



Alternative Materialien für Lüftungsanlagen

Reduktion von Grauer Energie und Grauer
Treibhausgasemissionen bei Lüftungen

Schlussbericht

Impressum

Auftraggeber

Stadt Zürich
Amt für Hochbauten AHB
Franz Sprecher
Lindenhofstrasse 21
Postfach
8021 Zürich

Auftragnehmer

Hochschule Luzern
Technik & Architektur
Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw

Verfasser

Settembrini Gianrico	IGE
Alina Kretschmer	IGE
Alex Primas	IGE
Achille Pidoux	IGE
Simon Hofstetter	IGE
Heinrich Huber	IGE

Verteiler

Franz Sprecher	AHB
----------------	-----

SAP-Nr.

1122342-00

Dateiname

r_20230428_alternative_Lüftungsmaterialien_
Schlussbericht_ AHB_sei.docx

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Status	Änderungen und Bemerkungen	Bearbeitet von

Zusammenfassung

Im Rahmen der Studie *Alternative Materialien für Lüftungsanlagen: Reduktion von Grauer Energie und Grauer Treibhausgasemissionen bei Lüftungen* sollten Möglichkeiten zur Senkung der Grauen Energie von Lüftungsanlagen im Vergleich zur gängigen Baupraxis aufgezeigt und evaluiert werden. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf der Verwendung von Materialien, welche bislang nicht für Lüftungsanlagen eingesetzt wurden. Die Ergebnisse sollen den Anstoss zu neuen Produktentwicklungen geben.

Die Grundlage der Studie bildet eine breite Recherche zum Stand der Technik mit Anknüpfung an den aktuellen wissenschaftlichen Diskurs. Gleichzeitig wurden Anforderungen an Lüftungsanlagen definiert, anhand derer die Auswahl von Materialien aufgrund ihrer Eignung analysiert und eingegrenzt werden konnte. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Materialien wurde ein Kriterienkatalog erstellt, in welchem die wichtigsten Eigenschaften aufgelistet werden. Durch den Austausch mit Fachleuten und im Rahmen eines Workshops wurden weitere Erkenntnisse gesammelt.

Der Einsatz von metallischen Materialien, insbesondere von verzinkten Stahlblechen in sogenannten Spiro-Rohren, ist derzeit Standard in Lüftungsanlagen. Bereits innerhalb metallischer Werkstoffe können Alternativen aufgezeigt werden, um die graue Energie zu verringern. Der Einsatz von Stahl mit einem maximalen Recycling-Anteil kann den Energieaufwand um etwa 85% verringern. Auch Aluminium und rostfreier Edelstahl weisen eine bessere Bilanz auf, sie sind jedoch weniger wirtschaftlich. Als Alternative zur reinen Verzinkung können Legierungen wie der *Zink-Magnesium-Überzug* dienen.

Die Ergebnisse der Studie zeigen das grosse Potential einiger Materialien auf, welche bislang weder in der Gebäudetechnik eingesetzt werden noch im Bausektor breite Anwendung finden. Aus ökologischer Sicht eignen sich zum derzeitigen Stand nicht alle Materialien gleich gut. Biotische Materialien sind fossilen vorzuziehen, Produkte aus Sekundärrohstoffen sowie rezyklierfähige Produkte sollten eher eingesetzt werden. Beispielsweise Altkarton wird derzeit noch nicht verwendet, obwohl sowohl Technologien zu Aufbereitung und Verarbeitung Standard sind und Karton aus Primärrohstoff vereinzelt in Lüftungsanlagen eingesetzt wird. Holzwerkstoffe scheinen sich aufgrund ihrer Festigkeit und Robustheit ebenfalls zu eignen. Auch Lüftungsanlagen aus Zellulose oder Bambus sind denkbar, allerdings sind hier noch weitere Untersuchungen zur Gebrauchstauglichkeit durchzuführen. Pilzbasierte Produkte bieten ein enormes Potential, sind jedoch weitestgehend unerforscht. Für alle diese Materialien gilt insbesondere, dass sich Beschichtungen zur Verbesserung von Feuchteresistenz und Brandschutz sowie Klebe- und Bindemittel negativ auf ihre ökologische Qualität auswirken, da Umweltverträglichkeit, Recycling und Kompostierbarkeit beeinträchtigt werden.

Alternative Lüftungsanlagen aus Dämmungen mineralischen Ursprungs (Glas- und Steinwolle) haben den Nachteil, dass ihr Recycling wenigere Nutzungszyklen erlaubt als das von metallischen Werkstoffen. Zudem rückt die Verknappung von benötigten Ressourcen immer

weiter in den Vordergrund. Der Einsatz von Produkten mit einem RC-Gehalt von min. 90% mit Rücknahmesystem und erneutem Recycling könnte einen Lösungsansatz liefern.

Zwar weisen Kunststoffe aufgrund ihres geringen Gewichts keine schlechte Ökobilanz auf, aus einer gesamtheitlichen Betrachtung heraus handelt es sich hierbei jedoch nicht um echte ökologische Alternativen. Darunter fallen auch Bioplastics und Textilien, auch wenn diese aus nachwachsenden Rohstoffen produziert werden können. Die benötigte Zeit für eine vollständige Zersetzung überschreitet die gewünschte Nutzungsdauer bei weitem, da ein Funktionsverlust verhältnismässig früh eintritt. Minderwertige Kunststoffe werden folglich nur noch thermisch (unter geringem Heizwert) verwertet. Dennoch kann ein neuer Ansatz in der Produktentwicklung vielversprechend sein, wenn die absolute Masse des Kunststoffs dabei reduziert wird und lösbar an eine tragfähige Komponente anschliesst.

Bezüglich der technischen Gebrauchstauglichkeit stellen alle Materialien eine Herausforderung dar, da sowohl hohe Brandschutz- als auch Hygieneanforderungen erfüllt werden müssen. Zudem ist von einer gewissen Temperaturdifferenz bei hoher Luftfeuchte auszugehen und die Tragfähigkeit muss unter allen Umständen gewährleistet sein. Biotische Materialien benötigen folglich i.d.R. eine Beschichtung oder Behandlung, welche sich problematisch auf ihre Recycling- und Abbaufähigkeit auswirken kann. Die technische Machbarkeit ist jedoch gegeben, wie der Einsatz von Karton bereits beweist. Metallische Produkte sowie Mineralische Dämmungen werden ebenfalls bereits eingesetzt und erfüllen problemlos alle Anforderungen. Die technische Gebrauchstauglichkeit von Kunststoffen ist gegeben, allerdings führen notwendige Flammenschutzmittel zu Entsorgungsproblemen. Textilien finden derzeit Anwendung bei Überdruckanlagen.

Die Hemmnisse im Einsatz der alternativen Materialien manifestieren sich mitunter in der fragwürdigen Wirtschaftlichkeit. Bei aktuellen Rohstoff- und Entsorgungspreisen für Rohstahl und Erdöl besteht kein akuter Handlungsbedarf. Zudem fehlen belastbare Forschungsergebnisse zu der Performance von alternativen Materialien sowie geeignete Produktentwicklungen. Angesichts des voranschreitenden Klimawandels und begrenzter natürlicher Ressourcen liegt die Vermutung nahe, dass Umstellungen auf alternative Lüftungsmaterialien allerdings künftig rentabel werden, wenn sie den Anteil an grauer Energie reduzieren und umweltverträglicher sind.

Der aus dieser Studie abgeleitete konkrete Forschungsbedarf besteht in der Eignungsprüfung von Altkarton als Basis für Lüftungsanlagen im Vergleich zu Karton aus Primärrohstoff, welcher vereinzelt bereits eingesetzt wird. Des Weiteren fehlen Untersuchungen zu ökologisch verträglichen Beschichtungen für Feuchte- und Brandschutz von biotischen Materialien sowie zu allgemeinen technischen Eigenschaften von Mycelium. Filme auf Proteinbasis könnten erdölbasierte Beschichtungen ersetzen. Bezüglich Biokunststoffen besteht Forschungspotential im Hinblick auf in ihrer Gänze biologisch abbaubare Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen. Auch Komposite (WPC) könnten sich für den Einsatz in Lüftungsanlagen anbieten, sollten Lösungen zur Trennung der Schichten nach ihrem Lebensende sowie für die Minimierung des Kunststoffanteils gefunden werden.

Die Analyse zum quantifizierbaren Potenzial hinsichtlich der Reduktion der Umweltbelastung durch alternative Materialien hat aufgezeigt, dass die grauen Treibhausgasemissionen eines Lüftungsrohrs aus Karton gegenüber eines solchen aus verzinktem Stahlblech bei gleicher Lebensdauer und mit der heutigen Ökobilanzgrundlage, d.h. mit der aktuellen Wertschöpfungskette und den gegenwärtigen Herstellungsprozessen, um über 90% reduziert werden könnten.

Zusammenfassende Tabelle

Material	Positiv	Neutral / Besonderes	Negativ
Metallische Materialien	<ul style="list-style-type: none"> - angewandte Technologie, State of the Art - ästhetisch - hohe Materialfestigkeit - 100% recyclingfähig 	<ul style="list-style-type: none"> - Herstellung von RC-Produkten erfordert bis zu 85% weniger Herstellungsenergie 	<ul style="list-style-type: none"> - sehr viel Energie benötigt in der Herstellung und Verarbeitung - umweltbelastender Abbau - Transportemissionen
Karton	<ul style="list-style-type: none"> - wird bereits eingesetzt - aus nachwachsenden Rohstoffen - angewandte Technologie 	<ul style="list-style-type: none"> - unklar ob Beschichtungen benötigt werden und deren Einfluss 	<ul style="list-style-type: none"> - Feuchtigkeitsresistenz nicht geklärt
Dämmmaterialien	<ul style="list-style-type: none"> - angewandte Technologie (Markt) - für Lüftungssysteme mit hohen Anforderungen an Wärme- und Schallschutz - geringes Gewicht 		<ul style="list-style-type: none"> - weniger Robustheit (vgl. Metall) - energieintensive Herstellung - Ressourcenverbrauch - Verbundwerkstoff als RC-Hemmnis
Kunststoff	<ul style="list-style-type: none"> - angewandte Technologie - sehr breit einsetzbar - jegliche Formen und Verbindungen möglich - in Reinform hohes RC-Potential 	<ul style="list-style-type: none"> - grosse Varianz - Potential als WPC? 	<ul style="list-style-type: none"> - negatives Image - energieintensive Herstellung und Entsorgung - umweltbelastend, Ressourcenverbrauch
Bioplastics	<ul style="list-style-type: none"> - Alternative zu üblichen Kunststoffen mit hohem (Masse-)Anteil an nachwachsenden Rohstoffen - kann dieselben Eigenschaften erfüllen wie Plastik - grosses wissenschaftliches Forschungspotential 	<ul style="list-style-type: none"> - Wichtigkeit dieser Stoffe wird sich noch zeigen. - Brauchen evtl. Schutzschichten 	<ul style="list-style-type: none"> - Trennbarkeit derzeit nicht gewährleistet: Weder Recycling noch Kompostierung möglich - Materialfestigkeiten prüfen - allenfalls etwas besseres Image als Kunststoff
Bambus	<ul style="list-style-type: none"> - erneuerbare Ressource - wird breit eingesetzt - ästhetische Qualität 	<ul style="list-style-type: none"> - Kompatibilität als Lüftungssystem muss geprüft werden -biologische Varianz der Querschnitte problematisch? 	<ul style="list-style-type: none"> - Transportemissionen
Holzwerkstoffe	<ul style="list-style-type: none"> - sehr viele verschiedene Möglichkeiten (Vollholz, Furniere, Span- und Faserprodukte, Komposite) - angewandte erneuerbare Technologie - ästhetische Qualität 	<ul style="list-style-type: none"> - Abklärungen bezüglich Formstabilität in feuchter Umgebung fehlen 	<ul style="list-style-type: none"> - je nach Holzwerkstoff Zirkularität prüfen infolge Additiven (Spannplatten, Leime, etc.)
Formgepresste Zelluloseplatten	<ul style="list-style-type: none"> - erneuerbare Ressource mit viel Potential - aus Altpapier und recyclebar 	<ul style="list-style-type: none"> - unklar ob alle Anforderungen von Lüftungen erfüllt werden können (Formstabilität und Feuchtigkeitsresistenz) 	<ul style="list-style-type: none"> - keine Erfahrung für Lüftungssysteme
Pilze	<ul style="list-style-type: none"> - vielversprechende erneuerbare Alternative - raffinierte Technologie, verschiedene Formen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - unklar ob alle Anforderungen von Lüftungen erfüllt werden können (Materialfestigkeit und Feuchtigkeitsresistenz) 	<ul style="list-style-type: none"> - junge Technologie, voraussichtlich noch ein langer Zeitraum bis zu einer adäquaten Produktentwicklung
Textilien	<ul style="list-style-type: none"> - wird bereits im Lüftungsbau eingesetzt - Viele Verschiedene Kombinationen möglich, auf Bedürfnisse angepasst - können auch Dämmfunktionen übernehmen (vgl. Dämmmaterialien) 	<ul style="list-style-type: none"> - Zirkularität und Umweltbelastung materialabhängig 	<ul style="list-style-type: none"> - oftmals aufwändige Verarbeitung - vorwiegend für Überdruck-Systeme geeignet

Danksagung

Die Autorenschaft dankt herzlich allen Fachleuten^a, die sich im Rahmen des Projektes in unterschiedlichen Formen und Phasen beteiligt haben, für die Unterstützung, die Anregungen, den fachlichen Austausch und das Interesse. Die Beauftragten danken zudem dem Amt für Hochbauten Zürich (AHB) für die finanzielle Unterstützung und dem themenspezifischen Engagement.

^a: Danke vielmals für die themenrelevanten Inputs während dem Workshop oder im persönlichen Austausch!

Pius Portmann (Dozent für Werkstoffe, HSLU), Franz Sprecher (AHB), Enrico Marchesi (EMPA),

Peter Mamie (Eggenschwiler Airsystems AG), Thomas Merhar (Hovalwerk AG), Jaroslaw Kotwinski (ViAir AG), Markus Rigert (Materialarchiv), Serge Lunin (ZHdK, dukta GmbH), Özlem Ayan (ETHZ),

Davide Bionda, Sina Büttner, Silvia Domingo, Marvin King (IGE, HSLU)

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	10
2	Ziel	11
3	Vorgehensweise.....	12
4	Anforderungen an Lüftungsanlagen	14
5	Erkenntnisse	15
5.1	Konzeptionelle Ansätze	15
5.1.1	Low-Tech-Lüftungen	17
5.1.2	Lüftungsführung in Bauteilen.....	17
5.1.3	Wiederverwendung	18
5.2	Metallische Materialien	20
5.2.1	Beschichtung.....	20
5.2.2	Hauptmaterial.....	22
5.3	Nichtmetallische Materialien	23
5.3.1	Karton	23
5.3.2	Dämmmaterialien	34
5.3.3	Kunststoffe	39
5.3.4	Biokunststoffe (Bioplastics)	45
5.3.5	Holzwerkstoffe.....	48
5.3.6	Bambus.....	52
5.3.7	Formgepresste Zelluloseplatten	55
5.3.8	Pilze	57
5.3.9	Textilien.....	59
5.3.10	Natürliche Beschichtungen.....	62
5.3.11	Einfluss auf Umweltbilanz.....	65
	Fazit	68

5.4	Fazit und Ausblick	68
5.5	Auslegeordnung	70
	Literaturverzeichnis.....	71
	Anhang.....	75
5.6	EPD-Vergleich verzinktes und unverzinktes Stahlband.....	75
5.7	Beispiele zur Umweltbelastung von Kartonleitungen	78
5.7.1	Materialvergleich	78

1 Ausgangslage

Die Norm SIA 180 «Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden» [1] setzt sowohl bei Neubauten als auch bei Sanierungen von Gebäuden ein Lüftungskonzept voraus. Eine Möglichkeit, diese Anforderung zu erfüllen, ist der Einbau einer mechanischen Lüftungsanlage. Korrekt ausgeführt, sorgt diese für eine gute Raumluftqualität und spart in der Regel, dank der vorgesehenen Wärmerückgewinnung, Betriebsenergie ein. Auf der anderen Seite bedeuten Lüftungstechnische Installationen auch eine Erhöhung des Erstellungsaufwands von Gebäuden, also der Grauen Energie und der Grauen Treibhausgasemissionen.

Die Wichtigkeit des Erstellungsaufwands im Gebäudepark wird durch das Merkblatt SIA 2040 «SIA-Effizienzpfad Energie» [2] verdeutlicht: Der darin festgehaltene Richtwert für die *Erstellung* von Neubauten ist bei sämtlichen Nutzungskategorien deutlich höher als derjenige für den *Betrieb*. Bei Wohnbauten beispielsweise, beträgt der Richtwert für Treibhausgasemissionen $9.0 \text{ kg/m}^2\text{a}$ für die Erstellung und $2.0 \text{ kg/m}^2\text{a}$ für den Betrieb. Dabei wird Elektrizität mit den Primärenergiefaktoren und Treibhausgasemissionskoeffizienten des CH-Verbrauchermixes gemäss SIA 380, Anhang C, gewichtet und basieren auf den KBOB-Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2014. Die Gebäudetechnik kann laut dem Merkblatt SIA 2032 «Graue Energie von Gebäuden» [3] rund ein Viertel der Grauen Treibhausgasemissionen von Neubauten ausmachen. Mit dem Trend zur Erhöhung des Technisierungsgrads in Gebäuden kann perspektivisch von einem höheren Anteil ausgegangen werden.

Der Lüftungsanteil seinerseits macht laut der Studie von Klingler et al. «Ökobilanzdaten für Lüftungs- und Wärmeanlagen» [4] ca. 30% des Gesamtaufwands der Gebäudetechnik im Gebäude aus und beträgt bei neuen Gebäuden zwischen 60 und 200 kWh pro m^2 Energiebezugsfläche. Dabei machen in der Regel verzinkte Lüftungskanäle 30-40% und Lüftungsgeräte 20-30% des Betrags aus. Die Studie von Bionda et al. «SYGREN Systemkennwerte Graue Energie der Gebäudetechnik» [5] zeigt auf, dass die Lüftungsverteilung für ca. 50-65% der Grauen Energie, der Treibhausgasemissionen und der Gesamtumweltbelastung der Lüftungsanlagen verantwortlich ist.

Will man demnach den Erstellungsaufwand von Lüftungsanlagen reduzieren, liegt ein grosser Hebel bei den Hauptleitungen. Valable Ansätze sind dabei einerseits die Reduktion der Leitungslänge durch optimierte Verteilungskonzepte oder Low-Tech-Lösungen, andererseits die Einsparung an Grauer Energie durch den Einsatz von alternativen Materialien, welche einen geringeren Erstellungsaufwand als die, üblicherweise in Lüftungsanlagen eingesetzten, verzinkten Lüftungskanäle mit sich bringen.

2 Ziel

Im Rahmen dieser Studie sollen Möglichkeiten zur Reduktion der Grauen Energie von Lüftungsanlagen gegenüber der heutigen Praxis aufgezeigt und evaluiert werden. Im Fokus steht dabei der Einsatz von **alternativen Materialien** für die Lüftungsverteilung. Die Studienergebnisse sollen vor allem Anregungen und neue Ideen für Lüftungskonzepte sowie Produkteentwicklungen geben. Detaillierte Berechnungen oder Materialnachweise stehen nicht im Vordergrund.

Im Grundsatz sollen Untersuchungen in zwei Stossrichtungen durchgeführt werden:

a) Metallische Materialien

Diese bilden den Standard für Hauptleitungen von Lüftungsanlagen in Gebäuden. In Steigschächten stehen aus technischer Sicht heute keine Materialalternativen zur Verfügung. Dennoch soll in der Arbeit untersucht werden, inwiefern Potential für eine Reduktion des Erstellungsaufwands vorliegen könnte, z.B. im Bereich der Oberflächenbehandlung. Metalle können auf gleicher Qualitätsstufe recycelt werden und bieten somit ein hohes Kreislaufpotential.

b) Nichtmetallische Materialien

Die Studie soll das Spektrum öffnen zum Einsatz von Baustoffen, die bisher bei Lüftungsanlagen nicht oder kaum in Betracht gezogen worden sind. Beispiele dafür sind Holz, Karton, spezielle Kunststoffe oder verarbeitete Wärmedämmungen.

3 Vorgehensweise

Das Projekt gliedert sich in folgende Arbeitsschritte:

- A) Identifizierung der wichtigsten **Anforderungen an Materialien** für Lüftungsanlagen.
- B) Unvoreingenommene **Recherche und Auslegeordnung** zu potenziellen alternativen Materialien:
Der Fokus liegt hierbei primär auf der Abbildung einer breiten Palette anstatt auf den in A formulierten technischen Anforderungen.
- C) Kontaktaufnahme und **Austausch mit Fachleuten** mit projektrelevantem Wissen:
Im Vordergrund standen einerseits Spezialisten mit Erfahrung in der Entwicklung, der Planung oder der Ausführung von Lüftungsanlagen, andererseits wurden Werkstoffspezialisten oder Personen mit besonderen Kenntnissen zu ausgewählten Materialien gesucht.
- D) Durchführung eines **Online-Workshops** mit den vorgängig kontaktierten Fachleuten:
Als Basis des Brainstormings zum Thema «alternative Lüftungsmaterialien» diente die Dokumentation der Recherche in Arbeitsschritt B. Die Fachleute wurden eingeladen auf der dafür eingerichteten digitalen Plattform die vorgeschlagene Materialauswahl zu diskutieren, Vor- und Nachteile der jeweiligen Materialien abzuschätzen, aber auch neue zu benennen.
- E) Dokumentation der durchgeführten Arbeit im vorliegenden **Schlussbericht**.

Um das Potential der identifizierten Materialien im Hinblick auf deren Verwendung in Lüftungsanlagen abzuschätzen, wurden relevante Themen definiert, welche eine gesamtheitliche Betrachtung von Lüftungen ermöglichen. Tabelle 1 fasst die Themen und die dazugehörigen Begriffe zusammen. Sie diente auch als Grundlage zur Diskussion der jeweiligen Materialien während des Workshops.

