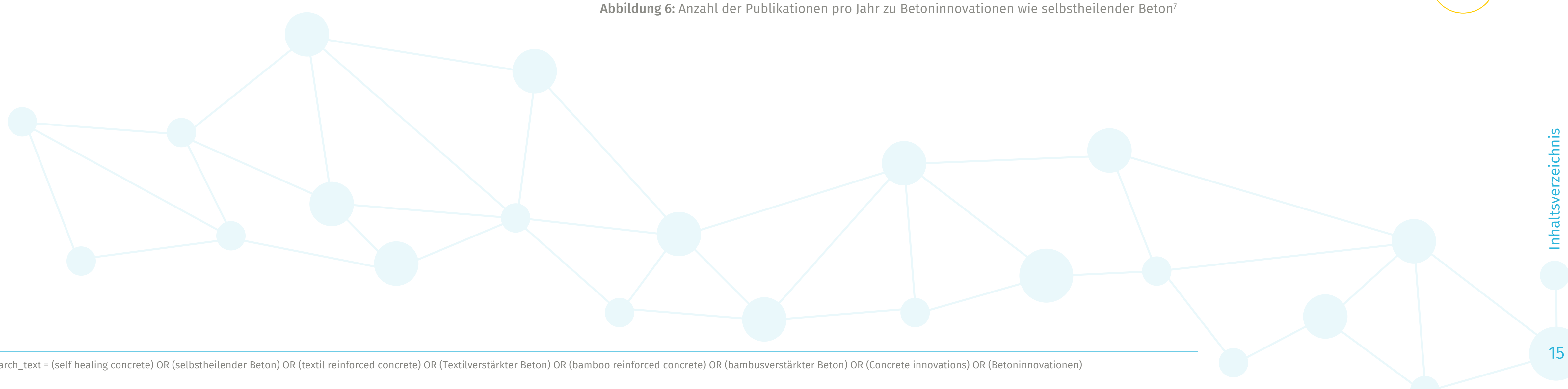


Abbildung 6: Anzahl der Publikationen pro Jahr zu Betoninnovationen wie selbstheilender Beton⁷

ZUM NACHLESEN

- Grüne Produktion des Klima-Sünders Beton – Spektrum der Wissenschaft
- 5 innovative Baustoffe der Zukunft (lead-innovation.com)
- The Economist 6. Nov. 2021: How cement may yet help slow global warming



⁷ search_text = (self healing concrete) OR (selbstheilender Beton) OR (textil reinforced concrete) OR (Textilverstärkter Beton) OR (bamboo reinforced concrete) OR (bambusverstärkter Beton) OR (Concrete innovations) OR (Betoninnovationen)

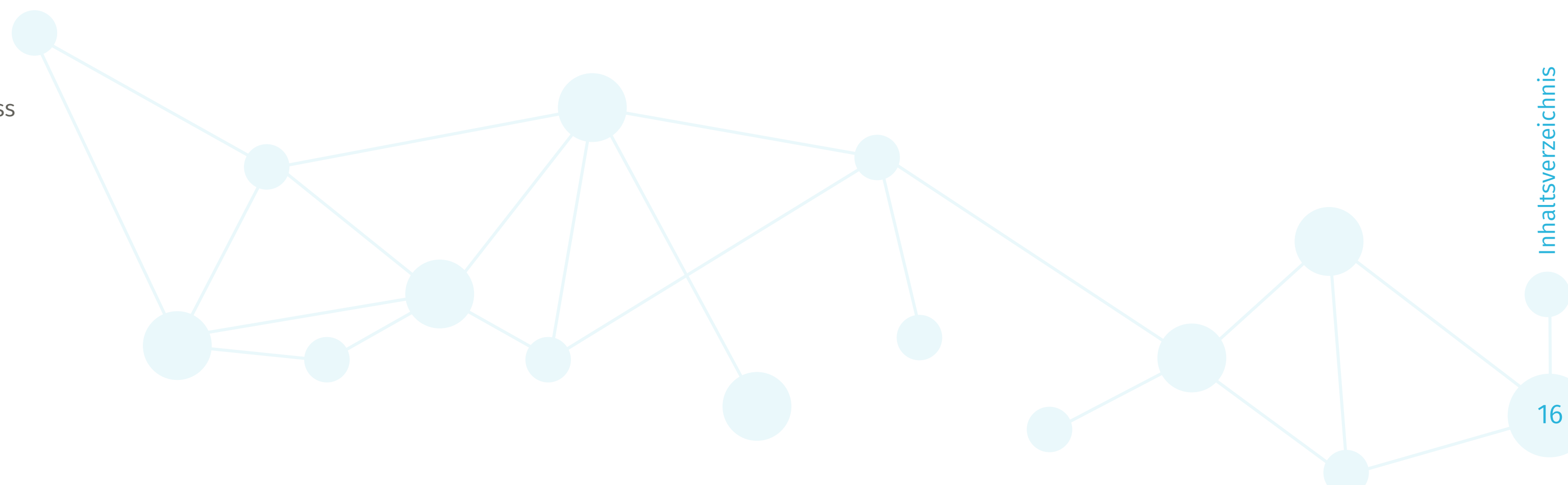
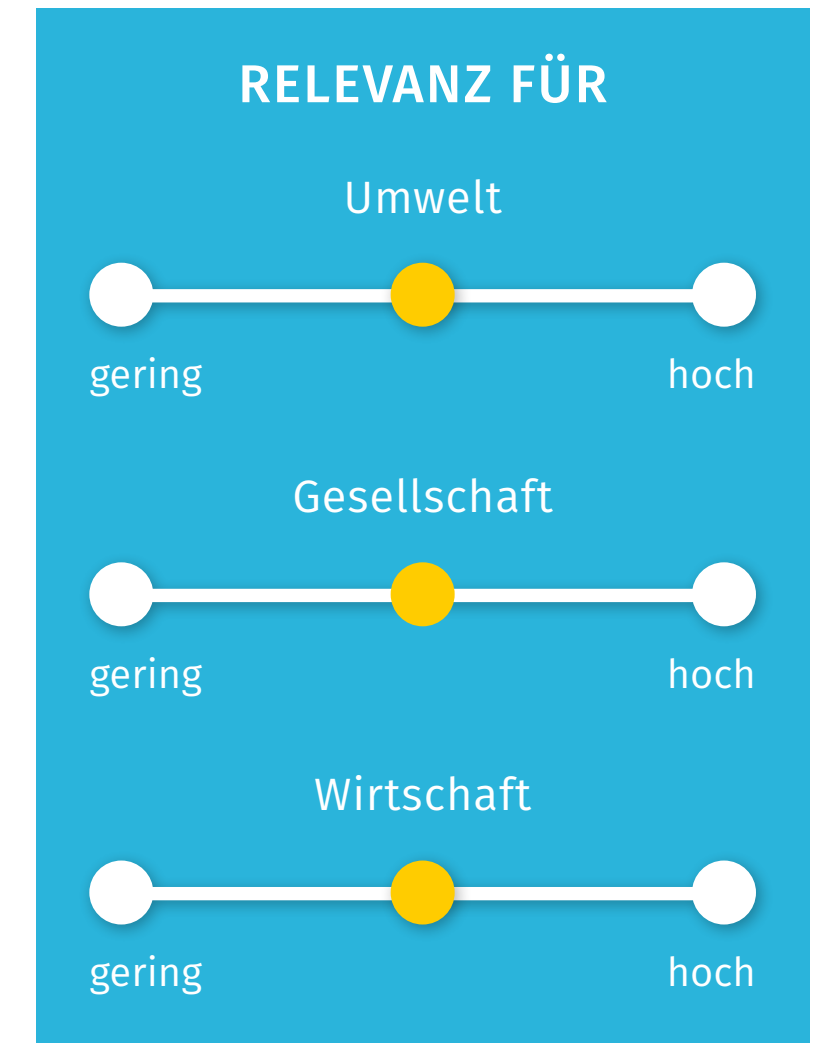
AUSGEWÄHLTE AKTUELLE ENTWICKLUNGEN

- **Selbstheilender Beton:** Mikroorganismen wurde genutzt, um „selbstheilenden“ Beton zu entwickeln (Alshalif et al. 2019). Die Bindung von atmosphärischem CO₂ in Zement bzw. Beton erfolgt, indem darin enthaltenes Ca(OH)₂ mit CO₂ zu Calciumcarbonat reagiert. Verwendet wird diese Technik bereits durch das niederländische Unternehmen Basilisk BV (Basilisk Concrete 2021).
- **Mikrobiell induzierte Kalzitfällung als Zementersatz:** Das Unternehmen Bioclear Earth beschäftigte sich in diesem Projekt mit Bio-Beton. Der untersuchte Bio-Beton besteht aus Sand, Kies und Bakterien. Die Bakterien produzieren Kalzit und „kleben“ die Mischung anstelle des traditionell verwendeten Zements (Eden 2020).
- **Alternative Bewehrung:** Carbonbeton ist ein Verbundwerkstoff aus Beton und einer Bewehrung aus Kohlenstofffasern. Der Materialwechsel von Stahlbeton zu Carbonbeton ermöglicht mit der Carbonbetonbauweise einerseits eine Materialersparnis von bis zu 80% und reduziert andererseits den Energiebedarf und CO₂-Ausstoss um bis zu 50%. In Dresden entsteht aktuell das weltweit erste Gebäude aus Carbonbeton. Allerdings ist auch beim Textilbeton insbesondere das Recycling noch eine Herausforderung, aber auch Gesundheitsbedenken sind noch nicht 100% ausgeräumt (Schneider et al. 2017). In Zukunft könnte die Verstärkung daher aus Ligninen, Holzabfallprodukten aus der Papierherstellung erfolgen (C³ – Carbon Concrete Composite e.V. 2021; Seifert und Lieboldt 2020; Alexander und Shashikala A.P. 2020).
- **Bambusverstärkter Beton:** Bambus ist eine schnell wachsende, erschwingliche und natürliche Ressource. Aktuelle Forschungen beschäftigen sich mit der Nutzung von Bambus als Betonverstärkung (Amin et al. 2021). Ergebnisse von Studien zeigen, dass der bambusverstärkte Beton einen ausreichenden Verbund mit der Betonmatrix entwickeln kann (Javadian et al. 2016).

ZUKUNFTSPOTENZIAL

Die Einführung von alternativer Bewehrung muss als mittel- bis langfristiger Prozess verstanden werden, da sich die Frage nach der Bewehrung erst durch aufwendige Untersuchungen und langjährige Praxiserfahrung beantworten lässt. Daher kann es Sinn machen kurzfristig Bindemittel und Betone für die Anwendung mit Carbonbewehrung zu entwickeln, bei denen auf bereits bestehende Ausgangsstoffe und Methoden der modernen Bontotechnik zurückgriffen werden kann. Allerdings ist auch beim Textilbeton insbesondere das Recycling noch eine Herausforderung, aber auch Gesundheitsbedenken sind noch nicht 100% ausgeräumt (Schneider et al. 2017).

Der wichtigste Hebel in diesem Bereich ist eine ganzheitliche Betrachtung der Umweltbilanz von Gebäuden und Infrastrukturen über die gesamte Lebensdauer. Dabei gehen wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Wandel (etwa in kommunalen Planungsprozessen) Hand in Hand.



9 BAUSTOFFE AUS STROH

KURZBESCHREIBUNG

Getreidestroh, einschließlich Weizen, Gerste und Reis, bietet einen erneuerbaren und nachhaltigen Ressourcenstrom für eine Vielzahl von Bauprodukten, einschließlich gepresster Platten, Strohdächern und Ballen (Thomson und Walker 2014). Strohballenwände bieten eine gute Dämmleistung sowie eine hohe thermische Trägheit und können in Gebäuden eingesetzt werden. Stroh wird aus landwirtschaftlichen Abfällen gewonnen, erfordert keinen industriellen Prozess und ist abbaubar. Schließlich können diese Eigenschaften von Stroh mit seinen niedrigen Kosten kombiniert werden. Eine lokale wirtschaftliche Entwicklung in diesem Bereich könnte möglich sein (Cornaro et al. 2020).

DYNAMIK

Der erfolgreiche Einsatz von Stroh als Wärmedämmung innerhalb der Außenhülle von Gebäuden ist durch die zunehmende Zahl erfolgreicher Projekte auf der ganzen Welt belegt. In Frankreich stehen 5.000 bis 6.000 Strohbauten darunter Schulen und Kindergärten in Deutschland etwa 500 (Netz 2019). Auch die wissenschaftlichen Publikationen und Patente steigen seit 2018 deutlich an. Schwerpunkt ist Asien aber auch Europa. Unter den Unternehmen befinden sich auch eine Reihe von KMUs etwa der Berliner Unternehmer Eckardt Dauck der erfolgreich in Ostafrika Bauplatten aus mit Reisstrohpaneelen Gebäude errichtet.

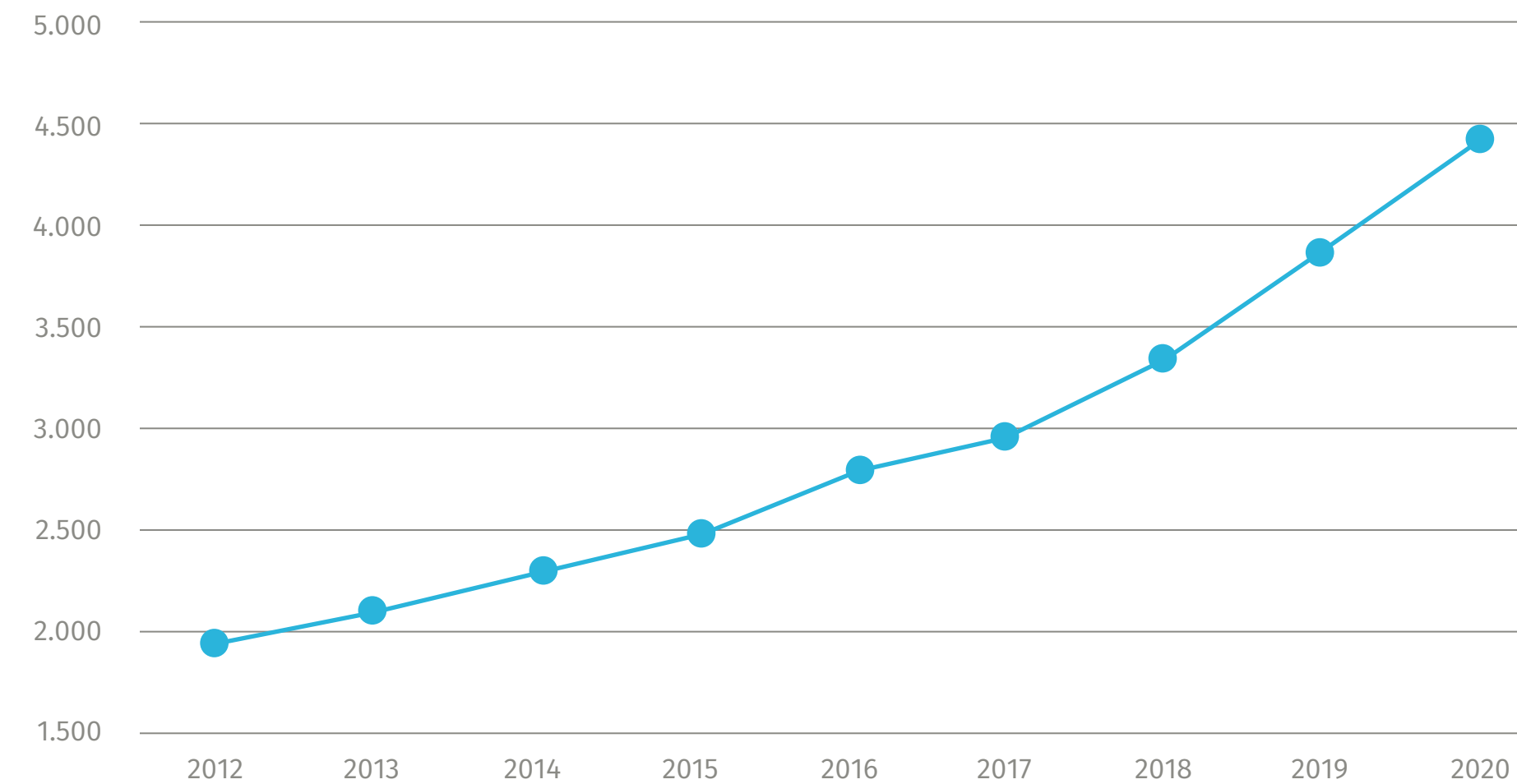
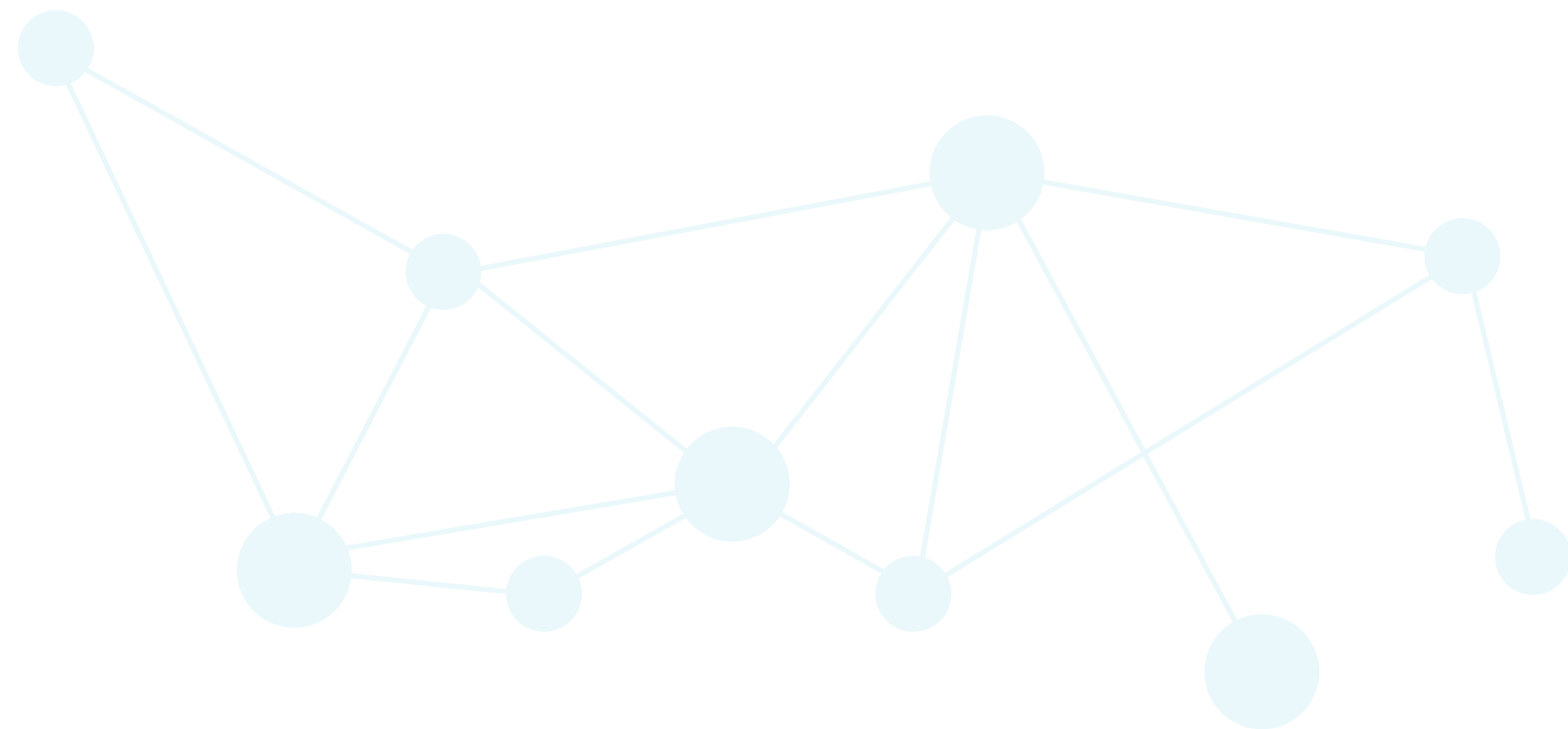


Abbildung 7: Anzahl der Publikationen pro Jahr zu Strohballen im Bausektor⁸

ZUM NACHLESEN

- [Stroh statt Styropor? Klimaschonendes Bauen | BR24](#)
- [Baustoff der Zukunft: Stroh | netzwerk südbaden \(netzwerk-suedbaden.de\)](#)
- [Häuser aus Lehm und Stroh statt Stahl und Beton – myHOMEBOOK](#)



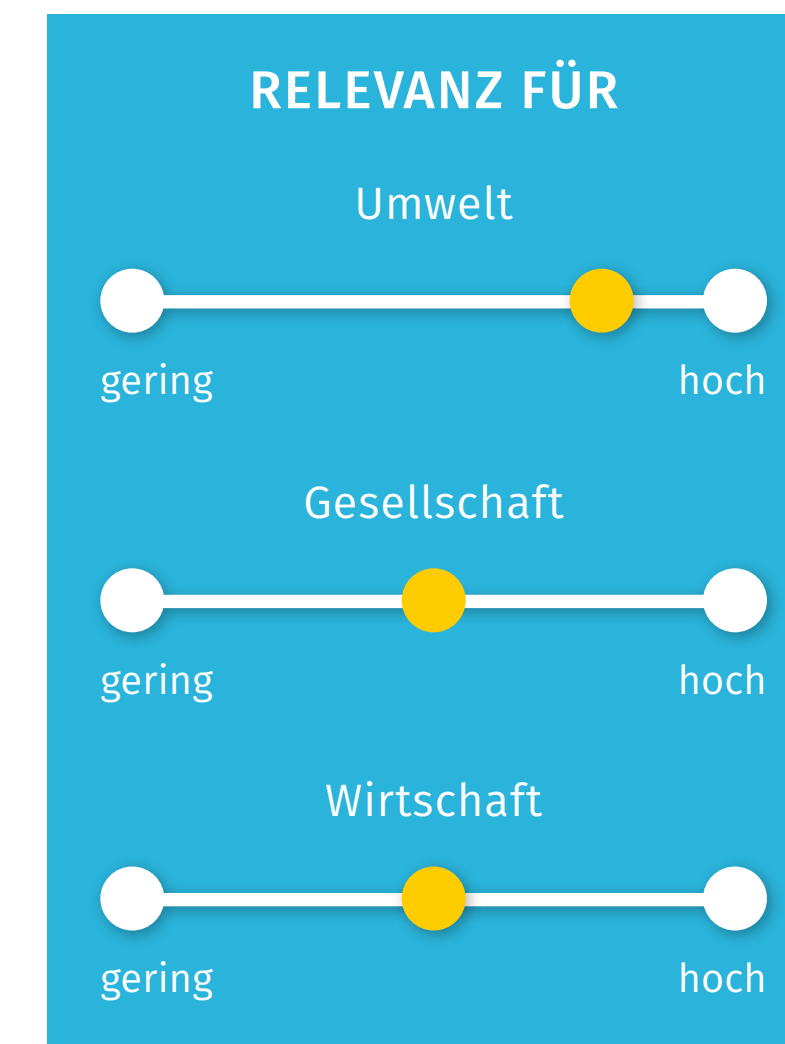
⁸ search_text = %20 ((straw bale) OR (Straw)) AND ((building) OR (construction) OR (Straw House)) OR (Strohhaus)

AUSGEWÄHLTE AKTUELLE ENTWICKLUNGEN

- **Reisstrohbällen:** Reisstroh ist ein Abfallstoff der Landwirtschaft und kann günstig zu Paneelen verarbeitet werden. Es wird vor allem in Afrika eingesetzt um aus Paneelen nachhaltig zu bauen. Wegen der hochdynamischen Urbanisierung ist nachhaltiges Bauen in diesen Ländern besonders wichtig. Das italienische StartUp Ricehouse gewann die DGNB Sustainability Challenge 2020 (DGNB Blog rund um Nachhaltiges Bauen 2020).
- **Einblasfähiges Baustroh:** Aus den Forschungen und Weiterentwicklungen im Strohbau sticht eine ganz besonders hervor, da einblasfähiger Baustroh als Dämmstoff auch für den mehrgeschossigen Wohnungsbau genutzt werden kann. Stroh kann seit 2018 eingeblasen werden (Fertighaus ERLER GmbH).

ZUKUNFTSPOTENZIAL

Strohballengebäude bieten erhebliche Vorteile in Bezug auf Kosten, menschliche Gesundheit und Umweltverträglichkeit. Mehrere Studien in verschiedenen Regionen haben die bemerkenswerten Eigenschaften von Strohbällen als Dämm- und Baumaterial hervorgehoben (Cascone et al. 2019). Die Verwendung natürlicher Baustoffe hat hohe Bedeutung für Ressourcenschonung und Abfallvermeidung sowie für die Bekämpfung der Erderwärmung, da der Ersatz von Zement erheblich zur Reduktion von CO₂ beitragen kann. Wegen der steigenden Nachfrage nach nachhaltigen Baustoffen und dem politischen Willen zur Kreislaufwirtschaft (vgl. etwa EU Strategie und deutsche Nachhaltigkeitsstrategie) ist auch das wirtschaftliche Potenzial hoch zu bewerten (Augustyńska 2020). Auch ein kultureller Wandel und insbesondere ein besseres Wissen über nachhaltige Baustoffe ist Voraussetzung für die Verbreitung.



10 NATÜRLICHE DÄMMATERIALIEN

KURZBESCHREIBUNG

Herkömmliche Dämmstoffe auf Erdölbasis oder Zement (Mineralwolle, Porenbeton und Polystyrol) haben einen hohen ökologischen Fußabdruck in der Herstellung und lassen sich oft nur schwer wiederverwerten. Gleichzeitig wird Dämmung zum Energiesparen immer wichtiger. Daher zielen zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte auf nachhaltigere Dämmstoffe (Korjenic et al. 2011; Zach et al. 2013; Schwenke et al.).