Begriff	Themen	positiv	neutral	negativ
Ökologie	Graue Energie und Treibhausgasemissionen, Umweltbelastung durch Materialursprung, Aufbereitung oder Oberflächenbehandlung, Recycling-Potential (RC-Potential) ...			
Lebensdauer	Dauerhaftigkeit (z.B. Korrosion, Feuchte etc.), Reparierbarkeit, Möglichkeiten des (Teil-) Ersatzes...			
Brandschutz	Brandschutzanforderungen, Brennbarkeit des Materials...			
Hygiene	Möglichkeiten der Reinigung, Oberflächenrauheit, mikrobiologische Eigenschaften...			
Materialfestigkeit	Anzahl erforderlicher Befestigungen, notwendige Materialstärke, Elastizität, Druckfestigkeit, Robustheit...			
Leckagen	Dichtheit des Materials, Dichtheit von Verbindungen, Druckverlust (Rauigkeit, Übergänge...)			
Feuchteresistenz	Anfälligkeit auf Feuchte			
Kompatibilität	Anschlüsse an Armaturen (Klappen, BSK, VAV, etc.), verfügbare Dimensionen, Fügungen innerhalb des Systems			
Robustheit	Beständigkeit im Bauprozess			
Ästhetik	Gestaltung (Materialeffekte, Haptik, Farben), «Image», Eignung für unverkleideten Einbau ...			
Realisierbarkeit	Umsetzbarkeit, Materialverfügbarkeit, (zeitnahe) Anwendbarkeit in Lüftungsanlagen...			
Wirtschaftlichkeit	langfristige Kosten-Nutzen-Betrachtung			

4 Anforderungen an Lüftungsanlagen

Lüftungsanlagen sind ein wesentlicher Bestandteil der technischen Ausstattung von Gebäuden. Sie versorgen Gebäudeinnenräume mit Aussenluft, queren dabei oftmals Brandabschnitte und haben eine Vielzahl technischer oder hygienischer Anforderungen zu erfüllen. Basierend auf Erfahrungswerten und Normen sind in Bezug auf Materialien insbesondere folgende Punkte hervorzuheben:

- **Brandschutz:**

Innerhalb des Brandabschnitts der luftversorgten Räume gilt heute für die Materialien die Anforderung **RF3 (cr) (nicht leichtbrennbar)**, ansonsten ist die Anforderung **RF1** zu erfüllen.

- **Hygiene:**

Die Lüftungsanlagen, und somit die verwendeten Materialien, müssen zu **reinigen** sein. Im Lüftungsbetrieb dürfen die Materialien **keine Emissionen** verursachen.

- **Festigkeit im Betrieb:**

Bei kleinen Anlagen müssen die Lüftung und dementsprechend die Materialien einem Über- bzw. Unterdruck von rund $\pm 500 \text{ Pa}$ standhalten. Bei mittleren Anlagen beträgt der massgebliche Druck rund $\pm 1'000 \text{ Pa}$.

- **Dichtheit:**

Lüftungen müssen mindestens die **Klasse B**, teilweise **Klasse C** gemäss den Normen SN EN 1507 [6], SN EN 12237 [7] und SN EN 15727 [8] erfüllen.

- **Feuchteresistenz:**

Bisher wurden noch keine quantitativen Anforderungen formuliert.

- **Robustheit:**

Die Beständigkeit im Bauprozess, und über die vorgesehene Lebensdauer (Einbauzeit) hinweg, muss gewährleistet werden.

- **Technische Nutzungsdauer:**

Bei Lüftungsanlagen wird von einer Nutzungsdauer von 30 Jahren ausgegangen.

5 Erkenntnisse

5.1 Konzeptionelle Ansätze

In der Studie «Vergleich von Lüftungskonzepten für Wohnbauten» [9] wurden unter anderem die Ökobilanzen von verschiedenen Lüftungsanlagentypen untersucht. Aus der Abbildung 1 geht die Aufteilung der Grauen Treibhausgasemissionen von verschiedenen Komponenten des Lüftungstyps «Einfache Lüftungsanlage (Mehrwohnungsanlage)» mit variiert Anordnung des zentralen Lüftungsgeräts – Dach oder Untergeschoss – und unterschiedlicher Anzahl Steigzonen hervor. Die Darstellung untermauert die Wichtigkeit des Anteils der Lüftungsverteilung. In den Bereichen *vertikale Steigzone*, *horizontal zu Lüftungsgerät* und *horizontal zu Wohnung* wurde von metallischen Lüftungsleitungen ausgegangen. Innerhalb der Wohnung wurden hingegen in der Decke eingelegte PE-Rohre angenommen. Diese Annahme spiegelt die meistverbreitete Lüftungsausführung der letzten Jahrzehnte.

Das Einlegen von Lüftungsleitungen in der Betondecke widerspricht den Grundsätzen der heute propagierten **Systemtrennung** im Bauwesen. Hinsichtlich des Recyclings von Baumaterialien oder der Wiederverwendung von Bauteilen ist eine Systemtrennung anzustreben. (vgl. Kapitel 5.1.3 «Wiederverwendung»)

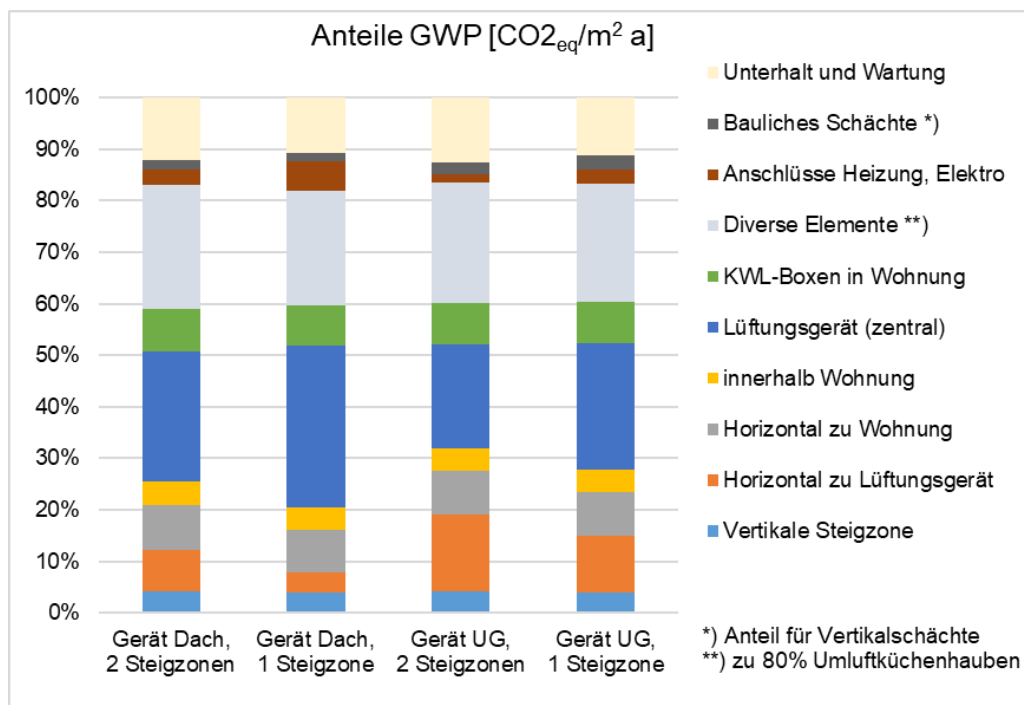


Abbildung 1: Prozentualer Anteil der Grauen Treibhausgasemissionen verschiedener Komponenten von typischen Lüftungsanlagen in Mehrfamilienhäusern. Dargestellt sind vier Varianten mit einem zentralen Lüftungsgerät auf dem Dach oder im Untergeschoss und mit einer unterschiedlichen Anzahl Steigzonen.

Als Alternative zu den in Beton eingelegten PE-Rohren für die Lüftungsverteilung innerhalb der Wohnung, können die Rohre, ebenfalls nicht sichtbar, über einer abgehängten Decke geführt werden. Zudem können die Rohre ohne abgehängte Decke sichtbar im Raum angebracht werden. In letzterem Fall werden heute nahezu ausschliesslich Leitungen aus verzinktem Stahl verwendet. Abbildung 2 zeigt den höheren Anteil an Treibhausgasemissionen durch eine solche Materialisierung auf. Durch den Einsatz von Metall anstelle der PE-Rohre erhöhen sich die Treibhausgasemissionen für die reine Lüftungsverteilung innerhalb der Wohnung um nahezu 70%, wenn man allfällige abgehängte Decken oder Anpassungen an der Deckenstärke nicht berücksichtigt. Das verdeutlicht die Wichtigkeit der Materialwahl bei Lüftungsanlagen.

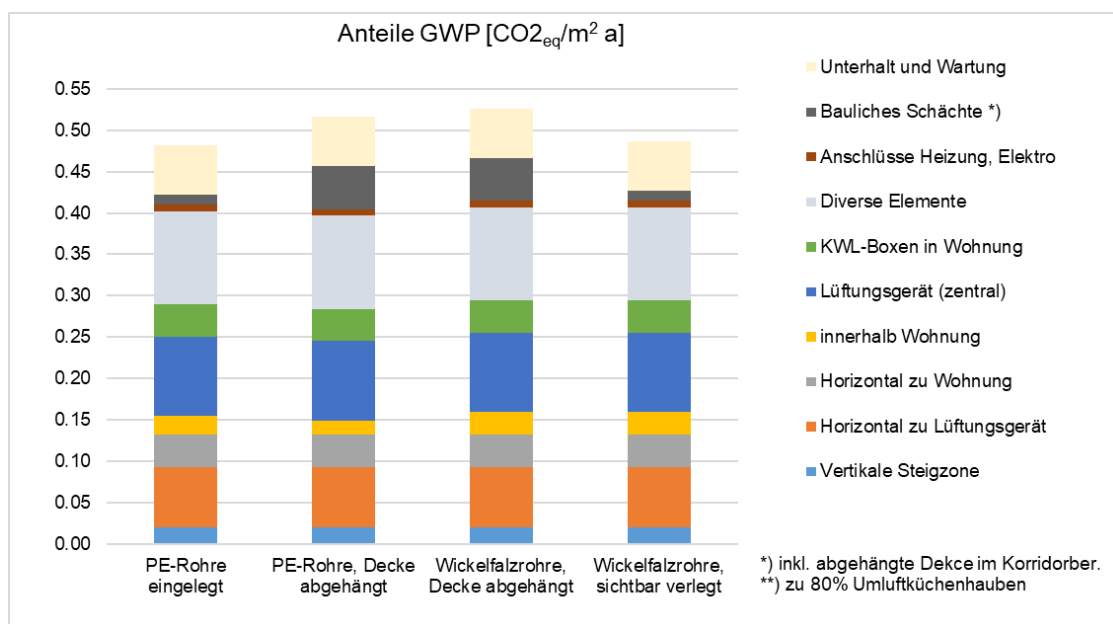


Abbildung 2: Graue Treibhausgasemissionen pro m² Energiebezugsfläche von typischen Lüftungsanlagen in Mehrfamilienhäusern. Dargestellt sind vier Varianten mit unterschiedlich geführter Verteilung innerhalb der Wohnungen, mit PE- oder Wickelfalzrohren, jeweils in der Betondecke eingelegt, über eine abgehängte Decke oder sichtbar geführt. In den Werten nicht berücksichtigt ist eine allfällige zusätzliche Betondeckenstärke als Folge der Rohreinlage.

Beim Einbau einer mechanischen Lüftungsanlage lassen sich Graue Energie und Treibhausgasemissionen mit suffizienten Konzepten effizient einsparen. Solche Konzepte zielen vor allem auf die Reduktion der notwendigen Lüftungskomponenten bei gleichzeitigem Erhalt der Luftqualität in Innenräumen. Die Darlegung, wie suffiziente Ansätze in der Praxis aussehen können, stand nicht im Fokus dieser Studie. Im folgenden Abschnitt werden gleichwohl einige Optionen kurz erläutert.

5.1.1 Low-Tech-Lüftungen

Heute werden Lüftungsanlagen vor allem bei beschränkten Platzverhältnissen, in der Regel bei Altbauanierungen, bereits oftmals mit stark vereinfachter Luftführung realisiert. Seit 2019 lässt beispielsweise das Label MINERGIE® bei Modernisierungen Lüftungskonzepte zu, bei welchen die Versorgung der Zuluft innerhalb von Wohnungen über offene Türen aus einem gemeinsamen Korridor oder aus dem Wohnbereich erfolgt. Dies reduziert die Lüftungsleitungen innerhalb von Wohnungen deutlich und verringert auch die Graue Energie bedeutend. Die Studie «Analyse vereinfachter Lüftungskonzepte» [10] zeigt, dass solche, reduzierten Ansätze bereits bei Türöffnungen ab 10 cm einen wirksamen Luftaustausch in Wohnungen generieren können.

Die ökologische Gesamtbilanz von Lüftungsanlagen kann demnach bereits durch konzeptionelle Ansätze in der frühen Entscheidungsphase massgeblich beeinflusst werden, noch bevor die Frage der Materialisierung von Leitungen relevant ist. Dabei spielen die Wahl des Technisierungsgrads und des anzustrebenden Komforts eine bedeutende Rolle. Entscheidend ist oftmals der architektonische Entwurf, respektive die Synergien zwischen dem architektonischen und dem gebäudetechnischen Konzept. Durch eine ideale Raumanordnung, eine optimierte Anzahl und Platzierung von Lüftungsgeräten sowie vertikalen Schächten lässt sich der Erstellungsaufwand von Lüftungsanlagen, insbesondere die Länge der Lüftungsleitungen, sehr effizient reduzieren.

5.1.2 Lüftungsführung in Bauteilen

Lüftungssysteme sind uns bereits aus der römischen Antike bekannt. In sogenannten *Hypokaustenheizungen* wurde warme Luft durch Decken- und Wandkanäle geführt, um Räume zu beheizen. Heute wird dasselbe Prinzip oftmals in Kombination mit Luftkollektoren und zur Nutzung von Solarenergie eingesetzt. Dabei werden beispielsweise Rohre in Decken einbetoniert oder in Kalksandsteinwände gemauert. Interessant sind die Systeme bezüglich der Grauen Energie, wenn auf Rohre zur Luftverteilung verzichtet werden können und die Luft direkt in den Bauteilen zirkuliert.

Das Konzept treffen wir in der heutigen Architektur bei gläsernen Hochhausfassaden bzw. in Doppelhautkonstruktionen an (vgl. Abbildung 3), kann aber durchaus auch im Gebäudeinneren – in Wänden und Decken – angewendet werden.

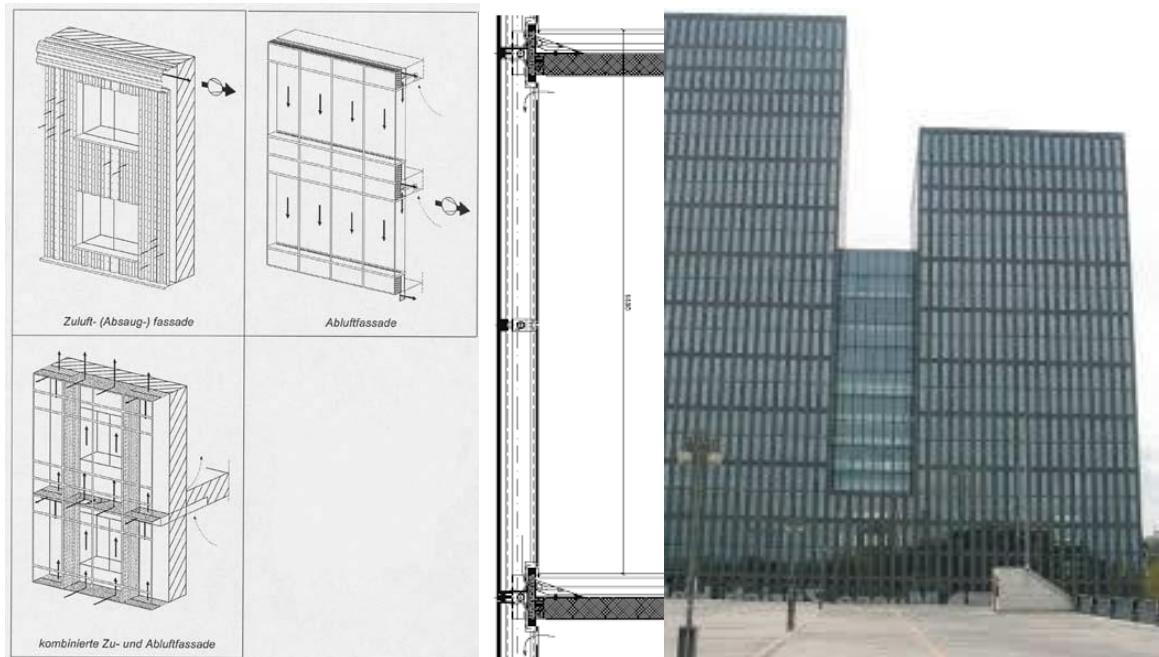


Abbildung 3: In den axonometrischen Darstellungen (links) werden verschiedene Möglichkeiten der Luftführung in der Fassadenschicht schematisch aufgezeigt. Beispiel einer Abluftfassade (rechts) anhand eines Fotos und des dazu gehörigen Fasadenschnitts (Sunrise Tower, Zürich Nord. Architektur: Planergemeinschaft Atelier WW / Max Dudler. Energie + Haustechnik: Gruenberg & Partner AG / Schneider Engineering + Partner AG. Fassadenplaner: Stäger & Nägeli AG)

5.1.3 Wiederverwendung

Allgemein ist das Bauen heute durch einen linearen Ablauf geprägt: Die Komponenten eines Gebäudes werden erstellt, eingebaut, nach der dafür gesehenen Lebensdauer ersetzt bzw. abgebaut und in der Regel entsorgt. Ein kleiner Teil der Baumaterialien wird recycelt und wiederverwertet. Der Ansatz des *zirkulären Bauens*, als Teil der sogenannten Kreislaufwirtschaft, wird heute im Bauprozess nur sporadisch praktiziert. Sollen die Graue Energie sowie Treibhausgasemissionen beim Bauen langfristig reduziert werden, können wir uns eine lineare Wirtschaft und die darauf basierende Abfallproduktion nicht mehr leisten (Abbildung 4).

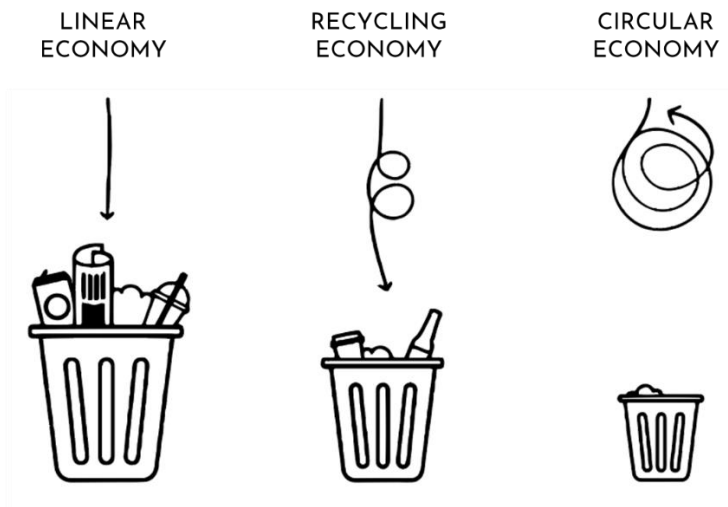


Abbildung 4: Von der linearen zur zirkulären Wirtschaft, mit entsprechender Abfallreduktion (© Insert Peter Kreukniet)

Das *Denken in Kreisen* (Abbildung 5) ist auch bei Lüftungsanlagen anwendbar. Es gilt dabei, bereits bei der Planung einer Anlage zu evaluieren, welche Teile davon in welcher Form wiederverwendet oder welche Materialien rezykliert werden könnten. Bei der Lüftungsverteilung liegt in dieser Hinsicht, in Abhängigkeit der verwendeten Materialien und des Systems, ein bisher kaum ausgenutztes Potential vor. Eine Untersuchung zu alternativen Lüftungsmaterialien muss demnach den Aspekt der Wiederverwendung und des Recyclings der Komponenten mitberücksichtigen. Die Basis zur Wiederverwendung wird bereits mit der Wahl des Lüftungssystems gelegt. Entscheidend ist dabei die Trennung der verschiedenen Systemkomponenten im Gebäude, respektive wie gut einzelne Komponenten nach der erreichten Funktionsdauer, am Bau entnommen und anderweitig wieder eingesetzt werden können.



Abbildung 5: Kreisläufe der Bauwirtschaft (© Espazium)

5.2 Metallische Materialien

Als Graue Energie wird die gesamte Menge nicht erneuerbarer Primärenergie bezeichnet, die für alle vorgelagerten Prozesse, vom Rohstoffabbau über Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse und für die Entsorgung, inklusive der dazu notwendigen Transporte und Hilfsmittel, erforderlich ist [3]. Die Aufteilung zwischen den einzelnen Prozessen und dem Transport hängt stark vom jeweiligen Material ab. Beim Holz beispielsweise, ist der Transportanteil besonders relevant, beim Aluminium ist die Herstellung bestimmend. Bei den metallischen Lüftungsmaterialien ist der Energieaufwand für den Transport in der Regel untergeordnet.

5.2.1 Beschichtung

Bei den heute in Lüftungsanlagen üblichen Spiro-Rohren ist für die Ökobilanz das Hauptmaterial wesentlich, also das verzinkte Stahlblech. Neben der Blechstärke ist dabei vor allem der Verzinkungsprozess von Bedeutung. Bei Lüftungskanälen ist eine Zinkauflage von 275 g/m² Kanal bzw. eine Schichtdicke von 20 µm pro Seite typisch [4]. Abbildung 6 zeigt die Wichtigkeit der Zinkbeschichtung in der Ökobilanz von Spiro-Rohren. Laut Studien macht sie bei den Grauen Treibhausgasemissionen und der Grauen Energie rund ein Drittel des Gesamtbetrags aus, zudem wäre Zink für über 60% der Umweltbelastungspunkte verantwortlich.

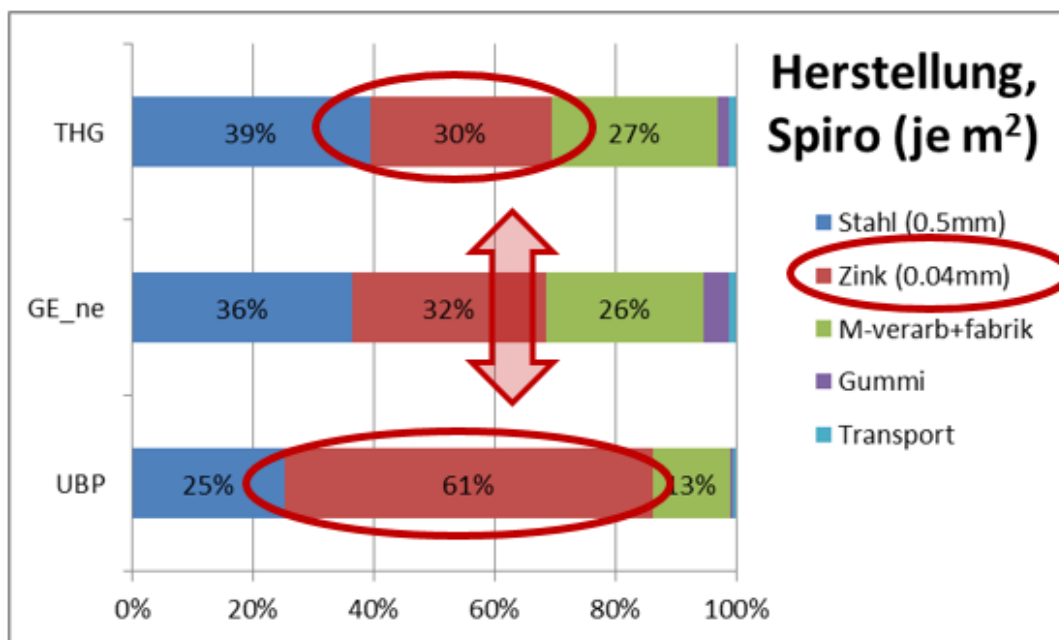


Abbildung 6: Prozentualer Anteil an Grauen Treibhausgasemissionen (THG), Grauer Energie (GE ne) und Umweltbelastungspunkte (UBP) von Spiro-Rohren. Untersuchung der Forschungsgruppe für Ökobilanzierung der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW im Rahmen der Studie SYGREN [5] auf Basis der Daten von Klingler et al. [4].

Beim Vergleich von gewöhnlichem und verzinktem Stahlblech sind die Unterschiede je nach Hersteller gross. Im Anhang 5.6 ist eine Analyse des Verzinkungsaufwands anhand der Environmental Product Declaration EPD von einem Schweizer Hersteller dargestellt. Durch die Verzinkung erhöht sich die Graue Energie des Stahlbands um 82%. Die Verzinkung ist für die Stahlanwendung jedoch von hoher Bedeutung, da die dünne Zinkschicht vor Korrosion schützt. Anders als nichtmetallische Beschichtungen bietet die Zinkschicht gar einen *aktiven Korrosionsschutz*. Dies bedeutet, dass der Zinküberzug die Korrosion bis zu einem Abstand von etwa 5mm bewirkt, also auch bei kleineren Fehlstellen der Schicht oder bei Schnittkanten. Abhängig von der Dicke des Zinküberzugs und vom angewendeten Verzinkungsverfahren kann eine unterschiedlich lange Schutzdauer erreicht werden. Stückverzinkte Bauteile erreichen eine Nutzungsdauer von mehr als 50 Jahren, was einen wirtschaftlichen Korrosionsschutz ohne Wartungsaufwand bedeutet. Die Verzinkung ist demnach für die ökologischen Kennwerte im Herstellungsprozess von Lüftungsrohren bedeutend, verlängert aber auch deren Lebensdauer in hohem Masse.

Eine alternative Beschichtung bzw. Behandlung zur Verzinkung müsste eine bessere Ökobilanz aufweisen, aber auch ähnliche technische und hygienische Eigenschaften übernehmen können. *Organische Beschichtungen*, *Lackierungen* bzw. Beschichtungen mit *Farbe (Pulverbeschichtungen)* oder *Kunststoffen* sind dabei kaum eine valable Alternative, da sie in der Regel als Vorbehandlung ebenfalls eine Verzinkung benötigen.

Eine Alternative zur reinen Verzinkung können **Legierungen** wie der *Zink-Magnesium-Überzug* sein. Dieser wurde vor etwas mehr als 10 Jahren auf dem Markt eingeführt (Abbildung 7) und bietet mit der Korrosionsklasse C5 (sehr hohe Anforderung) in vielen Anwendungsfällen eine bessere Korrosionsbeständigkeit als Feinbleche mit den üblichen Zinküberzügen. Zudem weist er Vorteile in der Ökobilanz auf. Mit Zink-Magnesium können die Überzugdicke und der Energieaufwand bei der Herstellung reduziert werden. Abbildung 8 zeigt die technischen Eigenschaften von Zink- und Zink-Magnesium-Überzügen im Vergleich auf. Die ebenfalls verfügbare Aluminium-Zink Beschichtung erreicht Korrosionsklasse C4 (hohe Anforderung).

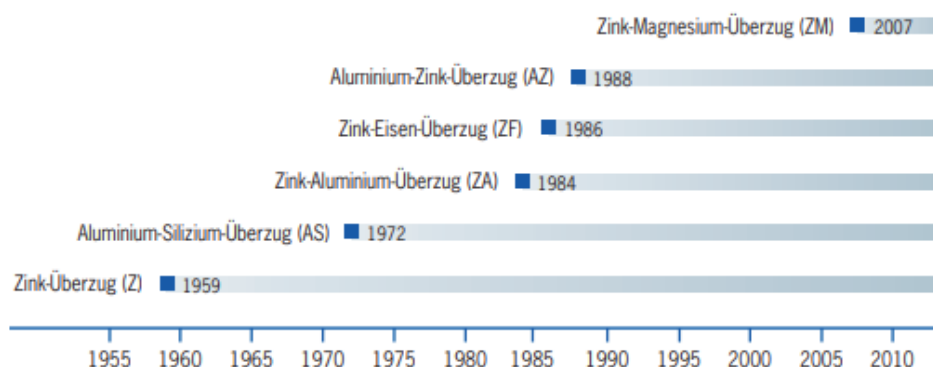


Abbildung 7: Markteinführung der metallischen Überzüge in Europa [11].

5.2.2 Hauptmaterial

Zur Verbesserung der Ökobilanz von metallischen Lüftungsrohren gilt es, das Potential auch beim verwendeten Stahl selbst zu untersuchen. Nebst der Wiederverwendung der Rohre (vgl. Abschnitt 5.1.3) ist beim Stahl für die Bilanz der Recycling-Anteil entscheidend. Für die Gewinnung von Stahl durch einen Recyclingprozess wird im Schnitt rund 70% weniger Energie benötigt und gar 85% weniger CO₂ emittiert als bei einer Primärproduktion mit vergleichbarer Qualität [12]. Es gibt Schweizer Stahlhersteller, die heute bereits 100% der Produktion auf Basis von Stahlschrott bereitstellen. Die Frage ist, inwiefern der Einsatz von Recycling-Stahl künftig für Lüftungsanlagen nachverfolgbar und auch bestellbar sein wird.

Als alternative metallische Materialien zum verzinkten Stahl für die Lüftungsanlagen kommen beispielsweise Aluminium oder rostfreie Edelstähle (z.B. Chromstahl und Chromnickelstahl) in Frage. Sie bringen aber, nebst einiger technischer, vor allem wirtschaftliche Nachteile mit sich. Üblicherweise werden diese nur für spezifische Anwendungen (z.B. Korrosionsschutz gegenüber bestimmten Medien) eingesetzt.

	Zink	Zink-Magnesium	
Allgemeine Eigenschaften			<p>Anmerkung: Die Angaben in dieser Tabelle kennzeichnen den heutigen Erfahrungsstand und gelten für eine vergleichbare Erzeugungsdicke und Auflagenmasse. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass beim Überzug ZM eine reduzierte Auflagenmasse angewendet werden kann. Die angegebene Bewertung ist nicht für jeden Anwendungsfall gültig. Im Zweifelsfall sollte der Hersteller konsultiert werden.</p> <p>a) Bei Anwendung im sauren oder basischen Bereich ist bei geringen Auflagenmassen eine spezielle Prüfung erforderlich, da in Abhängigkeit von den Anforderungen oder Testbedingungen die Einordnung in eine bessere oder schlechtere Klasse möglich ist.</p> <p>Legende: ■ = besonders empfehlenswert ■ = empfehlenswert ■ = Standard ■ = weniger geeignet ■ = noch zu klären</p>
• Beste Oberfläche	■	■	
• Lackiereignung	■	■	
• Beständigkeit gegen Säuren	■	■ ^{a)}	
• Beständigkeit gegen Basen	■	■ ^{a)}	
• Temperaturbeständigkeit	■	■	
Korrosionsverhalten			
• Unlackiert			
– Unverformte Fläche	■	■	
– Biegeschulter	■	■	
– Schnittkante	■	■	
• Lackiert, bandbeschichtet			
– Unverformte Fläche	■	■	
– Biegeschulter	■	■	
– Schnittkante	■	■	
Umformeigenschaften			
• (Mikro-)Rissbildung	■	■	
• Abrieb	■	■	
• Höchste Umformansprüche	■	■	
Fügen			
• Punktschweißen	■	■	
• Weichlöten	■	■	
• Kleben	■	■	
• Mechanisches Fügen	■	■	

Abbildung 8: Vergleich der Eigenschaften von Feinblech mit Zink- und Zink-Magnesium-Überzug [11].

5.3 Nichtmetallische Materialien

Es steht eine Vielzahl an nichtmetallischen Materialien zur Verfügung, die eingehender auf eine Eignung im Rahmen einer Lüftungsanlage überprüft werden müsste. Im Rahmen der Auslegeordnung wird im Folgenden eine Auswahl an alternativen Materialien mit grösserem Potential vorgestellt. Da der Baustoff *Karton* sich in unserer Studie als vielversprechend herauskristallisierte, wird derselbe bereits zu Beginn detailliert erläutert und greift somit auf später vorgestellte biotische Materialien vor. Nach Karton werden selbsttragende Dämmmaterialien (mineralischem und kunststoffbasiertem Ursprungs) aufgezeigt, welche den Suffizienzgedanken verfolgen und bereits eingesetzt werden. Infolgedessen werden Vor- und Nachteile von Kunststoffen und Biokunststoffen gegeneinander abgewogen. Schliesslich folgen biotische Materialien, welche durch pflanzliches oder tierisches Wachstum entstehen und sich in Zeiträumen erneuern, die dem Lebenszyklus von Gebäuden nahekommen. Sie bieten ein hohes ökologisches Potential. Vorgestellt werden Holzwerkstoffe, Bambus, Zellulose und Mycelium. Um ein möglichst vollständiges Bild zu generieren, schliessen die nichtmetallischen Materialien mit einer kurzen Vorstellung von Textilien ab und es folgt ein Abschnitt zu natürlichen Beschichtungen, welche den Einsatz von biotischen Materialien in einem geschlossenen Kreislauf künftig ermöglichen könnten.

5.3.1 Karton

Jüngsten Medienberichten zufolge scheint die Entsorgung von Altkarton vermehrt zum Problem zu werden. Die Materiallager von Kartonverwertern sind voll. Aufgrund des Überangebots, verlangen Schweizer Recyclinghöfe teilweise Geld für die Annahme von Karton [13]. Die Analyse des Preisindex von Karton zeigt, dass der Rohstoff-Wert kontinuierlich gefallen ist. Betrug er 2018 noch mehr als 80 CHF, reduzierte er sich 2019 auf 20 CHF. 2020 fiel für die Entsorgung derselbe Betrag (20 CHF) an (Abbildung 9).

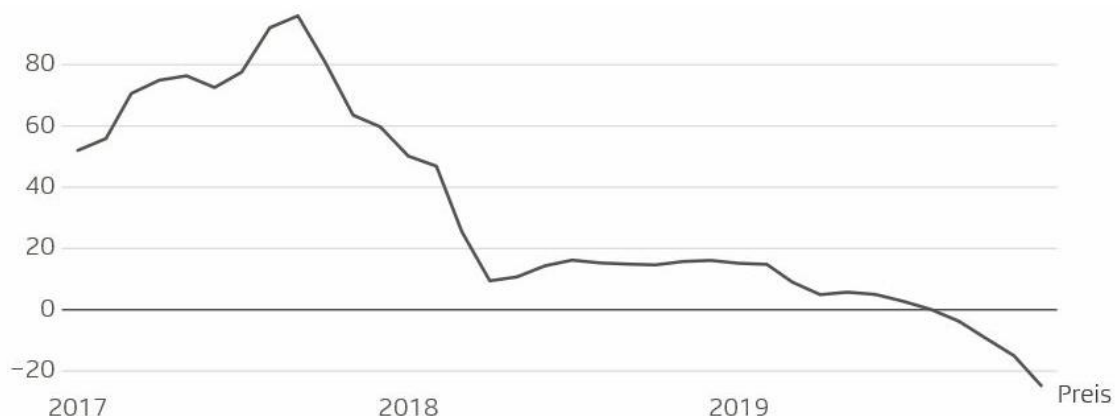


Abbildung 9: Preisindex für losen Karton in Franken pro Tonne seit 2017. Ein negativer Index bedeutet, dass die Entsorgung kostet [14].

Der Gebrauch von Verpackungskarton ist infolge des zunehmenden Online-Handels stark angestiegen. In der Schweiz werden rund 1.3 Millionen Tonnen Papier und Karton gesammelt (ca. 150 kg pro Kopf), die wiederum als Werkstoff für Kartonfabriken dienen. Es ist zu erwarten, dass in den nächsten Jahren die Produktionskapazitäten dieser Fabriken weiter ansteigen werden und mehr Altkarton wiederverwertet werden kann, denn auch der Gebrauch von Verpackungskarton ist infolge des zunehmenden Online-Handels stark angestiegen. Trotzdem wird wahrscheinlich mit Recycling-Karton langfristig ein preisgünstiges Material vorliegen.

Kartonarchitektur

Karton genießt in der Architekturszene zunehmende Beliebtheit, nicht zuletzt wegen den Beispielbauten des preisgekrönten Architekten Shigeru Ban (Pritzker-Preis 2014). «Karton ist billig, leicht und fast überall erhältlich», sagt er, «und als industrielles Produkt muss es gewisse Standards und Normen erfüllen, was die Arbeit damit vereinfacht». Der experimentelle Einsatz von Karton umfasst bei Shigeru Ban neben der Anwendung in Pavillons, Wohnhäusern oder Kirchen auch strukturelle Elemente im Aussenbereich, wie die Brücke «Pont du Gard» aufzeigt (Abbildung 10 unten und auf der Folgeseite).





Abbildung 10: Kartonanwendungen im Design- und Architekturbereich (v l n r): *Wiggle Side Chair*, Frank Gehry, 1972; *Cardboard Banquette Pavillon*, Cambridge, 2009; *Paper House*, Shigeru Ban, 1995; *Pavillon Hermès*, Shigeru Ban, 2011; *Christchurch in New Zealand*, Shigeru Ban, 2011; *Pont du Gard*, Shigeru Ban, 2007.

Herstellung von Karton

Ein Teil der heute eingesetzten Kartonprodukte wird aus wiederverwertetem Altkarton hergestellt und entsteht demnach durch einem Recyclingprozess. Dieser unterscheidet sich nicht wesentlich vom Kartonherstellungsprozess, beinhaltet aber ein Reinigungsverfahren der wieder zu verwendenden Fasern. Gemäss Jerzy F. Latka [15] benötigt die Herstellung von Recyclingpapier nur ein Sechstel der Energie zur Herstellung von «neuem» Papier. Sie bedarf nur die Hälfte des Wassers und verursacht weitaus weniger Treibhausgasemissionen. Beim Karton dürften die Verhältnisse ähnlich sein. Abbildung 11 zeigt den Herstellungsprozess von Kartonverpackungen aus Primärrohstoffen im Vergleich zum Recyclingprozess.

Recyclingkarton weist in der Regel eine geringere Qualität auf als Karton aus Primärrohstoffen. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Holzfasern nach jedem Recyclingschritt verkürzen und sich deshalb schlechter miteinander vernetzen. Papier und Karton können demnach nicht unendlich oft recycelt werden. Dennoch kann Karton öfters recycelt werden als allgemein bekannt. Eine Studie weist darauf hin, dass bis zu 25 Recyclingzyklen möglich sind [16].

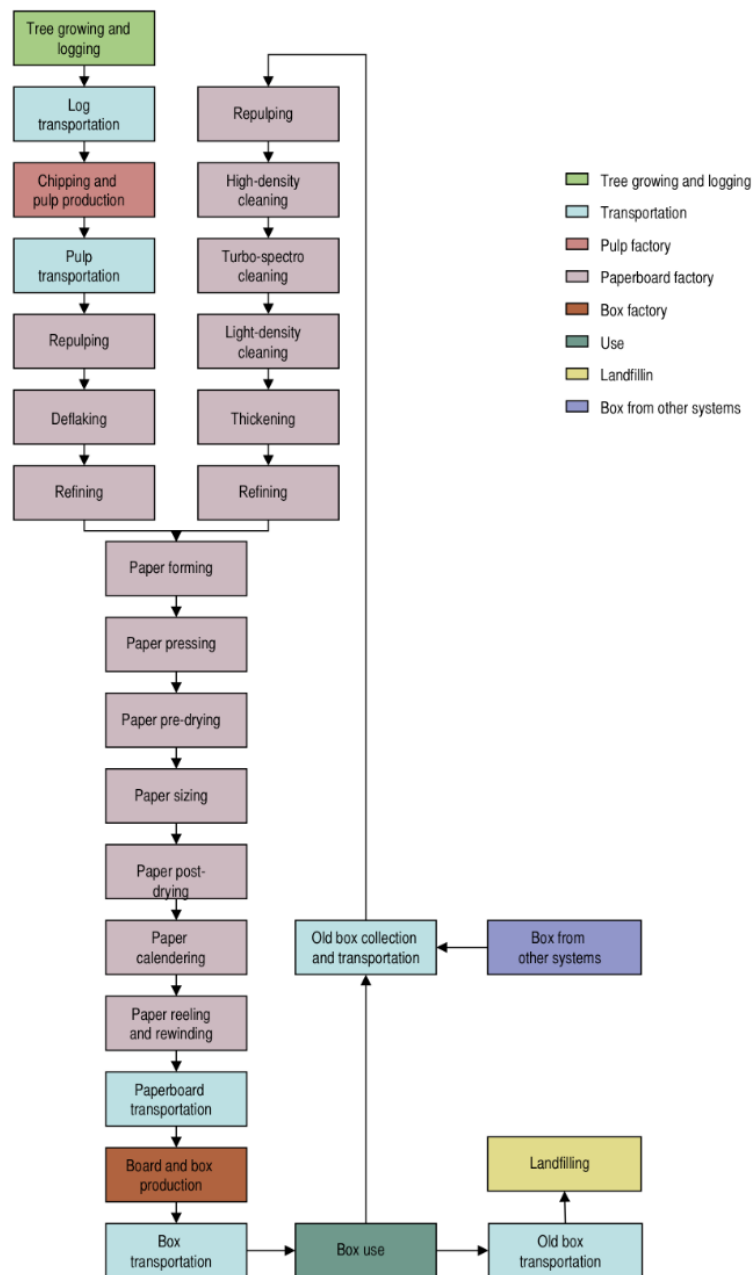


Abbildung 11: Herstellungsprozess von Kartonverpackungsmaterial aus der erstmaligen Produktion und aus recykliertem Karton im Vergleich [17].

Erste konkrete Beispiele der Kartonanwendung am Bau

Bereits 1999 konzipierte der Architekt Jouke Post das Gebäude *XX Office* in Delft nach den Grundsätzen der *Circular Economy*. Die technische Lebensdauer des Gebäudes sollte dabei an dessen vorgesehene Nutzungsdauer von lediglich 20 Jahre angepasst werden. Nach

dieser Zeit sollte das Gebäude komplett abgebaut und die Bauteile wieder-, weiterverwendet, wiederverwertet oder recycelt werden können. Das Motto des Architekten lautete: «Realisieren Sie ein Gebäude mit einer Lebensdauer von maximal zwanzig Jahren und wählen Sie Materialien aus, die im gleichen Zeitraum zu Staub geworden sind oder vollständig wiederverwendet werden können.» Das Gebäude steht heute noch, hat also die 20 Jahre übertroffen, interessanterweise mitsamt der originalen **Lüftungsanlage aus Karton**. (Abbildung 12)



Abbildung 12: Detailaufnahmen zur Kartonlüftungsanlage im XX Office in Delft (Architektur: Jouke Post).

Die *Westborough Primary School* (Abbildung 13) war 2001 das erste Gebäude in Europa, das hauptsächlich in Karton konzipiert wurde. Es sollte eine Lebensdauer von 20 Jahren erreichen und die Umweltbelastung durch Baumaterialien reduzieren. Ziel des Projektes war es zudem zu beweisen, dass Karton als vollwertiges Baumaterial eingesetzt und nach der Nutzungsdauer des Gebäudes recycelt werden kann: 90% des verwendeten Materials sollten wiederverwertet werden.

Die Tragstruktur des Gebäudes besteht aus Kartonröhren und -paneelen, welche die Holzfachwerkkonstruktion des Daches tragen. Die Paneele sind aus einer 4 mm dicken Vollkartonaussenfläche und drei 50 mm dicken Wabenpaneelen gefertigt, die in einen Holzrahmen eingebaut und zusammenlaminiert wurden. Zum Schutz vor **Feuchtigkeit** und **Wasser** wurden die Paneele auf der Innenseite mit einer Kunststoffbeschichtung und auf der Außenseite mit wasserfestem Baupapier überzogen.

Die Kartonbauteile wurden vor der Anwendung anhand von Prototypen hinsichtlich deren Wasser- und Feuerbeständigkeit, Festigkeit, Kriechfähigkeit und Dauerhaftigkeit geprüft. Die Tests ergaben, dass die Kartonrohre insbesondere vor **Feuchtigkeit** und signifikanten

Temperaturschwankungen geschützt werden müssen und dass eine **wasser- und feuerfeste Schicht** angebracht werden sollte.

Die **Projektkosten** waren vergleichsweise hoch. Ein Grossteil der Kosten wurde jedoch für die Entwicklung und Testung von Prototypen verwandt. Aus diesem Grund lässt sich vermuten, dass eine serielle Vorfabrikation die Kosten bedeutend reduzieren könnte. Letztlich wurde das Ziel, ein Gebäude aus 90 % recyceltem und wiederverwertbarem Material zu errichten, nicht erreicht. 85% des Gebäudegesamtwichts entfielen auf das Betonfundament. 29% des Baumaterialvolumens bestand aus Karton, 56 % ohne Berücksichtigung der Betonbodenplatte [15].