DYNAMIK

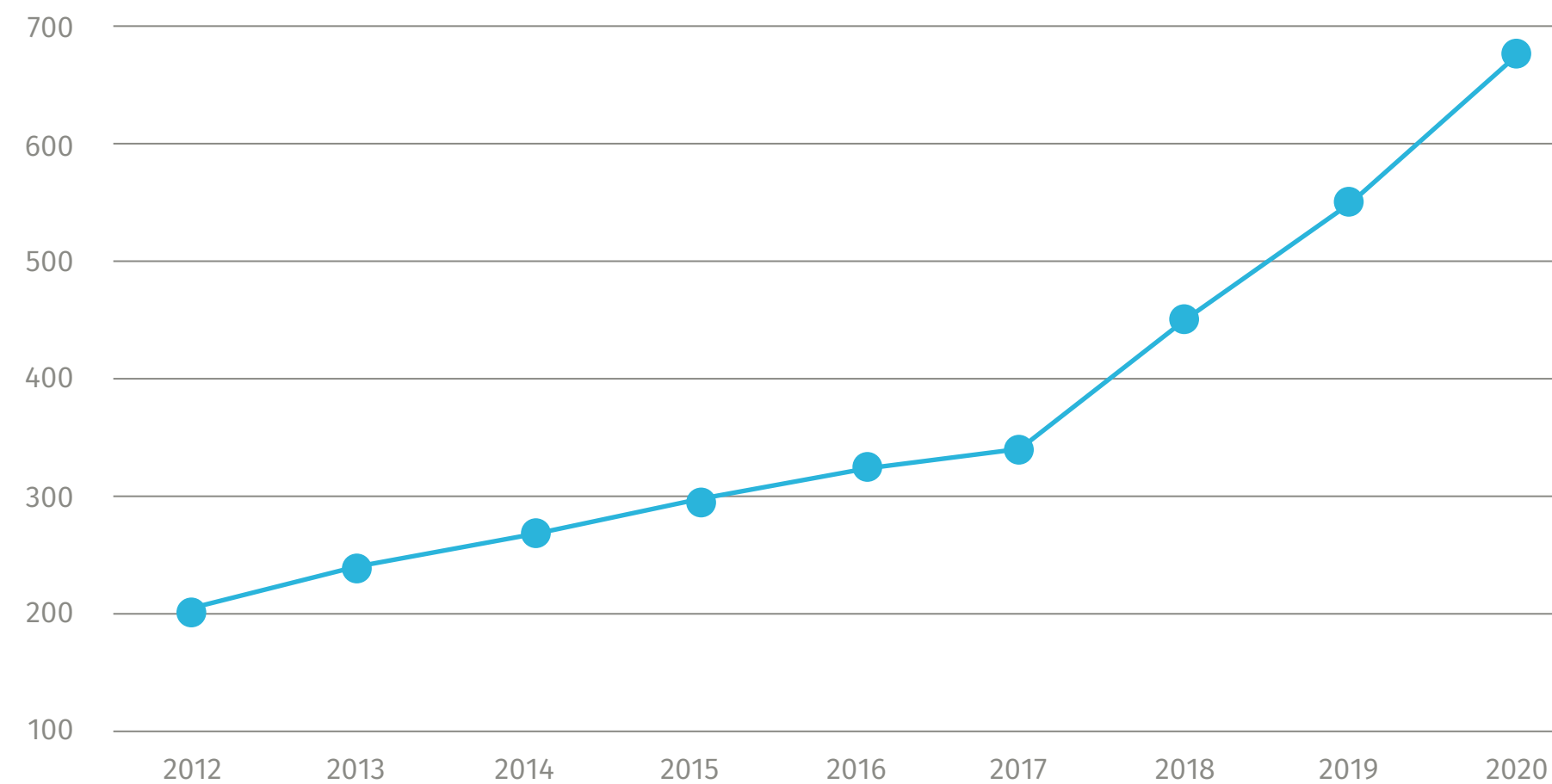
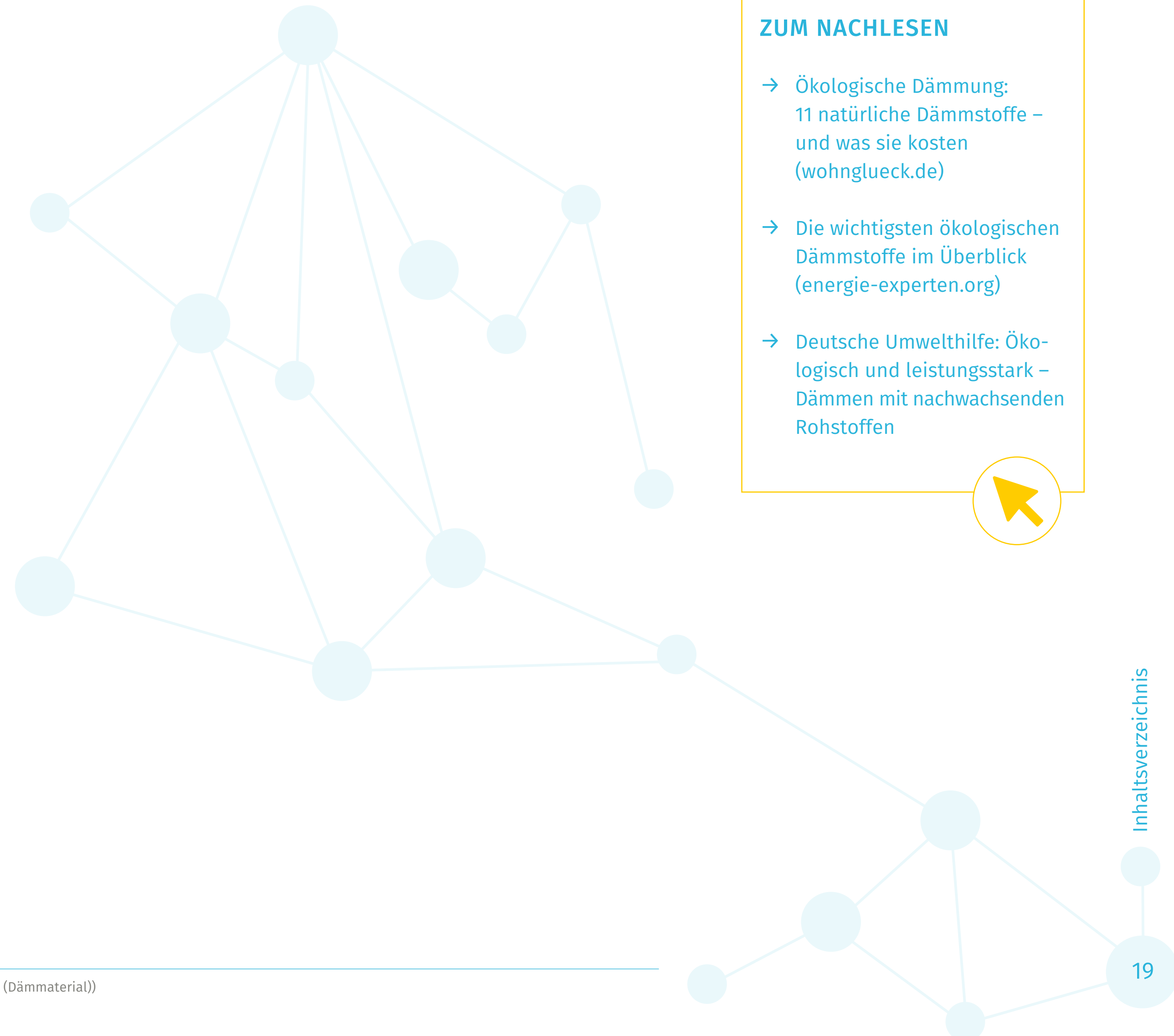


Abbildung 8: Anzahl der Publikationen pro Jahr zu nachhaltigen Dämmmaterialien⁹

⁹ search_text = („sustainable“ OR (Eco) OR (nachhaltig) OR (ökologisch) OR (new)) AND ((insulation materials) OR (insulation material) OR (Dämmmaterialien) OR (Dämmmaterial))



ZUM NACHLESEN

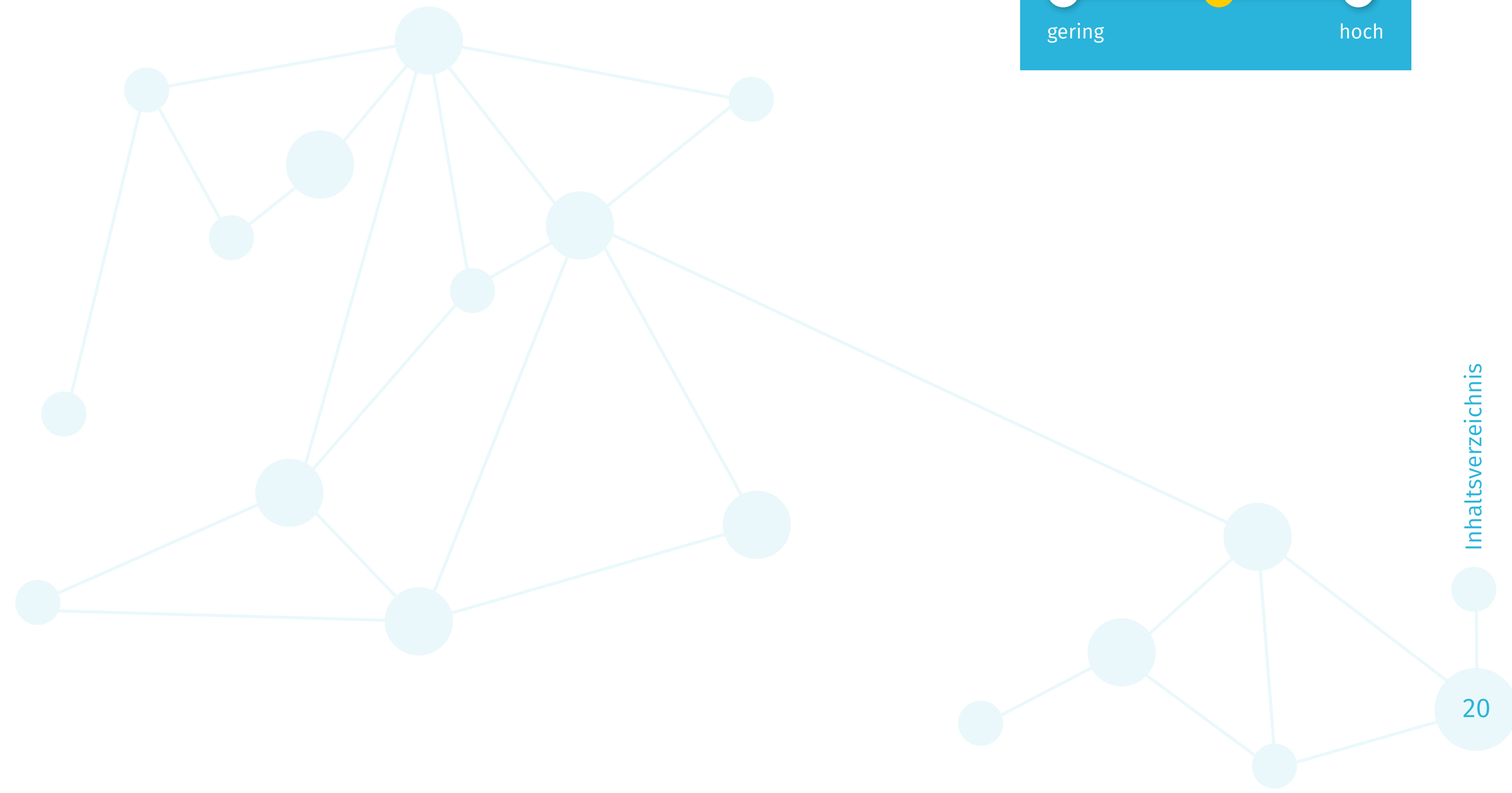
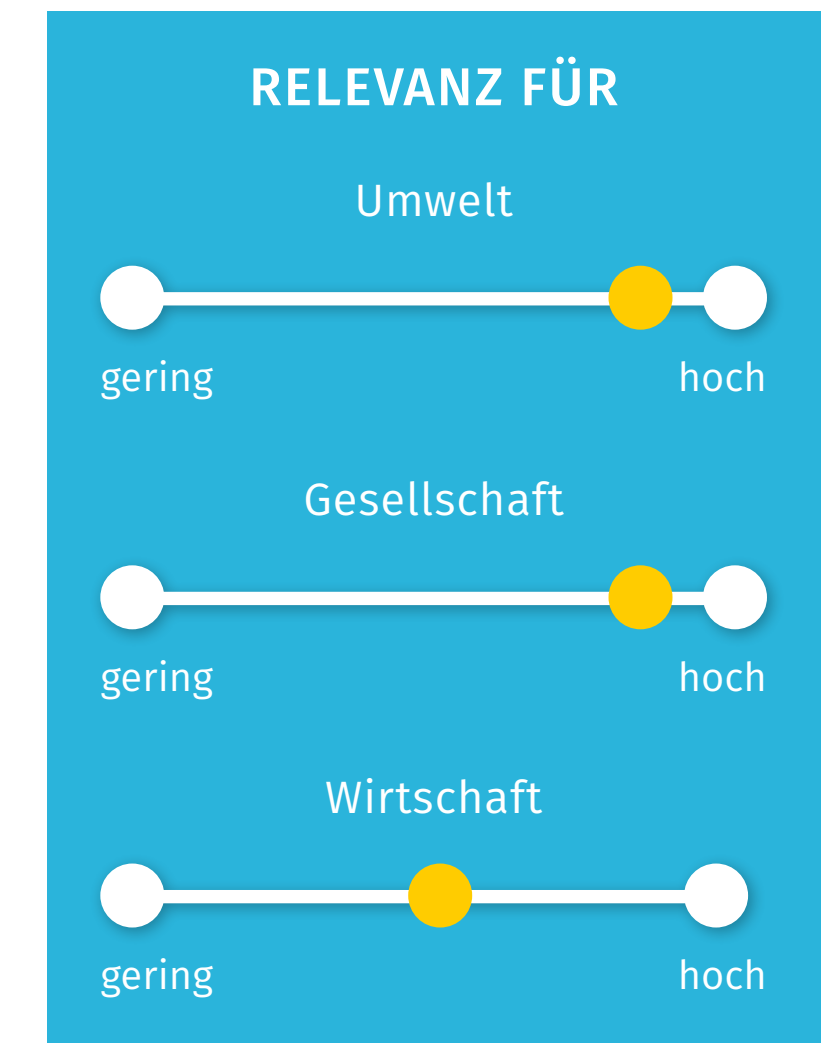
- Ökologische Dämmung: 11 natürliche Dämmstoffe – und was sie kosten (wohnglueck.de)
- Die wichtigsten ökologischen Dämmstoffe im Überblick (energie-experten.org)
- Deutsche Umwelthilfe: Ökologisch und leistungsstark – Dämmen mit nachwachsenden Rohstoffen

AUSGEWÄHLTE AKTUELLE ENTWICKLUNGEN

- **Ökologische Dämmstoffe:** Eine Reihe nachwachsender Rohstoffe können als umweltfreundliche Dämmstoffe eingesetzt werden darunter Blähton, Holzfaser, Stroh, Flachs, Hanf, Jute, Kork, Schafwolle, Schilf und Seegras. Neben den ökologischen Vorteilen wie Abbaubarkeit, Schadstofffreiheit und geringerer Energiebedarf sind auch andere Vorteile seit einigen Jahren bekannt, wie z.B. besseres Raumklima, besserer Hitzeschutz und gesundheitsfreundliche Verarbeitung. (Brandhorst et al. 2012).
- **Zellulosefaserdämmung** ist ein umweltfreundliches Wärmedämmmaterial, das aus recycelten Papierfasern hergestellt wird. Er bietet gute thermische Eigenschaften und hat einen niedrigen grauen Energiegehalt und ist auch der preisgünstigste ökologische Dämmstoff. Zellulose-Dämmstoffe sind lose zum Schütten oder als Platten erhältlich. Sie lassen sich wiederverwerten und deponieren (Lopez Hurtado et al. 2016; Zellulose-dämmstoff Thermofloc erhält natureplus-Qualitätszeichen).
- **Naturfaserverstärkte Geopolymerschäume:** Geopolymere sind Zwei-Komponenten-Systeme, bestehend aus einem reaktiven Feststoff, der Silizium- und Aluminiumoxide enthält, sowie einer basischen Aktivierungslösung aus Alkalihydroxiden oder -silikaten in Wasser. Der Feststoff ist ein natürliches Gestein oder Mineral wie z. B. Flugasche. Beim Mischen der Aktivierungslösung mit dem gemahlten Feststoff, dem je nach Anwendung Gesteinskörnungen und andere Substanzen beigefügt werden, bildet sich ein steinhartes anorganisches Polymer. Durch Beimischung von Tensiden und Naturfasern konnten in Versuchen Dämmstoffe mit guter Dämmwirkung hergestellt werden. Besonders geeignet als Naturfaser ist die Grasart Miscanthus. (Walbrück et al. 2021; Walbrück et al. 2020; Walbrück et al. 2019).

ZUKUNFTSPOTENZIAL

Dämmung wird immer wichtiger zur Steigerung der Energieeffizienz durch Heizen und wird auch stark staatlich gefördert. Der Klimawandel wird besseren Hitzeschutz erfordern. Um nicht neue problematische Abfallströme zu generieren ist jetzt ein wichtiger Zeitpunkt ökologische Dämmung voranzutreiben. Die vergleichsweise geringe Verwendung von Zellulose liegt meist am mangelnden Fachwissen, da Zellulose bereits seit Jahren erfolgreich als kostengünstiger und recycelter Dämmstoff eingesetzt wird. Einige Firmen haben sich bereits Patente in diesem Bereich gesichert.



11 MYZELIUM BASIERTE BAUSTOFFE

KURZBESCHREIBUNG

Mycelium ist ein Hefepilz, der die Eigenschaft hat, bei Zugabe von Wasser und Biomasse (z.B. Abfallprodukten der Landwirtschaft- und Nahrungsmittelindustrie) mehrzellig zu wachsen und dabei ein dichtes Netzwerk mikroskopischer Fasern auszubilden. Dieses kann durch gezielte Temperatursteuerung in verschiedene Formen gebracht werden. Es entsteht ein fester Verbundstoff – ein reines Biomaterial, aus dem man Kleidung entwickeln oder Möbel oder Häuserwände bauen kann, die zudem noch weniger entflammbar sind und weniger CO₂ beim Verbrennen emittieren. Zudem wird deutlich weniger Wasser als bei anderen Prozessen, etwa der Herstellung von Baumwolle, benötigt. Myzelium wächst anders als andere organische Rohstoffe innerhalb von Tagen und kommt ohne energieaufwendige Herstellungsprozesse aus. Es ist vollständig kompostierbar und kann im Sinne der Kreislaufwirtschaft als biologischer Nährstoff wieder in biologische Kreisläufe zurückfließen (Universität Stuttgart).

DYNAMIK

Weltweit arbeiten Forschungsgruppen in Industrie und Wissenschaft daran die Eigenschaft des Myzeliums für verschiedene Baumaterialien zu nutzen darunter Bodenfliesen, Paneele, Dämmplatten und „Ziegelsteine“ (Benkö).

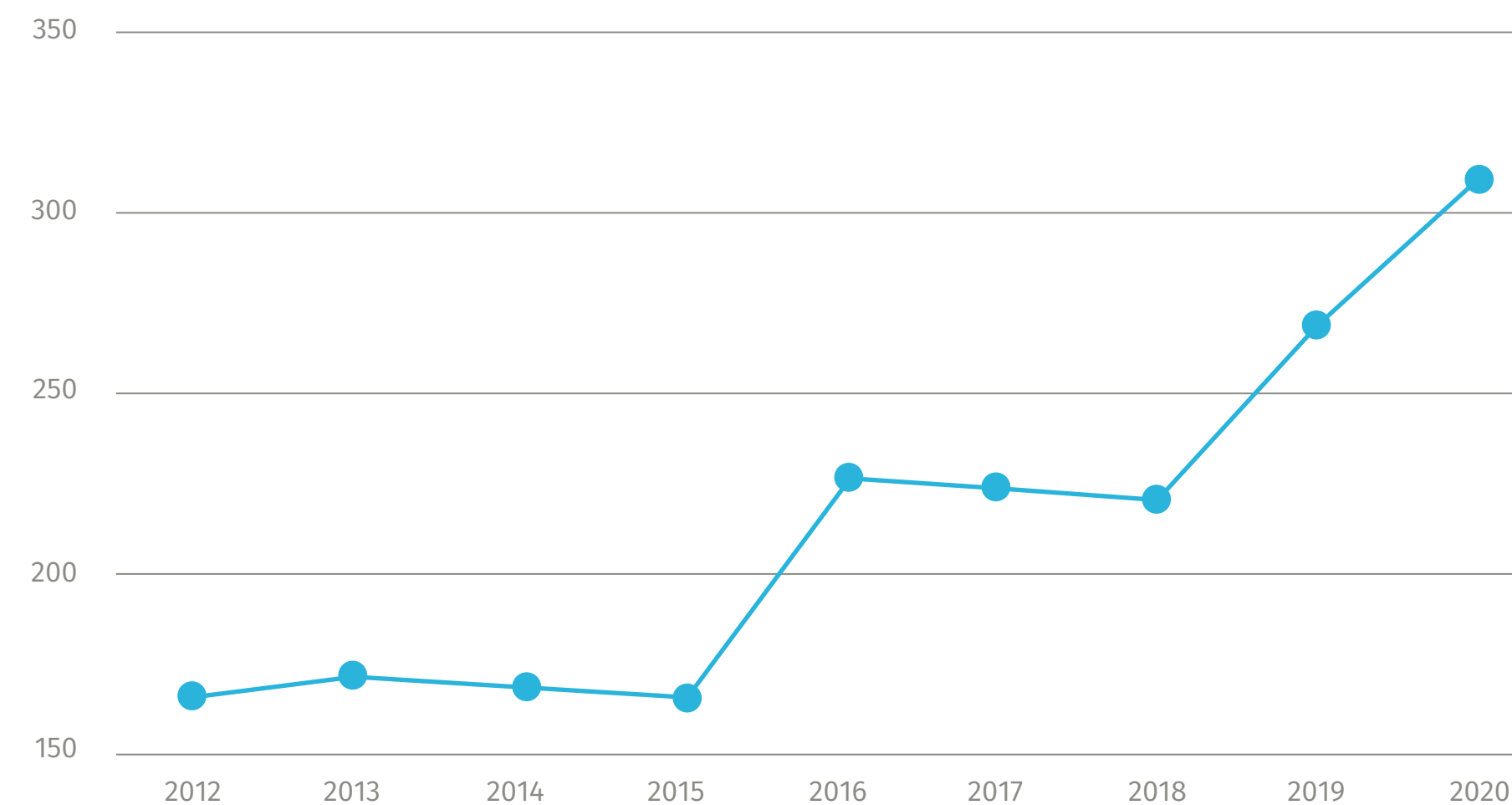


Abbildung 9: Anzahl der Publikationen pro Jahr zu Mycelium als Baumaterial¹⁰

¹⁰ search_text = ((myzelium) OR (mycelium) OR (mycelium based) OR (fungal) OR (lignocellulose)) AND ((building) OR (construction) OR (Bausektor) OR (AEC) OR (Insulation) OR (Dämmung))

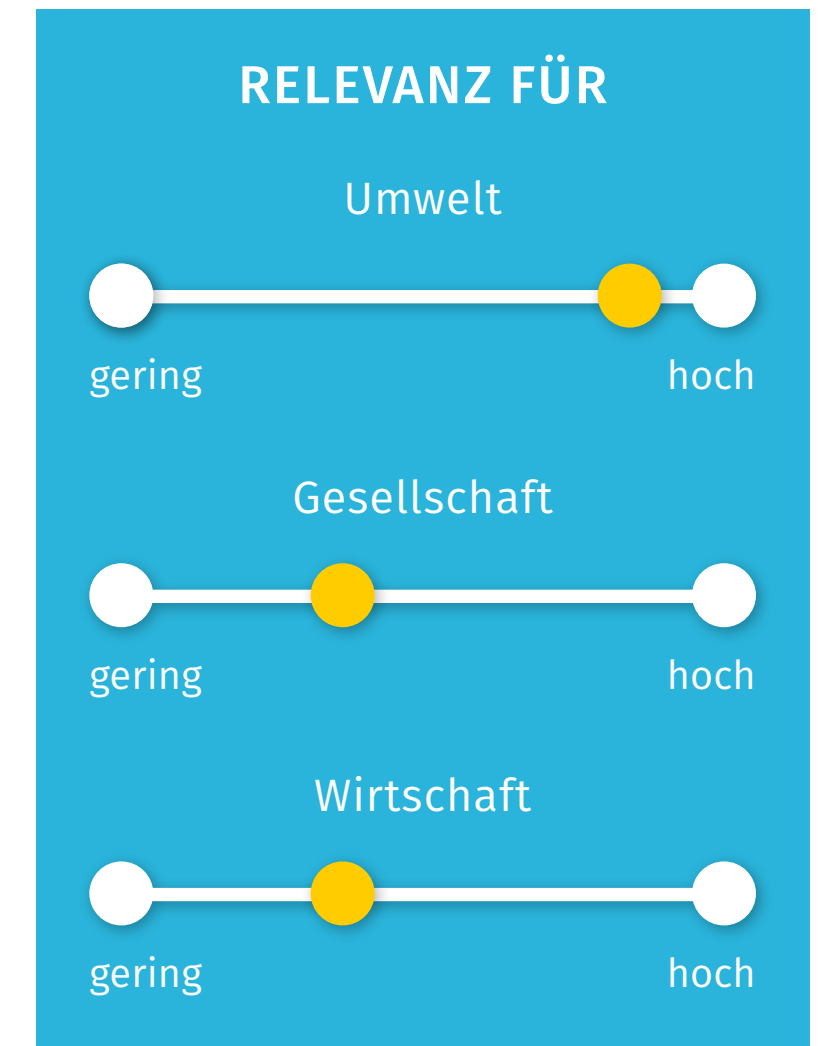


AUSGEWÄHLTE AKTUELLE ENTWICKLUNGEN

- Die Mushroom® -Verpackung des New Yorker Unternehmens Ecovative Design ist als Ersatz für Styropor auf dem Markt und sowohl in den USA als auch in Europa erhältlich. Sie ist voll kompostierbar und hat die Cradle2Cradle Gold Zertifizierung erhalten.
- MycoTree ist eine Struktur aus einem Verbundwerkstoff von Bambus und Mycelium die durch eine spezielle Formgebung eine hohe Festigkeit erreicht. Er wurde von einem Forscherteam vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der Block Research Group ETH Zürich entwickelt. In Kombination mit festen Materialien wie Bambus sowie durch die gezielte Gestaltung der geometrischen Form und des inneren Kräfteflusses können die neuen Baustoffe nach Meinung der Wissenschaftler belastbare Dachkonstruktionen bilden.
- Myco-Ziegelsteine aus Myzelium und Maisstroh wurden im Rahmen des „Young Architects Program“ im Museum of Modern Art in New York in einer turmartigen Konstruktion erstmals als tragendes Material im Außenbereich eingesetzt. Der Turm belegte damit beim Wettbewerb im Jahr 2014 den ersten Platz.
- 2014 gründete Maurizio Montalti das Unternehmen Mogu. Mogu ist auf Komposit-Materialien festgelegt und brachte als erste Produktreihe Paneele und Fliesen heraus. Die verwendeten Materialien waren Hanf und Flachs vermischt mit den Myzelien. Durch den Erfolg wurde als zweite Produktlinie eine strapazierbare Bodenfliese auf den Markt gebracht. Bei dieser Produktlinie wurden die Myzelien mit einer Zwei-Millimeter-Schicht Bio-Polyurethan vermischt. Das Produkt erhielt EU-Förderung (Benkö). Die Myzelium Paneele und Fliesen von Mogu sind umweltfreundlich, langlebig und schadstofffrei. Mit Massen-Bodenfliesenherstellern kann das Unternehmen nicht mithalten, dafür sind auch die Preise noch zu hoch. Aktuell forscht die Firma an weiteren Produktlinien, wie veganer Bekleidung aus Myzel Basis im Lederlook (Benkö).

ZUKUNFTSPOTENZIAL

Die rasante Zunahme von Bauprojekten weltweit geht mit hohen ökologischen Schäden einher. Zudem entstehen Knappheiten bei einigen Rohstoffen wie Sand. Dies treibt den Bedarf nach nachhaltigen Baustoffen wie dem Myzelium. Das Potenzial für die Umwelt ist daher hoch. Wie der Erfolg von Mogu zeigt besteht jedoch auch wirtschaftliches Potenzial für innovative Firmen in diesem Bereich. Treiber sind hier auch gesellschaftliche Veränderungen wie eine Ausbreitung veganer Lebensweisen.



ZUM NACHLESEN

- Darum könnten Pilze die Rohstoffe der Zukunft sein – quarks.de
- Häuser aus Pilzen | National Geographic



12 HOLZBAU

KURZBESCHREIBUNG

Weil Holz Kohlenstoff speichert und im Falle der Verwendung im Bauwesen auch langfristig bindet, wird aus der Klimaschutzperspektive die Nutzung von Holz im Baubereich empfohlen (Wolf et al. 2020; Jacob et al. 2021, S. 71). Wird statt eines mineralischen Gebäudes ein Gebäude mit vorwiegend Holzkonstruktion gebaut, lassen sich die THG-Emissionen um bis zu 50% reduzieren. Für die Konkurrenz um Holz als Baustoff ist vermutlich auch in Zukunft vor allem die energetische Nutzung relevant. Betreffend der stofflichen Nutzung könnte eine Konkurrenz zum Möbelbau entstehen, wenn vermehrt Laubholz für Holzbau zum Einsatz kommt. Kaskadennutzung ist ein interessanter Ansatz, die Konkurrenzen zum Holzbau abzuschwächen und ressourceneffizient zu wirtschaften. Holz kann massiv oder als Verbundwerkstoff eingesetzt werden. Im Verbund verbaut, wird jedoch die Recyclingfähigkeit eingeschränkt und die Ökobilanz verschlechtert. Zu beachten ist die Herkunft des Holzes aus nachhaltiger Bewirtschaftung.

DYNAMIK

Die Holzbauquote bei Wohngebäuden ist in den letzten Jahren von 16% im Jahr 2015 auf 18,7% im Jahr 2019 angestiegen. Mit regionalen Spitzenwerten in Baden-Württemberg von 31,9%. Die Publikationen zu Brettsperrholz haben in den letzten Jahren zugenommen. Dabei sind die USA, Kanada und viele europäische Länder führend.

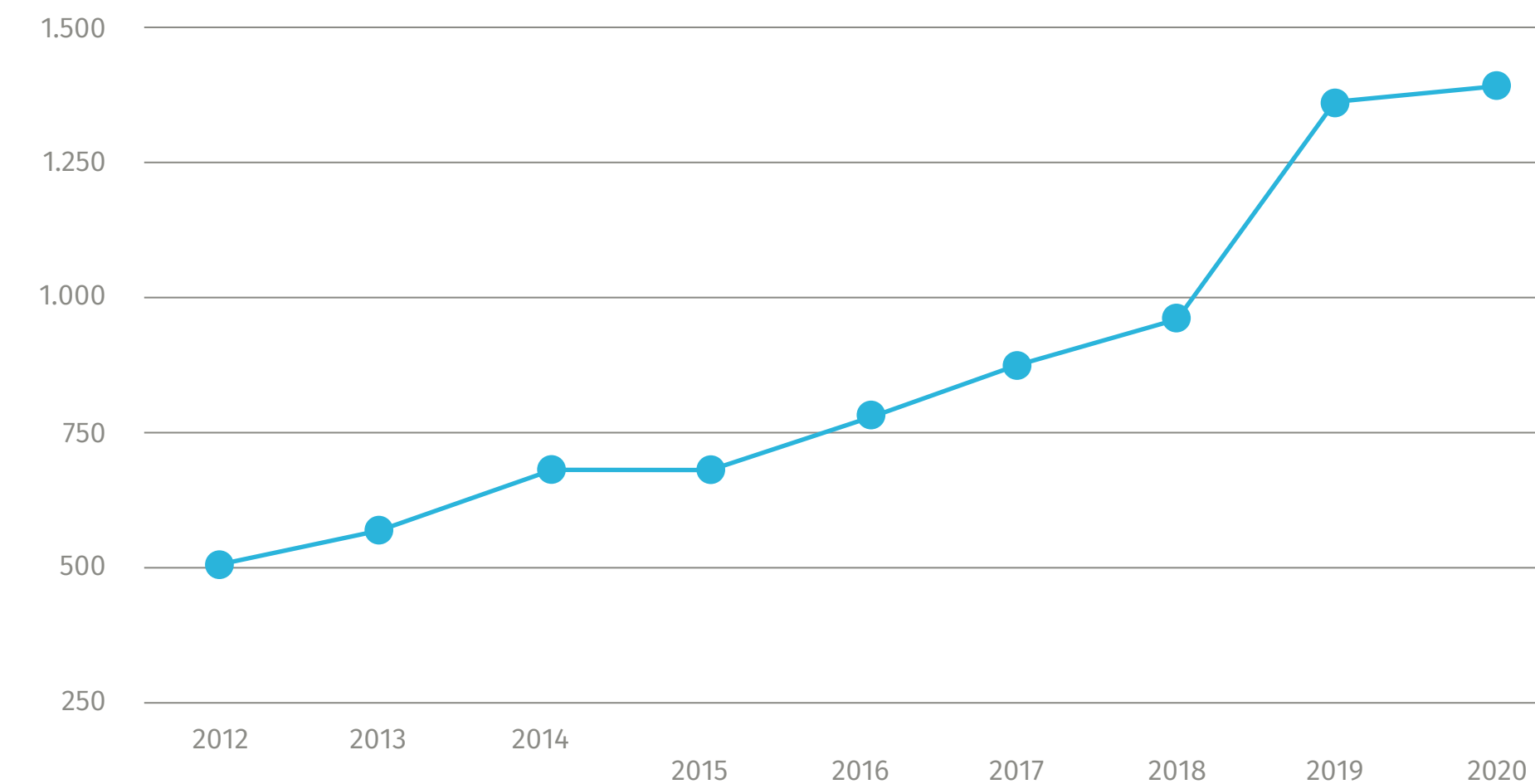


Abbildung 10: Anzahl der Publikationen pro Jahr zu Holzbau¹¹

ZUM NACHLESEN

- Baunetz_Wissen Holz
- Umweltbundesamt: Potenziale von Bauen mit Holz: Erweiterung der Datengrundlage zur Verfügbarkeit von Holz als Baustoff zum Einsatz im Holzbau sowie vergleichende Ökobilanzierung von Häusern in Massiv und Holzbauweise
- Wood Sector Alliance for the New European Bauhaus



¹¹ search_text = ((Timber construction) OR%20 (Wood construction) OR (Wooden construction) OR (Holzbau) OR (Holzhaus) OR (Holzgebäude)) AND ((building) OR (construction))



AUSGEWÄHLTE AKTUELLE ENTWICKLUNGEN

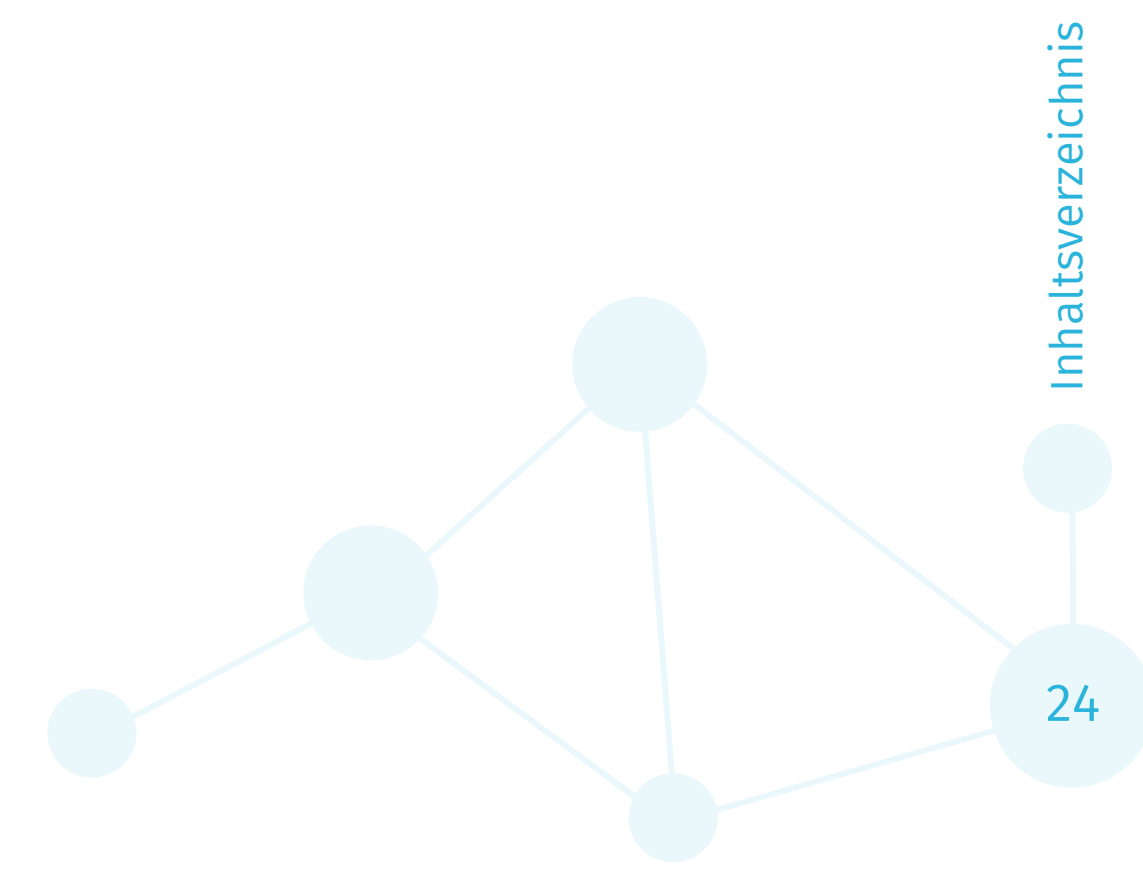
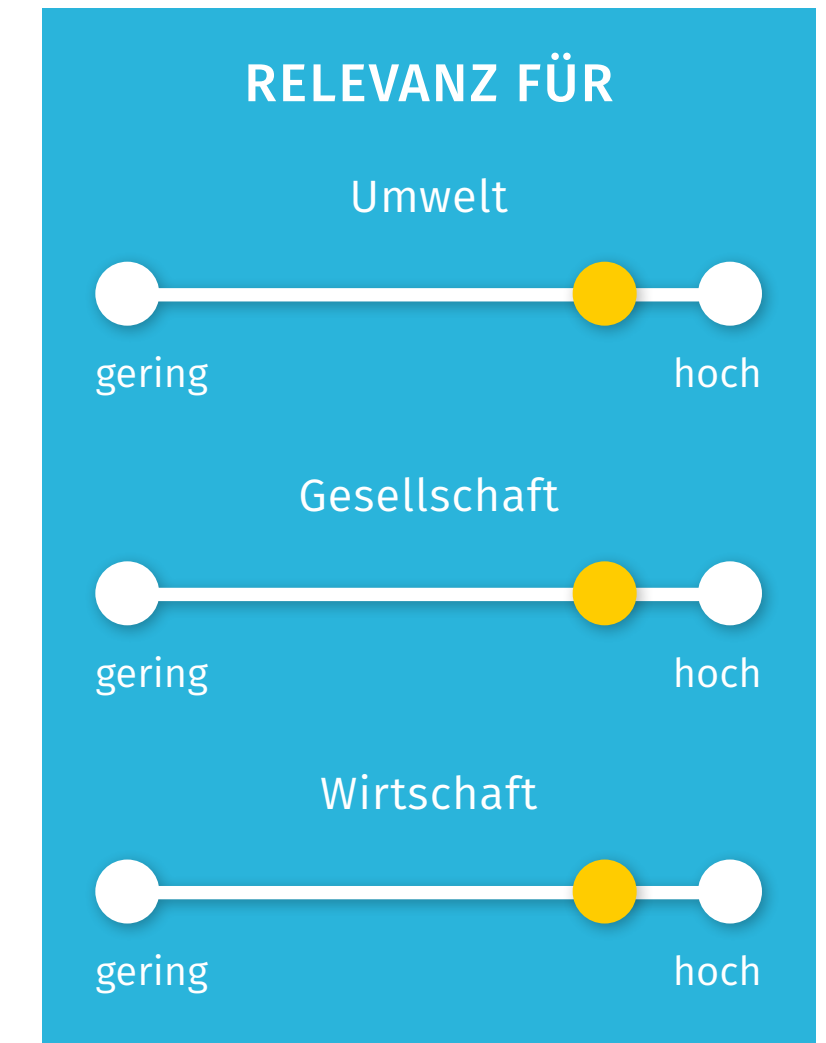
- Weltweit werden immer mehr **Hochhäuser aus Holz** erstellt. Ein Beispiel ist der Life Cycle Tower One in Dornbirn (Österreich) Der 27 Meter hohe, 13 Meter breite und 24 Meter lange Büroturm wurde nach Plänen des Architekturbüros Hermann Kaufmann errichtet und gilt als Prototyp für ein neues Holz-Hybridbausystem. Die wesentlichen Komponenten des Baukastensystems sind Kerne, Decken und Stützen, die allesamt vorgefertigt, mit wesentlichen Haustechnikelementen bestückt und auf der Baustelle zusammengesetzt werden. Die Fertigstellung des Rohbaus in Dornbirn dauerte nur acht Tage. Die Produktion der Module bei internationalen Anwendungen soll durch Partner vor Ort erfolgen, um das regionale Handwerk und die Holzwirtschaft zu unterstützen. Mit dem System lassen sich Plusenergie-, Passivhaus- oder Niedrigenergie-Standards umsetzen. Das höchste Holzgebäude der Welt ist mit 85,4 m der 2019 fertiggestellte Mjøsa Tower im norwegischen Brumunddal knapp gefolgt von dem HoHo Holzhochhaus in Wien, das beim international anerkannten Bewertungssystem für umweltfreundliche Gebäude LEED, bei Fertigstellung Gold erreicht hat. Höchster Holzhybridbau Nordrhein-Westfalens ist das Bürogebäude H7 im Hansaviertel von Münster.
- Holzbau spielt auch eine wichtige Rolle in dem für die Kreislaufwirtschaft zentralen „**Design for Deconstruction**“. In den Niederlanden sollen alle Bautätigkeiten bis 2050 vollständig in eine Kreislaufwirtschaft eingebunden werden. Vor diesen Hintergrund ist das Vorbildprojekt Building D(emountable), ein vollständig zerlegbares Gebäude, inmitten eines historischen Gebäudekomplexes im Zentrum der niederländischen Stadt Delft entstanden. Einfachheit war ein wichtiger Aspekt bei der Konstruktion sowie der Gestaltung des neuen Bürogebäudes. So ist die Hybridstruktur, eine Stahlkonstruktion mit Holzelementen und Glasfassade, vollständig zerlegbar und kann an einem anderen Standort wieder aufgebaut werden. Die eingesetzten drei Böden der Obergeschosse und das Dach bestehen aus vorgefertigten leichten Elementen aus Furnierschichtholz, in die trotz kompakter Dimension alle Installationen integriert sind. Der für den Boden verwendete Estrich ist biobasiert und besteht aus kiesartigem Granulat in einer

Pappwabenstruktur mit Gipsfaserplatten darüber. Der gesamte Estrich ist trocken und leicht wieder heraustrennbar. Als Bodenbelag kommt zum Teil recyceltes PVC zum Einsatz. Die Struktur wurde nicht nur als zerlegbare, sondern auch als leichte Konstruktion geplant, wodurch der Materialeinsatz stark reduziert werden konnte.

- Im April 2021 fand die Konferenz „**A New European Bauhaus** – How can the wood sector engage, contribute and co-create?“ statt. Das Neue Europäische Bauhaus der Europäischen Kommission ruft zu einer kreativen, interdisziplinären, neuartigen, in die Gesellschaft eingebetteten Bewegung auf, um sich gemeinsam eine nachhaltige Zukunft vorzustellen und sich auf einen transformativen Weg zu bezahlbaren und schönen Lebensräumen in der Stadt und auf dem Land zu begeben. Ein wichtiger Schritt ist die Transformation des Bausektors in ein zirkuläres Modell, das auch der eskalierenden Klimakrise entgegenwirken kann.

ZUKUNFTSPOTENZIAL

Holzbau kann nicht nur zur Reduzierung der CO₂-Emissionen, sondern auch zur Entschärfung der Entsorgungsproblematik im Bausektor einen Beitrag leisten. Gleichzeitig setzen auch Architekt:innen und Designer:innen zunehmend auf Holzbauweise. In Kombination mit nachhaltiger Waldbewirtschaftung ist das Zukunftspotenzial in allen drei Dimensionen Umwelt, Wirtschaft, Gesellschaft als sehr hoch zu bewerten.



13 BEWERTUNG FÜR DAS MÜNSTERLAND

Nach der Vorstellung aller Themen während einer Denkfabrik wurden die Teilnehmenden jeweils gebeten einzuschätzen, wie das Thema zu den eigenen Interessen, Entwicklungs- und Forschungsschwerpunkten passt, wie sie die Passfähigkeit zu den wirtschaftlichen Stärken des Münsterlandes bewerten und mit welchem Aufwand die Erschließung des Themas verbunden sein könnte. Alle Themen wurden auf einer Skala von 1 (gering) bis 5 (hoch) bewertet. Es haben sich jeweils ca. 20 Teilnehmende an der Befragung beteiligt.

#1 NACHHALTIGE BAUPLANUNG MIT BIM

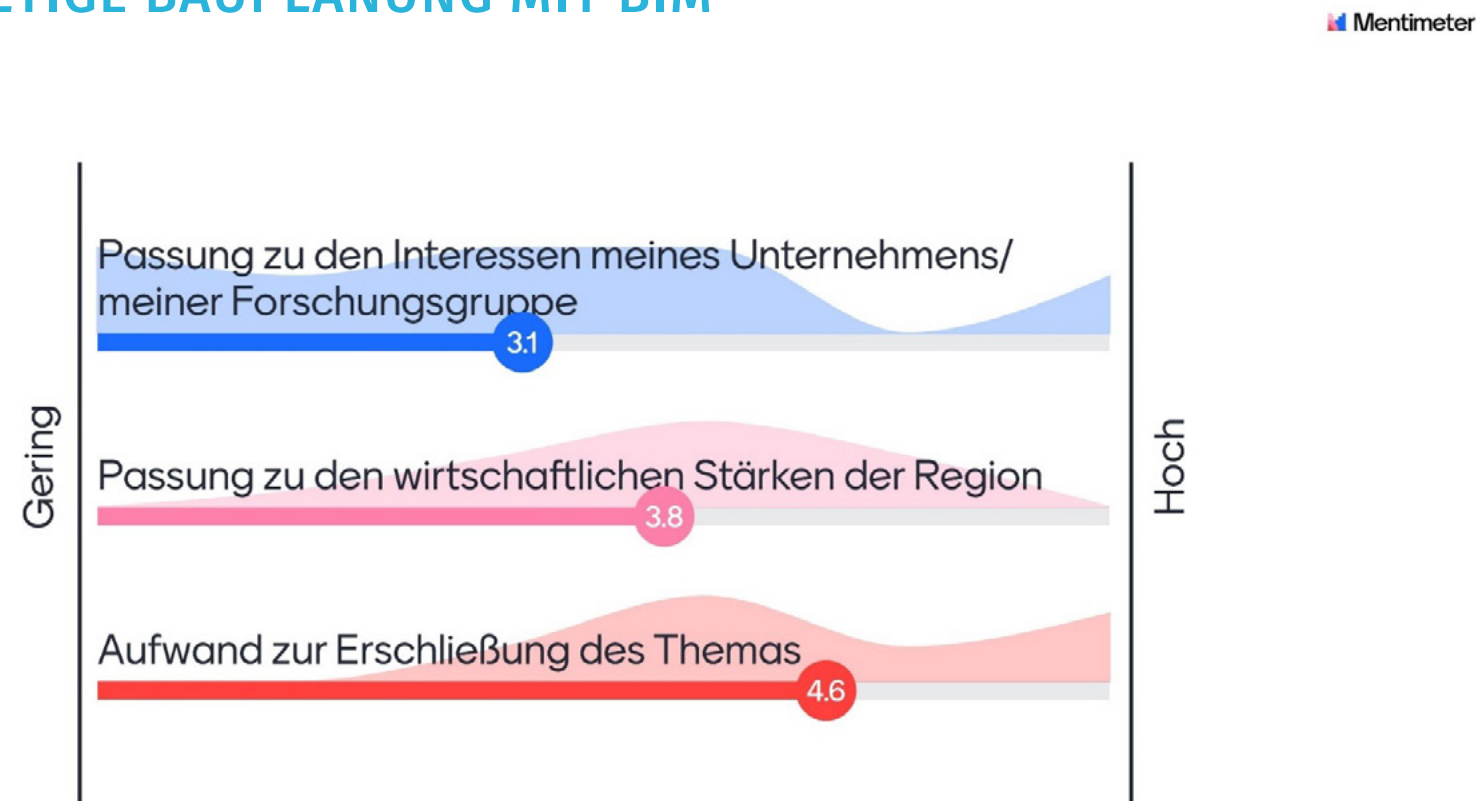


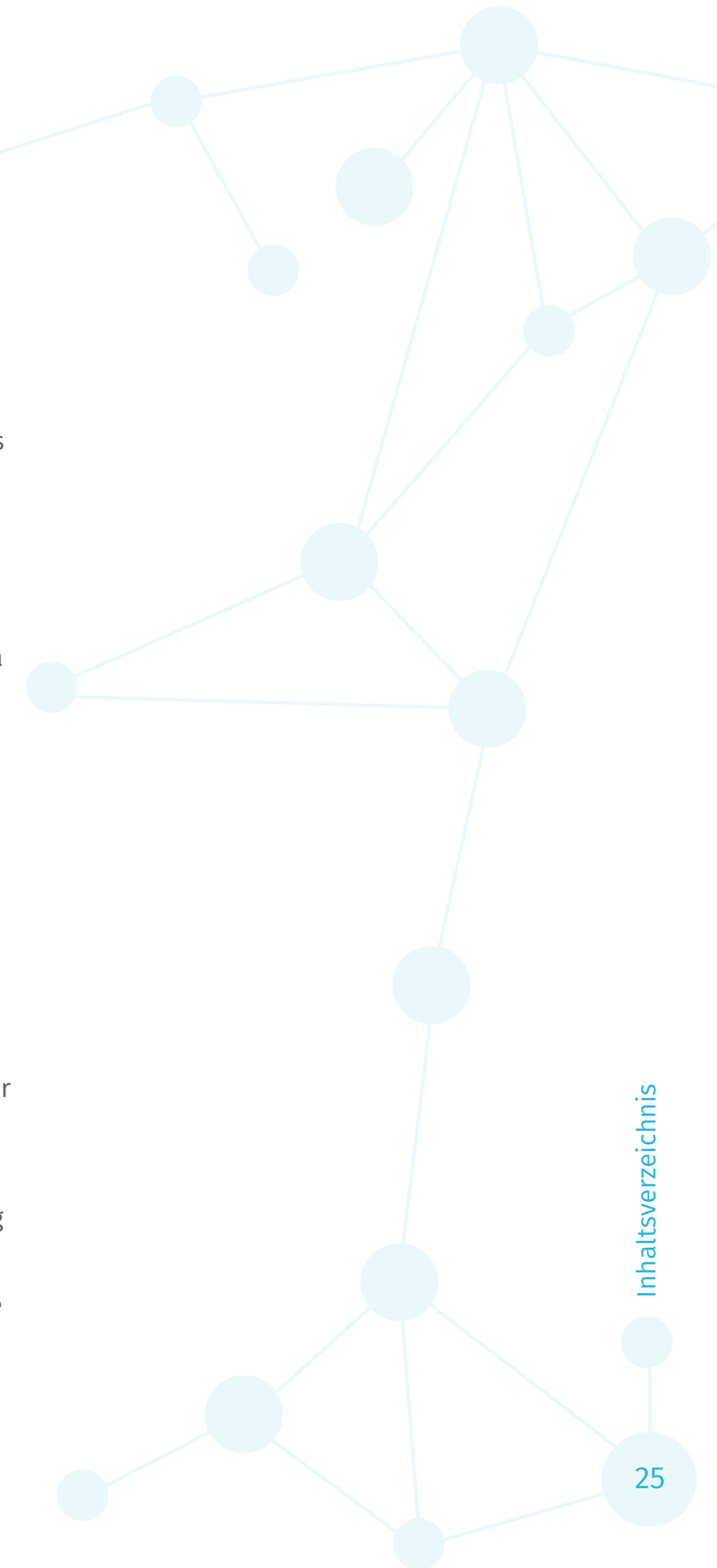
Abbildung 11: Beispiel für die Bewertung durch die Teilnehmenden mit Mentimeter

Das wichtigste Kriterium war jeweils die Passfähigkeit zu den Stärken der Region, aber auch der Aufwand für die Erschließung eines Themas sollte berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der Befragung dienten als Ausgangspunkt für die Diskussion während der Denkfabrik.

Regionale Stoffkreisläufe wurde mit Abstand als das wichtigste Thema identifiziert. Das Thema hatte nicht nur die größte Passfähigkeit zu den Akteuren, die an der Denkfabrik teilgenommen haben, sondern es wurde auch eine besonders gute Passfähigkeit zum Münsterland allgemein gesehen. Der Aufwand für die Erschließung des Themas wurde dagegen im Vergleich zu anderen Themen als eher gering bewertet. Diese Bewertung bestätigte sich auch in der Diskussion und das Thema wurde daher als Vertiefungsthema ausgewählt. Es wurde eine thematische Nähe zum Baustoff-Recycling gesehen, so dass diese beiden Themen evtl. gemeinsam weiter vertieft werden könnten.

Die Holzbauweise könnte ein weiteres interessantes Thema sein, da auch hier der Erschließungsaufwand eher gering eingeschätzt wird. Die Teilnehmenden Akteure sahen eher keinen Bezug zu ihren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten aber eine sehr gute Passfähigkeit zur Region insgesamt.

Materialsparenden Bauweise und nachhaltige Bauplanung mit BIM sind zwei weitere Themen, bei denen großes Potenzial für das Münsterland gesehen wird, auch wenn hier der Aufwand für die Erschließung etwas höher eingeschätzt wird. Beide Themen haben eine gewisse thematische Nähe zum Thema regionale Stoffkreisläufe, da durch die materialsparende Bauweise die Stoffströme reduziert werden und durch die Bauplanung mit BIM sowohl die verbauten Materialien als auch die Stoffströme beim Bau und bei Abriss deutlich transparenter sind. Auch durch die Holzbauweise werden die Stoffströme deutlich verändert.