Abbildung 13: *Westborough Primary School* – ein Sozialraum für Kinder, welcher von Cottrell & Vermeulen Architecture in Zusammenarbeit mit dem Büro Happold experimentell entworfen und errichtet wurde.

Technische Eigenschaften von Karton

Das Verhalten von dichtem Karton bezüglich **Feuer** ist demjenigen von Holz ähnlich. Die Brenngeschwindigkeit ist ungefähr dieselbe und beträgt ca. 0.7mm pro Minute. Mit intumescierenden^a Beschichtungen kann das Brandverhalten bedeutend verbessert werden [15]. Bei Holzoberflächen wird mit Beschichtungen Baustoffklasse B1- schwerentflammbar nach DIN 4102-1 erreicht. Zu beachten ist, dass beim Verbrennen von Karton Hitze sowie Rauchbildung entsteht und v.a. toxische Gase entweichen können [17]. Letzterer Aspekt dürfte bei Lüftungsanlagen besonders relevant sein.

^a Intumescenz bezeichnet eine Ausdehnung oder eine Anschwellung, also eine Volumenzunahme eines festen Körpers ohne chemische Umwandlung. Beim Brandschutz bezeichnet der Begriff das zweckdienliche Schwellen bzw. Aufschäumen von Materialien. Intumeszente Baustoffe nehmen unter Hitzeeinwirkung an Volumen zu und entsprechend an Dichte ab. In der Regel finden intumeszente Stoffe im vorbeugenden baulichen Brandschutz Anwendung.

Zellulose, im Vergleich zu Karton, verkohlt (tropft und fällt nicht ab) und es entstehen keine giftigen Gase bei der Verbrennung. Wenn kein Borsalz eingesetzt wird, handelt es sich hierbei um eine ökologische Alternative für Dämmungen aus dem gleichen Rohmaterial. Daher ist Zellulose laut Prüfungen der Brandverhaltensgruppe RF2^a zugeordnet. Hier besteht ein grosses Forschungspotential bezüglich Karton. In Steigzonen, aber auch generell in Untergeschossen gilt bis anhin RF1^b als Bedingung für den Materialeinsatz. Brandschutzverordnungen werden allerdings laufend überprüft und wurden in den letzten Jahren zunehmend gelockert. So sind beispielsweise Zelluloseflockungen in Steigzonen als Ausnahme bereits zugelassen. Auch beim Kunststoff sind die Einschränkungen bereits gelockert worden. Absehbar sind künftige Erleichterungen im Brandschutz bei kleineren Brandabschnitten bzw. in Untergeschossen. Innerhalb von Wohnungen ist der Einsatz von Karton als Verteilsystem bereits heute problemlos.

Die **Feuchtigkeit** in beheizten Innenräumen stellt für die Kartonanwendung i.d.R. kein Problem dar. Der höchste Feuchtigkeitsgehalt wird unter feuchten und kalten Bedingungen aufgenommen. Der optimale Feuchtigkeitsgehalt von Papier liegt zwischen 5 und 7% und ergibt sich bei 21°C und 50% relativer Feuchtigkeit von selbst. Wechselnde Feuchtigkeitsniveaus verursachen allerdings höhere Kriechraten als ein hohes, jedoch konstantes Feuchtigkeitsniveau selbst [15]. Das Verhalten von Karton dürfte ähnlich sein. Vorsicht ist demzufolge in Räumen mit starkem und schwankendem Feuchteinfall geboten, z.B. in Garderoben mit Duschen oder in gewerblichen Küchen.

Die **Dämmeigenschaften** von dichtem Karton selbst sind allgemein von geringerer Bedeutung als diejenigen von kartonbasierten Produkten wie Well- oder Wabenkarton. Diese bestehen zumeist aus Recycling-Karton und können, wie die Studien von M. Cekon et al. [18] und A. Russ et al. [19] zeigen, eine Wärmeleitfähigkeit von bis zu 0.045 W/mK erreichen.

Hohe Temperaturen und hohe Luftfeuchtigkeit können das Wachstum von **Bakterien** im Karton bedeutend fördern. Eine Imprägnierung oder die Zugabe von Chemikalien kann die Entwicklung von Mikroorganismen minimieren und auch Nagetiere abschrecken [15]. Zusatzstoffe können allerdings die Wiederverwendung von Karton beeinträchtigen.

Schutzbehandlungen

Bei den Schutzbehandlungen wird grundsätzlich zwischen zwei Methoden unterschieden:

- **Imprägnierung**

Bei der Imprägnierung werden feste poröse Stoffe, in diesem Fall Karton, mit gelösten, emulgierten oder dispergierten Substanzen (Imprägnierungsmittel) durchtränkt. Nach dem

^a RF2 = geringer Brandbeitrag (z.B. Eichenholz, brandschutzbehandelte Stoffe)

^b RF1 = kein Brandbeitrag (z.B. Glas, Beton, Gips)

Verdunsten oder Trocknen verleihen die aufgetragenen Substanzen dem behandelten Material veränderte Gebrauchseigenschaften. Die Schutzsubstanzen können bereits bei der Herstellung der Kartonmasse hinzugefügt werden.

- **Schutzschicht**

Schutzschichten werden auf das gefertigte Material zusätzlich aufgetragen. Beschichtungen können dabei sowohl auf künstlicher als auch auf natürlicher Basis sein.

Schutzbehandlungen können dem Karton zusätzliche positive Eigenschaften verleihen. Sie können sich aber auch nachteilig auf die Recyclingfähigkeit und Entsorgung des Materials auswirken. Empfehlenswert sind deshalb Imprägnierungsmittel und Schutzschichten aus natürlichen Substanzen.

Heute kommen bereits natürliche, proteinbasierte Schutzschichten vor allem in der Verpackungsindustrie und im Lehmbau zum Einsatz, als flüssige Filme oder in Sprayform. Ökologische Schutzschichten sind auch beim Brandschutz ein Thema, wo halogenfreier Flammenschutz (HFFR) angeboten wird. Solche Schutzschichten könnten zukünftig bei der Kartonbehandlung von Bedeutung sein.



Abbildung 14: (V l n r) Brandversuche, Schutzschichten in der Verpackungsindustrie und Beispiel einer proteinbasierten Schutzschicht im Lehmbau im Haus Rauch (Boltshauser Architekten). Dort wurde eine Lehm-Kasein-Spachtelung angeschliffen, mit Leinöl imprägniert und mit dem Wachs aus der brasilianischen Carnaubapalme poliert, welches als das härteste bekannte natürliche Wachs gilt. Dadurch wird die Oberfläche wasserfest, hart und pflegeleicht.

Karton und Lüftungsanlagen heute

In Grossbritannien werden bereits Lüftungsverteilsysteme aus Karton angeboten. *GatorDuct*[®] ist ein industrieller Hersteller von dreischichtigen Kartonprodukten für runde oder viereckige Lüftungsleitungen. Der Hersteller vermarktet seine Produkte als «innovativ, nachhaltig, kosteneffektiv und als 80% leichter als gängige Lüftungsverteilsysteme». Die auf den Karton aufgetragene *GatorSkin*-Schutzschicht wirkt als Dampfsperre, ist feuerhemmend, hydrophob und schützt vor Feuchtigkeit. Die Produkte sind laut Hersteller zu 100% recycelbar, jedoch selbst nicht aus Recycling-Karton hergestellt (Abbildung 15).



Abbildung 15: Dreischichtiger Aufbau der GatorDuct[®]-Produkte (o.l.) und ausgeführte Lüftungsbeispiele [20].

Zusammenfassung

Für den britischen Markt werden Lüftungsverteilsysteme auf Kartonbasis seit mehreren Jahren angeboten. Aus technischer Sicht scheint das Material die Anforderungen für Lüftungs-systeme erfüllen zu können und Langzeiterkenntnisse der realisierten Objekte werden bald Aufschluss darüber geben.

Fragen, die sich diesbezüglich stellen sind, ob derselbe Qualitätsstandard erzielt werden kann und die Kreislauffähigkeit trotz der Behandlung des Kartons zur Erfüllung der Anforderungen gegeben ist. Mit der ansteigenden Menge an verfügbarem Altkarton ist eine Preisreduktion von Recycling-Karton-Produkten zu erwarten, was das wirtschaftliche Potential der Kartonverarbeitung durchaus erhöhen dürfte.

Aus der Analyse geht hervor, dass Karton eine valable Alternative zu den gängigen Materialien in Lüftungsverteilanlagen bilden kann. Tabelle 2 fasst die wesentlichen Erkenntnisse aus den untersuchten Kriterien zusammen.

Tabelle 2: Beurteilung des alternativen Materials *Karton* hinsichtlich dessen Verwendung in Lüftungsanlagen.

Begriff	positiv	neutral / besonderes	negativ
Ökologie	<ul style="list-style-type: none"> - grosse Mengen verfügbar - Wiederverwertung möglich - RC-Karton: Geringerer Herstellungsaufwand, etablierte Verfahren - bindet CO₂ - kompostierbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Beschichtung entscheidet über RC-Potential - Verklebung der Komponenten ggf. RC-Hindernis 	<ul style="list-style-type: none"> - Herstellung aus Primärrohstoffen ist vergleichsweise energieintensiv
Lebensdauer	<ul style="list-style-type: none"> - 25 RC-Zyklen möglich - Kaskadennutzung 	<ul style="list-style-type: none"> - Langzeitstudien fehlen (20 Jahre scheinen möglich zu sein, Ziel: 30 Jahre, bzw. länger falls Wiederverwendung nach Demontage geplant) 	
Brandschutz	<ul style="list-style-type: none"> - innerhalb von Wohnungen oder Brandabschnitten heute bereits anwendbar 	<ul style="list-style-type: none"> - in Zusammenhang der Anpassung von Brandschutznormen könnte der Einsatz in Untergeschossen oder Steigzonen neu beurteilt werden - Verhalten im Brandfall ähnlich wie Holz, Beschichtungen können das Brandverhalten bedeutend verbessern 	<ul style="list-style-type: none"> - Beschichtungen können sich auf die Ökologie negativ auswirken - Toxizität im Brandfall muss überprüft werden
Hygiene	<ul style="list-style-type: none"> - Luftverteilsysteme aus Karton werden heute bereits eingesetzt 	<ul style="list-style-type: none"> - Beschichtungen oder Imprägnieren können Bakterienwachstum minimieren 	<ul style="list-style-type: none"> - Recyclingfähigkeit und Kompostierbarkeit durch Beschichtungen problematisch - Risiko der Einlagerung von Mikroben/Pilzen in feuchtem Karton
Materialfestigkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Luftverteilsysteme aus Primärmaterial werden bereits eingesetzt 		<ul style="list-style-type: none"> - Die Tragfähigkeit von RC-Karton ist ca. 30% geringer
Leckagen	<ul style="list-style-type: none"> - Luftverteilsysteme aus Primärmaterial werden bereits eingesetzt - Mit der entsprechenden Beschichtung Raugkeit unproblematisch 	<ul style="list-style-type: none"> - Forschungsbedarf Verbindungssysteme (Ziele: Dichtheit, einfache Demontage) 	
Feuchteresistenz	<ul style="list-style-type: none"> - etablierter Einsatz in Innen- und Außenräumen mit entsprechendem konstruktiven Schutz oder Behandlung 		<ul style="list-style-type: none"> - problematisch bei stark schwankender Raumfeuchte (Duschen, gewerbliche Küchen)
Kompatibilität	<ul style="list-style-type: none"> - Luftverteilsysteme aus Primärmaterial werden bereits eingesetzt. Erfahrungswerte stehen zur Verfügung - Dimensionen frei wählbar 		
Robustheit	<ul style="list-style-type: none"> - ganze Gebäude und Brücken in Karton wurden bereits realisiert 		
Ästhetik	<ul style="list-style-type: none"> - Renommierte Architekturprojekte mit Karton nehmen zu - Karton kann einfach gefärbt und bedruckt werden 		<ul style="list-style-type: none"> - die Materialakzeptanz durch die Nutzenden muss noch eruiert werden (Stellenwert der Qualität?)
Realisierbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Luftverteilsysteme aus Karton werden heute bereits eingesetzt - einfache Verarbeitung mit konventionellen Werkzeugen - Transport leicht umsetzbar 		
Wirtschaftlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> - der Preis vom Rohmaterial «Karton» zur Herstellung von RC-Karton ist derzeit sehr gering, Tendenz stagnierend 	<ul style="list-style-type: none"> - am britischen Markt werden Kartonprodukte seit 2013 industriell angeboten 	

5.3.2 Dämmmaterialien

Ein bedeutender Teil der Luftverteilung in Gebäuden bedarf aus unterschiedlichen Gründen (z.B. Schallschutz, Wärme-/Kälteschutz, Brandschutz) einer Dämmung. Als Möglichkeit zur Minimierung des Materialbedarfs bei Lüftungsanlagen drängt sich deshalb der Einsatz von Lüftungskanälen aus **selbsttragenden Dämmmaterialien** auf. In der Regel wird die Dämmung additiv auf stabile Lüftungskanäle aufgebracht. Bei einem im Sinne der Suffizienz optimierten Konzept sollte das Dämmmaterial selbst die zusätzlich zum Wärme-/Kälteschutz notwendigen Funktionen des Luftverteilsystems übernehmen können: Festigkeit, Luftdichtheit, Hygiene usw.

Verschiedene auf dem Markt bereits verfügbare Luftverteilsysteme orientieren sich bereits am Konzept des selbsttragenden Dämmmaterials, wie die folgend dargelegten Beispiele aufzeigen.

Beidseitig kaschierte Glaswolle

Die Firma Isover – St. Gobain bietet mit dem Produkt CLIMAVER® ein Komplettsystem zur Konstruktion selbsttragender, gedämmter Lüftungskanäle aus Glaswolle an. Dabei werden beidseitig kaschierte Glaswoll-Dämmplatten mit einer Stärke von 25 mm i.d.R. zu Lüftungskanälen mit viereckigem Querschnitt und den gängigsten Formteilen verarbeitet. Dies kann mit geeignetem Werkzeug direkt auf der Baustelle erfolgen (Abbildung 17).



Abbildung 16: Einsatzbeispiele des Systems CLIMAVER® [21]

Laut den technischen Datenblättern des Herstellers besitzt das System speziell folgende Eigenschaften: Das System ist bis zu **viertelmal leichter** als herkömmliche, isolierte Stahlblechkanäle. Handling und Montage werden dadurch vereinfacht. Das geringere Gewicht

wirkt sich indes ebenfalls auch auf die **Ökobilanz** aus. Diese soll rund 20% besser ausfallen als diejenige von isolierten Stahlblechkanälen. CLIMAVER® ist nach EN 14303 und EN 13403 sowie für die Labels BREEAM und LEED zertifiziert und wird bis zu 80% aus recyceltem Glas hergestellt. Ein erneutes Recycling ist allerdings höchst unwahrscheinlich.

Die Dämmplatten erzielen gute Werte sowohl hinsichtlich des **Wärme-/Kälteschutzes** als auch des **Schalls**. In der Regel kann durch den Einsatz von CLIMAVER® auf zusätzliche Schalldämpfer verzichtet werden. Die Platten besitzen eine gute Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 0,032 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) und eine hohe **Luftdichtheit** (Dichteklasse D gemäss EN 1507), was sich positiv auf die Energieeffizienz der Lüftungsanlagen auswirkt.

Die Beschichtung der Kanalinnenseite erfüllt die **Hygieneanforderungen** gemäß VDI 6022 / DIN EN 846 und bietet für mikrobiellen Wachstum, d.h. Schimmelpilze und Bakterien keinen Nährboden.

Das Material ist hinsichtlich des **Brandschutzes** vielseitig einsetzbar. Es ist nichtbrennbar (Euroklasse A2-s1, d0) und ist auch im Bereich von Flucht- und Rettungswegen gebrauchstauglich [22].

Das System ist verhältnismässig neu und wurde bisher nicht oft eingesetzt. Es fehlen Erfahrungen zum Langzeitverhalten, insbesondere hinsichtlich der Robustheit (Gefahr von Verletzungen der Kanalkonstruktion) und der Dichtheit. Es stellt sich diesbezüglich ebenfalls die Frage, wie einfach sich Klappen, Sensoren usw. im Lüftungssystem integrieren lassen.

Beidseitig kaschierte Steinwolle

Ähnliche Eigenschaften wie CLIMAVER® bietet das System Climate Recovery® des gleichnamigen Anbieters aus Schweden. Bei diesem System wird Mineralwolle anstelle von Glaswolle eingesetzt, welche mit einer Alufolie auf der Innen- und Aussenseite geschützt wird. Das System wird vornehmlich zu runden Lüftungsquerschnitten verarbeitet und kann mit traditionellen metallischen Lüftungskanälen kombiniert werden. Aus ökologischer Sicht ist Mineralwolle als energieintensiv in der Herstellung zu bewerten und die Verklebung der Materialien als problematisch einzustufen, da eine sortenreine Trennung und ein darauf basiertes Recycling erschwert werden. Recycling von Mineralwolle ist derzeit nicht Usus und führt i.d.R. zu Downcycling.

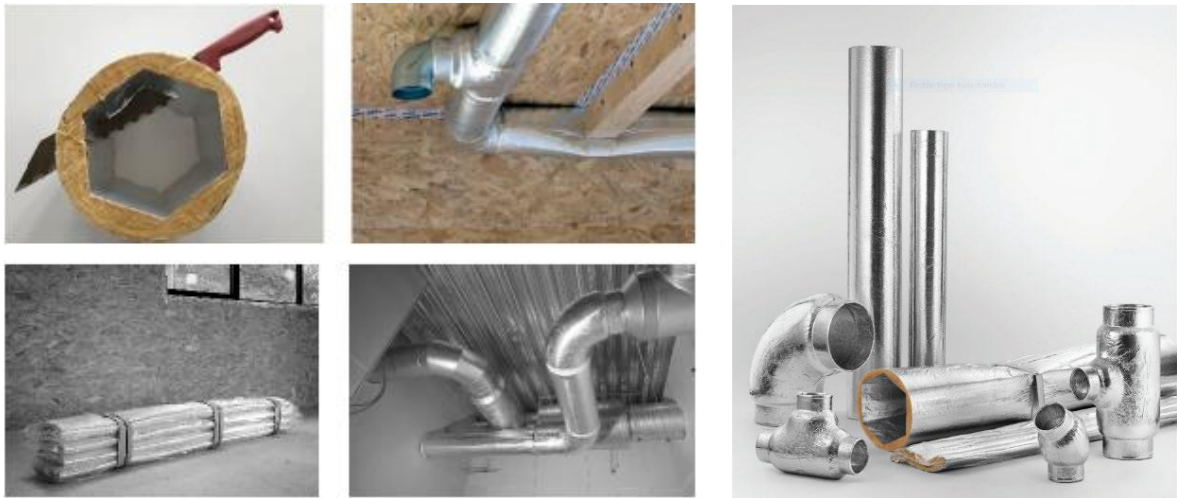


Abbildung 17: Einsatzbeispiele des Systems Climate Recovery® [23]

Expandiertes Polystyrol EPS

Das System RenoPipe® wird von der Firma Helios Lufttechnik angeboten und ist für den Einbau von mechanischen Lüftungsanlagen bei Altbauwohnungssanierungen konzipiert. Es bietet sämtliche Komponenten für eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung innerhalb einer Wohnung an. Das Besondere am System ist das Luftverteilsystem, welches i.d.R. am Deckenrand des Gangbereichs angebracht wird und als Deckenelement ohne zusätzliche Verkleidung angedacht ist (Abbildung 18).

Die Komponenten für die Luftverteilung aus **hochverdichtetem EPS** sind überstreichbar, lassen sich beliebig aneinanderfügen und auch wieder demontieren, was die mehrmalige Wiederverwendung erlauben würde (vgl. Abschnitt 5.1.3 Wiederverwendung). **Ablagerungen** werden laut Hersteller im geschlossenzelligen EPS verhindert. Die asymmetrischen Lippendichtungen zwischen den Komponenten sorgen für die **Dichtigkeit** des Luftverteilsystems. Das Konzept «2 in 1» (Luftführung und Verkleidung im selben Element) soll durch die Einfachheit zu Kosteneffizienz und Verkürzung der Bauzeit beitragen. Es wird jedoch explizit für den Wohnbereich propagiert. Eine Anwendung in Bereichen mit **Brandschutzanforderungen** ist aufgrund der Brennbarkeit von EPS bisher nicht vorgesehen. Das stoffliche Recycling von EPS wird künftig möglich sein, sofern es nicht im Verbund verklebt wurde. Sowohl die Wiederverwendung als auch die Wiederverwertung sind in absehbarer Zeit jedoch nicht wahrscheinlich, da es wirtschaftlich uninteressant ist und, unter Berücksichtigung der Transport- und Aufbereitungsenergie, auch ökologisch fragwürdig [24].



Abbildung 18: Komponenten, Konzept und Anwendung des Systems RenoPipe®

Zusammenfassung

Die Idee der Anwendung von selbsttragenden Dämmmaterialien als Lüftungskanäle wurde bereits in verschiedenen Ländern aufgenommen. Die bereits auf dem Markt erhältlichen Produkte bestehen laut Herstellern aus Primärrohstoffen und verfügen nicht über Rücknahmesysteme. Demzufolge bieten sie noch keine grösseren ökologischen Vorteile gegenüber Standardprodukten, ausser dem Verzicht auf das Material für ein zusätzliches Rohr. Ob sich das Konzept hinsichtlich der grauen Treibhausgasemissionen bewährt, hängt von den jeweils eingesetzten Materialien ab (vgl. 5.3.11 Einfluss auf Umweltbilanz). Aus der Analyse geht jedoch hervor, dass Dämmmaterialien selbst, aus technischer Sicht, eine valable Alternative zu den gängigen Materialien in Lüftungsverteilanlagen bilden können. Kontakte zu Anbietern von Dämmungen, welche während der Bearbeitungszeit der Studie stattfanden, haben dies bestätigt und ihr Interesse bekundet.