Inhaltsverzeichnis

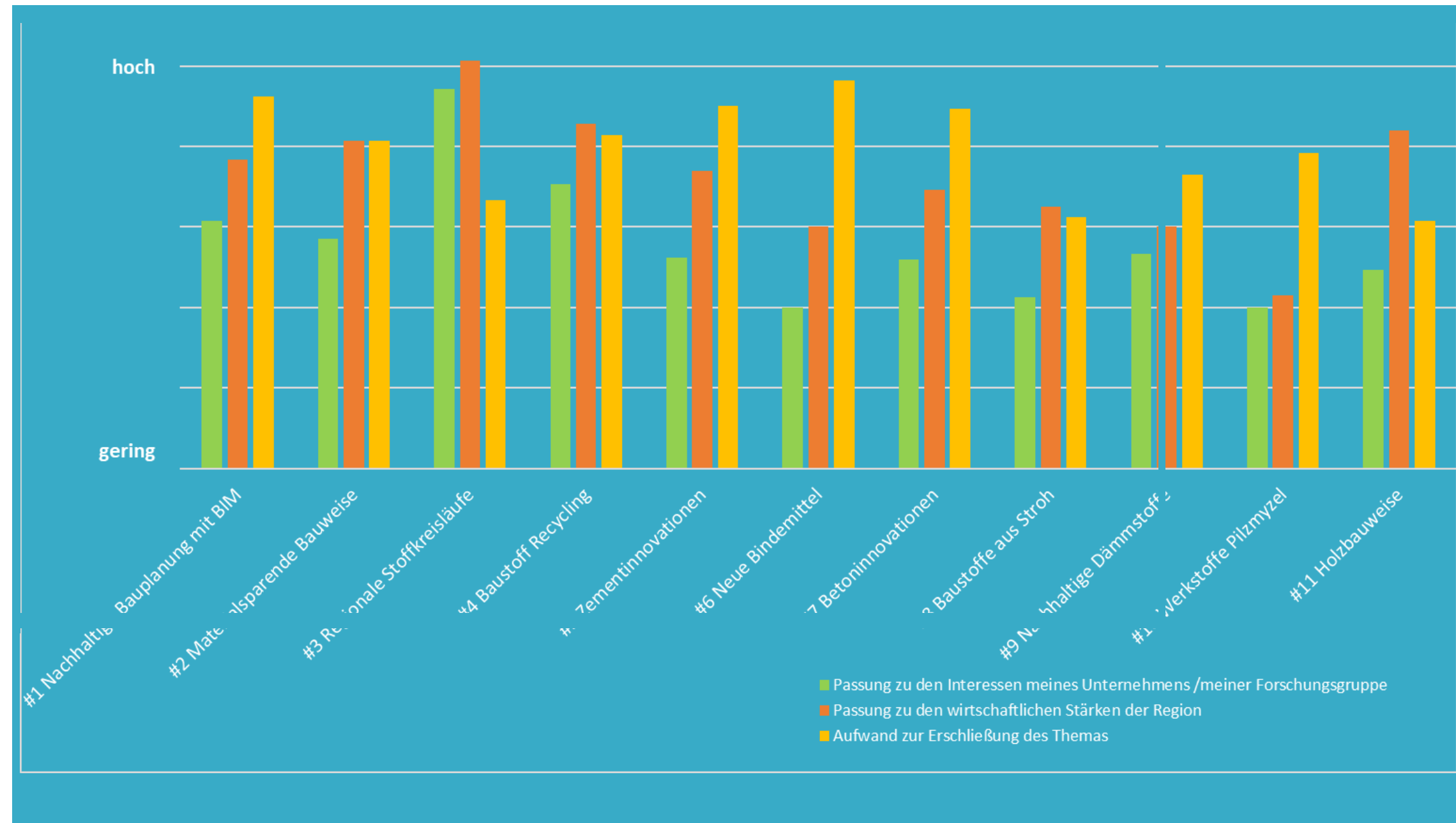


Abbildung 12: Bewertung der Zukunftsthemen durch die Teilnehmenden der Denkfabrik

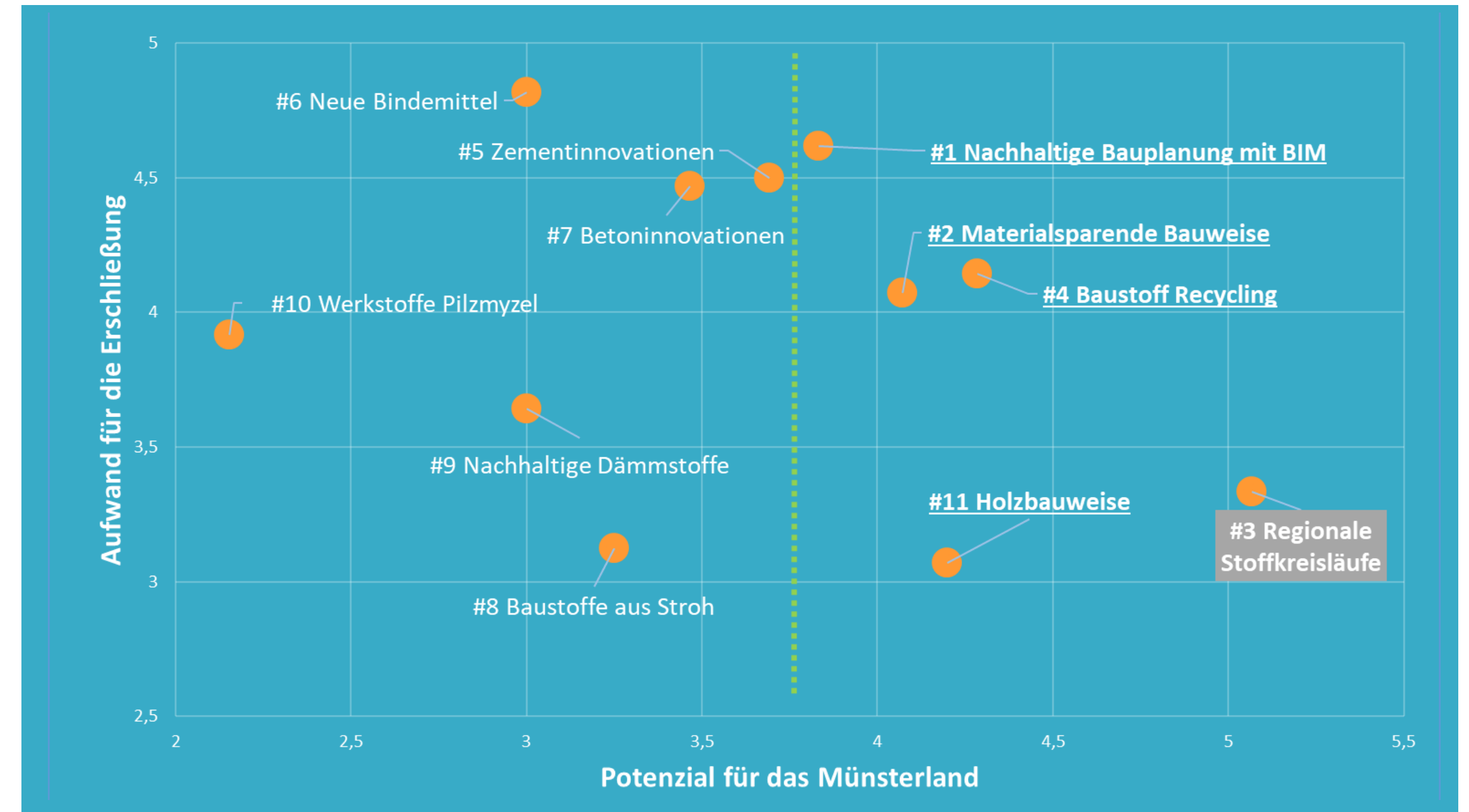
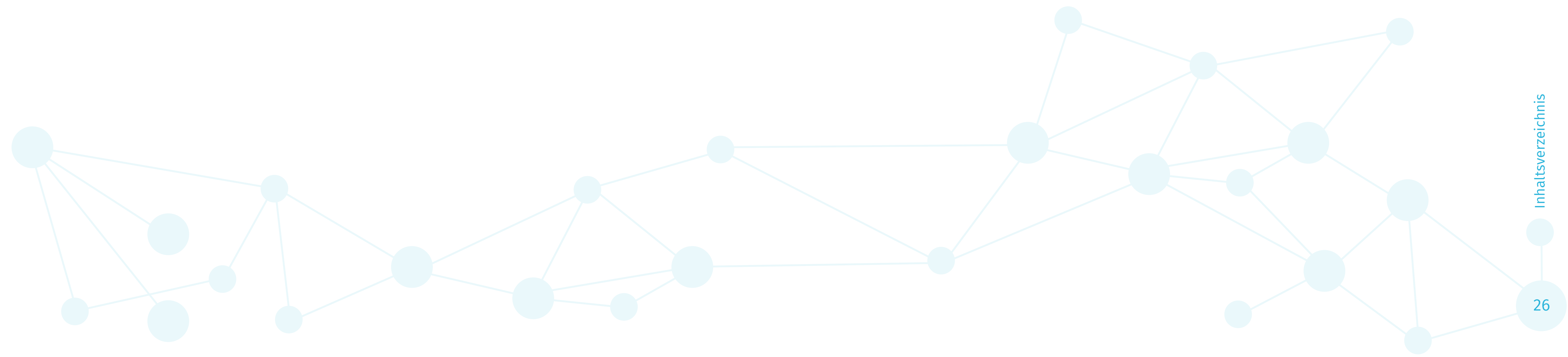


Abbildung 13: Potenzial und Aufwand für Erschließung der Zukunftsthemen



14 LITERATURVERZEICHNIS

Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin.

Alexander, Anjana Elsa; Shashikala A.P. (2020): Sustainability of Construction with Textile Reinforced Concrete – A State of the Art. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 936, S. 12006. DOI: 10.1088/1757-899x/936/1/012006.

Alshalif, Abdullah Faisal; Juki, Mohd Irwan; Othman, Norzila; Al-Gheethi, Adel Ali; Khalid, Faisal Sheikh (2019): Improvement of mechanical properties of bio-concrete using *Enterococcus faecalis* and *Bacillus cereus*. In: *Environmental Engineering Research* 24 (4), S. 630–637. DOI: 10.4491/eer.2018.306.

Amin, Kazi Faiza; Asrafuzzaman; Sharif, Ahmed; Hoque, Md Enamul (2021): Bamboo/Bamboo Fiber Reinforced Concrete Composites and Their Applications in Modern Infrastructure. In: Mohammad Jawaid, Sanjay Mavinkere Rangappa und Suchart Siengchin (Hg.): *BAMBOO FIBER COMPOSITES. Processing, properties and applications*. [S.l.]: SPRINGER, S. 271–297.

Augustyńska, Agnieszka (2020): Opportunities and threats for natural building using straw bale technology. In: *Bud-Arch* 19 (1), S. 29–38. DOI: 10.35784/bud-arch.739.

Basilisk Concrete (Hg.) (2021): Basilisk Concrete. Online verfügbar unter [→ www.basiliskconcrete.com/en](http://www.basiliskconcrete.com/en), zuletzt aktualisiert am 27.04.2021.

Beckmann, Birgit; Bielak, Jan; Scheerer, Silke; Schmidt, Christopher; Hegger, Josef; Curbach, Manfred (2021): Standortübergreifende Forschung zu Carbonbetonstrukturen im SFB/TRR 280. In: *Bautechnik* 98 (3), S. 232–242. DOI: 10.1002/bate.202000116.

Benkö, Linda: Pilzfäden als Baustoff der Zukunft. Hg. v. UBMM Development AG. Online verfügbar unter [→ www.ubm-development.com/magazin/pilz-baustoff-zukunft](http://www.ubm-development.com/magazin/pilz-baustoff-zukunft), zuletzt geprüft am 27.04.2021.

BioBall. Bioökonomie im Ballungsraum. Online verfügbar unter [→ www.provadis-hochschule.de/angewandte-forschung/innovationsraum-bioball.html](http://www.provadis-hochschule.de/angewandte-forschung/innovationsraum-bioball.html), zuletzt geprüft am 14.04.2021.

Borrmann, André; König, Markus; Koch, Christian; Beetz, Jakob (Hg.) (2015): *Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Wiesbaden: Springer Vieweg (VDI-Buch).

Brandhorst, Jörg; Spritzendorfer, Josef; Gildhorn, Kai; Hemp, Markus (2012): *Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen*. Hg. v. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Online verfügbar unter [→ www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21538970](http://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21538970), zuletzt geprüft am 09.03.2021.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (Hg.) (2016): *Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden*. 2. Aufl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Berlin. Online verfügbar unter [→ www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Leitfaden_2015/LFNB_D_final-barrierefrei.pdf](http://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Leitfaden_2015/LFNB_D_final-barrierefrei.pdf), zuletzt geprüft am 28.04.2021.

C³ – Carbon Concrete Composite e. V. (Hg.) (2021): *Stoffkreislauf Carbonbeton*. Online verfügbar unter [→ www.bauen-neu-denken.de/stoffkreislauf-carbonbeton/](http://www.bauen-neu-denken.de/stoffkreislauf-carbonbeton/), zuletzt aktualisiert am Januar 2021, zuletzt geprüft am 27.04.2021.



Cascone, Stefano; Rapisarda, Renata; Cascone, Dario (2019): Physical Properties of Straw Bales as a Construction Material: A Review. In: *Sustainability* 11 (12), S. 3388. DOI: 10.3390/su11123388.

Celitement GmbH&Co.KG (Hg.): Idee & Prinzip. Celitement setzt bei seiner Herstellung weniger Kohlendioxid frei als klassischer Portlandzementklinker. Online verfügbar unter → <https://celitement.de/das-produkt/idee-prinzip>, zuletzt geprüft am 29.04.2021.

Circular Valley. Online verfügbar unter → <https://circular-valley.de>, zuletzt geprüft am 14.04.2021.

Cornaro, C.; Zanella, V.; Robazza, P.; Belloni, E.; Buratti, C. (2020): An innovative straw bale wall package for sustainable buildings: experimental characterization, energy and environmental performance assessment. In: *Energy and Buildings* 208, S. 109–636. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109636.

Curbach, Manfred: SPP 1542: Leicht Bauen mit Beton - Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien. Hg. v. Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG). Online verfügbar unter → <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/172438440?context=projekt&task=showDetail&id=172438440&>, zuletzt geprüft am 29.04.2021.

DGNB Blog rund um Nachhaltiges Bauen (Hg.) (2020): Finalist: Ricehouse. Online verfügbar unter → <https://blog.dgnb.de/sustainability-challenge-2020/kategorie-start-up/ricehouse>, zuletzt aktualisiert am 27.04.2021.

Eden, Karin (2020): Bio-Beton für die Zukunft. Hg. v. Bio-Ökonomie – Grüne Chemie. Online verfügbar unter → <https://bioeco-edr.eu/blog/bio-beton-f%C3%BCr-die-zukunft/4878/53404>.

Fertighaus ERLER GmbH: Strohhaus Bauvarianten. Online verfügbar unter → www.unserstrohhaus.at/strohieso/strohhaus-bauvarianten/, zuletzt geprüft am 05.04.2021.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP: Elektrodynamische Fragmentierung. Unter Mitarbeit von Volker Thome und Severin Seifer. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP. Abteilung Mineralische Werkstoffe und Baustoffrecycling. Valley. Online verfügbar unter → www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/produktblaetter/mwb/produktblatt-fragmentierung.pdf, zuletzt geprüft am 27.04.2021.

Fromm, Leonhard (2020a): Bauschutt-Recycling auf hohem Niveau. Ein Abbruchunternehmer erzielt Recyclingquoten von 90%, doch in vielen öffentlichen Ausschreibungen bleiben die aufbereiteten mineralischen Baustoffe unerwünscht. In: *Deutsches Architektenblatt*. Online verfügbar unter → www.dabonline.de/2020/02/18/bauschutt-recycling-feess-kirchheim-beton-wiederverwertung-ziegel, zuletzt geprüft am 15.04.2021.

Fromm, Leonhard (2020b): Vom Bauschutt zum Baustoff. Über die schleppende Verwendung von Recycling-Beton im Hochbau, Vorreiter-Projekten und Pionieren der Branche sowie einem Architekten, den die Vorteile überzeugten. In: *Deutsches Architektenblatt* (01–21), S. 36–39. Online verfügbar unter → www.dabonline.de/2020/12/28/rc-beton-recycling-bauschutt-baustoff-umweltstation-wuerzburg/, zuletzt geprüft am 14.04.2021.

Fromm, Leonhard (2020c): Recycling-Beton als Sichtbeton für Schule. Die Stadt Kirchheim unter Teck schreibt bei kommunalen Bauvorhaben Recycling-Beton vor. Dabei sind trotz oder gerade wegen der Zuschlagstoffe aus Bauschutt hochwertige Sichtbetonflächen möglich. In: *Deutsches Architektenblatt*. Online verfügbar unter → www.dabonline.de/2020/03/17/recycling-beton-als-sichtbeton-fuer-schule-bauschutt-rbeton/, zuletzt geprüft am 15.04.2021.



Guy, Bradley; Shell, Scott; Homsey, Esherick (2006): Design for deconstruction and materials reuse. In: *Proceedings of the CIB Task Group 39* (4), S. 189–209. Online verfügbar unter → <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.482.8512&rep=rep1&type=pdf>, zuletzt geprüft am 14.04.2021.

Hager, Izabela; Golonka, Anna; Putanowicz, Roman (2016): 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? 151, S. 292–299. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.357.

Jacob, Klaus; Postpischil, Rafael; Graaf, Lisa; Ramezani, Maximilian; Ostertag, Katrin; Pfaff, Matthias et al. (2021): Handlungsfelder zur Steigerung der Ressourceneffizienz: Potenziale, Hemmnisse und Maßnahmen. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (UBA Texte, 32/2021).

Javadian, Alireza; Wielopolski, Mateusz; Smith, Ian F.C.; Hebel, Dirk E. (2016): Bond-behavior study of newly developed bamboo-composite reinforcement in concrete. In: *Construction and Building Materials* 122, S. 110–117. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.084.

Korjenic, Azra; Petránek, Vít; Zach, Jiří; Hroudová, Jitka (2011): Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. In: *Energy and Buildings* 43 (9), S. 2518–2523. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.06.012.

Kovacic, Iva; Honic, Meliha; Sreckovic, Marijana (2020): Digital Platform for Circular Economy in AEC Industry. In: *Engineering Project Organization Journal* Oktober 2020 (9).

Kuehlen, Anna; Thompson, Neil; Schultmann, Frank (2014): Barriers for Deconstruction and Reuse/Recycling of Construction Materials in Germany. In: *cib* (CIB Publication 397), S. 38–50. Online verfügbar unter → https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2393174/cib_w115pub_397.pdf, zuletzt geprüft am 28.04.2021.

Kupfer, Olaf (2020): „Circular Valley“ – neuer Trumpf für NRW, der von Wuppertal ausgeht? In: *Westdeutsche Zeitung*, 11.08.2020. Online verfügbar unter → www.wz.de/politik/landespolitik/circular-valley-ein-neuer-nrw-trumpf-der-von-wuppertal-ausgeht_aid-52717909, zuletzt geprüft am 14.04.2021.

Lehigh Hanson – Heidelberg Cement Group (Hg.) (2021): Lehigh Hanson and Fortera Work Together to Economically Reduce CO₂ Emissions. Online verfügbar unter → www.lehighhanson.com/resources/news/news-post/news/2021/03/11/lehigh-hanson-and-fortera-work-together-to-economically-reduce-co2-emissions.

Lopez Hurtado, Pablo; Rouilly, Antoine; Vandenbossche, Virginie; Raynaud, Christine (2016): A review on the properties of cellulose fibre insulation. In: *Building and Environment* 96, S. 170–177. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.09.031.

Müller, Felix; Kohlmeyer, Regina; Krüger, Franziska; Kosmol, Jan; Krause, Susann; Dorer, Conrad (2020): Leitsätze einer Kreislaufwirtschaft. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter → www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitsaetze-einer-kreislaufwirtschaft

Netz, Hartmut (2019): Wohnen im Stroh. Ökologischer Hausbau. In: *Süddeutsche Zeitung*, 02.03.2019. Online verfügbar unter → www.sueddeutsche.de/wissen/haus-stroh-strohwand-hausbau-oekologisch-bauen-1.4349139, zuletzt geprüft am 27.04.2021.

Potrykus, Alexander; Zotz, Ferdinand; Aigner, Joachim Felix; Weißenbacher, Jakob; Burgstaller, Maria; Abraham, Veronika et al. (2021): Prüfung möglicher Ansätze zur Stärkung des Recyclings, zur Schaffung von Anreizen zur Verwendung recycelbarer Materialien und zur verursachergerechten Zuordnung von Entsorgungskosten im Bereich der Bauprodukte. Dessau-Roßlau (UBA Texte, 05). Online verfügbar unter → www.umweltbundesamt.de/publikationen/pruefung-moeglicher-ansaetze-zur-staerkung-des



Provis, John L.; van Deventer, Jan Stephanus Jakob (2009): Geopolymers. Structure, processing, properties and industrial applications. Oxford, Boca Raton, FL: Woodhead; CRC Press (Woodhead Publishing in materials). → <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=689381>

Schneider, Kai; Butler, Marko; Mechtcherine, Viktor (2017): Carbon Concrete Composites C 3 – Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (12), S. 784–794. DOI: 10.1002/best.201700058.

Schwenke, Tasia; Rüther, Norbert; Schwab, Harald: Karlsruher Tage 2018 – Holzbau: Forschung fuer die Praxis, Karlsruhe, 04. Oktober–05. Oktober 2018. Die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen als Dämmstoffe im Bauwesen – Zusatznutzen und Grenzen, S. 27–46.

Seifert, Wiebke; Lieboldt, Matthias (2020): Ressourcenverbrauch im globalen Stahlbetonbau und Potenziale der Carbonbetonbauweise. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (6), S. 469–478. DOI: 10.1002/best.201900094.

Streck, Stefanie (2018): Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen. Kriterien für Neubau und Bauen im Bestand. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg. → www.springer.com

Stürmer, Sylvia; Fritz, Walter (2020): Vom historischen Ziegelsplitt – und modernen R-Betonen. Ein Plädoyer für mehr Akzeptanz von Recyclingbaustoffen. In: *BAUSUBSTANZ* 11 (6), S. 37–43.

Thomson, Andrew; Walker, Pete (2014): Durability characteristics of straw bales in

building envelopes. In: *Construction and Building Materials* 68, S. 135–141. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.041.

Universität Stuttgart (Hg.): Mycelium. Institut für Baukonstruktion. Online verfügbar unter → www.ibk.uni-stuttgart.de/ibk2/forschung/mycel, zuletzt geprüft am 27.04.2021.

Verein Deutscher Zementwerke, V. D.Z. (2020): Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Online verfügbar unter → www.vdz-online.de/dekarbonisierung, zuletzt geprüft am 17.04.2021.

Walbrück, Katharina; Drewler, Lisabeth; Witzleben, Steffen; Stephan, Dietmar (2021): Factors influencing thermal conductivity and compressive strength of natural fiber-reinforced geopolymer foams. In: *Open Ceramics* 5, S. 100065. DOI: 10.1016/j.oceram.2021.100065.

Walbrück, Katharina; Maeting, Felicitas; Witzleben, Steffen; Stephan, Dietmar (2020): Natural Fiber-Stabilized Geopolymer Foams-A Review. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 13 (14). DOI: 10.3390/ma13143198.

Walbrück, Katharina; Witzleben, Steffen; Stephan, Dietmar (2019): Neuartige geopolymergebundene Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen.

Winnefeld, Frank; Leemann, Andreas (2017): Nachhaltige Betone mit alternativen Bindemittelsystemen – was wird die Zukunft bringen? Beitrag in FSKB-Seminar „Am Puls der Betontechnologie – neue Erkenntnisse“, Dagmersellen (CH), 25.04.2017. Online verfügbar unter → www.researchgate.net/publication/317042749_Nachhaltige_Betone_mit_alternativen_Bindemittelsystemen_-_was_wird_die_Zukunft_bringen

Wolf, Tobias; Untergutsch, Andrea; Wensing, Christoph; Mittelbach, Heidi; Lu-Pagenkopf,



Feng; Kellenberger, Daniel; Kubowitz, Petra (2020): Potenziale von Bauen mit Holz. Erweiterung der Datengrundlage zur Verfügbarkeit von Holz als Baustoff zum Einsatz im Holzbau sowie vergleichende Ökobilanzierung von Häusern in Massiv- und Holzbauweise. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (Texte, 192/2020). Online verfügbar unter → <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/potenziale-von-bauen-holz#:~:text=Die%20Studie%20%E2%80%9EPotenziale%20von%20Bauen%20in%20Massiv%2D%20und%20Holzbauweise%20durch>

Wörner, Mark; Schmeer, Daniel; Schuler, Benjamin; Pfinder, Julian; Garrecht, Harald; Sawodny, Oliver; Sobek, Werner (2016): Gradientenbetontechnologie. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (12), S. 794–805. DOI: 10.1002/best.201600056.

Zach, Jiří; Hroudová, Jitka; Brožovský, Jiří; Krejza, Zdeněk; Gailius, Albinas (2013): Development of Thermal Insulating Materials on Natural Base for Thermal Insulation Systems. In: *Procedia Engineering* 57, S. 1288–1294. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.162.

Zellulosedämmstoff Thermofloc erhält natureplus-Qualitätszeichen. In: *bauhandwerk – Das Profimagazin für Ausbau, Neubau und Sanierung* (05/2013). Online verfügbar unter → www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_Zellulosedaeemmstoff_Thermofloc_erhaelt_natureplus-Qualitaetszeichen_1719319.html, zuletzt geprüft am 15.04.2021.

Regionale Kreislaufwirtschaft

AUF DEM WEG ZUR KREISLAUFWIRTSCHAFT

Eine Zukunfts-Analyse zu ausgewählten Technologie-Trends vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung in Zusammenarbeit mit den Münsterland Denkfabriken

06/2022

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	34
2	Innovationslandschaft.....	35
2.1	Wissenschaft	35
2.2	Wirtschaft.....	38
2.3	Politik und Gesellschaft.....	42
3	Leuchtturm-Beispiele	45
3.1	„Innovationsräume Bioökonomie“ – BioBall	45
3.2	Reallabor Zirkuläres Wirtschaften im urbanen Raum	46
3.3	Wiederverwendung in regionalen Netzwerken: RECOM Ostwestfalen.....	46
3.4	CIRCO-Methode	47
3.5	INKA – Intermediate aus industriellem Kaffeesatz	48
3.6	STRAMENTO Biogas aus Stroh	48
3.7	Recycling Firma Feess und Kommune Kirchheim: Pioniere Baustoffrecycling	49
3.8	Automatisiertes Recycling von E-Auto-Batterien	50
3.9	Regionales Phosphor-Recycling (RePhoR)	51
3.10	Waste-to-Resource-Unit: Bio-Reaktor im Container	52
4	Ausblick Münsterland	53
5	Literaturverzeichnis	54



1 EINLEITUNG

Natürliche Ressourcen wie Rohstoffe, Boden, Wasser und Luft sind Grundlage unseres täglichen Lebens und Wirtschaftens. In unsere aktuellen Wirtschaftsweise verbrauchen wir weit mehr als die vorhandenen Kapazitäten und leben damit auf Kosten zukünftiger Generationen. Um dem entgegenzuwirken soll die Kreislaufwirtschaft helfen, eine ressourceneffiziente, nachhaltige Lebens- und Wirtschaftsweise zu etablieren, welche die Umsetzung der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen fördert und planetare Grenzen respektiert. (Müller et al. 2020).

Dazu zielt die Kreislaufwirtschaft darauf ab, den Wert von Produkten, Materialien und Ressourcen so lange wie möglich in der Wirtschaft zu erhalten und gleichzeitig die Materialeffizienz zu erhöhen, Umweltbelastungen zu reduzieren sowie Klimaneutralität zu erreichen. Der Übergang zu einer Circular Economy bedeutet eine Transformation ganzer Wertschöpfungsketten und umfasst Design-, Produktions- und Konsumphase sowie die Kreislaufschließung nach der Nutzung.

Die Kreislaufwirtschaft erstreckt sich auf ganz verschiedene Arten von Stoffströmen von den großen Mengen der Grundstoffindustrie (Fecke et al. 2021) bis hin zu biogenen Abfall- und Reststoffen wie Nahrungsmittelreste und Reststoffe der Landwirtschaft, deren Kreislaufführung im Kontext der Bioökonomie diskutiert wird (Schüch und Hennig 2020).

Die Entwicklung hin zur Kreislaufwirtschaft wird von vielen gesetzlichen Bestimmungen flankiert, darunter etwa das EU-Legislativpaket zur Kreislaufwirtschaft von 2018, das deutsche Kreislaufwirtschaftsgesetz, die EU-Abfallrahmenrichtlinie und das Verbot von Einwegplastikprodukten durch die Einwegkunststoff-Verbotsverordnung.

Auf regionaler und lokaler Ebene werden große, bisher wenig beachtete Potenziale zur Erhöhung der Ressourceneffizienz gesehen (Verbücheln und Wagner-Endres 2019). Insbesondere den Kommunen kommt bei der Optimierung von Stoffkreisläufen eine zentrale Rolle zu. Viele Stoffströme, wie zum Beispiel die Wasserver- und Abwasserentsorgung (z.B. Reststoffe, Klärschlämme), sowie viele Abfallströme (z.B. biogene Fraktionen) sind zumeist kommunal oder regional organisiert. Des Weiteren können Kommunen auch auf andere Stoffströme direkten bzw. indirekten Einfluss nehmen (z.B. Stadtplanung, Fuhrpark, Beschaffung), eine Steuerungsfunktion übernehmen und wichtiger Akteur lokaler Netzwerke sein (ebd.) Aber auch Akteure aus Wirtschaft und Zivilgesellschaft spielen eine entscheidende Rolle bei der Etablierung regionaler Stoffkreisläufe (Gsell und Dehoust 2019).

**ANSPRECHPARTNER:INNEN
FRAUNHOFER ISI:**

**Elna Schirrmeister,
Dr. Philine Warnke und
Jan Rörden**



2 INNOVATIONSLANDSCHAFT

2.1 WISSENSCHAFT

Wie Abbildung 1 zeigt, steigt die Zahl der Publikationen zur Kreislaufwirtschaft seit etwa sieben Jahren an. Insbesondere seit 2019 hat sich die Dynamik noch einmal verstärkt.

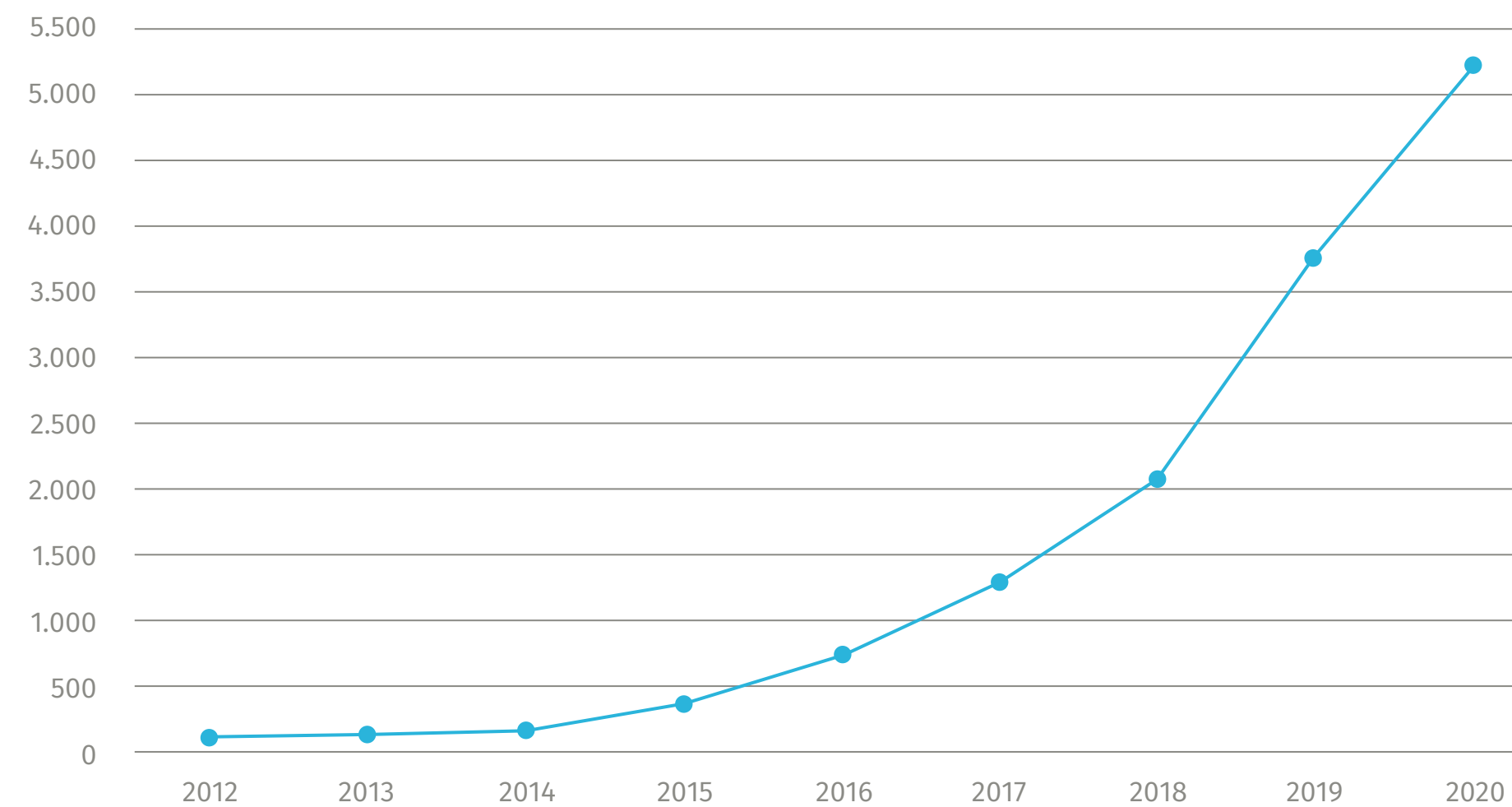


Abbildung 1: Anzahl der weltweiten Publikationen pro Jahr zu Kreislaufwirtschaft (Suchstring „Circular Economy“ in Titel und Abstrakt)

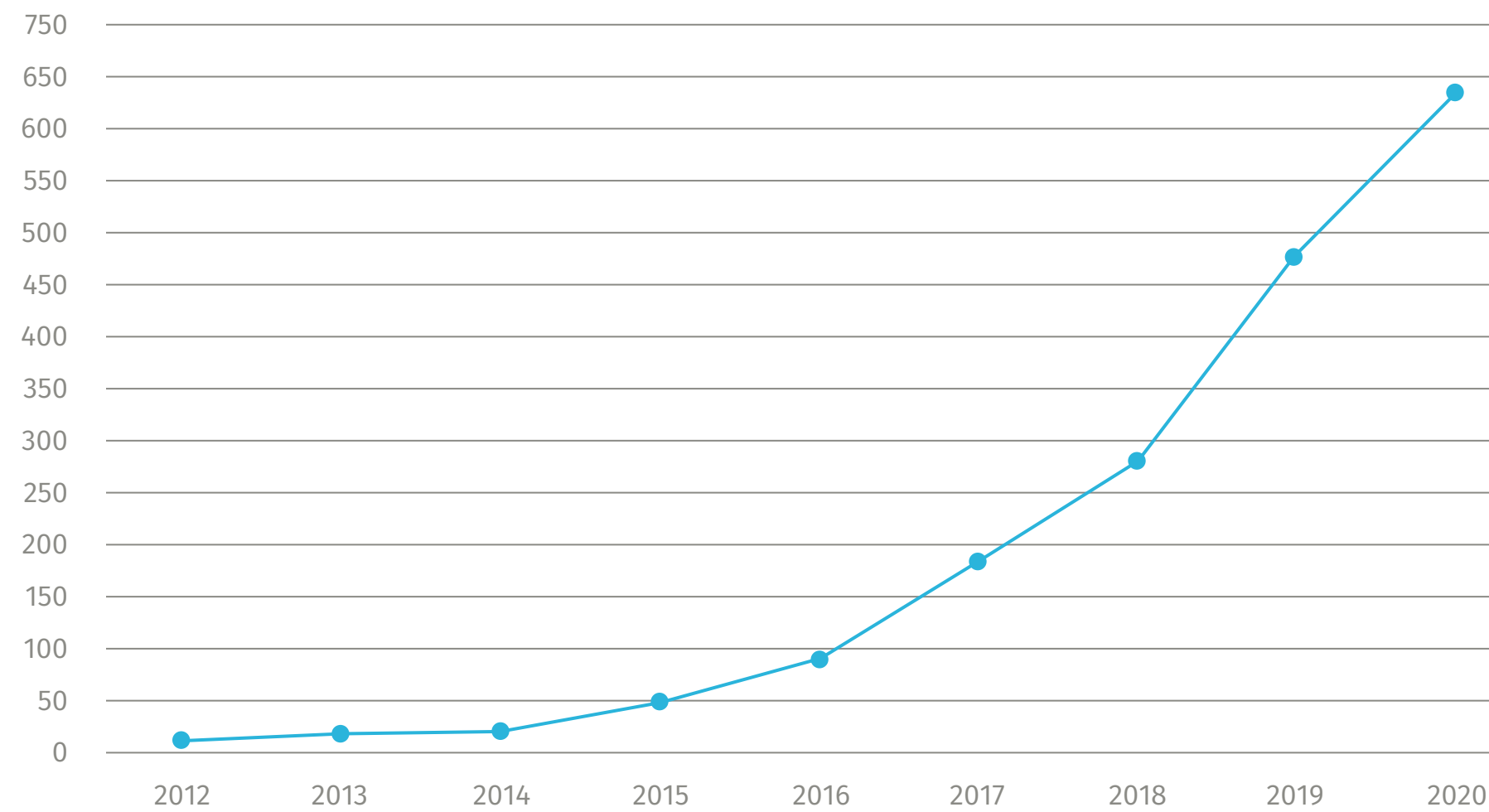
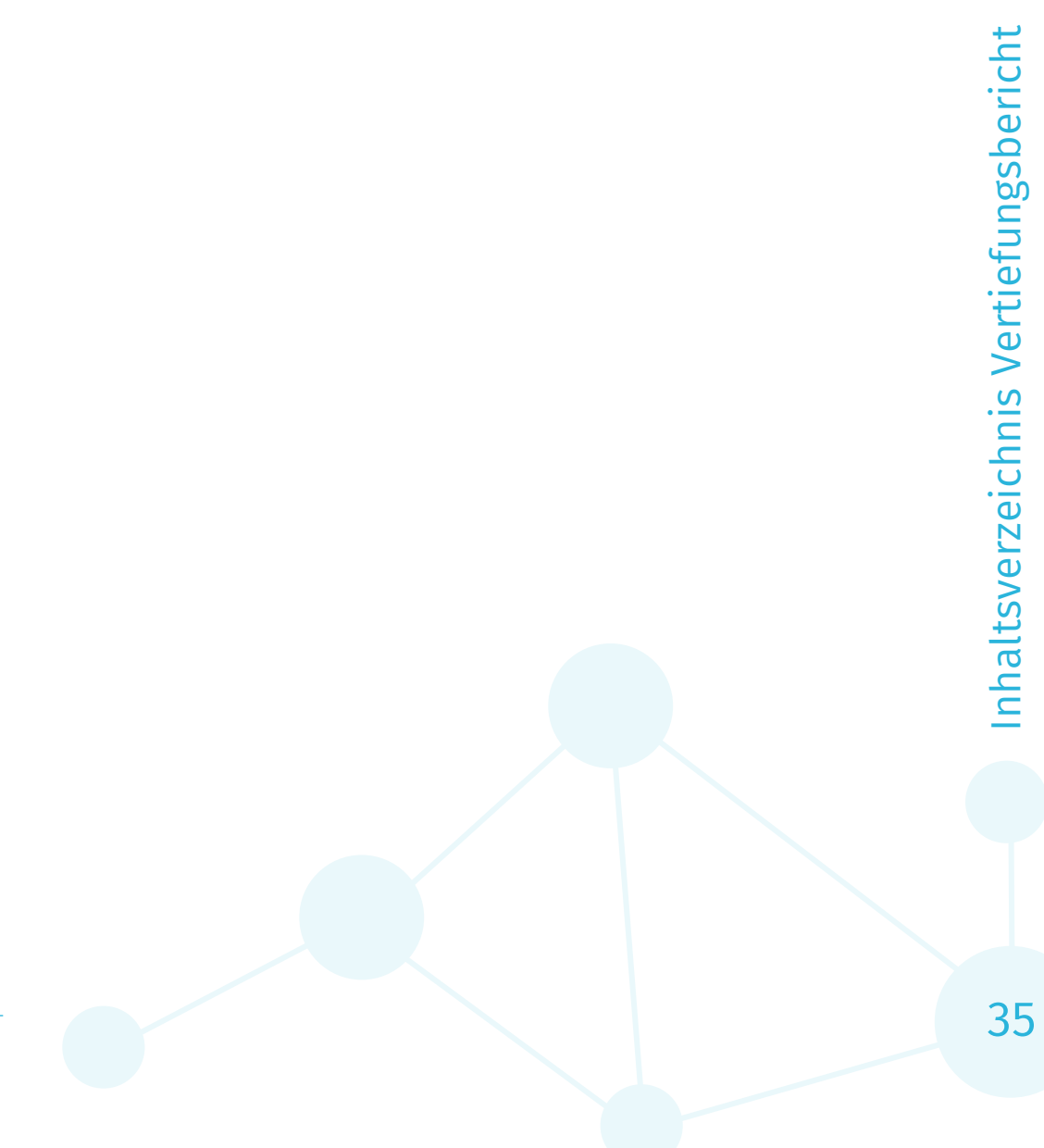


Abbildung 2: Publikationen Regionale Kreislaufwirtschaft (Suchstring „Circular Economy“ AND „regional“ OR „local“ OR „urban“) in Titel und Abstrakt.

Ein Blick auf die aktiven Forschungseinrichtungen in Tabelle 1¹ zeigt, dass Forschungseinrichtungen in aller Welt zum Thema Kreislaufwirtschaft aktiv sind. Schaut man auf die Publikationen pro Land (Tabelle 2) liegt Deutschland nach China, Großbritannien, Italien, den USA und Spanien an sechster Stelle, dicht gefolgt von Indien und den Niederlanden.

¹ Ausgewertet sind hier und im Folgenden sämtliche vorliegende Publikationen in der Datenbank, die früheste von 1973



FORSCHUNGSEINRICHTUNG	LAND	ANZAHL PUBLIKATIONEN
Universität Tsinghua	China	483
Universität und Forschung Wageningen	Niederlande	403
Polytechnische Universität von Mailand	Italien	386
Technische Universität Delft	Niederlande	371
Technische Universität von Dänemark	Dänemark	326
Universität Lissabon	Portugal	305
Jiao Tong Universität Shanghai	China	286
Universität von Aveiro	Portugal	278
Universität von São Paulo	Brasilien	255
Universität der Chinesischen Akademie der Wissenschaften	China	255
Universität von Bologna	Italien	254
Universität Sapienza Rom	Italien	250
Universität von Cambridge	Großbritannien	249
Ghent Universität	Belgien	247
Universität Neapel Federico II	Italien	245
Universität Peking	China	238
Utrecht Universität	Niederlande	238
Aalto Universität	Finnland	237
Lund Universität	Schweden	226
Tongji Universität	China	225

Tabelle 1: Forschungseinrichtungen weltweit mit Publikationen im Bereich regionale Kreislaufwirtschaft (Volltext)

FORSCHUNGSEINRICHTUNG	ANZAHL PUBLIKATIONEN
China	8641
Vereinigtes Königreich	4954
Italien	4555
USA	4246
Spanien	3448
Deutschland	3090
Indien	2474
Niederlande	2049
Australien	1949
Brasilien	1892
Frankreich	1831

Tabelle 2: Publikationen im Bereich regionale Kreislaufwirtschaft nach Ländern (Volltext)

Mit Abstand die meisten der deutschen Publikationen stammen von der TU Berlin und dort insbesondere aus dem Bereich Technischer Umweltschutz Fachgebiet Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie² Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter. Weitere an der TU Berlin aktive Gruppen sind Sustainable Engineering Prof. Matthias Finkenbeiner und am Institut für Technologie und Management Dr. Luana Ladu. An der RWTH Aachen stammen die meisten Publikationen vom Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen INaB³ Prof. Dr. Marzia Traverso.

Am Helmholtz Zentrum für Umweltforschung Abteilung Bioenergie der Arbeitsgruppe „Systemanalyse der Bioökonomie“ liegt der Schwerpunkt auf Wechselwirkungen zwischen erneuerbaren Rohstoffquellen, ihren technischen Nutzungsoptionen, der Umwelt und der Gesellschaft.⁴

² → www.circulareconomy.tu-berlin.de/menue/forschung

³ → www.inab.rwth-aachen.de/en/new-welcom-to-inab

⁴ → www.ufz.de/index.php?de=34237



In der Fraunhofer-Gesellschaft beschäftigen sich mehrere Institute mit verschiedenen Aspekten der Kreislaufwirtschaft:

- Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT: Fokus auf nachhaltig bereitgestellter Kohlenstoff, erneuerbare, Energie und im Kreislauf geführte Produkte und Werkstoffe⁵
- Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie: Fokus auf Charakterisierung von Stoffströmen hinsichtlich ihrer hochwertigen Verwertbarkeit⁶
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: Fokus auf Schließen von Stoffkreisläufen in industriellen Produktionsumgebungen⁷
- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI: Fokus Rahmenbedingungen und Perspektiven für Transformation von Wertschöpfungsketten.⁸

Ein Exzellenzcluster mit fünf Instituten beschäftigt sich unter Leitung des Fraunhofer UMSICHT mit der Umsetzung einer zirkulären Kunststoffwirtschaft⁹



FORSCHUNGSEINRICHTUNG	SITZ	ANZAHL PUBLIKATIONEN
Technische Universität Berlin	Berlin	167
RWTH Universität Aachen	Aachen	137
TU Dresden	Dresden	122
Karlsruher Institut für Technologie	Karlsruhe	109
Helmholtz-Zentrum Umweltforschung GmbH UFZ	Leipzig	93
Technische Universität München	München	83
Leuphana Universität Lüneburg	Lüneburg	77
Universität Freiburg	Freiburg	66
Universität Kassel	Kassel	61
Technische Universität Braunschweig	Braunschweig	58
Universität Bonn	Bonn	57
Universität Rostock	Rostock	56
Universität Stuttgart	Stuttgart	55
Humboldt-Universität zu Berlin (HU)	Berlin	54

Tabelle 3: Deutsche Forschungseinrichtungen mit Publikationen im Bereich regionale Kreislaufwirtschaft

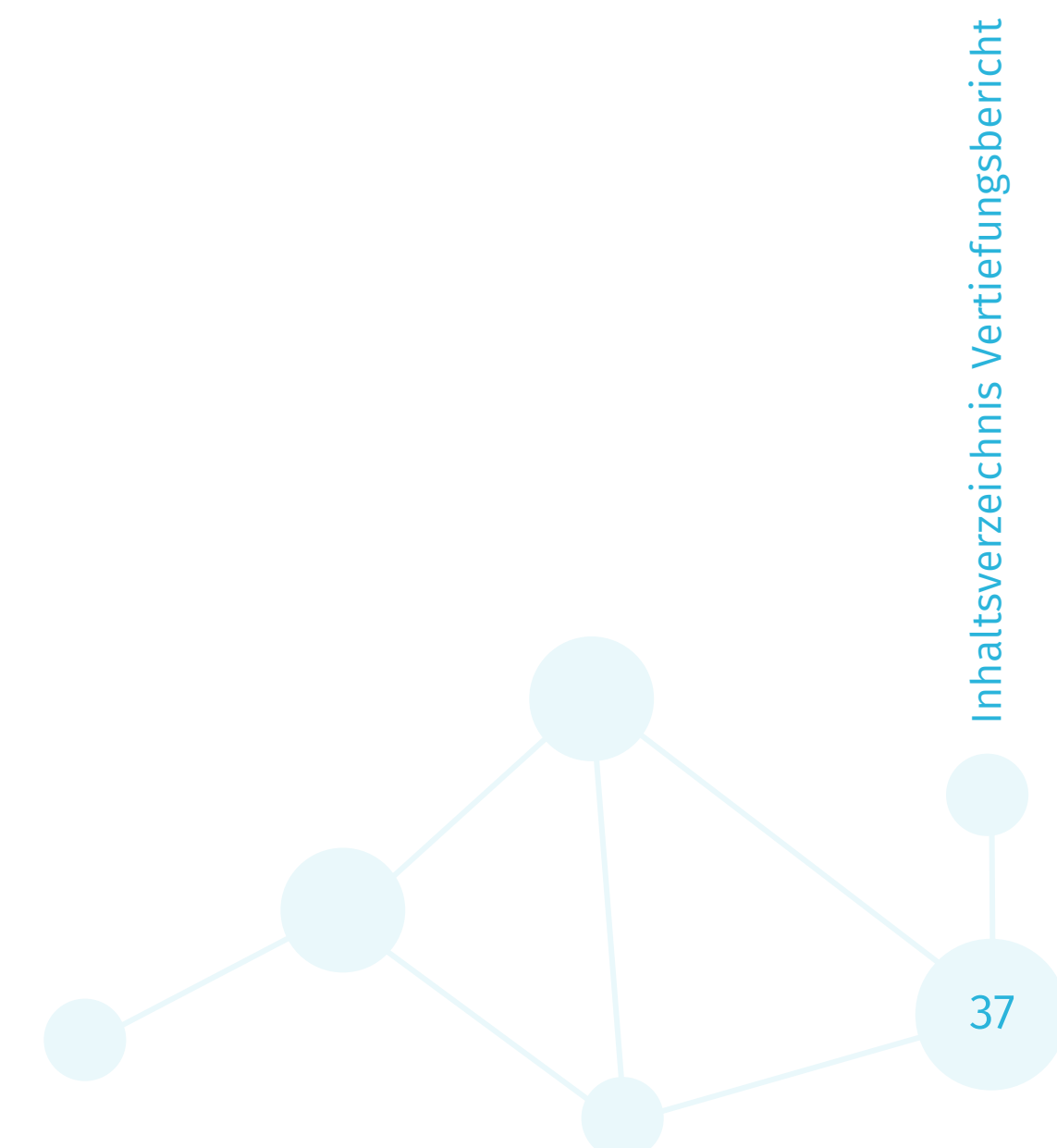
⁵ → www.umsicht.fraunhofer.de/de/ueber-fraunhofer-umsicht.html

⁶ → www.ict.fraunhofer.de/de/komp/ue/kr.html

⁷ → www.ipa.fraunhofer.de/de/ueber_uns/Leitthemen/kreislaufwirtschaft-und-klimaneutrale-Produktion/kreislaufwirtschaft.html

⁸ → www.isi.fraunhofer.de/de/themen/wertschoepfung/kreislaufwirtschaft.html

⁹ → www.ccpe.fraunhofer.de



2.2 WIRTSCHAFT

Tabelle 4 zeigt die Anzahl der Patente im Bereich regionale Kreislaufwirtschaft pro Land. China dominiert die Landschaft hier stark, die Niederlande stechen mit Philips als bedeutendem Einzelanmelder hervor, Deutschland steht an 4. Stelle. Eine weitere Auswertung erwies sich als nicht sinnvoll, da die Patente sich auf eine Vielzahl von Einzelpersonen verteilen und oft nur Randbereiche der Kreislaufwirtschaft betreffen.

LAND	PATENTE
China	2149
USA	161
Niederlande	115
Deutschland	89
Frankreich	58
Norwegen	45
Schweiz	39
Spanien	30
Italien	25
Vereinigtes Königreich	23
Taiwan	20

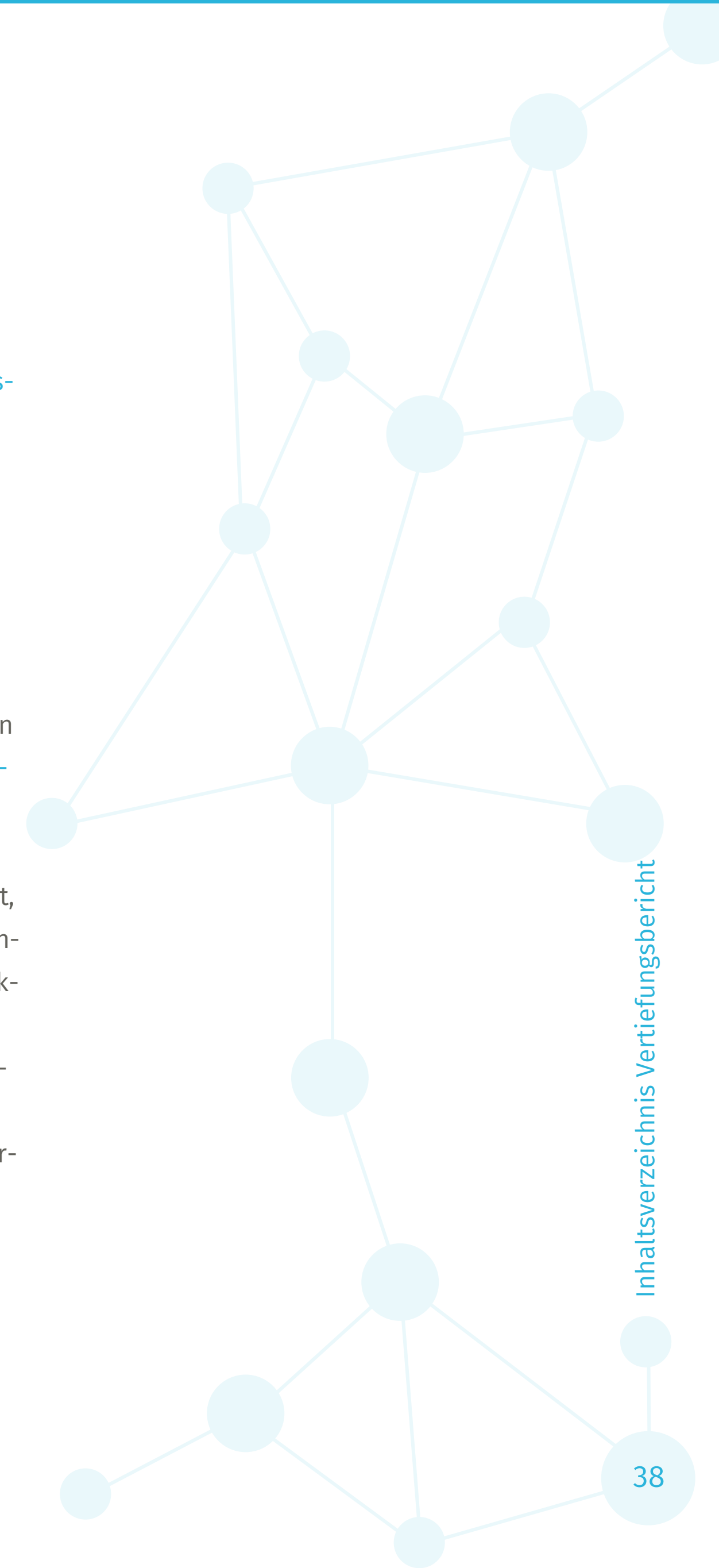
Tabelle 4: Anzahl der Patente regionale Kreislaufwirtschaft pro Land

In den Jahren 2020 und 2021 behandelten fast 200 Marktstudien das Thema „Circular Economy“. Besonders hervorzuheben sind:

- Frost & Sullivan. (2021, October 04). Global Waste Recycling and Circular Economy Outlook, 2021. → <https://store.frost.com/global-waste-recycling-and-circular-economy-outlook-2021.html>
- Frost & Sullivan. (2021, June 17). Transformative Mega Trends Driving the Circular Economy. → <https://store.frost.com/transformative-mega-trends-driving-the-circular-economy.html>

- Frost & Sullivan. (2019, May 30). How Sustainability Trends are Affecting the Global Plastics Industry, 2017–2026. → <https://store.frost.com/how-sustainability-trends-are-affecting-the-global-plastics-industry-2017-2026.html>
- Frost & Sullivan. (2021, March 31). Technology Advances Enabling Sustainability in Building and Construction Industry. → <https://store.frost.com/technology-advances-enabling-sustainability-in-building-and-construction-industry.html>
- Frost & Sullivan. (2021, March 03). Convergence and Collaboration to Usher Circular Economy in the Plastics and Composites Industry. → <https://store.frost.com/convergence-and-collaboration-to-usher-circular-economy-in-the-plastics-and-composites-industry.html>
- Frost & Sullivan. (2019, December 27). Emerging Alternatives for Single-use plastics in Packaging. → <https://store.frost.com/emerging-alternatives-for-single-use-plastics-in-packaging.html>

Ein starkes Wachstum wird vor allem in den Technologien der Kreislaufwirtschaft erwartet, wie automatisches Sortieren und Recycling insbesondere von Plastik. In den Marktsegmenten feste Siedlungsabfälle, Industrieabfälle, gefährliche Abfälle, Elektro- und Elektronik-Altgeräte, Bau- und Abbruchabfälle sowie Kunststoffverpackungsabfälle, welche von Abfall in wertvolle Ressourcen umgewandelt werden, lag der Umsatz im Jahr 2020 weltweit bei 457,14 Milliarden USD. Erwartet wird bis 2021 eine Wachstumsrate von 13,3%. Die Chancen für einen nachhaltigen Abfallrecyclingmarkt sehen die Marktstudien unterschiedlich je nach Region, wobei in Europa und Nordamerika ein hohes Niveau bei der Abfallsammlung, -sortierung, -wiederverwendung und -verwertung erwartet wird.



Zu den als wichtige Investitionsbereiche hervorgehobenen Top-Trends im Jahr 2021 gehören die KI-basierte intelligente Sortierung, neue Lösungen für das Recycling von Karton- und Papierverpackungsabfällen, die digitale Nachhaltigkeit von Lieferketten, Kreislaufwirtschaften für das Altölrecycling (verstärktes Recycling petroleumbasierter und synthetischer Öle sowie der Ölfilter), das Konzept der „Building as Material Banks“ (BAMB), chemisches Recycling von Kunststoffabfällen, Dekarbonisierung und Kreislaufwirtschaften für die Entsorgung von IT-Assets (IT Asset Disposal ITAD).