Interessant für eine breite Anwendung dürften demnach insbesondere Materialien sein, welche auch Brandschutzanforderungen erfüllen können, wie Glas- und Steinwolle. Diese benötigen bisher – sowohl innen- als auch aussenseitig – zusätzlich aufgebrachte Materialschichten zur Erfüllung der Anforderungen an Hygiene und Dichtheit des Luftverteilsystems.

Somit ist sogar bei den mineralischen Baustoffen der Vorteil letztlich gering, wenn das Dämmmaterial nicht explizit notwendig ist (Brandschutz, Wärmeschutz, Schall), da alle aufgeführten Dämmstoffe auch in ihrer Ökobilanz als energieintensiv einzustufen sind. Bei einem Einsatz von RC-Baustoffen könnten sich die Werte deutlich verbessern. Die Materialisierung und die **Trennbarkeit** der zusätzlichen Schichten zur Dämmung wäre für die Zirkularität eines solchen Systems entscheidend, dennoch ist ein erneutes Recycling zum derzeitigen Stand der Technik sehr unwahrscheinlich.

Tabelle 3: Zusammenfassung zu Lüftungskanälen aus selbsttragenden Dämmmaterialien

Begriff	positiv	neutral / besonderes	negativ
Ökologie	- Geringes Materialgewicht und weniger Masse: EPS benötigt weniger Material für die gleiche Dämmleistung - Materialsuffizienz	- material- und konzeptabhängig bei den verschiedenen Systemen	- aus nicht erneuerbaren Rohstoffen, energieintensiv in der Herstellung - bei mehrschichtigen Aufbauten Kreislaufpotential überprüfen - Kunststoff hohe RC Fähigkeit, aber nur in Reinform
Lebensdauer	- Langlebigkeit des Materials	- Langzeiterfahrung bei den Systemen auf dem Markt fehlt noch, sollte aber keine grosse Hürde darstellen	- End of Life: Alle Materialien haben ein Entsorgungsproblem, zudem als Verbundwerkstoffe keine sortenreine Trennung möglich
Brandschutz	- Glas- und Steinwolle sind nicht brennbar	- material- und konzeptabhängig	- EPS erfüllt keine Anforderungen
Hygiene	- i.d.R. durch zusätzliche Schicht erfüllt	- material- und konzeptabhängig	- Zusätzliche Schicht verstärkt i.d.R. das Entsorgungsproblem
Materialfestigkeit	- Druckfestigkeit für übliche Anwendungen ausreichend	- material- und konzeptabhängig	
Leckagen	- gemäss Herstellerangaben gegeben	- Langzeiterfahrung fehlt noch - vermutlich vergleichbarer Druckverlust	
Feuchteresistenz	- unproblematisch, wenn innere Schicht dicht ist	- material- und konzeptabhängig	
Kompatibilität	- Luftverteilsysteme aus selbsttragenden Dämmungen werden bereits eingesetzt - Dimensionen frei wählbar		
Robustheit			- im Vergleich zu Stahl gering - anfälliger auf mechanische Beschädigungen
Ästhetik	- Glaswolle unverkleidet möglich	- i.d.R analog gedämmter Kanäle	- Steinwolle und EPS eher verkleidet denkbar
Realisierbarkeit		- material- und konzeptabhängig, Verarbeitung erscheint aber gut	
Wirtschaftlichkeit	- laut Hersteller kosteneffizient (bei vergleichbarer Leistung)	- auf dem Markt noch nicht etabliert	- Recycling nicht wirtschaftlich

5.3.3 Kunststoffe

Als Kunststoffe – umgangssprachlich Plastik – werden grundsätzlich alle Werkstoffe bezeichnet, welche synthetisch oder halbsynthetisch aus organischen Kohlenstoffverbindungen hergestellt sind. Typisches Merkmal von Kunststoffen ist, dass sich ihre technischen Eigenschaften, wie Formbarkeit, Härte, Elastizität, Bruchfestigkeit, Temperatur- oder chemische Beständigkeit, durch die Auswahl von Ausgangsmaterial, Herstellungsverfahren und Beimischung von Additiven sehr stark variieren lassen. Sie lassen sich so wahlweise zu Formteilen, Fasern oder Folien weiterverarbeiten und den verschiedensten Nutzungen zuführen. Sie dienen deshalb als Verpackungsmaterialien, Textilfasern, Wärmeisolierung und Trennschicht, Bodenbeläge, Bestandteile von Lacken, Klebstoffen, Kosmetika usw. In der Elektrotechnik werden sie als Materialien für Isolierungen, Leiterplatten und Gehäuse eingesetzt, im Fahrzeugbau unter anderem als Material für Reifen, Polsterungen, Benzintanks. Bei Lüftungsrohren gelten dementsprechend **Polymer-Kunststoffe** – neben verzinkten Stahlblechen, Aluminium oder Edelstahl – als die **gängigste Materialoption**.

Technische Eigenschaften

Vor allem in Wohnbauten wird Kunststoff aufgrund folgender **Vorteile** häufig eingesetzt:

- hohe **Beständigkeit gegen Korrosion**
Kunststoff verhält sich beispielsweise besser als ein galvanisiertes Wickelfalzrohr
- einfache **Installation und Bearbeitung**
Kunststoff kann nicht nur leicht geschnitten, sondern auch erhitzt werden. Enden lassen sich ohne zusätzliche Dichtung vollständig luftdicht abschließen.
- geringes **Gewicht**
in diesem Punkt ist Kunststoff insbesondere gegenüber Metallen konkurrenzlos
- glatte **Oberflächen** ohne Schweißnähte
Widerstände gegen Luftströme im (Flex-)Rohr werden reduziert, so dass die Leistung von Ventilatoren niedriger ausfallen kann. Weniger Rauigkeit führt zu weniger Reibungsverlusten.
- günstige **Anschaffungskosten**
Kunststoff ist in der Anschaffung deutlich günstiger als andere Materialien

Kunststoff weist aber ebenfalls bedeutende Nachteile auf:

- **Herstellung**
Die Erzeugung von Kunststoffen, welche aus dem fossilen Rohstoff Erdöl hergestellt werden, ist besonders umweltbelastend. Da sie erst durch Additive ihre spezifischen Eigenschaften erhalten, entstehen grösstenteils Materialien mit geringem RC-Potential, welche teilweise toxisch und schwer zu entsorgen sind [25]. Dies ist beispielsweise ein wesentlicher Unterschied zu RC-fähigen Metallen wie Stahl.
- hohe **Zerbrechlichkeit**

Kunststoff ist trotz guter Festigkeit letztendlich zerbrechlich. Nach rund fünf bis sieben Jahren lässt die Elastizität nach. Dann genügt oftmals ein kleiner Stoß, um einen Bruch auszulösen.

- Ausgeprägte **Brennbarkeit**

Bereits bei einer Temperatur von 200 °C fängt Kunststoff an zu „schwimmen“ und die Polymer-Lüftungsrohre dehnen sich aus. Dadurch ist eine einwandfreie Funktionsfähigkeit der Lüftungsanlage nicht mehr gewährleistet [26].

- **Entsorgungsproblematik**

Kunststoffe weisen eine hohe Recyclingfähigkeit auf, wenn sie in Reinform vorliegen. Ein Grossteil der Kunststoffe ist nach wie vor verunreinigt und kann somit weniger oft und nur in minderwertiger Qualität recycelt werden (**Downcycling**). Generell gilt allerdings, dass Kunststoffe derzeit fast ausschliesslich thermisch (bei geringem Heizwert) verwertet werden, wobei giftige Gasentwicklung möglich ist. Da wirtschaftliche Anreize fehlen, ist ein stoffliches Recycling zwar perspektivisch in vielen Fällen möglich, wird jedoch nicht praktiziert [24].

Gebräuchliche Rohrarten

Polyethylen (PE) und **Polypropylen (PP)** finden bereits eine grosse Anwendung in neu angelegten Druckrohrleitungen. Die wichtigsten Eigenschaften sind deren Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer, aber auch thermischer Langzeitbelastung. In der Lüftungsrohrindustrie zeichnen sie sich durch die hohe chemische Beständigkeit, Anwendung über einen grossen Temperaturbereich und die einfache Verlegung der Rohre aus. PE- und PP-Rohre sind in unterschiedlichsten Formen erhältlich. Dabei kann entschieden werden, ob die Lüftungsrohre geschweisst oder gesteckt werden sollen. Durch die einfache Herstellung ist die passende Verbindungstechnik zu anderen Lüftungssystemen gewährleistet. Als Thermoplaste sind PE und PP recyclebar und können ohne umweltschädliche Weichmacher oder Zusatzstoffe eingesetzt werden. PE benötigt weniger Energie im Herstellungsprozess als andere Kunststoffe.

Einige Vorteile von PE- und PP-Rohren können auch auf **Polyvinylchlorid PVC** übertragen werden. PVC-Rohre sind leichter und temperaturbeständiger als solche aus PE oder PP und können ebenfalls recycelt werden. In der Herstellung von PVC finden i.d.R. Weichmacher sowie giftige Polyvinylchloride Verwendung. Solche Substanzen können im Recycling- oder Verbrennungsprozess entweichen und sind als gesundheitsgefährdend einzustufen. PVC hat deshalb ein kritisches Brandverhalten und sollte in Innenräumen generell nicht eingesetzt werden (auch bei Elektrokabeln nicht).

Entwicklung alternativer Produkte

Kunststofflüftungsleitungen werden in bewohnten Räumen i.d.R. nicht sichtbar verlegt, da das Material optisch zumeist als minderwertig wahrgenommen wird. In abgehängten Deckenkonstruktionen oder im Beton geführt kommen sie hingegen, aufgrund ihrer Performance, oft zum Einsatz (Abbildung 19).

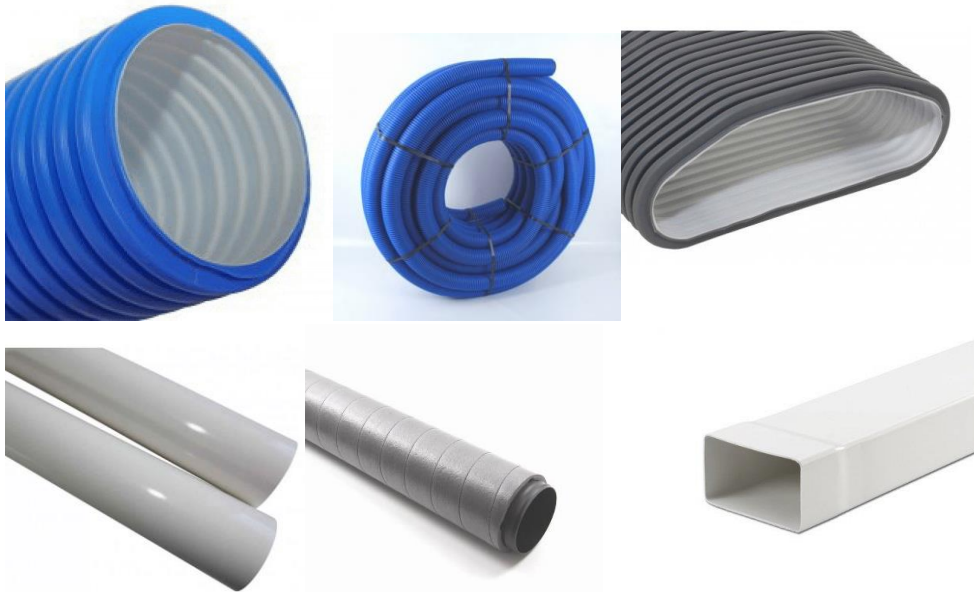


Abbildung 19: Klassische Leitungsrohre aus Kunststoff mit 75 mm Durchmesser, verfügbar in Rollen bis zu 50 m (o.l.) sowie verschiedene mögliche Rohrformen oder Ausführungen [27].

Eine ästhetische Aufwertung könnten Kunststoffleitungen durch **Beschichtungen** erlangen. Galvanisierte Kunststoffrohre, beispielsweise, sind in der Herstellung und Dimensionierung mit den üblichen Kunststoffrohren vergleichbar, sind jedoch im Aussehen metallischen Rohren sehr ähnlich. Die sortenreine Rückgewinnung des Kunststoffs aus dem **Hybridmaterial** ist derzeit noch nicht möglich, Untersuchungen zu einem vollständigen Recycling werden derzeit aber durchgeführt [28].

Eine Alternative bieten Lüftungsrohre aus **Polyurethanschaum** (PUR), diese sind oft mit glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) beschichtet. Der Polyurethanschaum verleiht dem Rohr eine gute schallisolierende Wirkung, die GFK Beschichtung gute korrosive und mechanische Eigenschaften sowie Gestaltungsmöglichkeiten, welche diejenige von unbeschichtetem Kunststoff übersteigen. Reine **GFK-Rohre** weisen vor allem bessere mechanische Eigenschaften auf. Polyurethanschaum kann chemisch recycelt werden, da es allerdings in diesem Fall beschichtet vorliegt, ist eine stoffliche Verwertung unwahrscheinlich bis unmöglich.

Die vorgestellten Alternativen bieten aus ökologischer Hinsicht bislang keine Vorteile zu konventionellen Produkten. Es fehlen ausgereifte Recyclingkonzepte und Rücknahmesysteme der Hersteller um den Ressourcenverbrauch der fossilen Rohstoffe zu senken und

einen geringeren Fussabdruck zu gewährleisten. Solange die Systeme nicht eine breite Anwendung finden, wird wahrscheinlich auch kein wirtschaftlicher Reiz zum Aufbau eines Rücknahmesystems geschaffen.

Die Kunststoffherstellung ist im Vergleich zur Metallproduktion bedeutend weniger aufwändig und dennoch sehr energieintensiv. Kunststoffe bestehen aus organischen, nicht nachwachsenden Rohstoffen und können bei der Entsorgung gesundheitlich bedenklich sein. Zudem sind Recyclingkonzepte insbesondere für vermischte Materialgruppen, noch nicht ausgereift und wirtschaftlich bislang nicht tragfähig. Die verschiedenen Kunststoffprodukte weisen beträchtliche Unterschiede hinsichtlich der *ökologischen Bilanz* auf. Bessere Werte als reine Kunststoffsysteme weisen Hybride auf bzw. Composite, welche die Kunststofftechnik mit nachwachsenden Materialien kombinieren (Abbildung 20, Abbildung 21). Ein Beispiel diesbezüglicher Weiterentwicklung von Kunststoffprodukten bilden Wood Plastic Composites WPC, die im Abschnitt 0 «

Holzwerkstoffe detaillierter beschrieben werden. Kapitel 0 widmet sich vertieft

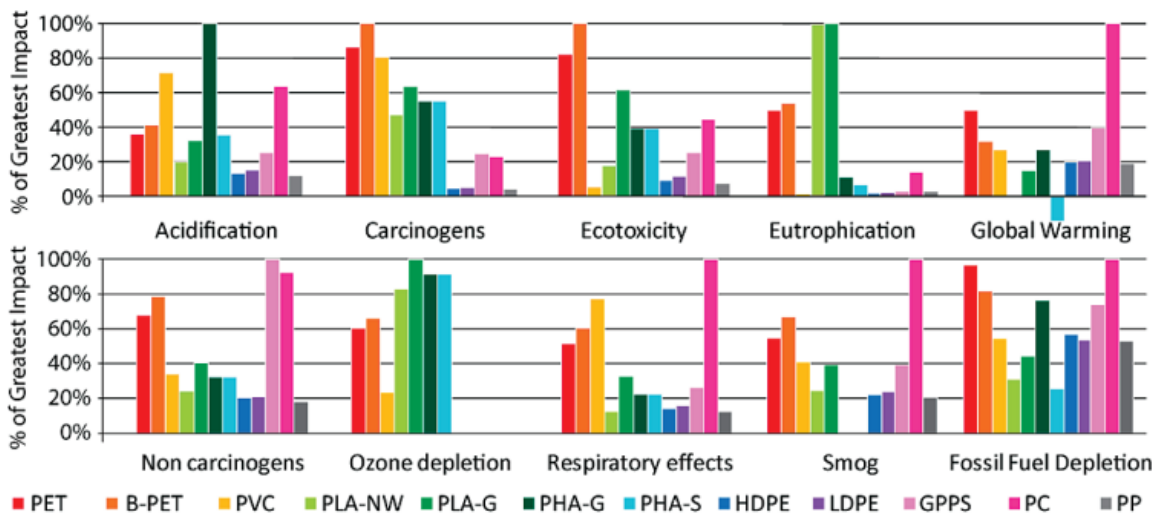


Abbildung 20 LCA von verschiedenen Polymeren in verschiedenen Kategorien. Immer im Vergleich zu dem Polymertyp mit dem grössten Einfluss [29].

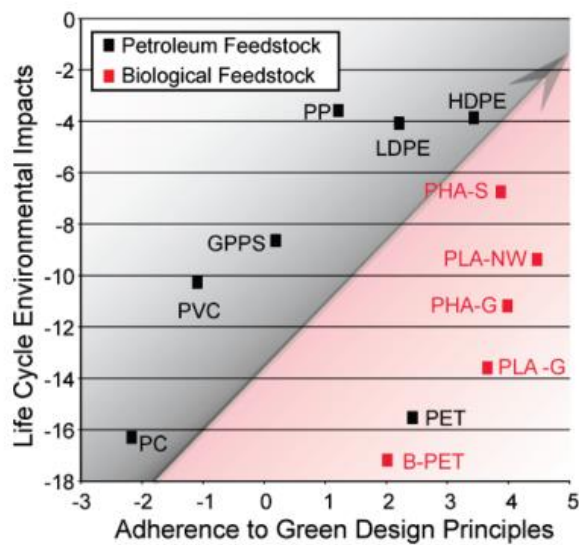


Abbildung 21 Einschätzung ausgewählter fossiler und biobasierter Kunststoffe anhand ihres Potentials zur Einhaltung ökologischer Gestaltungsprinzipien (*Green Design Principles*) im Verhältnis zu ihrer Umweltwirkung (LCA) [29]

Zusammenfassung

Aus der Analyse geht hervor, dass Kunststoffe bereits breit eingesetzt werden in der Lüftungsindustrie. Die Variabilität an Eigenschaften von Kunststoff ist sehr hoch und führt zu diversen Einsatzmöglichkeiten. Wo es die Brandschutzanforderungen erlauben sowie in nicht sichtbaren Lüftungsverteilsystemen entsprechen Kunststoffleitungen dem Standard. Die Weiterentwicklung von Kunststoff-Kompositen mit nachwachsenden Materialien macht das Material ökologisch interessanter, jedoch nicht unbedenklich. Die ökologische Bilanz der verschiedenen Produkte ist bedeutend und variiert individuell sehr stark. Tabelle 4 fasst die wesentlichen Erkenntnisse aus den untersuchten Kriterien zusammen.

Begriff	positiv	neutral / besonderes	negativ
Ökologie	<ul style="list-style-type: none"> - grosse Mengen verfügbar - Wiederverwendung möglich - Stoffliche Wieder- und Weiterverwertung umsetzbar - Hohe Performance bei wenig Materialeinsatz 	<ul style="list-style-type: none"> - Umgang mit Plastikabfällen und RC-Produkten ist zu definieren (z.B. Sammlung von PE-Abfällen) - PE kann recycelt werden, Innenschicht besteht jedoch meist aus Primärrohstoff 	<ul style="list-style-type: none"> - Giftige Emissionen bei Verbrennung - Trennbarkeit oft nicht möglich - nicht erneuerbare Ressource - Weichmacher, Flammschutzmittel, Stabilisatoren können an die Umwelt abgegeben werden - energieintensive Herstellung und v.a. Entsorgung im Vgl. zu abbaubaren oder RC-fähigen Materialien
Lebensdauer		<ul style="list-style-type: none"> - Kunststoffe sind sehr langlebig, können aber beim Altern spröder werden. Kommt auf Kunststoff und Betriebsbedingungen an 	
Brandschutz		<ul style="list-style-type: none"> - meist nicht RF1, dennoch vereinzelt Anwendungen umgesetzt 	<ul style="list-style-type: none"> - Im Brandfall schmelzen die Rohre schon bei ungefähr 200 °C- Toxizität im Brandfall möglich
Hygiene	<ul style="list-style-type: none"> - Luftverteilsysteme aus Kunststoff heute bereits eingesetzt 	<ul style="list-style-type: none"> - im Normalfall kein Beschichten oder Imprägnieren notwendig 	
Materialfestigkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Luftverteilsysteme aus Kunststoff bereits breit eingesetzt - sehr geringer Druckverlust durch glatte Oberfläche und Schweiss/Stecknähte 	<ul style="list-style-type: none"> - Anschlüsse sollten so konzipiert sein, dass eine einfache Demontage möglich ist. 	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Tragfähigkeit (vgl. Metall)
Leckagen	<ul style="list-style-type: none"> - Luftverteilsysteme aus Kunststoff bereits breit eingesetzt - Stecken und Schweissen möglich. Leckagen unüblich 		
Feuchteresistenz	<ul style="list-style-type: none"> - Feuchteresistenz gegeben 		
Kompatibilität	<ul style="list-style-type: none"> - Luftverteilsysteme aus Kunststoff bereits breit eingesetzt - Dimensionen frei wählbar 		
Robustheit	<ul style="list-style-type: none"> - bereits Stand der Technik 		<ul style="list-style-type: none"> - Ungünstige Bedingungen (z.B. Wärme), falsche Benutzung oder mechanische Schwingbeanspruchung können zu Versprödung oder Materialversagen führen
Ästhetik		<ul style="list-style-type: none"> - Gestaltungsmöglichkeiten durch Beschichtungen, Farbgebung 	<ul style="list-style-type: none"> - negatives Image
Realisierbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Luftverteilsysteme aus Kunststoffen bereits breit eingesetzt - einfache Verarbeitung mit konventionellen Werkzeugen 		
Wirtschaftlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> - niedrige Preise von Rohmaterial und Rohren 	<ul style="list-style-type: none"> - Möglicher Trend: Preissteigerung in Abhängigkeit zu Ölpreisen 	

5.3.4 Biokunststoffe (Bioplastics)

Kunststoffe werden zunehmend mit Werkstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen kombiniert, so dass auch Studien zu biologisch abbaubaren Kunststoffen rasant zunehmen. Biokunststoffe können aus biotechnologischer Synthese bzw. aus fossilen Rohstoffen (z.B. Ecoflex von BASF) sowie aus natürlicher Synthese hergestellt werden. Produkte aus der letztgenannten Gruppe stammen aus tierischen oder pflanzlichen Assimilationsprozessen (z.B. Gelatine, Stärke und Zellulose). Sie können sowohl biologisch abbaubar als auch biologisch nicht abbaubar vorliegen (z.B. naturfaserverstärkte Kunststoffe).