Als Technologietrends sehen die Studien im Bereich der Kreislaufwirtschaft vor allem die Herstellung von Nanotubes aus Kohlenstoff, der aus der Atmosphäre gewonnen wird, die Wiederaufbereitung von Altbatterien für Elektrofahrzeuge für Energiespeicheranwendungen und neue Hightech-Materialien, die eine selektive Abtrennung von Kohlendioxid ermöglichen und damit die Kosten für die Kohlenstoffabscheidung senken.

Die Marktstudie mit dem Titel „Technology Advances Enabling Sustainability in Building & Construction Industry“ konzentriert sich auf die Identifizierung und Analyse von Technologien, die die Nachhaltigkeit in der Bauindustrie verbessern können. Nach Schätzungen des Umweltprogramms der Vereinten Nationen entfallen derzeit 36% des weltweiten Energieverbrauchs auf das Baugewerbe und damit etwa 40% der weltweiten Kohlendioxidemissionen in die Atmosphäre. Daher wird hier ein besonders dringlicher Handlungsbedarf gesehen. Bei dieser Untersuchung stehen drei Schlüsseltechnologien im Mittelpunkt, nämlich:

1. Verringerung des gebundenen Kohlenstoffs durch den Einsatz nachhaltiger Baumaterialien.
2. Verbesserung der Energieeffizienz mit Hilfe von Netto-Nullenergiegebäuden und
3. Die Einbeziehung von biophilem Design (Schaffung von natürlichen und naturnahen Umgebungen).

¹⁰ → <https://mogu.bio>

¹¹ → www.hempitecture.com

¹² → www.geopolymertech.com

Folgende Unternehmen, die sich mit Kreislaufwirtschaft beschäftigen, werden in den Marktstudien explizit genannt:

Mogu, Italien entwickelt nachhaltige Baumaterialien, die auf Myzel, dem vegetativen Stadium von Pilzen, basieren. Das Unternehmen hat sich auf die Gewinnung von Materialien durch die Kultivierung ausgewählter Myzelstämme auf vorgefertigten Substraten spezialisiert, die aus landwirtschaftlichen Abfällen hergestellt werden. Die Materialien von Mogu können für Akustik- und Bodenbeläge verwendet werden und wurden auf Allergene und VOC-Emissionen getestet. Die Bodenbelagsprodukte wurden vom deutschen Blauen Engel für ihre Umweltfreundlichkeit zertifiziert.¹⁰

Hempitecture, US hat sich auf die Entwicklung von umweltfreundlichen Baumaterialien und kohlenstoffabsorbierenden Materialien spezialisiert, die synthetische und giftige Baumaterialien in der Bauindustrie vollständig ersetzen können. Die pflanzlichen Materialien des Unternehmens, bekannt als Hanfbeton und Hanfwolle, sind Dämm- und Baumaterialien, die völlig kohlenstoffnegativ und energieeffizient sind und auch die Luftqualität im Gebäude verbessern können. Hanfbeton ist ein hervorragender Bau- und Dämmstoff, der pro Tonne produzierten Hanfbetons 325 Kilogramm Kohlendioxid absorbieren kann und außerdem die hervorragende Fähigkeit besitzt, Feuchtigkeit zu speichern und sie bei optimalen Umweltbedingungen wieder abzugeben.¹¹

Geopolymer Solutions LLC, US hat sich auf die Herstellung von Geopolymerbeton unter Verwendung seiner patentrechtlich geschützten Kaltschmelzbeton-Technologie (CFC) spezialisiert. Bei diesem Verfahren werden industrielle Nebenprodukte wie inerte Flugasche aus Kohlekraftwerken, granuliertem Hochofenschlacke aus der Stahlherstellung und Natriummetasilikate verwendet.¹²



HempFlax Group B.V., Niederlande hat sich auf den großflächigen Anbau von Industriehanf spezialisiert, die für die Herstellung hochwertiger Baumaterialien verwendet werden können. Das Unternehmen entwickelt innovative Methoden, um Industriehanf mit weniger Wasser und ohne Pestizide anzubauen. Der angebaute Industriehanf ist eine ökologische Mehrzwecklösung, die auch in alltäglichen Anwendungen eingesetzt werden kann¹³ (vgl. auch Vertiefung Naturfaserverstärkte Verbund Werkstoffe).

Semmes & Co. Builders Inc., US ist ein grünes Bauunternehmen, das Pionierarbeit bei der Verwendung nachhaltiger Technologien in der Bauindustrie leistet. Das Unternehmen hat sich auf die Verwendung von Strohballen als umweltfreundliche Alternative zur Holzbauweise spezialisiert. Ziel des Unternehmens ist es, nachhaltiges Bauen zu fördern und den Schutz natürlicher Ressourcen zu unterstützen.¹⁴

Evocative Design, US konzentriert sich auf die Entwicklung alternativer, nachhaltiger und umweltverträglicher Materialien für verschiedene Anwendungen. Mit der Mycelium Foundry des Unternehmens entwickelt es neue Plattformen für verschiedene Anwendungen aus dem Mycelium, der Wurzelstruktur von Pilzen. Zu den Plattformen des Unternehmens gehören Atlast, Mycoflex und Mycocomposite.¹⁵

Kanpur Flower Cycling Pvt. Ltd. (Phool), Indien entwickelt eine fortschrittliche Version von Leder, genannt Fleather, das aus den enormen Mengen von Blumenabfällen hergestellt wird. Das Unternehmen kann vermeiden, dass große Mengen von Blumenabfällen und Pestiziden in den Fluss Ganga gekippt werden, und beschäftigt 1.200 Familien in ländlichen Gebieten.¹⁶

Pangaia, UK, welches 2018 in London gegründet wurde, beschäftigt sich mit Recyclingmaterial und Biomaterialien für textile Applikationen. Ihr Produkt Vegea, veganes Leder aus Trauben, entstand aus der Zusammenarbeit mit der Weinindustrie. Das Leder besteht zu 70% aus recycelten Abfällen und erneuerbaren Materialien. Das Besondere an Vegea ist, dass es kein Plastik enthält und sehr langlebig ist.¹⁷

¹³ → www.hempflax.com/en

¹⁴ → <https://semmesco.com>

¹⁵ → <https://ecovative.com>

¹⁶ → <https://phool.co>

Madreperla Spa, Italien, stellt als eine von wenigen Firmen recyceltes Acryl her. Die Marke der Firma namens GreenCast soll das derzeit einzige 100% recycelte Acrylglas der Welt sein. Seit 2011 ist es in Europa auf dem Markt und hat das Potenzial, sich einen großen Marktanteil im Bereich recyceltes Acryl zu sichern.¹⁸

Auch in Deutschland beschäftigen sich viele Unternehmen mit der Kreislaufwirtschaft und bieten entsprechende Produkte und Dienstleistungen an. Beispiele sind:

Die **VEKA AG**, aus Sendenhorst im Münsterland mit mehr als 6.000 Beschäftigten betreibt die europaweit größte und modernste Recyclinganlage für Fenster, Türen, Rollläden und Profilschnitte aus Kunststoff. Die Profilsysteme für Fenster, Türen und Rollläden der Weltmarktführerin sind in Wohnungen und Häusern fast überall auf der Welt eingebaut. Die Verwertung solcher Bauteile auf möglichst hohem Niveau ist eines der vielversprechendsten Ansätze der Kreislaufwirtschaft im Baubereich (Bendix et al. 2021).

Rudolf Group, mit Sitz in Geretsried, BY stellt Textilchemie durch das Upcycling von recycelten Einweg- und Einweg-Getränke-PET-Kunststoffflaschen her. Die zugehörige Marke heißt CYCLE-LOGIC®.¹⁹

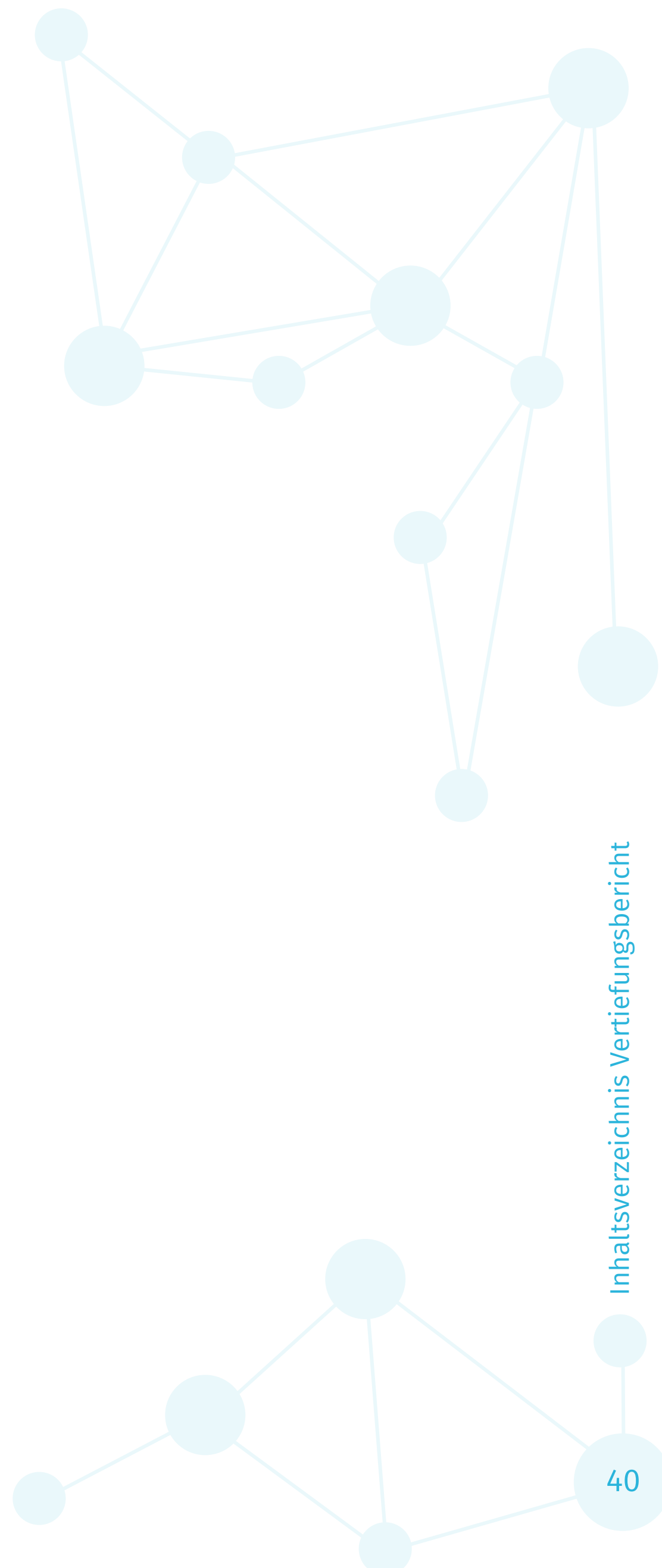
AmboFluor mit Sitz in Hamburg beschäftigt sich mit Fluor- und Hochleistungskunststoffen. Dabei bieten sie qualitativ hochwertige, virginale und recycelte Kunststoffgranulate, Pulver und Compounds von Markenherstellern an. Außerdem führen sie Amboflon-Farbkonzentrate zu allen angebotenen Materialien. All ihre Produkte recyceln sie selbst. Dazu übernehmen sie von ihren Kunden Wertstoffe aus ihrem Produktportfolio, führen sie dem Recyclingprozess zu und beliefern die Kund:innen anschließend mit den aufbereiteten, nahezu neuwertigen Regranulaten.²⁰

¹⁷ → <https://thepangaia.com/pages/leather-alternatives>

¹⁸ → www.madreperlaspa.com/UK/greencast.html

¹⁹ → www.rudolf.de/en/technology/cycle-logic

²⁰ → www.ambofluor.de



Mauser mit Sitz in Brühl, NRW, wurde 2018 von BWAY, MAUSER Group, National Container Group (NCG) und Industrial Container Services (ICS) gegründet. Durch ein globales Netzwerk von Herstellungs-, Wiederaufbereitungs- und Recyclinganlagen bieten sie hochwertige, nachhaltige Verpackungslösungen über den gesamten Verpackungslebenszyklus. So hat NCG im Jahr 2016 2,4 Millionen Kubikmeter wiederaufbereitetes Verpackungsvolumen dem Markt zurückgeführt. Die Kunden von ICS sparten beispielsweise 127.000 Tonnen Treibhausgase ein.²¹

ProTec Polymer Processing GmbH (Schoeller-Gruppe) mit Sitz in Bensheim, Hessen, hat ein „Bottle-to-Bottle“-Verfahren entwickelt, mit dem PET-Flaschenmahlgut zu rPET-Granulat umgewandelt wird. Durch abschließendes Nachkondensieren und Dekontaminieren des aufbereiteten Granulats im Taumelreaktor von ProTec entsteht wieder hochwertiges, für den Lebensmittelkontakt zugelassenes rPET.²²

Remondis mit Hauptsitz in Lünen, NRW, trägt als größtes deutsches Unternehmen für Recycling, Wasserwirtschaft sowie kommunale und industrielle Dienstleistungen maßgeblich zur Kreislaufwirtschaft bei. Remondis betreibt am Standort Lippewerk in Lünen Europas größtes Zentrum für industrielles Recycling nach dem Prinzip der zirkulären Wertschöpfung (Fecke et al. 2021, 85, ff.). Remondis produziert im Vergleich zu Primärrohstoffen wesentlich energie- und ressourcenschonendere Recyclingrohstoffe und setzt sich dafür ein, dass organische Reststoffe europaweit nicht mehr in Deponien gelagert, sondern stattdessen verwertet werden. Außerdem versucht Remondis Stoffkreisläufe durch den vermehrten branchenübergreifenden Einsatz von Reststoffen zu schließen, z.B. durch das von Remondis patentierte TetraPhos-Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen.

²¹ → <https://mauserpackaging.com>

²² → www.sp-protec.com/de/materialveredelung/pet-recycling

²³ → <https://rewindo.de>

²⁴ → www.krv.de

In einer aktuellen Studie für das Umweltbundesamt (Bendix et al. 2021) zu Potenzialen der Kreislaufwirtschaft im Baugewerbe werden folgende **Rücknahmesysteme** hervorgehoben:

Rewindo organisiert die Rücknahme und das Recycling von Fenstern, Rollläden und Türen aus PVC. Nach der Demontage wird das Material aufbereitet, regranuliert und wieder für die Verwendung in PVC-Profilen recycelt. Rewindo ist Teil der europäischen Selbstverpflichtung VinylPlus.²³

PreZero nimmt als Recycling-Unternehmen in Zusammenarbeit mit dem Kunststoffrohrverband e.V.²⁴ Kunststoffrohre zurück und recycelt diese. Verarbeitet werden die Kunststoffsorten PE, PP und PVC. Die Rezyklate werden teilweise wieder für den Einsatz in Kunststoffrohren verwendet. PreZero ist die Umweltsparte der Schwarz Gruppe aus Neckarsulm, zu der auch die Handelsunternehmen Kaufland und Lidl sowie die Schwarz Produktion gehören.

Die **Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling** organisiert die Rücknahme und das Recycling von Bodenbelägen aus PVC-P. Die Bodenbeläge werden gereinigt und werkstofflich recycelt.²⁵

Tarkett hat ein Programm namens ReStart etabliert, welches Teile seiner Produktpalette an Bodenbelägen als Gebrauchtware und Verlegeverschnitt zurücknimmt und recycelt diese zusammen mit Produktionsresten. Aus den Resten werden Rezyklate und Teppichrückseiten hergestellt.²⁶

Interface bietet Bodenbeläge aus verschiedenen Materialien an und nimmt diese auch zurück. Neben dem Rücknahmesystem und Recycling versucht Interface die Umweltauswirkung ihrer Produkte zu minimieren und arbeitete schon früh mit Innovationen wie klebstofffreier Installation oder der Verwendung von Recyclingmaterial.²⁷

²⁵ → <https://agpr.de>

²⁶ → https://boden.objekt.tarkett.de/de_DE/node/tarkett-restart-recycling-bodenbelag-10166

²⁷ → www.interface.com/EU/de-DE/homepage



2.3 POLITIK UND GESELLSCHAFT

Nationale Ebene

Die Kreislaufwirtschaft ist ein wichtiger Bestandteil der Strategien verschiedener Ministerien auf Bundes- und Landesebene. Eine Reihe von Gesetzen und Verordnungen, wie etwa die Pfandpflicht für Einweggetränkeflaschen aus Kunststoff, die Vorschrift von Mindestmengen für Rezyklateinsatz und das Verbot von Einwegplastik in vielen Bereichen, zielen in Richtung der Kreislaufwirtschaft.²⁸ Die gesetzlichen Regelungen werden von einer Reihe von Fördermaßnahmen flankiert:

- Das **Abfallvermeidungsprogramms** des Bundes „Wertschätzen statt Wegwerfen“²⁹
- Handlungsfeld „Kreislaufwirtschaft“ des Deutschen **Ressourceneffizienzprogramms**
- Forschung für Nachhaltige Entwicklung FONA 3 Schwerpunkte **Rohstoffeffizienz und Kreislaufwirtschaft**³⁰
- BMBF Förderprogramm „**Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft** – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe“ (ReMin) mit Schwerpunkt Ausbau der Kreislaufwirtschaft in der Bauwirtschaft und Schließung mineralischer Stoffkreisläufe.³¹
- Die Förderung der besseren Nutzung von Reststoffen und Abfallstoffen aus der Landwirtschaft durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe**.³²

- Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW): Joint Initiative on Circular Economy (JICE). Die größten nationalen Förderbanken und Institute der EU bringen gemeinsam mit der Europäischen Investitionsbank eine Initiative von 2019–2023 im Volumen von zehn Milliarden Euro auf den Weg, die den Übergang zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft beschleunigen soll. In Deutschland ist die KfW daran beteiligt. Ziel ist es, die Entwicklung und Durchführung von Kreislaufwirtschaftsprojekten und Programmen in der Europäischen Union (EU) zu fördern. Der Fokus liegt besonders auf Investitionen, die in den EU-Mitgliedstaaten durchgeführt werden und die Wende zur Kreislaufwirtschaft beschleunigen. Die Initiative zielt auf alle Stufen der Wertschöpfungskette sowie auf die Nutzungsdauer von Produkten und Dienstleistungen ab.³³
- Die Packmittelrücknahme Agrar – PAMIRA® – ist eine Initiative des Industrieverband Agrar³⁴ in Trägerschaft der CWFG – Chemie Wirtschaftsförderungs-GmbH³⁵, welche durch die RIGK³⁶ umgesetzt wird. PAMIRA® ist das Rücknahmesystem in Deutschland für Pflanzenschutzmittel- und Flüssigdüngerverpackungen. An bundesweit fast 400 Sammelstellen können Landwirte, Gartenbaubetriebe, Baumschulen und anderen professionellen Anwender ihre Verpackungen kostenlos abgeben. Dort werden sie an Recycling-Partner weitergeleitet. Über 90% der zurückgegebenen Verpackungen werden als Kunststoffprodukte für die europäische Kabelschutzrohrindustrie wiederverwendet. Die Kosten für das Sammeln, die Logistik und die Verwertung der Verpackungen tragen die Hersteller von Pflanzenschutzmitteln gemeinsam.³⁷
- ERDE – Erntekunststoffrecycling Deutschland: Im Rahmen der verschiedenen unter RIGK zusammengefassten Rücknahmesysteme organisiert das ERDE-Rücknahmesystem die Rücknahme von Kunststofffolien aus der Landwirtschaft. Die Folien werden regranuliert und als Kunststoffprodukte wiederverwendet.³⁸

²⁸ → www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/einwegplastik-wird-verboden-1763390

²⁹ → www.bmu.de/download/abfallvermeidungsprogramm-des-bundes-unter-beteiligung-der-laender-fortschreibung-wertschaetzen-statt-wegwerfen

³⁰ → www.fona.de/de/themen/rohstoffeffizienz.php

³¹ → www.pius-info.de/service/foerderung-und-beratung/foerderprogramme-bund

³² → www.fnr.de

³³ → www.eib.org/de/press/all/2019-191-eur-10-billion-to-support-the-circular-economy-in-the-eu

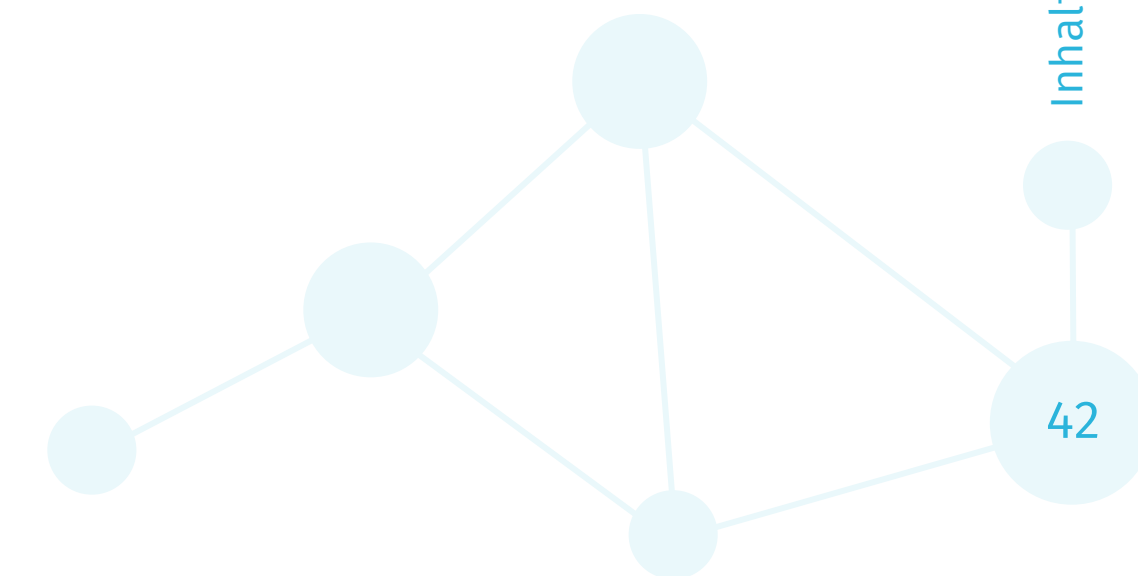
³⁴ → www.iva.de

³⁵ → www.ihre-chemie.de

³⁶ → www.rigk.de

³⁷ → www.pamira.de

³⁸ → www.erde-recycling.de



EU Ebene

Die Europäische Kommission hat den neuen Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (CEAP) im März 2020 verabschiedet. Er ist einer der wichtigsten Bausteine des Europäischen Green Deals, der neuen europäischen Agenda für nachhaltiges Wachstum. Der Aktionsplan zielt darauf ab, wie Produkte gestaltet werden, fördert die Kreislaufwirtschaft, ermutigt zu nachhaltigem Konsum und soll sicherstellen, dass Abfall vermieden wird und die verwendeten Ressourcen so lange wie möglich in der EU-Wirtschaft verbleiben. So beschloss die EU ein Verbot für Einweg-Plastikprodukte.³⁹ Zudem gilt seit dem 1. Januar 2021 ein EU-weites Exportverbot für schwer recycelbare Kunststoffabfälle, die vermischt oder verschmutzt sind.⁴⁰ Weitere Gesetzesinitiativen, darunter die Überarbeitung der Ökodesign-Richtlinie, sind vorgesehen.

Entsprechend existieren zahlreiche Förderprogramme darunter *Horizont Europa* und *LIFE Calls*:

- LIFE Calls 2021 – Unterprogramm: Kreislaufwirtschaft und Lebensqualität
Ziel ist es, den Übergang zu einer nachhaltigen, zirkulären, schadstofffreien, energieeffizienten und klimaresistenten Wirtschaft zu erleichtern und die Umwelt zu schützen, wiederherzustellen und zu verbessern – entweder durch direkte Interventionen oder indem die Integration dieser Ziele in andere Politiken unterstützt wird. Daher finanziert LIFE Projekte im Umweltsektor, insbesondere im Bereich der Kreislaufwirtschaft, einschließlich der Rückgewinnung von Ressourcen aus Abfall, Wasser, Luft, Lärm, Boden und Chemikalien. Das Unterprogramm stellt hauptsächlich Aktionszuschüsse für Projekte bereit, die innovative und bewährte Lösungen in diesen Bereichen umsetzen.⁴¹

- **Horizont Europa**
Im EU Forschungsförderprogramm Horizon Europe ist die Förderung der Kreislaufwirtschaft über viele Bereiche verteilt. Explizit findet sie sich in – Cluster 6 – Destination 3: „Circular Economy and Bioeconomy Sectors“. Der Cluster 4 (Digital, Industry and Space) befasst sich mit industriellen und technologischen Aspekten und der Rohstoffversorgung, einschließlich des Bauens mit einem geringeren ökologischen Fußabdruck durch Modularisierung, digitale Technologien, Kreislaufwirtschaft und neue Materialien.
- **Circular Bio-based Europe Joint Undertaking (CBE JU)⁴²**
Die Partnerschaft zwischen der Europäischen Union und dem Konsortium der biobasierten Industrie (BIC), die Projekte zur Förderung wettbewerbsfähiger biobasierter Kreislaufwirtschaft in Europa finanziert, ist mit 2 Milliarden Euro ausgestattet. Ziel der Partnerschaft ist es, wettbewerbsfähige kreislaforientierte biobasierte Industrien in Europa zu fördern und somit die Nachhaltigkeit und Kreislauffähigkeit von Produktions- und Verbrauchssystemen im Einklang mit dem Europäischen Green Deal zu erhöhen.