Von besonderem Interesse erscheinen die biologisch abbaubaren **Werkstoffe auf Zellulosebasis**. Solche kompostierbaren Verbundwerkstoffe aus natürlichen Materialien werden u.a. bereits als biologisch abbaubare Folien, Formkörper oder Verpackungsmaterialien verwendet. In diesem Zusammenhang dürften vor allem **Flüssigholzprodukte** interessant sein. Diese lassen sich auf der Basis von Lignin oder Holzmehl herstellen. Im Bausektor haben sich einige derartiger Produkte (z.B. Arboform oder Fasal) bereits bewährt [30]. Anwendung finden solche Produkte aus Biokunststoff als dauerhafte und rezyklierfähige Fasadensplatten, aber auch in der Gebäudetragstruktur (Abbildung 22).



Abbildung 22: (v r n l) Anwendung von Biokunststoffen im Bausektor. Fassaden Mock-Up an der ITKE Universität Stuttgart (System ArboSkin), Artek Pavillon von Shigeru Ban in Mailand von 2007 (gesamtes Gebäude aus UPM ProFi wood plastic) [31].

Technische Eigenschaften

Produkteigenschaften und Produktionstechniken unterscheiden sich stark in Abhängigkeit der verwendeten Basisrohstoffe. Im Idealfall erreichen aber Biokunststoff-Produkte dieselben technischen Eigenschaften **wie herkömmliche Kunststoffprodukte**, mit dem Vorteil der **besseren Ökobilanz**. Folgend werden einige Biokunststoff-Beispiele aufgeführt und kurz erläutert:

Polylactid PLA (Polymilchsäure) ist ein bereits weitverbreitetes Biopolymer. Es entsteht durch die Polymerisation von Milchsäure, welche ein Produkt der Fermentation aus Zucker und Stärke durch Milchsäurebakterien ist. Es ist farblos und hat sehr ähnliche Eigenschaften wie thermoplastische Polymere. Da es selbst ein Thermoplast ist, kann es durch Zuführung von Wärme geformt werden. Gängige Fabrikationsprozesse wie Extrusion und Spritzguss können für PLA eingesetzt werden. Deswegen kann PLA übliche Polymere ersetzen. Ein grosser Nachteil ist, dass die Formstabilität nur bis 75°C gegeben ist. Die Hitzebeständigkeit kann aber durch Copolymerisation von hitzebeständigeren Polymeren oder durch Beigabe von Füllstoffen erhöht werden. Eine wichtige Rolle spielt PLA im FDM 3D Druck^a. Das macht PLA vor allem auch für den Prototypenbau zu einer günstigen Alternative zu normalen Kunststoffen, eröffnet aber auch im Bereich der Luftverteilung grundlegende Möglichkeiten. Zudem ist es ein Kunststoff aus nachwachsenden Rohstoffen, welcher biologisch abbaubar ist.

Naturfaserverstärkte Kunststoffe NFK sind Verbunde aus Kunststoffen (z.B. Polyesterhaz, Epoxidharz oder Polyamid) und Naturfasern. Sie erhalten über die eingearbeiteten Naturfasern eine Stabilität, die ohne sie nicht möglich wäre. Heute werden insbesondere **hanffaserverstärkte Kunststoffe**^b bereits in der Autoindustrie (Karosserie) verwendet, um karbon- oder glasfaserverstärkte Kunststoffe zu ersetzen (Abbildung 23). Diese Kunststoffe sind allerdings biologisch nicht abbaubar.

^a Bei der Schmelzschichtung (Fused Deposition Modeling FDM) werden Thermoplaste wie PLA durch eine beheizte Düse extrudiert, wobei das Material schmilzt und der Kunststoff Schicht für Schicht auf Konstruktionsplattform aufgebaut wird.

^b Zusammensetzung der aufgeschlossenen Faser gemäss Material-Archiv: Cellulose (67,0%), Hemicellulose (16,1%), Pektin (0,8%), Lignin (3,3%), Eiweiss, Asche und Mineralstoffe (2,1%), Fette und Wachse (0,7%), Feuchtigkeit (10,0%). Vgl.: Zellauloseinhalt von Holz (40%), Flachs (65-76%), Baumwolle (90%)



Abbildung 23: (v.l.n.r.) Hanffaserverstärkte Kunststoffe, PLA Filament für übliche FDM 3D Drucker.

Zusammenfassung

Die Relevanz von Biokunststoffen wird künftig zunehmen. Auch wenn es im Moment noch keine kommerziellen Lösungen gibt für Lüftungssysteme aus Biopolymeren, könnten Hersteller diesbezüglich nach Lösungen suchen. Eine valable Alternative zu den gängigen Materialien für Lüftungsverteilanlagen könnte potenziell entwickelt werden. Der Markt für Biokunststoffe entwickelt sich derzeit rapide. Tabelle 5 fasst die wesentlichen Erkenntnisse aus den untersuchten Kriterien zusammen.

Tabelle 5: Beurteilung von «Bioplastics» hinsichtlich deren Verwendung in Lüftungsanlagen.

Begriff	positiv	neutral / besonderes	negativ
Ökologie	<ul style="list-style-type: none"> - Weniger CO₂-Emissionen im Herstellungsprozess durch Anteil (Masse) an nachwachsenden Rohstoffen - Kann, je nach Kunststoff, biologisch abgebaut oder recycelt werden 	<ul style="list-style-type: none"> - noch keine Langzeiterfahrung hinsichtlich Umweltverträglichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - teilweise nur mit viel Aufwand oder gar nicht kompostierbar - je nach Kunststoff nicht recyclingfähig
Lebensdauer		<ul style="list-style-type: none"> - Langzeiterfahrung fehlt. Annahme: Bioplastics verhalten sich ähnlich wie Kunststoffe 	
Brandschutz		<ul style="list-style-type: none"> - Langzeiterfahrung fehlt noch, Verhalten sollte jedoch ähnlich wie dasjenige von Kunststoff sein 	<ul style="list-style-type: none"> - Im Brandfall schmelzen die Rohre schon bei ungefähr 200 °C- Toxizität im Brandfall muss überprüft werden

Hygiene	- Luftverteilsysteme aus Kunststoff heute bereits breit eingesetzt, Biopolymere sollten ähnliche Eigenschaften aufweisen	- Kein Beschichten oder Imprägnieren nötig
Materialfestigkeit	- Luftverteilsysteme aus Kunststoff heute bereits breit eingesetzt, Biopolymere sollten ähnliche Eigenschaften aufweisen	- Tragfähigkeit ist reduziert gegenüber Metallrohren kann allerdings deutlich höher sein als bei Kunststoffen
Leckagen	- Luftverteilsysteme aus Kunststoff heute bereits breit eingesetzt, - Stecken und Schweißen ist möglich. Leckagen sind unüblich - geringer Druckverlust durch glatte Oberfläche und Schweiss/Stecknähte	- Anschlüsse sollten so konzipiert sein, dass eine einfache Demontage möglich ist.
Feuchteresistenz		- Feuchtigkeitsresistenz unterscheidet sich stark bei Bioplastics: Gelatinebasierte sind nicht beständig, PLA und übliche Polymere schon.
Kompatibilität	- Luftverteilsysteme aus Kunststoff heute bereits breit eingesetzt, Bioplastics sollten ein ähnliches Verhalten aufweisen können.	
Robustheit	- Vermutung einer Erhöhung der Robustheit	- Bei ungünstigen Bedingungen (Wärme), falsche Benutzung oder mechanische Schwingbeanspruchung kann Versprödung oder Materialversagen auftreten. - Gewisse Bioplastics nicht wasserresistent
Ästhetik	- grosser optischer und haptischer Gestaltungsspielraum	- Chance: Negatives Image von Plastik könnte aufgewertet werden - Gefahr der Vermarktung von weniger ökologischen Produkten unter einem falschen Image
Realisierbarkeit	- Luftverteilsysteme aus Kunststoff heute bereits breit eingesetzt, Bioplastic sollte vergleichbar sein - einfache Verarbeitung mit konventionellen Werkzeugen	
Wirtschaftlichkeit	- Der Preis vom Rohmaterial sollte durch effiziente industrielle Herstellungsverfahren tief gehalten werden können.	

5.3.5 Holzwerkstoffe

Holz, als nachwachsender Rohstoff, gewinnt im hiesigen Bausektor immer mehr an Bedeutung. Auf dem Markt findet sich eine grosse Varianz an Holzwerkstoffen mit unterschiedlichen (ökologischen) Eigenschaften, angepasst an ihre Einsatzgebiete. Grosses Potenzial weisen Holzwerkstoffe insbesondere dann auf, wenn bei deren Herstellung Primärrohstoffe eingesetzt werden können.

In Lüftungsanlagen spielen Holzprodukte bisher noch keine bedeutende Rolle. Dennoch lassen sich Beispiele finden, bei denen Luftverteilungen in Holz ausgeführt wurden. Der Kärntner Architekt Dr. Herwig Ronacher setzt seit vielen Jahren **Lüftungskanäle aus Zirbenholz** ein (Abbildung 24).

Das aromatisch duftende Holz der Zirbelkiefer soll dabei für eine angenehme Lufteigenschaft sorgen und wird dementsprechend für sämtliche Zuluftleitungen verwendet. Für die Abluft kommen hingegen Wickelfalzrohre aus verzinktem Stahlblech zum Einsatz. Bei seinem Projekt „Energie Plus Haus Weber“ wurden für die Wohnungen Kanäle mit quadratischen Querschnitten von 14 x 14 cm verwendet, für den Bereich des Seminarraums Querschnitte von 20 x 20 cm [32].

Denkbar für die Luftverteilung könnten **Decken- oder Wandsysteme in Holz** mit geschlossenen Zwischenräumen sein, wie sie bei den Lignatur®-Flächenelementen vorkommen (Abbildung 24).

Ökologisch sind solche Systeme insbesondere interessant, wenn zumindest teilweise auf zusätzliche Rohre zur Luftverteilung verzichtet werden kann und die Luft direkt in den Bauteilen zirkuliert (vgl. Kapitel 5.1.2 «Lüftungsführung in Bauteilen»).

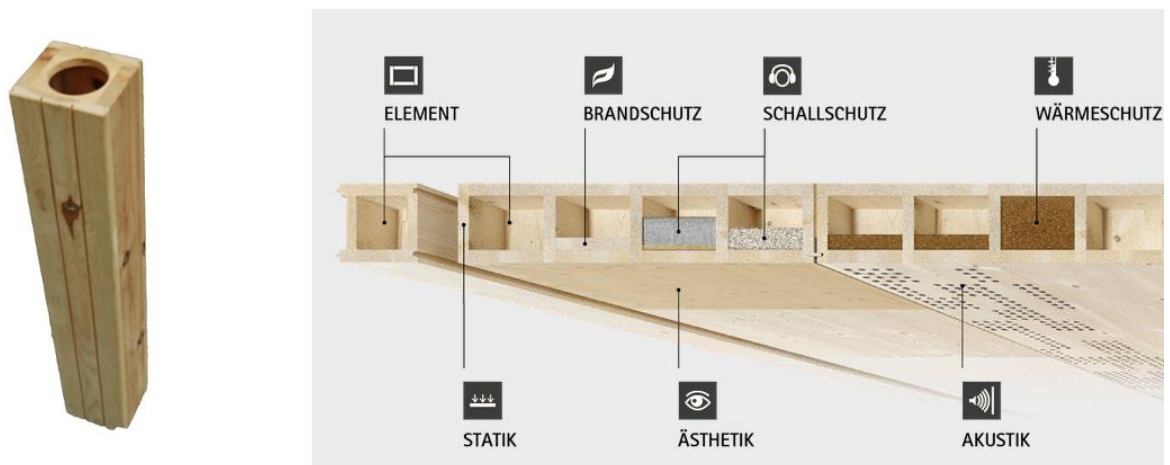


Abbildung 24 (v.l.n.r.): Zirbelholzkanal vor dem Einbau [33], Lignatur-Deckenelement, Quelle: Lignatur®

Im Gebäudeausbau spielen allgemein **Spanplatten** oder Grobspanplatten wie die OSB-Platte^a eine wesentliche Rolle. Für Lüftungsleitungen, wo nicht dieselben mechanischen Eigenschaften wie bei den grossflächigen Platten benötigt werden, könnten sich dünne Spanplatten als alternatives Material anbieten. Verformbarkeit, Temperaturfestigkeit,

^a OSB-Platten (englisch für oriented strand board bzw. oriented structural board, "Platte aus ausgerichteten Spänen") sind Holzwerkstoffe bzw. Grobspanplatten, die aus langen schlanken Spänen (strands) hergestellt werden.

Brandschutzverhalten und Feuchtigkeitsresistenz von Spanplatten hängen sehr stark von den beigemischten Zusatzstoffen ab. Einerseits spielen dabei die verschiedenen (z.B. Formaldehyd enthaltenden) Leime, Bindemittel und Oberflächenbehandlungen eine Rolle, die aber auch für die Recyclingfähigkeit und Umweltverträglichkeit der Platten entscheidend sind, andererseits gibt es eine Vielzahl an Verbundmaterialien, um gewisse Eigenschaften zu erzielen. Zementgebundene Spanplatten, gipsgebundene Spanplatten oder Bambusspanplatten sind Beispiele für eine grosse Auswahl, die laufend anwächst.

Faserplatten werden im Gebäudeausbau ebenfalls breit eingesetzt. Bekannt sind insbesondere Hartfaserplatten, MDF Platten oder Faserdämmplatten. Ihr Vorteil liegt auf spezifischen verbesserten Eigenschaften. Bei einer MDF Platte werden die mechanischen Eigenschaften verbessert, wo hingegen bei einer Faserdämmplatte die Wärme und Akustikisolation im Vordergrund steht. Die Holzfasertechnologie ist weit fortgeschritten und eröffnet viele Möglichkeiten, auch im Bereich von Lüftungsleitungen. Je nach Additiven, Fasergehalt und Bindemittel können spezifische Anforderungen erfüllt werden.

Interessant in diesem Zusammenhang sind die bereits im Kapitel 5.3.3 Kunststoff angesprochenen Holz-Kunststoff-Komposite. **Wood-Plastic-Composites WPC** werden eine Fülle von Eigenschaften zugeschrieben. Sie gelten als pflegeleicht, wasserresistent, seewasserfest, unverrottbar, riss- und splitterfrei sowie resistent gegen Pilze und Insekten. Sie stellen eine Alternative zu reinen Kunststoffsystemen dar. WPC sind i.d.R. thermoplastisch verarbeitete Kunststoffe, zu denen Holzmehl beigefügt wird. Dabei kommen übliche Verfahrenstechniken wie Extrusion, Spritzguss und weitere Thermoverfahren zum Einsatz. Die Eigenschaften von WPC machen es für den Lüftungsbereich sehr interessant. Anwendungsbeispiele sind allerdings bisher nicht bekannt. Im Vergleich zu üblichen Holzwerkstoffen zeichnen sich WPC durch eine höhere Feuchtigkeitsresistenz aus. Gegenüber Kunststoffen bieten WPC hingegen eine höhere Steifigkeit und einen geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Durch den Holzmehlgehalt wird der ökologisch bedenkliche Kunststoffgehalt heruntersetzt. Als sichtbar geführte Lüftungsleitungen könnten WPC durchaus eine Alternative zu Metallrohren sein. Das Recycling von WPC stellt heutzutage noch eine Herausforderung dar. Durch den Materialverbund wird i.d.R. jedoch sowohl ein Recycling-Prozess als auch die Kompostierung verhindert [34].

Ein weiteres interessantes Beispiel für Holzwerkstoffe ist **Holz-Kork-Latexgranulat**. Platten aus Holz-Kork-Latexgranulat lassen sich von Hand, in Vakuumpressen, Heizpressen und Flachpressen leicht in jede Richtung verformen. Sogar verschiedene Richtungen in einem Formteil sind möglich. Die gewünschte Form muss jedoch fixiert werden. Beim Herstellungsverfahren werden heute Holz-, Kork- und Latexgranulate mit Polyurethan-Bindemittel zu Grosszylindern verpresst und anschliessend in Platten und Bahnen mit unterschiedlichen Dicken geschnitten. Hierbei sollte aus ökologischen Gründen darauf geachtet werden, dass kein Formaldehyd verwendet wird. Die Verarbeitung aufrollbarer Bahnen hat den Vorteil, dass sich der Verschnitt deutlich reduziert. Sie bieten durch ihre Struktur eine gute Lärmisolation und weisen eine Wärmeleitfähigkeit von 0.0836 w/mK auf. Die Dichte ist mit 440 kg/m³ eher gering. Die industriell bestellbaren Plattendicken sind zwi-

schen 6 und 18mm dick. Eine Verarbeitung zu Leitungszwecken ist nicht bekannt. Spezifische Anforderungen für Lüftungsanlagen, Recyclingfähigkeit und eine umweltverträglichere Alternative zum angewendeten Bindemittel müssten noch untersucht werden.



Abbildung 25: Holz-Latex-Granulat-Platte [35]

Zusammenfassung

Aus der Analyse geht hervor, dass Holzwerkstoffe eine valable Alternative zu den gängigen Materialien in Lüftungsverteilanlagen darstellen könnten. Die Lüftungsspezifische Anwendung von Holzprodukten ist jedoch noch weitgehend unbekannt. Die Erfüllung der Anforderungen an Lüftungsanlagen hängt entscheidend von den verwendeten Zusatzstoffen ab. Diese können Eigenschaften modifizieren, im Gegenzug jedoch auch umwelt- und gesundheitsschädlich sein und ein hochwertiges Recycling verhindern. Die Palette von Holzwerkstoffen ist sehr gross und nimmt laufend zu.

Tabelle 6 fasst die wesentlichen Erkenntnisse aus den untersuchten Kriterien im Allgemeinen zusammen.

Tabelle 6: Beurteilung von Holzwerkstoffen hinsichtlich deren Verwendung in Lüftungsanlagen.

Begriff	positiv	neutral / besonderes	negativ
Ökologie	- grösster Teil aus erneuerbaren Rohstoffen	- RC-Potential und Ökobilanz hängen entscheidend ab von Zusatzstoffen (Leime, Bindemittel) und Beschichtungen	- Geeignete Additive müssen z.T. noch entwickelt werden - Heute verwendete Additive verhindern i.d.R. das Recycling und sind bei der Entsorgung/Verbrennung problematisch

Lebensdauer	- bekannte Anwendungen von Holz am Bau zeigen, dass eine lange Lebensdauer möglich ist	- Erfahrung im Lüftungsbereich fehlt. Im Innenausbau aber Lebensdauern von 20-30 Jahren möglich	- UV-Strahlung und Feuchteexposition beeinflussen das äussere Erscheinungsbild
Brandschutz	- insgesamt hohe Anforderungen aber auch gute Brandverhalten und viele Anwendungsbeispiele	- Beschichtungen können das Brandverhalten bedeutend verbessern - holzimmanenter Brandschutz	- Beschichtungen oder Additive können sich auf die Ökologie negativ auswirken - Toxizität im Brandfall muss entsprechend überprüft werden
Hygiene	- Holzwerkstoffe werden im Gebäudeinnenausbau bereits eingesetzt	- Erfahrungen im Lüftungsbereich fehlen - Beschichtungen oder Imprägnieren können Bakterienwachstum minimieren	- Emissionen von Leimen oder Bindemittel können gesundheitsbedenklich sein
Materialfestigkeit	- Breite Anwendung im Bau	- stark abhängig von der Materialstärke	- übliche Plattenstärken für Lüftungsrohre ungeeignet
Leckagen	- in bekannter Plattenform unproblematisch	- Verbindungssystem ist entscheidend (Ziel: dicht und wieder demontierbar)	- Verbindungen von Holzwerkstoffen in üblicher Form wenig dicht
Feuchteresistenz	- Holzwerkstoffe bereits breit eingesetzt im Gebäudeausbau. Unter normalen Umständen unproblematisch	- Beschichtungen und Additive sind entscheidend, führen oft zu RC-Hemmnissen	- problematisch bei stark schwankender Feuchtigkeit (Duschen, gewerbliche Küchen) - Holzwerkstoffe sind unbehandelt i.d.R. nicht sehr feuchtebeständig
Kompatibilität		- vereinzelt Systeme in Holz realisiert	
Robustheit	- Holzwerkstoffe bereits breit eingesetzt im Gebäudeausbau		
Ästhetik	- Hohe Nutzerakzeptanz - Potential zu sichtbaren Lüftungen ist vorhanden		- Spanplatten-Optik i.d.R. wenig nachgefragt - Feuchte und UV-Strahlung auf Dauer ablesbar
Realisierbarkeit		- vereinzelt Systeme in Holz realisiert - Forschung ist an Holzwerkstoff aufgrund des Potentials interessiert	
Wirtschaftlichkeit	- Nebenprodukte der Industrie können verarbeitet werden. Verwendung von Restholz ist wirtschaftlich - Kork ist ein teurer Baustoff		

5.3.6 Bambus

Bambus ist eine Pflanze, die mit Ausnahme von Europa und der Antarktis auf allen Kontinenten natürlich vorkommt. Während Bambus in Afrika und Australien keinen bedeutenden ökonomischen Wert hat, ist er in vielen asiatischen Ländern kulturell verwurzelt, dient als Lebensmittel und findet in etlichen Bereichen Anwendung.

Die Pflanze gedeiht auf Meereshöhe im tropischen und subtropischen Klima sowie an Gebirgshängen. Die Grösse der Halme ist abhängig von der Art und Gattung. Sie können 15

cm lang und wenige mm dick sein, aber auch 40 m Höhe und einen Durchmesser von 30 cm aufweisen.

Da Bambus sehr schnell wächst, können auf einer Hektare jährlich bis zu 13 t Trockensubstanz geerntet werden. Ohne den Bestand zu gefährden, können alle 2-4 Jahre bis zu 30% der reifen Halme einer Pflanze geerntet werden. Das Potenzial des nachwachsenden Materials ist deshalb enorm. Es wird als ökologische sowie notwendige Alternative zu Beton und Stahl und oft auch als **Baustoff der Zukunft** bezeichnet. Auch an der ETH Zürich werden mögliche Anwendungen im Bausektor erforscht [36].

Im Lüftungsbereich wurde Bambus bisher noch nicht explizit eingesetzt. Das enorme Potential wurde aber auch für die Anwendung in Tragstrukturen erkannt (Abbildung 26).





Abbildung 26: Bambus und Anwendung von Bambus am Bau. Im Bild die *Green School* in Cali und die *Millenium Bridge* in Bali. Bilder: Green School / PT bamboo pure [37].

Technische Eigenschaften

Bambusrohre sind **schwer entflammbar**, gelten jedoch als brennbar. Mit entsprechenden Beschichtungen kann das Brandverhalten verbessert werden. Bei Holzoberflächen wird i.d.R. mit Beschichtungen Baustoffklasse B1- schwerentflammbar nach DIN 4102-1 erreicht.

Um Bambusrohre gegen Insekten resistenter zu machen, werden sie geräuchert, erhitzt, gekocht oder gewässert. Ebenfalls sind **Anstriche** verschiedenster Art, z. B. mit Borax, möglich. Generell müssen Bambusrohre vor **Feuchtigkeit** geschützt werden, damit sie nicht von Pilzen befallen werden.

Zusammenfassung

Bambus ist für den Bausektor eine hinsichtlich des nachhaltigen Potenzials sehr hoffnungsvolle Materialalternative zu treibhausgasintensiven Baumaterialien. Im Bereich von Lüftungsverteilanlagen wurden damit noch keine Erfahrungen gesammelt. Tabelle 7 fasst die Überlegungen zur möglichen Anwendung zusammen.

Tabelle 7: Zusammenfassung zu Lüftungskanälen aus Bambus

Begriff	positiv	neutral / besonderes	negativ
Ökologie	- schnell nachwachsendes Material mit grossem ökologischem Potential		- wächst nicht in Europa, daher hohe Transportemissionen für Import

Lebensdauer	- langlebiger, kompostierbarer Baustoff	- Erfahrung bei Lüftungssystemen fehlt noch	
Brandschutz	- innerhalb von Wohnungen ist die allgemeine Anwendung von Holz i.d.R. unproblematisch	- Beschichtungen können das Brandverhalten verbessern	- Beschichtungen können sich auf die Ökologie negativ auswirken - Toxizität im Brandfall muss überprüft werden
Hygiene	- müsste durch eine zusätzliche Schicht erfüllt werde		- problematisch bei starken Schwankungen der Raumfeuchte (Badzimmer) wegen Pilzbefall
Materialfestigkeit	- Druckfestigkeit für übliche Anwendungen ausreichend	- Erfahrung bei Lüftungssystemen fehlt noch	- Formgebung zu Lüftungsrohren unklar
Leckagen		- Erfahrung bei Lüftungssystemen fehlt noch - ggf. Anschlüsse mit Dichtungen anderer Materialität ausbilden	- Anschlüsse mit Holz unklar
Feuchteresistenz		- Erfahrung bei Lüftungssystemen fehlt noch	- Bambus muss generell vor Feuchtigkeit geschützt werden
Kompatibilität		- vermutlich als Mischsystem mit Verbindungselementen zu konstruieren	- Da Naturstoff nur gerade Rohre, braucht wahrscheinlich Verbindungselemente. Verbindung zwischen Rohren nicht gewährleistet
Robustheit	- robustes Material, welches auch bei Tragkonstruktionen eingesetzt wird	- Erfahrung zu Lüftungssystemen in Bambus fehlt noch	
Ästhetik	- Bambus genießt i.d.R. eine hohe Nutzerakzeptanz	- Erfahrung zu Lüftungssystemen in Bambus fehlt	
Realisierbarkeit		- Erfahrung zu Lüftungssystemen in Bambus fehlt noch - Zunahme an Forschungsergebnissen	
Wirtschaftlichkeit	- Bambus ist verfügbar und schnell nachwachsend	- Erfahrung zu Lüftungssystemen in Bambus fehlt noch	- Transportkosten - Abhängigkeit durch Import

5.3.7 Formgepresste Zelluloseplatten

Bei der formgepressten Zelluloseplatte handelt es sich um eine profilierte und flexible Leichtbauplatte. Diese kann aus **100% Zellstoff aus rezykliertem Altpapier** hergestellt werden. Entsprechend herkömmlichen Holzwerkstoffen lässt sich die Zelluloseplatte mit den üblichen Holzbearbeitungsverfahren weiterverarbeiten, unter anderem auch mit CO₂-Laser und Water Jet. Die Oberfläche kann mit Farben, Lacken, Ölen, Wachsen und Klebstoffen bearbeitet sowie mit 3D-Druckverfahren bedruckt werden. Da die Platten nicht verleimt sind, ist der Zellstoff **biologisch abbaubar**, sofern die Oberflächen nicht mit Lacken und Farben bearbeitet wurden.

Die Platten werden folgendermassen hergestellt: Das Altpapier wird sortiert, anschliessend mechanisch zerkleinert, gewässert und von Verschmutzung, Rückständen und Fremdstoffen

gereinigt. Die letzten papierfremden Bestandteile, z.B. Klebstoffe von rückengeleimten Magazinen oder Selbstklebeetiketten, werden durch das Dispergieren zerkleinert und entfernt. Die gewonnene Zellulose wird nicht zusätzlich gebleicht. **Unbehandelte Platten** sind vollständig **recyclbar**.

Durch **Imprägnieren** mit einem geeigneten Brandschutzmittel kann die **Brandschutzklasse B1 / schwer entflammbar** erreicht werden. **Unbehandelt** ist der Holzwerkstoff normal entflammbar (**Brandschutzklasse B2**). Das Flächengewicht des Materials schwankt zwischen 1'250 und 2'700 g/m³.



Abbildung 27: Formgepresste Zellulosewerkstoffplatte [35].

Zusammenfassung

Die Eigenschaften von formgepressten Zelluloseplatten machen es grundsätzlich zu einer Alternative zu den gängigen Materialien für Lüftungsverteilanlagen. Tabelle 8 fasst die wesentlichen Erkenntnisse aus den untersuchten Kriterien zusammen.

Tabelle 8: Beurteilung von formgepressten Zelluloseplatten hinsichtlich der Verwendung in Lüftungsanlagen.

Begriff	positiv	neutral / besonderes	negativ
Ökologie	<ul style="list-style-type: none"> - grosse Mengen verfügbar, da aus Altpapier hergestellt - Wiederverwertung ist bereits Stand der Technik 	<ul style="list-style-type: none"> - Schutzschicht entscheidend bzgl. RC-Potential und Kompostierung 	<ul style="list-style-type: none"> - Herstellung durch Reinigungsverfahren eher aufwändig - Recycling durch Beschichtung problematisch
Lebensdauer		<ul style="list-style-type: none"> - Erfahrung im Lüftungsbereich fehlt, Material wird jedoch im Gebäudeausbau bereits eingesetzt 	
Brandschutz	<ul style="list-style-type: none"> - innerhalb von Wohnungen oder Brandabschnitten heute bereits anwendbar - mit Beschichtung Brandschutzklasse B1 (schwer entflammbar) erreichbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Verhalten im Brandfall ähnlich wie Holz, Beschichtungen können das Brandverhalten bedeutend verbessern 	<ul style="list-style-type: none"> - Beschichtungen können sich auf die Ökologie negativ auswirken - Toxizität im Brandfall muss überprüft werden

Hygiene		- Beschichtungen oder Imprägnieren können Bakterienwachstum minimieren - Keine weiteren Erfahrungen
Materialfestigkeit	- Wird als genügend eingestuft für Lüftungsmaterialien, da es bereits im Einsatz ist im Holzbau	- Eigenschaften mit jeweiligen Zusatzstoffen noch zu überprüfen.
Leckagen		- Keine Erfahrung im Lüftungsbereich. - Verbindungssystem / Klebesystem wird entscheidend sein
Feuchteresistenz	- Formgepresste Zelluloseplatten werden heute bereits in Innen- und Aussenräumen eingesetzt. Bei entsprechendem Schutz oder Behandlung ist der Umgang mit Feuchtigkeit lösbar	- problematisch bei stark schwankender Feuchtigkeit (Duschen, gewerbliche Küchen)
Kompatibilität		- Bisher keine Erfahrung im Lüftungsbereich. Technologie ist zu überprüfen
Robustheit	- Formgepresste Zelluloseplatten kommen schon in Gebäuden vor	
Ästhetik	- Erinnern an Karton (Karton genießt in der Architekturwelt durchaus Beliebtheit)	- kann verhältnismässig einfach gefärbt und bedruckt werden - die Materialakzeptanz durch die Nutzenden muss noch eruiert werden
Realisierbarkeit		- Pressung in Rohrform oder Klebeverbindungen sind zu überprüfen
Wirtschaftlichkeit	- günstiges Rohmaterial (Altpapier)	- bei Nutzung von bestehenden effizienten Herstellungs- und Lieferprozessen wirtschaftliche Produkte möglich

5.3.8 Pilze

Weltweit sind bereits mehrere Unternehmen gegründet worden, welche insbesondere Plastikverpackung durch Mycelium ersetzen möchten. Pionierarbeit in Zusammenhang mit der Mycelium-Technologie leistete die amerikanische Firma *Ecovative Design* bereits seit 2007. Aber auch in der Schweiz ist das grosse Potential des Materials unlängst erkannt. So wurde bei der *NEST-Unit Urban Mining and Recycling* die neue Materialgruppe *Ressource der kultivierten Baumaterialien* (= Mycelium) [38] eingeführt. Das Schweizer Start-Up-Unternehmen *Mycrobez* arbeitet zusammen mit der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften daran, erste Prototypen für die industrielle Produktion auf Myceliumbasis anzubieten. Bisher sind allerdings keine Produkte verfügbar.

Das Mycel ist jener Teil des Pilzes, der normalerweise im Verborgenen, i.d.R. unterirdisch, wächst. Eine besondere Eigenschaft des Mycels ist, dass es in jede Richtung wächst und somit die verschiedensten Formen annehmen kann. Setzt man das Mycel in eine Negativform, gibt diese vor, wie der Pilz am Schluss aussieht. Wenn der Pilz die gewünschte Form

hat, kommt er in den Ofen. Durch den Brennungsprozess stirbt er ab, der Wachstumsprozess wird dadurch gestoppt und die Form härtet aus (Abbildung 28).

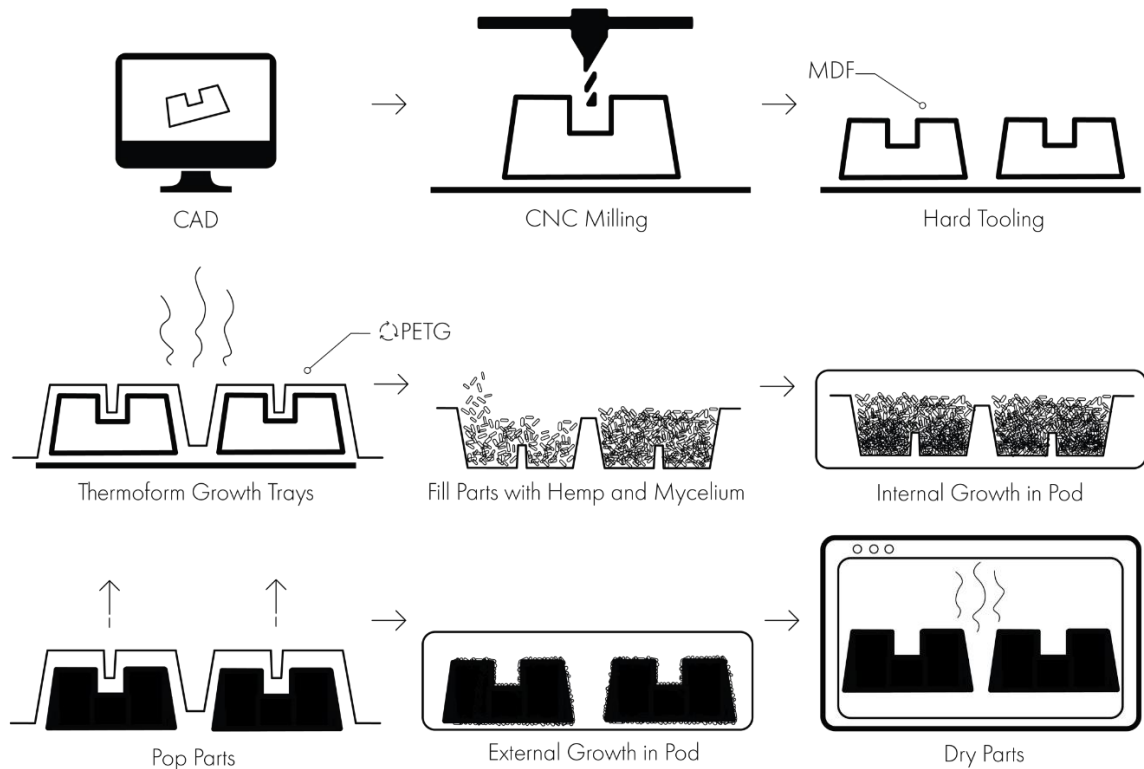


Abbildung 28: Schematischer Prozess und Bilder zur Herstellung von Pilzprodukten [39].

Technische Eigenschaften

Am Ende des beschriebenen Herstellungsvorgangs entsteht ein Produkt mit den **ähnlichen Materialeigenschaften wie Styropor**. Pilzprodukte sind leicht, weisen gute Dämmeigenschaften auf und sind mechanisch robust in der allgemeinen Handhabung. Vermutlich würden sie bei Lüftungsanlagen in derselben Weise wie das System RenoPipe® (vgl. Kapitel 5.3.2 Dämmmaterialien) eingesetzt werden können. Im Gegensatz zu Styropor sind sie jedoch zu **100 Prozent biologisch abbaubar**. Pilzprodukte zersetzen sich, wenn sie genügend lange mit Feuchtigkeit und Bakterien in Berührung kommen, wie dies in üblichen Kompostieranlagen der Fall ist.

Zusammenfassung

Die künstliche Verarbeitung von Pilzprodukten ist eine sehr junge Idee. Erfahrungen mit dem aus ökologischer Sicht sehr interessanten Produkt fehlen noch. Tabelle 9 fasst dennoch die Gedanken zum Einsatz von Pilzprodukten in Lüftungsanlagen zusammen.

Tabelle 9: Beurteilung von Pilzprodukten hinsichtlich der Verwendung in Lüftungsverteilanlagen.

Begriff	positiv	neutral / besonderes	negativ
Ökologie	- 100% biologisch abbaubar - Erstellungsprozess wenig energieintensiv - keine chemischen Behandlungen oder Bindemittel notwendig		- Formen/Gefäße zur Zucht müssen einmalig vorab hergestellt werden
Lebensdauer		- Langzeiterfahrung fehlt - im Idealfall analog Styropor	- verrottet schnell
Brandschutz	- bis zu einem gewissen Mass feuerresistent	- Brandverhalten muss detailliert untersucht werden	
Hygiene		- Langzeiterfahrung fehlt, wird allerdings v.a. für die Lebensmittelbranche konzipiert	
Materialfestigkeit	- Druckfestigkeit für übliche Anwendungen ausreichend		
Leckagen		- Langzeiterfahrung fehlt - ggf. analog zu Styropor	
Feuchteresistenz		- Langzeiterfahrung fehlt	- zersetzt sich, wenn zu lange der Feuchtigkeit ausgesetzt. Ziemlich sicher Beschichtung notwendig
Kompatibilität	- kann jede Form annehmen, allerdings sind dichte Anschlüsse sicher eine Herausforderung	- Langzeiterfahrung fehlt	
Robustheit		- Langzeiterfahrung fehlt	
Ästhetik		- bisher noch kein Thema (Verwendung als Verpackungsmaterial)	
Realisierbarkeit		- ist noch in der Pilotprojektphase	
Wirtschaftlichkeit	- kann aus landwirtschaftlichen Nebenprodukten bestehen - preiswert	- dürfte mit ersten gesammelten Erfahrungen und im Hinblick auf ökologische Anforderungen interessant werden	

5.3.9 Textilien

Grundlegend alternative Ansätze der Luftverteilung bieten sich im Einsatz von Textilien als Lüftungsleitungen. Das System weist bedeutende Vorteile durch die Minimierung des Materialgewichts und die flexible Handhabung im Vergleich zu konventioneller Materialisierung auf.

Spezielle Textilien werden bereits heute vereinzelt in der Industrie eingesetzt, insbesondere wo eine hohe Flexibilität – d.h. eine einfache Veränderung der Luftführung – oder eine Abgabe der Luft über längere Strecken gewünscht oder erforderlich ist. Typischerweise werden solche Luftverteilsysteme im Überdruck betrieben und benötigen so keine aufwändige Abstützung. Die Luftabgabe kann bei (semi-) permeablen Textilien durch die Schläuche selbst erfolgen oder durch explizite Auslässe stattfinden beim Einsatz von luftdichten Beschichtungen.

Der dänische Hersteller **KE-Fibertec SA** bietet seit mehreren Jahrzehnten textile Luftverteilsysteme an (Abbildung 29) und mit dem Produkt CradleVent® den ersten Luftkanal mit dem «Cradle to Cradle» Siegel (EPEA Institut Hamburg). Früher sah man diese textilen Luftverteiler meistens in Hallen für die Industrie. Heute werden sie auch in vielen andere Bauten eingebaut. Das Produkt zeichnet sich durch einen einfachen Transport und eine gute Akustik aus. Die Feuerresistenz, und somit die Eignung bei höheren Brandschutzanforderungen (Steigschächte), ist noch abzuklären.



Abbildung 29: Beispiele von Lüftungsanlagen mit textiler Luftverteilung der Firma KE Fibretec AS. Anfänglich wurden die Systeme v.a. in grossen Hallen und für die Industrie angeboten. Heute werden sie auch in anderen Bauten eingesetzt [40].

Technische Eigenschaften

Aus den Herstellerangaben lassen sich folgende Eigenschaften von angebotenen Produkten ableiten:

Polyesterstoff mit flammenhemmender PU-Beschichtung wird als **schwer entflammbar** deklariert und weist **Brandschutzklasse B-S1-d0** gemäss EN13501 auf. Das **Gewicht** ist –

mit ca. 0.73 kg/m² Schlauchoberfläche – **5- bis 10-mal leichter** als bei einer Stahlverrohrung. Die **Luftdichtheit** beträgt bei durchlässigen Varianten 50 bis 1380 m³/(h m²), bei dichten Varianten wird 0 m³/(h m²) erreicht. Die Farbgebung ist frei wählbar

Weiterentwicklung

Ein Beispiel für einen Nachhaltigen Verbundwerkstoff bietet Antefil Composite Tech®. Das Startup-Unternehmen von der ETH Zürich produziert neuartige Composite, indem es Fäden mit einem thermoplastischen Matrixmaterial beim Spinnen kombiniert und diese zu Textilien verarbeitet. So werden die üblichen, aufwändigen Infiltrationsmechanismen überflüssig. Da als Kunststoffe Thermoplaste benutzt werden, kann dieser Faserverbundwerkstoff sogar recycelt werden [41].

Zusammenfassung

Die Luftverteilung auf textiler Basis wird heute bereits mit Erfolg angeboten.

Tabelle 10 fasst die Gedanken zur Ausweitung der Anwendung zusammen.

Tabelle 10: Beurteilung von Lüftungskanälen auf textiler Basis hinsichtlich der untersuchten Kriterien.

Begriff	positiv	neutral / besonderes	negativ
Ökologie	- geringe Materialstärke bei hoher Performance	- Schutzschicht entscheidend bzgl. RC-Potential (Komponenten wieder trennbar?)	- i.d.R. kunststoffbasierte Bestandteile (energieintensive Herstellung, Verbrennung als EoL)
Lebensdauer		- Datenlage zur Langzeiterfahrung ist noch nicht verfügbar	
Brandschutz	- innerhalb von Brandabschnitten einsetzbar		- Schwer entflammbar (B-S1-d0) ist für Schächte und Hauptleitungen nicht genügend
Hygiene	- Luftverteilsysteme auf textiler Basis werden heute bereits eingesetzt	- Beschichtungen oder Imprägnierungen sind für die Hygiene entscheidend und können Bakterienwachstum minimieren	- Recycling durch Beschichtung problematisch
Materialfestigkeit			- Leitungen funktionieren nur bei Überdruck, also nur für die Zuluft!
Leckagen	- Bei «gewünschten» Leckagen (statt Luftauslass) interessant	- Vergleichswerte für Druckverlust fehlen. Anschlüsse problematisch?	- bei «gewünschter» Dichte vermutlich vergleichsweise gut
Feuchteresistenz		- Beschichtungen oder Imprägnierungen sind für die Feuchteresistenz entscheidend	- Recycling durch Beschichtung problematisch
Druckverlust		- Vergleichswerte fehlen. Anschlüsse allenfalls problematischer	

Kompatibilität	- bisher nur für grössere Dimensionen verfügbar. Bei Kleinanlagen ist die Kompatibilität noch zu prüfen - Anschlüsse?
Robustheit	- im Vergleich zu Stahl gering
Ästhetik	- konzeptabhängig - könnte durchaus interessant sein
Realisierbarkeit	- wird bereits angeboten, jedoch mit eingeschränktem Anwendungsbereich (nur Zuluft!). - Potential?
Wirtschaftlichkeit	- geringeres Gewicht wirkt sich positiv auf Transportkosten aus - Flexibilität könnte sich bei speziellen Objekten mit wechselnden Bedingungen auszahlen. - wird bereits angeboten, im expliziten Anwendungssektor konkurrenzfähig

5.3.10 Natürliche Beschichtungen

Die Untersuchungen der verschiedenen alternativen Materialoptionen für Lüftungsleitungen haben aufgezeigt, dass oftmals Beschichtungen entscheidend für die Erfüllung der an Lüftungsanlagen gestellten Anforderungen sind. Dieselben Beschichtungen sind i.d.R. massgebend für die Ökobilanz, für das Recycling oder die potentielle Wiederverwertung der Luftverteilkomponenten. Deshalb lohnt es sich, nebst den eigentlichen Materialien, einen detaillierteren Blick auf die aktuelle Entwicklung von alternativen, natürlichen Beschichtungen zu werfen. So können in anderen Einsatzgebieten bereits angewendete Konzepte oder Technologien allenfalls Inspirationen für die Verwendung als Lüftungsanlagen liefern.