³⁹ → www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/einwegplastik-wird-verboden-1763390

⁴⁰ → www.bmu.de/pressemitteilung/europaeische-union-beschaenkt-export-von-plastikmuell

⁴¹ → www.eu-foerdermittel.eu/life-calls-2021-unterprogramm-kreislaufwirtschaft-und-lebensqualitaet

⁴² → www.nks-bio-umw.de/cluster6/partnerschaften/circular-bio-based-europe

Bundesland Nordrhein-Westfalen

- NRW hat den Thinktank IN4climate.NRW⁴³ ins Leben gerufen, der als Wissens-, Dialog- und Arbeitsplattform einen Raum bieten soll, um innovative Strategien für eine klimaneutrale und wettbewerbsfähige Industrie zu erarbeiten. Deswegen entwickelt IN4climate.NRW gemeinsam mit Expert:innen aus Industrie, Wissenschaft und Politik konkrete Maßnahmen für klimaneutrale Produktionsprozesse und Wertschöpfungsketten sowie für die nötigen Infrastrukturen und die politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen. Rund 40 Unternehmen und Verbände aus den Bereichen Stahl und Metalle, Chemie, Zement, Glas, Papier und Baustoffe sowie sechs Forschungseinrichtungen beteiligen sich an der Initiative.
- Das NRW Förderprogramm „Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) und Ressourceneffizienz“ stellt bis zu zehn Millionen Euro für den Ausbau der Kreislaufwirtschaft im Sinne einer Circular Economy und zur Steigerung der Ressourceneffizienz in produzierenden Unternehmen zur Verfügung. Damit sollen die Unternehmen auf Ihrem Weg zu einer zukunftsfähigen Wirtschaftsweise durch eine Förderung von Investitionen und von Beratungsdienstleistungen unterstützt werden.⁴⁴
- Sonderprogramm Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz – Das NRW-Umweltministerium stellt aufgrund der Covid-19 Pandemie 10 Millionen Euro bis Ende 2022 für die Unterstützung von Unternehmen bereit, um deren Geschäftsabläufe kreislauforientiert zu gestalten und neue Konzepte für die Produktgestaltung zu entwickeln. Durch die Aufstockung des Budgets für das Beratungsprogramm „Ressourceneffizienz NRW“ profitieren auch kleine und mittlere Unternehmen. Anteilig werden auch neuartige ressourceneffiziente Technologien bzw. Recyclingtechnologien, die erstmalig großtechnisch zur Anwendung kommen sollen mit bis zu 500 000 Euro bezuschusst.⁴⁵

⁴³ → www.energy4climate.nrw/industrie-produktion/in4climatenrw

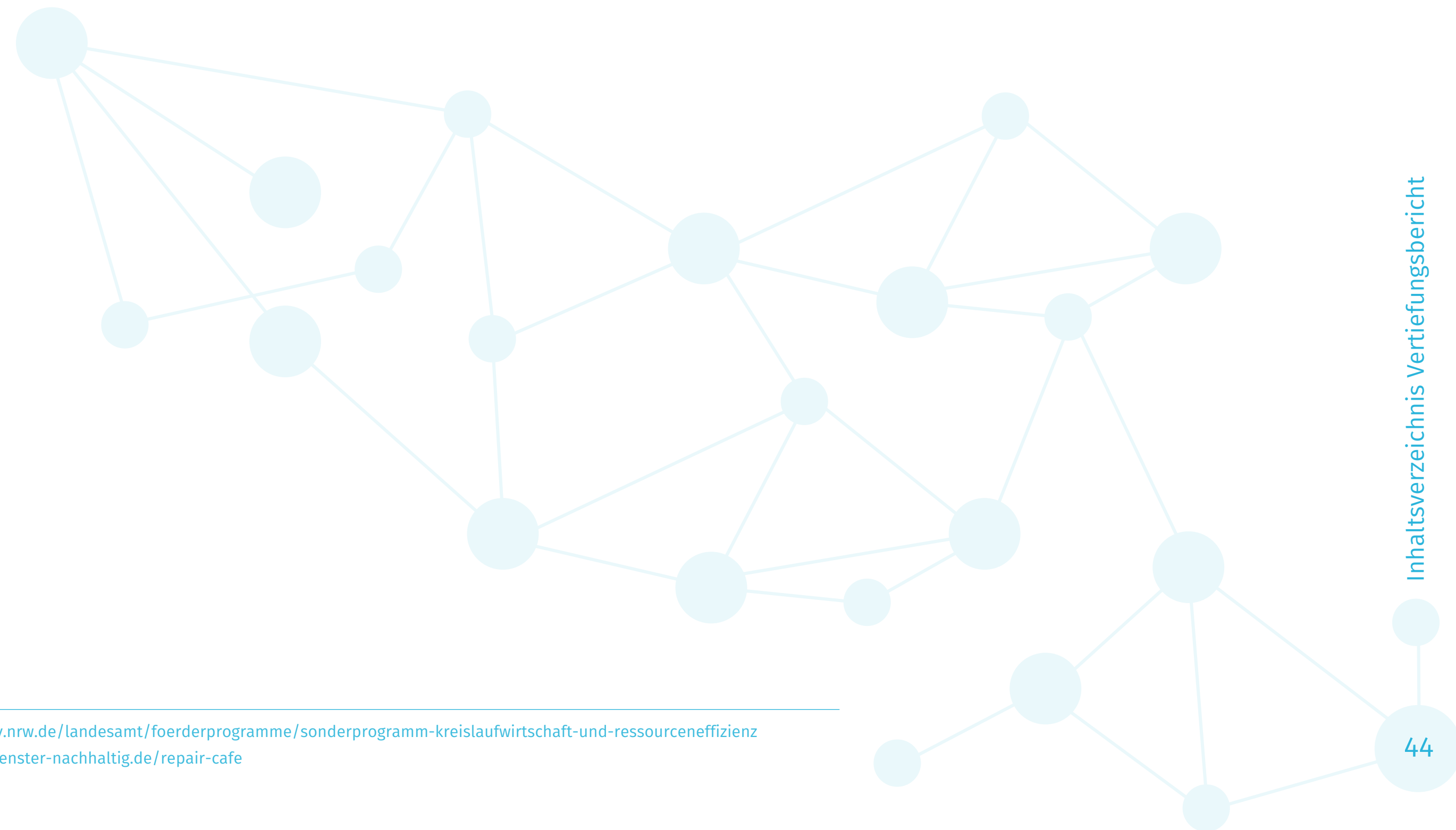
⁴⁴ → www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Land/NRW/kreislaufwirtschaft-ressourceneffizienz.html

Zivilgesellschaft

Die Etablierung der Kreislaufwirtschaft ist auf zivilgesellschaftliche Akteure angewiesen, da sie mit neuen Nutzungsweisen von Materialien und Produkten einhergeht wie etwa Lebensdauererlängerung durch Teilen und Tauschen (Jacob et al. 2021, S. 60) oder sogar insgesamt mit neuen weniger ressourcenintensiven Formen der Bedürfnisbefriedigung. Zahlreiche Bürger:innen engagieren sich in sehr vielfältigen Initiativen für die Kreislaufwirtschaft. Beispiele aus dem Raum Münster sind das Repair Café Münster⁴⁶, der Ernährungsrat Münster (AG Ressourcenschonung) sowie die zahlreichen öffentlichen Bücherschränke.

⁴⁵ → www.lanuv.nrw.de/landesamt/foerderprogramme/sonderprogramm-kreislaufwirtschaft-und-ressourceneffizienz

⁴⁶ → <http://muenster-nachhaltig.de/repair-cafe>



3 LEUCHTTURM-BEISPIELE

3.1 „INNOVATIONSRÄUME BIOÖKONOMIE“ – BIOBALL

Mit den „Innovationsräumen Bioökonomie“ unterstützt das Bundesministerium für Bildung und Forschung die Entwicklung im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie 2030“ bioökonomischer Innovationen als Treiber für eine nachhaltige, biobasierte Wirtschaft.

Einer der unter diesem Dach geförderten Innovationsräume ist der **Innovationsraum BioBall**. Ziel des Innovationsraums BioBall ist es, die stoffliche Nutzung von biogenen Rest- und Abfallstoffen innerhalb der Metropolregion Frankfurt/Rhein Main zu fördern.

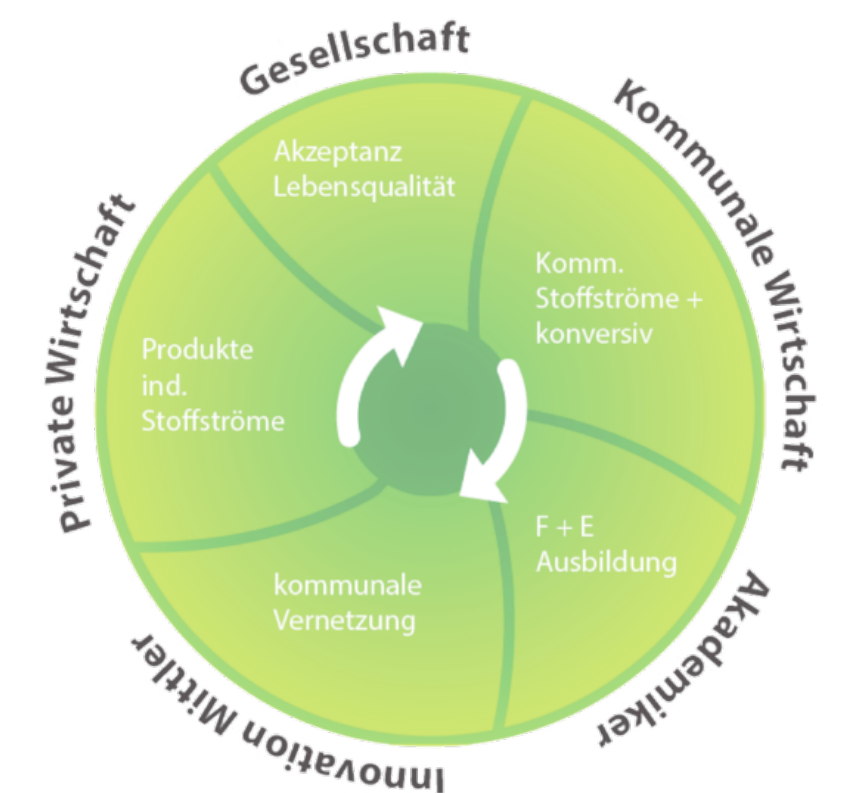
BioBall:

- greift alle Themen auf, die zu einer nachhaltigen Nutzung biologischer Ressourcen in der privaten und kommunalen Wirtschaft führen.
- initiiert naturwissenschaftlich/technologisch sowie gesellschaftsrelevante Forschung & Entwicklung & Innovation.
- verknüpft Wertschöpfungsketten und soll Kreisläufe schließen.
- bietet Aus- und Weiterbildung zur Bioökonomie an.

Aus dem Innovationsraum heraus entstanden bereits viele verschiedene Projekte. Zu nennen ist hier das Projekt INFeed, welches Veredelungsverfahren zur nachhaltigen Erzeugung von insektenbasiertem Tierfutter aus Lebensmittelresten entwickelt⁴⁷. Ein weiteres spannendes Projekt ist **GreenToGreen**, bei dem kommunaler Grünschnitt von Park- und Gartenabfällen zur nachhaltigen Erzeugung von Chemikalien und Futtermitteln genutzt werden soll^{48, 49}. Wenn der Grünschnitt als Rohstoff für die Produktion von Grund und Feinchemikalien eingesetzt werden kann, dann kann er neben der Verwendung in Biogasanlagen oder als Kompost auch innerhalb einer Bioraffinerie für vielfältige Einsatzmöglichkeiten erschlossen werden, da er im Vergleich zu stark verholzten Rohstoffen weniger energieintensiv aufgearbeitet werden kann. Somit könnten kommunale Stoffströme an die chemische Industrie angebunden werden.

Ein weiterer Fokus ist der Innovationsraum BIOTEXFUTURE⁵⁰, in dem die textile Wertschöpfungskette von erdölbasiert auf biobasiert umgestellt werden soll. Dazu wird etwa die Erschließung von Mikroalgen als Rohstoffbasis für Kunststofffilamente zur Herstellung nachhaltiger textiler Erzeugnisse untersucht.

→ https://biooekonomie-metropolregion.de/bioball/de/home_de.html



⁴⁷ → https://biooekonomie-metropolregion.de/bioball/de/innovations_de/infeed_de.html

⁴⁸ → https://biooekonomie-metropolregion.de/bioball/de/innovations_de/greentogreen_de.html

⁴⁹ → <https://biooekonomie.de/foerderung/foerderbeispiele/aus-abfaellen-werden-rohstoffe>

⁵⁰ → https://biooekonomie-metropolregion.de/bioball/de/about_de/innovationsraeume_de.html#_iraum_biotexfuture_de

3.2 REALLABOR ZIRKULÄRES WIRTSCHAFTEN IM URBANEN RAUM

In Berlin hat sich eine Gruppe von Initiativen zusammengeschlossen und das Haus der Materialisierung (HdM)⁵¹ eröffnet. Das HdM fungiert als Reallabor, um neue Strukturen der Verortung, Vernetzung und Kommunikation für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft im Kontext innovativer Stadtentwicklung zu erforschen, zu erproben und zu dokumentieren.

Im Rahmen dieses Vorhabens möchten die Projektpartner:innen interne und externe Kommunikationsstrukturen in einem Akteursnetzwerk für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft modellhaft für ausgewählte Aktivitäten im HdM entwickeln. Diese sollen mit digitalen Tools dazu beitragen, bestehende Defizite bezüglich der Transparenz von Menge, Qualität und Umweltbewertung der Materialwiederverwendung zu beheben. Damit soll ein Innovations- und Professionalisierungssprung aus der alltagspraktischen Zusammenarbeit hin zu selbsttragenden Geschäftsmodellen für zirkuläres Wirtschaften erreicht werden und somit die Wirkung, Akzeptanz und Langfristigkeit solcher Maßnahmen gesteigert werden.

Zur Erfassung von Quellen, Mengen, Qualitäten von Materialströmen und zur Förderung von Produktinnovationen und Identifizierung neuer Absatzmärkte wird ein digitales Inventar-tool entwickelt. Dieses hat die Aufgabe die Akquise und Vermarktung von Material zu unterstützen und gleichzeitig die Umweltbewertung der Aktivitäten zu ermöglichen. Der Demonstrationscharakter des Projektes wird durch die regelmäßigen Öffnungszeiten und offenen Führungen, sowie Veranstaltungen und praktische Workshops unterstützt.

→ <https://hausdermaterialisierung.org>

⁵¹ → <https://hausderstatistik.org>

3.3 WIEDERVERWENDUNG IN REGIONALEN NETZWERKEN: RECOM OSTWESTFALEN

Das Projekt RECOM (Recovery Ecological Management) ist in der Studie „Stoffkreisläufe und Stoffströme auf der regionalen und lokalen Ebene optimieren“ (Gsell und Dehoust 2019, S. 19) als herausragendes Praxisbeispiel für regionale Kreislaufwirtschaft beschrieben. Es wurde von dem Verein Arbeitskreis Recycling e.V., der sich bereits seit 1986 für die Wiederverwendung von Konsumgütern im Kreis Herford einsetzte, initiiert. Nach der Umsetzung in der Region Ostwestfalen-Lippe wurden auch in Frankfurt a.M., München, Mönchengladbach und Mittweida RECOM-Projekte initiiert. Mit dem konzeptionellen Ansatz Corporate Social Responsibility (CSR) wurden das gesellschaftliche Engagement, insbesondere privatwirtschaftlicher Unternehmen, für das Thema Wiederverwendung aktiviert und Kooperationen und regionale Netzwerke etabliert.

Durch RECOM wurden in der Region dauerhafte Partnerschaften zwischen sozialwirtschaftlichen Betrieben, gewerblich-privatwirtschaftlichen KMU und öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern (öRE) sowie Ämtern, Kammern, Umweltverbänden und Bürgerinnen und Bürgern geschlossen und damit die Ressourcenschonung durch regionale Wiederverwendung qualitativ und quantitativ verbessert. So wurden im Kreis Herford durch die „Recyclingbörse!“ fünf Sammelbörsen unterhalten, Sammelaktionstermine organisiert und damit die kreisweite Wiederverwendung gesichert. Das Möbelhaus Porta wurde als Kooperationspartner gewonnen und liefert seither Rücksendungen zur Wiederverwendung.

Das Projekt RECOM erzielte neben seiner ökologischen Wirkung (geringere Ressourceninanspruchnahme in der Region) auch ökonomische (z. B. Ersparnis von Entsorgungskosten für kooperierende Betriebe) und soziale Effekte (Beschäftigung und Qualifikation von Langzeitarbeitslosen, Bereitstellung von preisgünstigen Gebrauchsgütern). So entstanden Win-win-Kooperationen, die dauerhaft die Verwertungsströme von Konsumgütern in der Region optimieren können.

→ www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/181113_bro_difu_optimierung_a4_freie_wirtschaft_barrierefrei_final-klein.pdf (S. 19)

→ www.recyclingboerse.org/projekte/projektarchiv/recom



3.4 CIRCO-METHODE

CIRCO ist ein Workshop-Angebot aus den Niederlanden, das Unternehmen bei der Entwicklung und Gestaltung neuer, nachhaltiger Geschäftsmodelle im Sinne der Circular Economy unterstützt. Entwickelt wurde die Methode 2015 im Auftrag des niederländischen Umweltministeriums auf Basis der wissenschaftlichen Ergebnisse der TU Delft Studie „Products that last“. Unternehmen arbeiten gemeinsam mit Designern an der Entwicklung von Kreislaufprodukten, Dienstleistungen und Geschäftsmodellen. Die CIRCO-Methode besteht aus einer Kombination aus Informationsvermittlung durch die Trainer, selbstständiges Arbeiten mithilfe von Online Materialien und Design-Tools sowie durch den Austausch in der Gruppe. In einer Reihe von dreitägigen Workshops arbeiten Unternehmen, Designer:innen und Studierende zusammen, um einen Fahrplan für die Entwicklung von Unternehmen durch Kreislaufdesign zu erstellen. Die Workshop-Teilnehmenden werden auf eine Reise durch drei Phasen mitgenommen: Initiierung, Ideenfindung und Umsetzung. Für Designer:innen gibt es einen separaten eintägigen Kurs, in dem sie die ersten Schritte zur Neugestaltung eines Produkts ihrer Wahl in einer kreislauforientierten Weise unternehmen. Am Ende des Business-Tracks haben die Teilnehmenden einen klaren Vorschlag für ein Kreislaufwirtschaftskonzept, eine abschließende Machbarkeitsprüfung und einen Fahrplan für die Umsetzung. Durch den Austausch von Wissen und Inspiration werden wichtige Partnerschaften gebildet, um neue Produkte, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle zu entwickeln, die auf konkreten Herausforderungen basieren. Durch die Bereitstellung eines sicheren und kreativen Umfelds, in dem Unternehmen und Designer:innen Kreislaufwirtschaftsstrategien auf aktuelle, reale Fälle anwenden können, können sie die ersten Schritte zur Umsetzung ihrer Kreislaufwirtschaftsideen unternehmen.

Durch den Erfolg in den Niederlanden – 900 Betriebe mit 500 Designer:innen nutzten sie bereits – fand im Februar 2021 die erste CIRCO-Workshopreihe in Zusammenarbeit mit der Effizienz-Agentur NRW in Nordrhein-Westfalen statt. An den fünf Online-Workshops nahmen Mitarbeitende aus acht Unternehmen teil und konnten dort mit einem Pitch für die von den Teilnehmenden entwickelten Geschäftsmodelle im Plenum und jeweils individuellen Maßnahmenplänen für die nächsten Schritte in Richtung Circular Economy gehen. Die Effizienz-Agentur NRW plant weitere Workshop-Reihen nach der CIRCO-Methode.

→ <https://www.ressourceneffizienz.de/aktuelles-terminen/detailansicht-alle/erfolgreicher-pilot-des-niederlaendischen-workshop-konzepts-circo-in-nrw-1>



3.5 INKA – INTERMEDIATE AUS INDUSTRIELLEM KAFFEESATZ⁵²

Bei der Herstellung von Kaffee entsteht viel Reststoff – nämlich nasser Kaffeesatz – der aufgrund schneller Schimmelbildung aus Privathaushalten kaum sammelbar ist und als Reststoff bisher ausschließlich thermisch verwertet wird. Allein in der EU entstehen durch Kaffeesatz eine Millionen Tonnen Reststoffe pro Jahr. Im Projekt INKA des Fraunhofer-Instituts UMSICHT in der Abteilung zirkuläre und biobasierte Kunststoffe, werden unterschiedliche Verwertungsmöglichkeiten für Kaffeesatz aus der Gastronomie und dem Gewerbe entwickelt und bewertet. Gefördert wird das Projekt durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung mit einer Laufzeit von Mai 2019 bis Mai 2022.

Am Ende soll ein industrienaher Ansatz zur Überführung kommerziell anfallenden Kaffeesatzes in hochwertige Intermediate das Ergebnis sein. Die Intermediate sollen nicht nur als Rohstoff für biobasierte Produkte dienen, sondern auch zu bisher nicht erreichbaren Eigenschaftsverbesserungen der Endprodukte führen oder andere, wenig verfügbare Rohstoffe ersetzen.

Neben Intermediaten, die als Monomer weiterverarbeitet werden, können aus dem Kaffeesatz weitere sekundäre Wertstoffe gewonnen werden; darunter Glycerin, Polysaccharide, Aromastoffe und diverse Mineralien. Der entölte Kaffeesatz wird auf seine Eignung zur Papier- und Kartonherstellung geprüft. Mit im Boot sitzt daher auch der Projektpartner BellePapier GmbH. Anhand von Stoffstromanalysen der verfahrenstechnischen Konzepte wird eine Kostenabschätzung für die Intermediate bzw. deren Produkte erstellt. Eine besondere Herausforderung ist dabei das Scale-up der Verfahrensschritte vom Labor zur industriellen Fertigung.

→ <https://biooekonomie.de/nachrichten/neues-aus-der-biooekonomie/kaffeesatz-als-rohstoffquelle>

⁵² → www.umsicht.fraunhofer.de/de/projekte/inka-kaffeesatz-als-rohstoff.html

3.6 STRAMENTO BIOGAS AUS STROH

Das Ziel von „Stramento“⁵³ (lat. aus Stroh gemacht) ist es, durch einen innovativen Biogasprozess eine integrierte Energie- und Nährstoffnutzung lignozellulosereicher landwirtschaftlicher Reststoffe zu erreichen und somit neben der Bereitstellung von Biogas und Gärrestsubstraten nachhaltig Treibhausgas- und Nährstoffemissionen zu reduzieren sowie Bodenfunktionen zu verbessern. Das Projekt wird in enger Zusammenarbeit von den Projektpartnern Herbst Umwelttechnik GmbH (HUT) und der Technischen Universität Berlin (Fachgebiet Kreislaufwirtschaft und Recycling-technologie) (TUB) durchgeführt.

Auf Basis des zum Patent angemeldeten Verfahrens zur Vergärung von Reisstroh soll im Rahmen dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhabens ein Verfahren entwickelt werden, mit dem sich auch heimisches Getreidestroh in Biogas umsetzen lässt. Kern des Projektes ist die Errichtung und der Betrieb einer Pilotanlage, welche als Hauptsubstrat Getreidestroh verwendet.

Ein stationärer Betrieb über 14 Monate soll die Effizienz der Anlage mit anderen Herangehensweisen, gemäß dem Methodenhandbuch „Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagasemissionen“, ermitteln. Weiterhin werden verschiedene Optionen mit gängigen Methoden der Gärrestbehandlung und Veredlung bezüglich Energiebedarf, Emissionen und Produktqualität untersucht. Neben der reinen Verfahrensentwicklung findet eine umfangreiche Begleitforschung statt, mit der eine schnelle und nachhaltige Markteinführung forciert wird. Daten zu Eigenschaften und Potenzialen von Getreidestroh und anderen lignozellulosereichen Biomassen sowie potenziellen Co-Substraten werden für eine Modelregion quantifiziert und allgemein zugänglich gemacht. Den Beitrag des Verfahrens zum Klimaschutz und Reduktion von Nährstoffüberschüssen in der Landwirtschaft wird quantitativ erfasst. Für die weitere Markteinführung des Verfahrens wird ein Anlagenkonzept mit standardisierten Modulen entwickelt. Weiterhin hat das Verfahren hohe Potenziale auch für weitere lignozellulosereiche landwirtschaftliche Reststoffe angewandt zu werden.

→ www.herbstumwelt.com/stramento-blog

⁵³ → www.circulareconomy.tu-berlin.de/index.php?id=216800



3.7 RECYCLING FIRMA FEESS UND KOMMUNE KIRCHHEIM: PIONIERE BAUSTOFFRECYCLING

Im Sinne der Kreislaufwirtschaft muss es das Ziel sein, einen möglichst großen Teil mineralischer Bauabfälle wiederaufzubereiten. Die Firma Feess in Kirchheim/Teck⁵⁴ mit 200 Mitarbeiter:innen und dem Kerngeschäft Erdbau, Abbruch und Recycling ist ein Pionier in diesem Bereich und wurde dafür auch schon mehrfach ausgezeichnet – unter anderem mit dem deutschen Umweltpreis 2016. Feess wendet das Prinzip der Kreislaufwirtschaft an, indem mineralische Bauabfälle direkt am Ort der Baustelle wiederaufbereitet werden (Fromm 2020a). Dazu werden mobile Brecher- und Siebanlagen eingesetzt. So werden wertvolle Ressourcen, Deponievolumen und viele LKW-Kilometer gegenüber dem klassischen Entsorgungsweg gespart. In den Recycling-Parks der Firma werden aus Beton, Asphalt, Aushub und Bauschutt neue Baustoffe gewonnen. Dazu werden die Ausgangsmaterialien gesiebt, sortiert und zerkleinert und daraus bis zu 40 Qualitäts-RC-Baustoffe hergestellt. Für die Aufbereitung des Bauschutts hat Feess auf seinem Gelände Zisternen mit 2,8 Millionen Litern Fassungsvermögen angelegt, um das Regenwasser von der asphaltierten Fläche zu sammeln. Auf der Nassklassieranlage werden kiesig-sandiger Erdaushub und Bauschutt mittels Regenwasser gereinigt und refraktioniert in Sand, Kiesel und andere Materialien, die anschließend sortenrein bis zum Wiederverkauf in großen Boxen auf dem Gelände lagern. Hinzu kommen Brecher, Rüttler, Mahlwerke, Siebe und andere Maschinen, die Feess kauft und teilweise von einem Subunternehmer so umbauen lässt, dass sie den Schutt zu den am Markt gefragten Fraktionen wie Sand oder Schotter unterschiedlichster Körnungen und Gewichte aufbereiten. Seine neue Siebanlage für Splitt ging im Juni 2019 in Betrieb. Bis zu 500 Tonnen Steine pro Tag aus dem Umkreis von 20 Kilometern kann die neue Anlage in fünf Fraktionen von 2 bis 32 Millimeter sortieren. So können auch sehr kleine Körnungen wie Hartgesteinssplitt aus dem wertvolleren Gleisschotter behandelt werden. Wenn dieser gewaschen, gebrochen und gesiebt ist, liegt die Recyclingquote bei 98%. Dieses Material aus Granit und Basalt ist etwa als Untergrund für den öffentlichen Parkraum vorgeschrieben.

Ein innovatives Produkt sind z.B. die „Öko-Stones“ – ökologische Betonblöcke aus 100% RC-Zuschlagstoffen. Weiterhin wird recyklierte Gesteinskörnung für R-Beton hergestellt. Bezogen auf das Ausgangsmaterial wird durchschnittlich eine Recyclingquote von bis zu 80% erreicht. Unterstützt wird Feess von der Stadt Kirchheim unter Teck. Diese schreibt bei kommunalen Bauvorhaben bereits Recycling-Beton vor, weswegen mehrere Projekte im Ort schon realisiert werden konnten – unter anderem ein Schulbau in dem 6.000 Kubikmeter Recycling-Beton für hochwertige Sichtbeton Flächen verbaut wurden (Fromm 2020b).

Zur Firma Feess gehört auch das K3 Kompetenzzentrum Kreislaufwirtschaft⁵⁵. Es soll als Ort des Lernens dienen und einen Raum für Information und Austausch schaffen. Dadurch soll der Dialog zwischen Wissenschaft und Gesellschaft gefördert werden. Als eine der ersten Plattformen im Baubereich werden die Themen Recycling und Kreislaufwirtschaft behandelt.

→ www.dabonline.de/2020/02/18/bauschutt-recycling-feess-kirchheim-beton-wiederverwertung-ziegel

⁵⁴ → www.feess.de/startseite.html

⁵⁵ → <https://k3.feess.de/>



3.8 AUTOMATISIERTES RECYCLING VON E-AUTO-BATTERIEN

2020 brachen die E-Autos einen neuen Rekord: 10,9 Millionen zugelassene E-Autos weltweit. Auch in Deutschland sind immer mehr E-Autos auf den Straßen zu sehen. Die Lithium-Ionen-Batterien darin sollen nach 10–15 Jahren entsorgt werden. Aktuell liegt dies in Europa noch im Bereich der Kilotonnen, aber ab 2040 sollen die zu recycelten Lithium-Ionen-Batterien im Megatonnenbereich liegen. Dabei ist die Beseitigung von Fahrzeug- und Industrie-Alt-Batterien durch Verbrennung oder Deponierung durch das Batteriegesetz untersagt. Eine kostenfreie Rückgabemöglichkeit muss vom Hersteller der E-Autos garantiert werden. Dazu gehört auch sicherzustellen, dass alle zurückgenommenen Alt-Batterien nach dem Stand der Technik behandelt und verwertet werden. Das Recycling von Fahrzeugbatterien gilt als technisch machbar und schon heute können besonders gut Kobalt und Nickel aus den Batterien herausgeholt werden, aber für weitere Stoffe wie Lithium, Graphit oder Mangan gibt es noch keine Lösungen (Thielmann et al. 2020).

Im Folgenden werden Firmen und aktuelle Forschungsstände dargestellt:

Umicore aus Belgien betreibt in Hanau eine der größten Recyclinganlagen für E-Auto-Batterien in Deutschland. Dazu hat die Firma ein globales Netzwerk von Abgabestellen eingerichtet, indem Hersteller und Kund:innen ihre Batterien entsorgen können.

Erlos aus Düsseldorf recycelt Autobatterien und bietet mobile Wiederaufbereitungsanlagen an, um teure Gefahrguttransporte zu vermeiden.

Roth International hat in Wernberg-Köblitz eine Anlage, in der Batterien automatisiert zerlegt werden können. Dieses Pilotprojekt soll ausgebaut werden, um ab diesem Jahr 1,5 Tonnen Kobalt und Nickel in der Stunde zu verarbeiten. Durch die hohe Nachfrage ist eine weitere Recycling-Anlage in Planung, die 99% der Batterien wiederverwenden soll.

N-Ergie hat 2019 in Wendelstein eine Anlage in Betrieb genommen, die den Energieinhalt von 70 bis 80% der ausgemusterten E-Auto-Batterien für private Haushalte oder in der Industrie als Großspeicher wiederverwendet, denn gleichzeitig wächst auch das Angebot aus Strom an Sonnenenergie, welche nicht gespeichert werden kann.

Audi und **ENBW** versuchen in einer Kooperation, gebrauchte Elektroauto-Batterien als Energiespeicher in der Nähe von Windrädern und Photovoltaik-Anlagen aufzustellen, um überschüssige Energie zu speichern. Im EnBW-Heizkraftwerk in Heilbronn wurde 2020 ein Referenzspeicher errichtet, um verschiedene Anwendungsszenarien zu testen. Das Referenzprojekt soll anschließend als Vorbild für weitere Anlagen im kommerziellen Betrieb dienen.

Das **Institut für Infrastruktur – Wasser – Ressourcen – Umwelt IWARU** an der FH Münster arbeitet mit der Hochschule RWTH Aachen zusammen an einem Konzept für ein Recycling-Zentrum mit dem Ziel einer vollständigen Kreislaufschließung für den Gesamtstoffstrom Batterien. Gefördert werden sie dabei vom Land Nordrhein-Westfalen. Das IWARU arbeitet auch am Projekt „DemoSens“ mit dem Ziel, Digitalisierungs- und Automatisierungsprozesse beim Demontieren von Akku-Packs weiterzuentwickeln. Die automatische Sortierung und Kennzeichnung würde Arbeitsprozesse erleichtern und effizienter machen. Gefördert wird das Projekt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Das dritte Projekt der IWARU heißt „Aurrelia“ und beschäftigt sich mit der Rückgewinnung von LIB-Bauteilen. Im Rahmen des Projektes untersuchen die Wissenschaftler des IWARU, wie sich die Bestandteile „im nassen Milieu“ zerkleinern lassen. Der sogenannte Nassschredder-Prozess soll die bisherigen thermischen Vorbehandlungsschritte ersetzen. Auch dieses Projekt wird vom BMBF gefördert.

→ www.fh-muenster.de/hochschule/aktuelles/pressemitteilungen.php?madid=7934



3.9 REGIONALES PHOSPHOR-RECYCLING (RePhoR)⁵⁶

Phosphate sind wichtige Nährstoffe in der Landwirtschaft, die Vorkommen sind jedoch endlich und in wenigen Ländern konzentriert. Gleichzeitig stellen die hohen vom Menschen verursachten Phosphoreinträge in die Umwelt ein Risiko für Seen und Meere dar, denn kippen Gewässer infolge der Überdüngung, hat das schwerwiegende Folgen für die Biodiversität und die Wasserqualität (Jacob et al. 2021, S. 68). Recycling von Klärschlamm kann damit maßgeblich zu Umweltschutz und Versorgungssicherheit beitragen.

Ziel der von Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Maßnahme Regionales Phosphor-Recycling (RePhoR) ist es, durch innovative wirtschaftliche Lösungen zum regionalen P-Recycling einen Beitrag zur Umsetzung der neuen Klärschlammverordnung zu leisten. Durch die daraus resultierende verstärkte Nutzung von Sekundärphosphor aus der Kreislaufwirtschaft sollen der Verlust von Phosphor und die Abhängigkeit Deutschlands von Phosphorimporten maßgeblich verringert werden. Zu diesem Zweck werden verschiedene Technologien zur P-Rückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm oder Klärschlammverbrennungssasche großtechnisch umgesetzt und somit wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse und praktische Erfahrungen unter realen Bedingungen gesammelt. Für die lokal anfallenden Klärschlämme werden innovative regionale Verwertungskonzepte entwickelt. Es werden darüber hinaus ganzheitliche Konzepte entwickelt und realisiert, die die Lücke zwischen P-Rückgewinnung und P-Recycling schließen und damit den rückgewonnenen Phosphor über die Landwirtschaft in den Nährstoffkreislauf oder als Rohstoff in die Industrie zurückführen. Sie sollen als Vorbild für andere Regionen mit vergleichbaren Bedingungen dienen.

Innerhalb der BMBF-Fördermaßnahme RePhoR werden innovative regionale Lösungen zum P-Recycling und zur Klärschlammverwertung unter Beachtung der veränderten rechtlichen Rahmenbedingungen entwickelt und umgesetzt. Dabei wird besonderer Wert auf einen regionalen Ansatz gelegt. Hierbei sind insbesondere die örtlichen Gegebenheiten und Infrastrukturen der Abwasserreinigung und Klärschlammverwertung sowie

möglichst kurze Transportwege zu berücksichtigen. Es soll die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet werden, um den rückgewonnenen Phosphor über die Landwirtschaft in den Nährstoffkreislauf oder als Rohstoff in die Industrie zurückzuführen (gegebenenfalls unter Etablierung neuartiger Organisations- und Geschäftsmodelle). Dabei soll darauf geachtet werden, dass alle regional relevanten Agierenden aus Wirtschaft, Wissenschaft, Verwaltung und Gesellschaft von Anfang an mit eingebunden werden (z.B. potenzielle Nutzende der P-Rezyklate oder Genehmigungsbehörden). Für die in der Region anfallenden Klärschlämme sind neuartige Verwertungskonzepte aufzuzeigen.

Gefördert werden sieben Verbundprojekte⁵⁷ darunter zwei in der Nähe des Münsterlandes:

AMPHORE (Bottrop)⁵⁸ Regionales Klärschlamm- und Aschen-Management zum Phosphorrecycling für einen Ballungsraum.

SATELLITE (Hildesheim, Pattensen, Landkreis Nienburg, Göttingen)⁵⁹ Verfahrenstechniken im Haupt- und Satellitenbetrieb eines interkommunalen Recyclingzentrums für ein optimiertes regionales Nährstoffrecycling.

Insbesondere SATELLITE mit seinem Fokus auf die Koordination vieler regionaler Entsorgungszentren im ländlichen Raum kann für das Münsterland interessante Anregungen für die regionale Kreislaufwirtschaft geben.

⁵⁶ → www.bmbf-rephor.de

⁵⁷ → www.bmbf-rephor.de/verbundprojekte

⁵⁸ → www.bmbf-rephor.de/verbundprojekte/amphore

⁵⁹ → www.bmbf-rephor.de/verbundprojekte/satellite



3.10 WASTE-TO-RESOURCE-UNIT: BIO-REAKTOR IM CONTAINER

In Städten fallen erhebliche Mengen von Lebensmittelabfällen an. Allein in Berlin sind es täglich etwa 1.500 Tonnen. Diese werden derzeit üblicherweise biologisch behandelt. Hierbei handelt es sich zwar um ein bewährtes Verfahren zur Nutzung organischer Abfälle; jedoch können aus den Lebensmittelabfällen keine hochwertigen Komponenten gewonnen werden, die sich direkt in der Lebensmittelproduktion einsetzen lassen. Hinzu kommt, dass die derzeitige Ver- und Entsorgungsinfrastruktur Konsumgüter unter hohem Ressourcenaufwand produziert, über weite Strecken transportiert und sich organische Verbindungen am Ort des Konsums anreichern.

Um das Potenzial von organischen Reststoffen bestmöglich auszuschöpfen, haben Boje Müller vom Fraunhofer IME in Münster, in Zusammenarbeit mit den Universitäten Münster, Lüneburg, Bonn, Mitarbeiter:innen der inter 3 GmbH und dem Deutschen Institut für Lebensmitteltechnik (DIL) e.V., die Waste-to-Resource-Unit entwickelt (Laibach et al. 2021). Die „Waste-to-Resource-Unit“ soll die Umwandlung von organischen Reststoffen in hochwertige Rohstoffe ermöglichen. Die in Kantinen oder anderen Einrichtungen platzierte Bio-Raffinerie hygienisiert gemischte Lebensmittelabfälle wie bspw. Obst- und Gemüschalen oder tierische Produkte und extrahiert einzelne Bestandteile wie z.B. Stickstoff- und Kohlenstoffverbindungen. Diese dienen zur Kultivierung gesundheitlich unbedenklicher und proteinreicher Mikroalgen im Inneren eines Bio-Reaktors, dem Herz der Bio-Raffinerie. So sind Algen u.a. in weiten Teilen Asiens bereits fester Bestandteil einer pflanzenbasierten Ernährung. Je nach Zusammensetzung der Lebensmittelabfälle ist z.B. auch die Gewinnung von Pigmenten, Vitaminen, Antioxidantien u.v. m. mittels moderner Technologien für die Lebensmittelproduktion und darüber hinaus möglich. Die Waste-to-Resource-Unit arbeitet hierbei automatisiert, kann dank ihrer Container-Bauweise modular zusammengesetzt werden und ist somit mobil und flexibel einsetzbar. Die Rohstoffeffizienz und Kreislaufwirtschaft in Städten kann so gesteigert und die Umweltbelastung gesenkt werden. Lebensmittelabfälle werden auf diese Weise gleich am Entstehungsort sinnvoll weiterverarbeitet und leisten so einen Beitrag zur lokalen

Wertschöpfung. Neben der Nutzung lokaler Stoffströme und Schaffung einer Kreislaufwirtschaft würden hiermit auch Entsorgungsinfrastruktur und Transport gespart sowie hochwertige Arbeitsplätze und Geschäftsmöglichkeiten im städtischen Umfeld geschaffen.

Die Waste-to-Resource-Unit könnte erfolgreich den Kreislauf zwischen Lebensmittelabfällen, wie sie in großen Mengen im städtischen Umfeld vorkommen, und der Lebensmittelproduktion, die zumeist fernab der Städte stattfindet, schließen. Sie ermöglicht eine hochwertige Verwertung von Nahrungsmittelresten und reduziert Transportwege auf ein Minimum. Diese innovative Lösung wurde von der Jury des Deutschen Nachhaltigkeitspreis Forschung in 2021 unter die Top-3-Nominierungen für die beste Idee zur urbanen Bioökonomie gewählt.

→ www.inter3.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Pressemitteilungen/Pressemappe_WasteToResourceUnit_final.pdf



4 AUSBLICK MÜNSTERLAND

Die Denkfabrik Münsterland hat sich zum Ziel gesetzt, das Münsterland zu einem Vorreiter der regionalen Kreislaufwirtschaft zu machen. Die Vertiefungsarbeiten haben gezeigt, dass dazu bereits eine Reihe von sehr vielversprechenden Anknüpfungspunkten vorhanden sind.

Insbesondere bei der **Schließung von Stoffkreisläufen in der Bauwirtschaft** sind einige Vorreiter im Münsterland aktiv, wie etwa die Firma VEKA mit ihrem avancierten Recycling und Rücknahmekonzept und die Recyclingunternehmen Remondis und ALTEX. Firmen wie Klostermann, Büscher und Huesker experimentieren mit avancierten Konzepten von Rücknahme und Recycling. Das Potenzial für positive Beiträge zu Umwelt- und Klimaschutz ist hier wegen der großen Mengen von Stoffströmen besonders hoch.

Ein weiteres für das Münsterland attraktives Handlungsfeld ist die **Kreislaufführung von biogenen Rest- und Abfallstoffen**. Einerseits kann hier die hohe Zahl von Park- und Grünflächen einen Ausgangspunkt für Projekte wie GreenToGreen (BioBall) oder Stramento bilden, in denen biogene Abfallstoffe in der grünen Chemie genutzt werden. Des Weiteren ist aber auch die Verwertung von Nahrungsmittelabfällen, wie sie die „Waste-to-Resource-Unit“ und das INKA Projekt realisieren, ein vielversprechender Startpunkt für das Münsterland. Hier könnten auch die Großkonzerne im Lebensmittelbereich wie apetito in Rheine und Iglo in Reken, die im Münsterland einen Teil ihres Gemüses anbauen, ernten und verarbeiten, einbezogen werden.

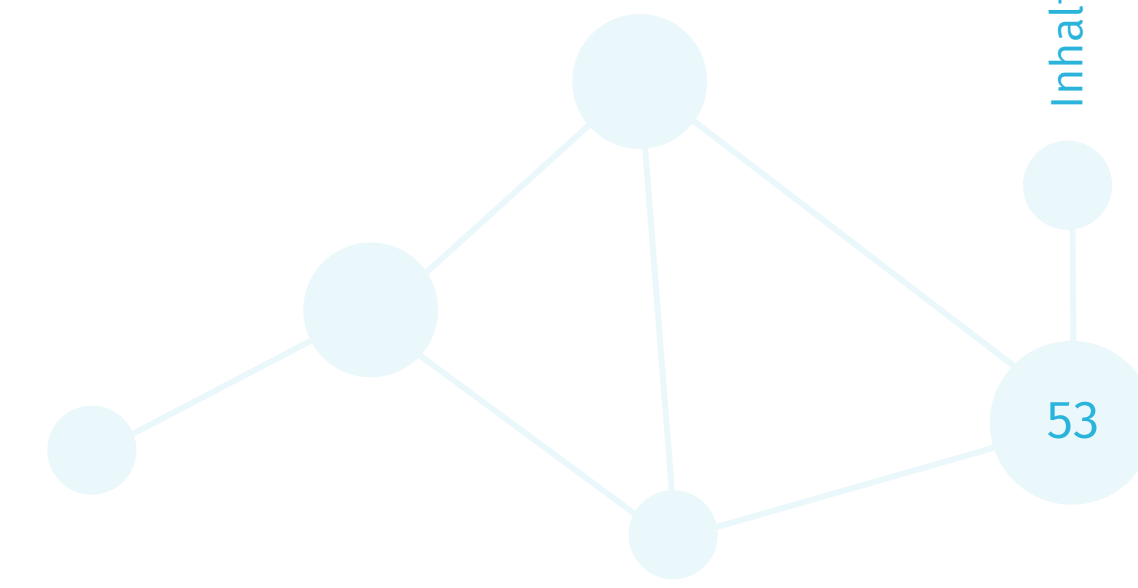
Für beide Bereiche Bauwirtschaft und Bioökonomie liegt die Verwendung der **CIRCO-Methode** nahe, um die Kooperationsmöglichkeiten zu identifizieren und die Umsetzung anzustoßen. Dabei sollten unbedingt auch Querverbindungen ausgelotet werden, denn die Verwendung von Bioressourcen im Baugewerbe ist ein ausgewiesenes Zukunftsfeld (vgl. Vertiefung Umweltneutrale Werkstoffe). Auch eine Initiative nach dem Modell von **RECOM** könnten hier ansetzen, um Potenzial für Win-win-Kooperationen bei der Schließung von Kreisläufen zu identifizieren und umzusetzen. In diesem Fall kann auch die Einbeziehung von Sozialunternehmen geprüft werden, was zusätzlichen Mehrwert für die Region bedeuten könnte.

Schließlich stehen im Münsterland starke **wissenschaftliche Partner** zur Verfügung um die Initiativen zu beraten und wissenschaftlich zu begleiten – ein wichtiger Faktor denn die Beurteilung der Nachhaltigkeit von Kreislaufkonzepten ist oft schwierig wie sich am Beispiel der Biokunststoffe zeigt. Institute wie das Institut für Infrastruktur – Wasser – Ressourcen – Umwelt (IWARU) der FH Münster und das Fraunhofer IME können hier maßgeblich unterstützen.

Ein weiterer zentraler Zukunftsbereich, in dem das Münsterland herausragt, ist das **Batterierecycling**. Angesichts der erwarteten rasanten Zunahme der Elektromobilität besteht hier die Chance sich frühzeitig im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu positionieren und die Aktivitäten auch auf weitere Branchen auszudehnen.

Ein letzter vielversprechender Fokus mit stärker langfristiger Perspektive ist die **Nährstoffverwertung aus Klärschlämmen** wie es die von RePhoR geförderten Projekte anstreben. Hier kann für das Münsterland mit seinen vielen kleinen Zentren, insbesondere der Blick zu dem dezentral orientierten SATELLITE Projekt, sinnvoll sein. Zudem kann die nahegelegene Firma Remondis, die mit einem eigenen patentierten Verfahren ein Pionier in diesem Bereich ist, hier ggf. maßgeblich unterstützen.

Neben dem Vorteil der hohen Dichte innovativer kleiner und mittlerer Unternehmen und der geeigneten Mischung ländlicher, kleinstädtischer und urbaner Strukturen weist das Münsterland auch günstige politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen auf. So ist das starke Engagement von NRW im Bereich Kreislaufwirtschaft und die demzufolge hohe Dichte von Initiativen für Lern- und Kooperationsprozesse eindeutig als Vorteil zu werten. Nicht zuletzt kann auch das hohe Engagement der Bürger:innen etwa als Standortvorteil gewertet werden, denn gerade Initiativen der Kreislaufwirtschaft sind auf die Unterstützung gesellschaftlicher Akteure angewiesen. Initiativen wie das RECOM Ostwestfalen und das Haus der Materialisierung in Berlin sind in angepasster Form durchaus auch im Münsterland denkbar.



5 LITERATURVERZEICHNIS

Bendix, Phillip; Berg, Holger; Sebestyén, János; Ritthoff, Michael; Perschel, Laura; Eckert, Daniela et al. (2021): Förderung einer hochwertigen Verwertung von Kunststoffen aus Abbruchabfällen sowie der Stärkung des Rezyklateinsatzes in Bauprodukten im Sinne der europäischen Kunststoffstrategie. Hg. v. Umweltbundesamt (Texte | 151/2021). Online verfügbar unter → www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-11-23_texte_151-2021_rebaupro_0.pdf

Fecke, Marina; Fluchs, Sarah; Rieth, Iris; Wilts, Henning; John, Lukas (2021): Circular Economy in der Grundstoffindustrie: Potenziale und notwendige Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Transformation. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy. Hg. v. IN4climate.NRW. Gelsenkirchen.

Fromm, Leonhard (2020a): Bauschutt-Recycling auf hohem Niveau. Ein Abbruchunternehmer erzielt Recyclingquoten von 90%, doch in vielen öffentlichen Ausschreibung bleiben die aufbereiteten mineralischen Baustoffe unerwünscht. In: *Deutsches Architektenblatt*. Online verfügbar unter → www.dabonline.de/2020/02/18/bauschutt-recycling-feess-kirchheim-beton-wiederverwertung-ziegel, zuletzt geprüft am 15.04.2021.

Fromm, Leonhard (2020b): Recycling-Beton als Sichtbeton für Schule. Die Stadt Kirchheim unter Teck schreibt bei kommunalen Bauvorhaben Recycling-Beton vor. Dabei sind trotz oder gerade wegen der Zuschlagstoffe aus Bauschutt hochwertige Sichtbetonflächen möglich. In: *Deutsches Architektenblatt*. Online verfügbar unter → www.dabonline.de/2020/03/17/recycling-beton-als-sichtbeton-fuer-schule-bauschutt-rbeton, zuletzt geprüft am 15.04.2021.

Gsell, Martin; Dehoust, Günther (2019): Stoffkreisläufe und Stoffströme auf der regionalen und lokalen Ebene optimieren. Handlungsfelder, Fallbeispiele und Empfehlungen für die lokale Wirtschaft und Zivilgesellschaft. Unter Mitarbeit von Maic Verbücheln und Sandra Wagner-Endres. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter → www.umweltbundesamt.de/publikationen/stoffkreislaeufe-stoffstroeme-auf-der-regionalen-0

Jacob, Klaus; Postpischil, Rafael; Graaf, Lisa; Ramezani, Maximilian; Ostertag, Katrin; Pfaff, Matthias et al. (2021): Handlungsfelder zur Steigerung der Ressourceneffizienz: Potenziale, Hemmnisse und Maßnahmen. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (UBA Texte, 32/2021).

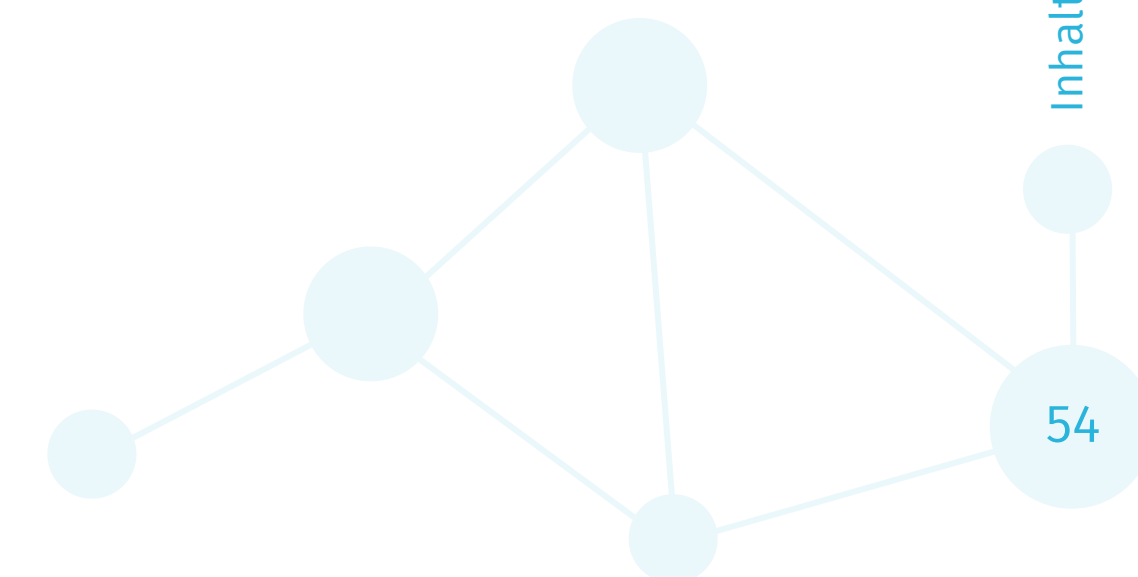
Laibach, Natalie; Müller, Boje; Pleissner, Daniel; Raber, Wolf; Smetana, Sergiy (2021): An integrated, modular biorefinery for the treatment of food waste in urban areas. In: *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 4, S. 100118. DOI: 10.1016/j.cscee.2021.100118.

Müller, Felix; Kohlmeyer, Regina; Krüger, Franziska; Kosmol, Jan; Krause, Susann; Dorer, Conrad (2020): Leitsätze einer Kreislaufwirtschaft. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter → www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitsaetze-einer-kreislaufwirtschaft

Schüch, Andrea; Hennig, Christiane (2020): Abfall- und reststoffbasierte Bioökonomie. In: Daniela Thrän und Urs Moesenfechtel (Hg.): *Das System Bioökonomie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 125–146.

Thielmann, Axel; Wietschel, Martin; Funke, Simon Á.; Grimm, Anna; Hettesheimer, Tim; Langkau, Sabine et al. (2020): Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf Sind Batterien für Elektroautos der Schlüssel für eine nachhaltige Mobilität der Zukunft? (Perspektiven – Policy Briefs, 01/2020). Online verfügbar unter → www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf

Verbücheln, Maic; Wagner-Endres, Sandra (2019): Stoffkreisläufe und Stoffströme auf der regionalen und lokalen Ebene optimieren. Handlungsfelder, Fallbeispiele und Empfehlungen für Kommunen. Unter Mitarbeit von Martin Gsell und Günther Dehoust. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter → umweltbundesamt.de/publikationen/stoffkreislaeufe-stoffstroeme-auf-der-regionalen



KONTAKT:

Münsterland e.V.

Telefon +49 2571 94 93 27

buedding@muensterland.com

raiber@muensterland.com

www.muensterland.com

PROJEKTPARTNER WIRTSCHAFTSFÖRDERUNG:



PROJEKTPARTNER TRANSFER:



PROJEKTPARTNER INNOVATIONSKOMPETENZFELDER:



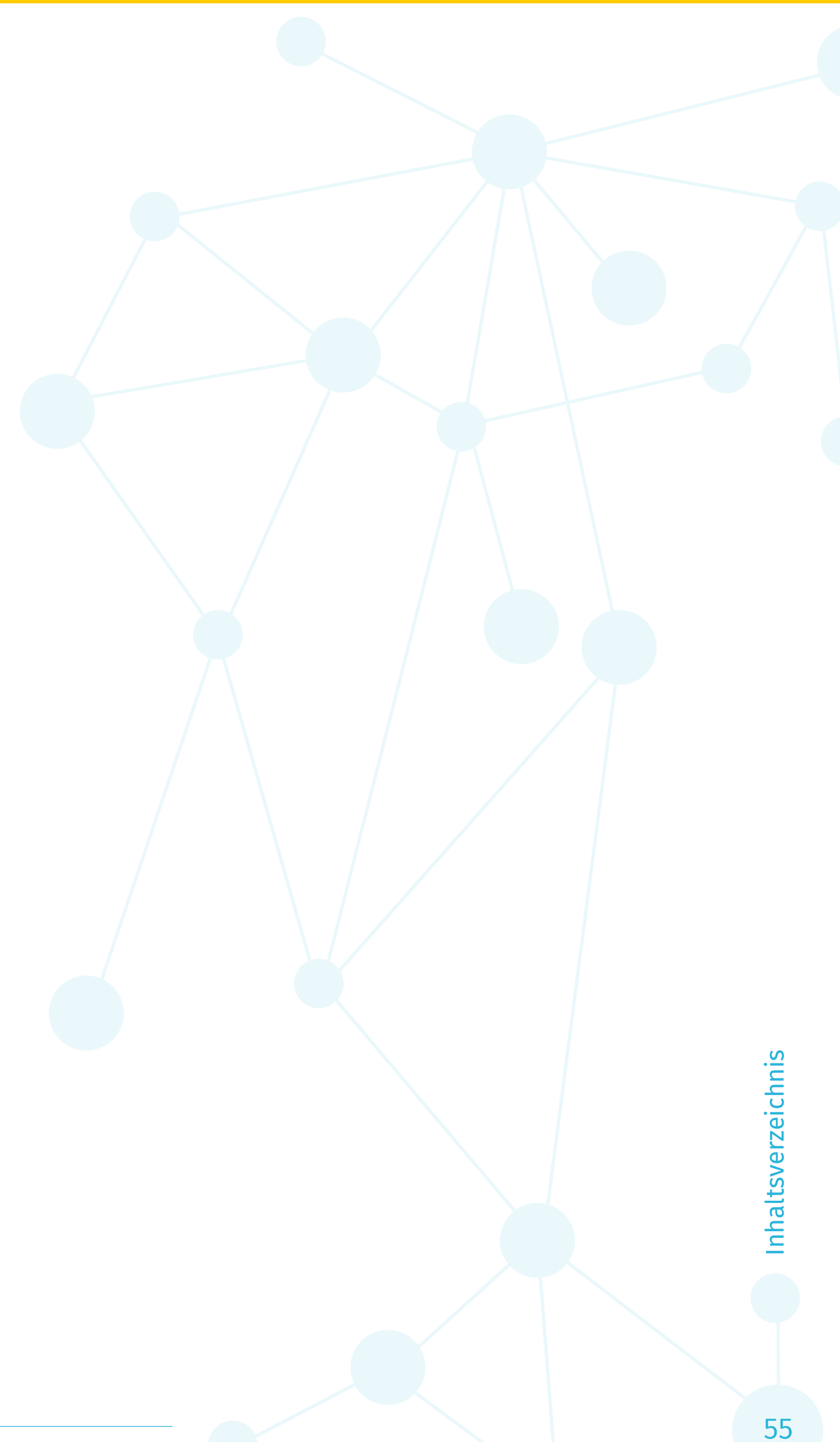
FÖRDERER:



UNTERSTÜTZER:



PROJEKTLEAD:



Inhaltsverzeichnis