Verpackungen von Nahrungsmitteln

In der Nahrungsmittelverpackungsindustrie werden bereits heute **Filme auf Proteinbasis** eingesetzt. Zur Steuerung der Wasserempfindlichkeit solcher Filme, können Proteine durch Anhängen langer apolarer (aliphatischer) Ketten hydrophobiert werden. So kann die Funktionsfähigkeit des Proteins durch die chemische Reaktion verändert werden und ein effizienter Film hergestellt werden, der eine gute Alternative zu erdölbasierten Polymeren darstellt [42].

Durch die Addition von Zusatzstoffen kann die Wasserempfindlichkeit von Proteinfilmen und -beschichtungen weiter reduziert werden. So lassen sich durch das Mischen von Proteinen mit Ölen, Wachsen oder acetylierten Monoglyceriden natürliche und wasserresistente eierproteinbasierte Folien herstellen. Es fehlen noch langfristige Untersuchungen zur Lebensdauer solcher Filme. Diese könnten sich aber als gute Beschichtungen für Lüftungsanlagen anbieten, z.B. von Kartonrohren, insbesondere, wenn eine sortenreine Trennbarkeit von Filmen und Leitungsmaterial beim Rückbau gewährleistet wäre.



Abbildung 30: Filme auf Proteinbasis für die Nahrungsmittelverpackungsindustrie.

Beschichtungen im Lehmbau

Im Lehmbau kommen kaseinbasierte Spachtelungen zum Einsatz. Die Spachtelmasse wird nach einem speziellen Verfahren hergestellt und mit Kasein stabilisiert. Kasein ist ein Milcheiweiß, das mit Kalk aufgeschlossen ein dauerhaftes, starkes und natürliches Klebemittel bildet. Die Replastifizierbarkeit des Lehms und das Recycling der Spachtelung werden durch den mineralischen Verbund erschwert. Lehmkaseinspachtelungen sind auf allen Flächen möglich. Auf Böden, Wänden und Möbeln eingesetzt ergibt sich eine extrem robuste und hochwertige Oberfläche. Im aufgezeigten Beispiel (Abbildung 31) wurde die Kaseinspachtelung angeschliffen, mit Leinöl imprägniert und mit einem Wachs, das aus den Blättern der in Brasilien wachsenden Carnaubapalme gewonnen wird und das härteste bekannte natürliche Wachs ist, poliert. Dadurch wird die Oberfläche wasserfest, hart und pflegeleicht. Solche Konzepte der Beschichtung bzw. Behandlung sind möglicherweise auf die in diesem Bericht dargelegten alternativen Materialien für Lüftungsanlagen übertragbar.



Abbildung 31. Beispiel einer Lehmkaseinspachtelung beim Wohn- und Atelierhaus in Schlins (Architektur: Boltshauser Architekten, Zürich und Martin Rauch).

5.3.11 Einfluss auf Umweltbilanz

Der Einfluss der alternativen Materialwahl für Lüftungsleitungen auf die Umweltbilanz eines Gebäudes ist insbesondere von folgenden Faktoren abhängig:

- Einsatzmöglichkeit (Wo sind überhaupt alternative Materialien möglich)
- Lebensdauer (Ist eine vergleichbare Lebensdauer der Materialien erreichbar?)
- Umweltbelastung der verglichenen Materialien für die Herstellung (inkl. Entsorgung)
- Materialbedarf bzw. -gewicht für dieselbe Leistung (z.B. kg-Wert pro m² Oberfläche)

In Abbildung 32 ist ein Vergleich zwischen einem konventionelles Lüftungsrohr (Wickelfalzrohr, verzinkt) mit einem entsprechenden Rohr aus Karton (bzw. kartonähnlichem Material) für verschiedene Indikatoren dargestellt. Die Werte basieren auf einer Analyse der zu erwartenden Belastungen für die Herstellung und die Entsorgung mit Daten aus der aktuellen Ökobilanzdaten im Baubereich der KBOB [43]. Für das Materialgewicht wird eine zu erwartende Spannweite von 0.68 bis 1.98 kg/m² Oberfläche eingesetzt, die aus ähnlichen Produkten aus dem Verpackungsbereich stammt.

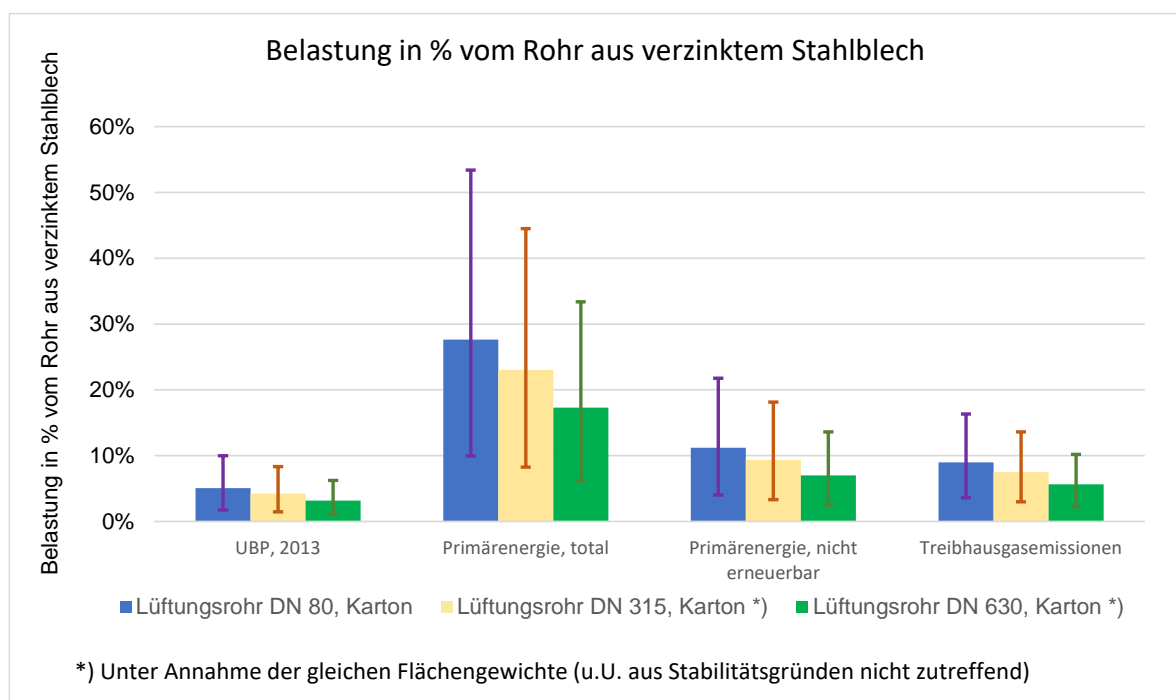


Abbildung 32. Vergleich der Ökobilanz von Lüftungsrohren aus Karton zu konventionellen Wickelfalzrohren

Die Resultate zeigen auf, dass – bezogen auf ein vergleichbares Lüftungsrohr aus verzinktem Stahlblech – eine Reduktion der Umweltbelastung um 80% bis deutlich über 90% möglich ist. Lediglich bei der gesamten Primärenergie ist die Reduktion bedeutend geringer, da in dieser Bewertung auch die erneuerbare Energie im Karton eine wesentliche Rolle spielt.

Ähnliche Werte für Karton zeigt eine Untersuchung zu bio-basierten Lüftungsleitungen, die kürzlich an der TU Delft durchgeführt wurde [44]. In Abbildung 33 ist ein Vergleich daraus für den Indikator Treibhausgaspotential für verschiedene Materialien dargestellt. Als Basis diente dabei eine Bilanz für ein Lüftungsrohr mit 180mm Durchmesser.

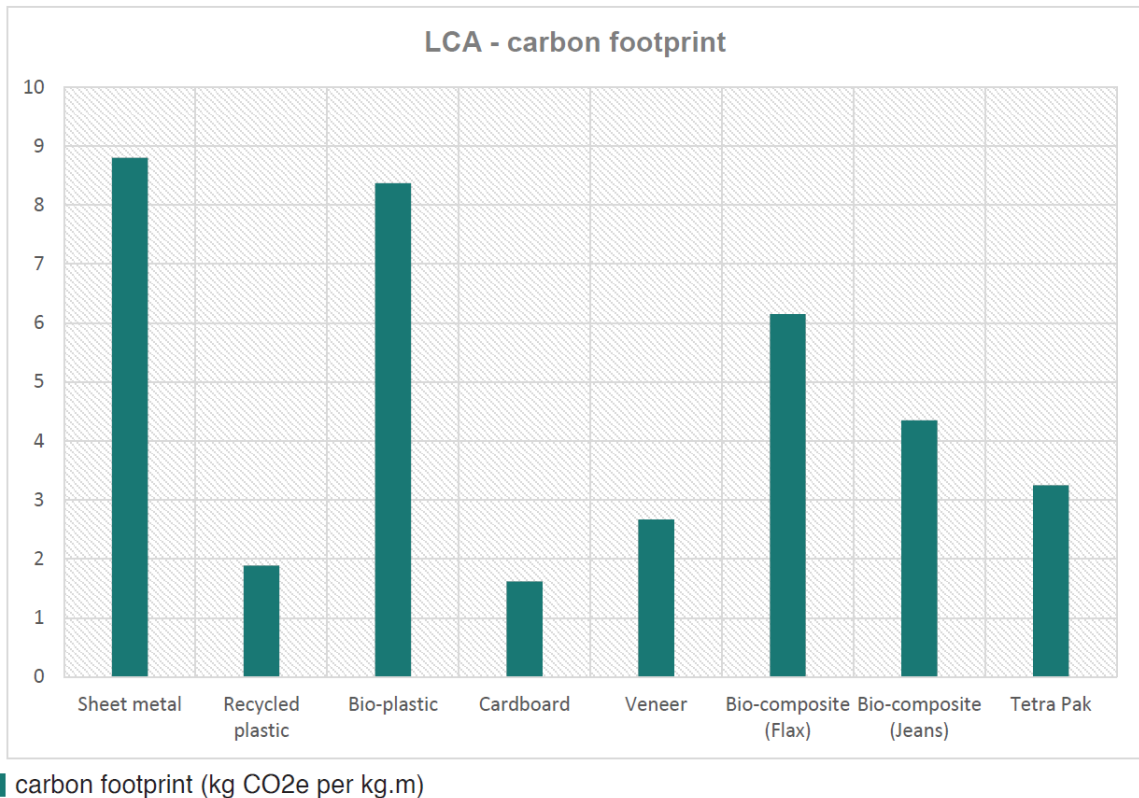


Abbildung 33. Treibhausgasbilanz für 1m Lüftungsrohr mit 180mm Durchmesser für verschiedene Materialien; [44]

Einen grossen Einfluss auf die Gesamtbilanz der Lüftungsleitungen hat die Lebensdauer der jeweiligen Materialien. Wird von einer vergleichbaren Lebensdauer ausgegangen, so könnten die in Abbildung 32 dargestellten Werte direkt miteinander verglichen werden bzw. die in Abbildung 33 aufgezeigten Reduktionen realisiert werden.

In der beigezogenen Untersuchung [44] wird für die betrachteten Materialien jedoch von einer viel kürzeren Mindestlebensdauer von bio-basierten Materialien im Vergleich zu Stahl ausgegangen: nur rund 3 Jahre für Karton, jedoch 40 Jahre für Stahl, Bioplastik und Bio-composite (Flax+bioresin). Würde dies dementsprechend in die Berechnung der Umweltbelastung gemäss Abbildung 32 einfließen, wäre ein deutlich ungünstigeres Bild für die Alternativmaterialien resultiert. In der Studie wird jedoch explizit darauf hingewiesen, dass die effektive Lebensdauer (bzw. der Erneuerungszyklus) deutlich von den betrachteten Mindestlebensdauern abweichen kann.

Fazit

5.4 Fazit und Ausblick

Wo ist Potenzial erkennbar?

Karton ist eines der vielversprechendsten alternativen Lüftungsmaterialien. Die Begründung hierfür ergibt sich daraus, dass Herstellungs- und Aufbereitungsprozesse schon bestehen und es bereits Lüftungssysteme ähnlicher Art gibt, die funktionieren. Bestenfalls wird ausschliesslich Karton aus Sekundärrohstoffen (RC-Karton) verwendet. Ob dieser alle Anforderungen erfüllt, wird sich noch zeigen müssen. Zelluloseplatten weisen ein ähnlich hohes Potential aus, sofern ihre Beschichtungen biologisch abbaubar sein können.

Die Umweltbelastung eines Lüftungsrohrs aus Karton gegenüber einem solchen aus verzinktem Stahlblech kann – je nach Bewertungsgrösse – um 80% bis deutlich über 90% reduziert werden. Solche Werte setzen jedoch voraus, dass die Rohre dieselbe Lebensdauer und dieselben Eigenschaften, auch hinsichtlich der Hygieneanforderungen, aufweisen.

Auch unter metallischen Werkstoffen bestehen Verbesserungsmöglichkeiten, um graue Energie zu verringern. Hier lässt sich durch den Einsatz von Stahl mit einem maximalen Recycling-Anteil der Energieaufwand um etwa 85% verringern. Ein Korrosionsschutz kann in Form von Legierungen wie der *Zink-Magnesium-Überzug* erfolgen. Aluminium und rostfreier Edelstahl können ebenfalls verwendet werden.

Ein Augenmerk sollte auch auf Pilzbasierte Produkte, Holzwerkstoffe und Bambus gelegt werden. Da diese Baustoffe aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen, ist ihr ökologischer Fussabdruck deutlich geringer verglichen mit anderen alternativen Materialien. Sollten sie in der Herstellung als Lüftungsmaterial ausschliesslich mit natürlichen Beschichtungen, Bindemitteln sowie Klebern verwendet werden, wären sie auch biologisch abbaubar. Insbesondere bei Holzwerkstoffen besteht hier Entwicklungsbedarf. Bei diesen Produkten wird sich noch zeigen müssen, wie wirtschaftlich sie sind. Mycelium ist in der Herstellung weder energie- noch kostenintensiv, allerdings stellt sich hier die Frage nach ausreichender Dauerhaftigkeit des Materials. Der Nachteil von Bambus liegt in den Anbaugebieten, welche sich ausschliesslich ausserhalb von Europa erstrecken. Hier bliebe zudem zu klären, ob organisch gewachsene Hohlprofile den Anforderungen an Lüftungsanlagen genügen.

Erdölbasierte Dämmungen, Kunststoffe, Textilien und Bioplastics können aufgrund ihres fossilen Ursprungs nicht als reelle nachhaltige Alternativen bewertet werden, wenngleich sie sich durch ihre Langlebigkeit bei niedrigem Einkaufspreis auf dem Markt etabliert haben. Einzig die Gruppe der Thermoplaste ist recyclingfähig, wenn sie sortenrein vorliegt. Dann können mehrere Nutzungszyklen (unter Qualitätsverlust) durchlaufen werden. Das gilt folglich für hier vorgestellten Ansätze der Lüftungssysteme aus Textilien.

Bioplastics weisen ähnliche Schwachstellen auf. Sofern noch kein Produkt aus 100% biologisch abbaubarem Biokunststoff verfügbar ist, verfügen diese zwar über eine bessere Ökobilanz, müssen aber dennoch am Lebensende energetisch verwertet werden, da ein stoffliches Recycling im Verbund nicht umsetzbar ist. Sollte es künftig biologisch abbaubare Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen in Kombination mit Holz geben, z.B. aus Stärke, Milchsäure oder proteinbasiert, welche als Gesamtheit schneller biologisch abbaubar wären, könnten Bioplastics eine hervorragende Alternative darstellen. Zum aktuellen Stand der Technik besteht aus ökologischer Sicht noch grosses Verbesserungspotential.

Gleiches gilt für die Holz-Kork-Latexgranulat-Platte. Solange Polyurethan (PU) als Bindemittel verwendet wird, kann die Platte nicht biologisch abgebaut werden. Es bliebe zu überprüfen, ob Naturlatex als Bindemittel ausreicht, um ähnliche Eigenschaften zu erzielen. Zudem kann Kork als Kostentreiber in dieser Plattenkombination die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigen.

5.5 Auslegeordnung

Kriterien / Material	Brandschutz	Hygiene und Reinigung	Festigkeit in Betrieb	Dichtheit	Feuchteresistenz	Robustheit	Nutzungsdauer	Ökologie	Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit
Karton ****(*)	- möglich innerhalb von Wohnungen und Brandabschnitten - vgl. Holz - Toxizität im Brandfall prüfen	- Luftverteilsysteme aus neuem Karton werden bereits eingesetzt - Vorteil: Karton hat eine glatte Oberfläche	- möglich (Wabenkarton) - Luftverteilsysteme aus Karton werden bereits eingesetzt	- Luftverteilsysteme aus Karton werden im Ausland bereits eingesetzt - Schweizer Vorgaben müssen geprüft werden	- Schutzbehandlung notwendig für ABL, AUL und FOL, ZUL nach WRG nicht problematisch (Bsp.: Lebensmittel)	- im Elementbau möglich (Wabenkarton)	- 20 Jahre problemlos möglich - Keine Langzeitstudien >20 Jahre	- RC-Karton vorhanden, nachwachsend, recycelbar aber Kaskadennutzung - Beschichtung beeinflusst Ökologie - Aufbereitungstechnologie etabliert, allerdings aufwändige Aufbereitung	- Rohmaterial günstig - Renommierter Architektur - Eigenschaften von Karton aus Sekundärrohstoff müssen abgeklärt werden
Holz ****(*)	- möglich innerhalb von Wohnungen und Brandabschnitten - Beschichtungen/holzimmanenter Brandschutz - Bandbreite an Produkten	- insgesamt möglich, Bedenken wenn die Holzoberfläche mit der Zeit rau wird	- gegeben	- je nach Holzaufbereitung möglich	- Schutzbehandlung notwendig, ansonsten Pilzbildung möglich	- gegeben	- 30 Jahre möglich	- nachwachsender Rohstoff - Beschichtung und Klebmittel beeinflussen Ökologie und RC-Potential - muss formaldehydfrei sein - Bearbeitung energieintensiv	- preisgünstiges Rohmaterial «Holz» zur Herstellung - effiziente Herstellungsprozesse - Adaption auf Lüftungen technisch realisierbar
Dämmungen **	- Glas- und Steinwolle sind nicht brennbar - EPS erfüllt keine Anforderung	- Glas- und Steinwolle besitzen eine raue Oberfläche, daher zusätzliche Schutzschicht notwendig	- Druckfestigkeit für übliche Anwendungen ausreichend	- gemäss Herstellerangaben gegeben	- unproblematisch, solange innere Schicht dicht ist	- im Elementbau denkbar, konzeptabhängig - anfälliger auf mechanische Beschädigungen	- i.d.R. langlebige Materialien	- Beschichtung und Trennbarkeit ausschlaggebend - energieintensive Herstellung - nicht nachwachsende Rohstoffe - Materialeffizienz - Recycling unwahrscheinlich	- laut Hersteller kosteneffizient (bei vergleichbarer Leistung), hat sich jedoch auf dem Markt noch nicht durchsetzen können
Textilien ***	- wird bereits eingesetzt (v.a. für Auslässe) - <i>schwer entflammbar</i> nicht ausreichend für Schächte und Hauptleitungen	- Bedenken mit der rauhen Oberfläche - waschbar	- nur für Überdruck geeignet, Verstärkung bei Unterdruck notwendig	- es gibt auch Leitungen, die nicht als Auslass verwendet werden und somit dicht sind	- wird bereits eingesetzt	- im Elementbau denkbar, konzeptabhängig	- 30 Jahre möglich	- Das Material ist leicht und wirkt sich somit positiv auf die UBP aus - materialabhängige Ökobilanz	- geringeres Gewicht wirkt sich positiv auf Transportkosten aus - Spezielle Flexibilität als Vorteil - wird bereits eingesetzt
Holz-Kork-Latexgranulat***	- vergleichbar mit Holz, somit innerhalb von Wohnungen und Brandabschnitten möglich	- Bedenken aufgrund der rauhen Oberfläche, - Latexgranulat wird mit der Zeit spröde	- keine Daten und schlecht abschätzbar	- Latexgranulat wird mit der Zeit spröde - Dichtheit muss geprüft werden	- im Wasser quillt das Material kaum - evtl. Schutzbehandlung notwendig	- gut formbar - Verarbeitung wie Holz: Im Elementbau denkbar - konzeptabhängig	- Keine Daten und nicht abschätzbar - verrottungsfest	- 95 % nachwachsende Rohstoffe formaldehydfrei verleimt - industrielle Nebenprodukte verarbeitbar - recycelbar, nicht mehr kompostierbar - Beschichtung und Bindemittel problematisch, Additive verhindern Recycling	- Wahrscheinlich höhere Materialkosten als bei üblichen Holzwerkstoffen (Kork ist ein kostenintensiver Baustoff) - einfacher Herstellungsprozess
Bambus ****(*)	- vgl. Holz	- möglich - Rundungen besser zu reinigen - Oberfläche innen rau	- gegeben	- keine Daten und nicht abschätzbar - organisch: Verbindungen problematisch und schwer zu standardisieren	- Schutzbehandlung notwendig	- gegeben	- 30 Jahre möglich	- Transportemissionen als Indikator - etwaige Beschichtungen und Klebmittel als RC-Hemmnis	- Bambus schnell nachwachsen - natürliches Hohlprofil - wird im Wohnungsbau eingesetzt - es fehlen Erfahrungswerte - organisch: Standard als Problem
Zellulose*****	- Beschichtungen verbessern das Brandverhalten - Zelluloseflocken: feuerhemmend bis feuerbeständig möglich	- möglich	- möglich	- möglich	- evtl. Schutzbehandlung notwendig	- formbar (unter Druck) - Verarbeitung wie Holz im Elementbau denkbar	- keine Daten und nicht abschätzbar	- aus recykliertem Altpapier - nicht verleimt, unter hohem Druck verpresst - recycelbar, kompostierbar ohne Oberflächenbehandlung	- Altpapier ist kostengünstig. Aufbereitungsaufwand muss eruiert werden - vorhandene Technologie - unklare techn. Verhalten
Mycelium****(*)	- erfüllt keine Anforderungen	- Langzeiterfahrung fehlt, wird allerdings v.a. für die Lebensmittelbranche konzipiert	- stossfest - Druckfestigkeit für übliche Anwendungen ausreichend	- wenn gepresst, möglich	- evtl. Schutzbehandlung notwendig	- im Elementbau möglich - leichte Verarbeitung	- keine Daten und nicht abschätzbar	- erneuerbar - leicht und wirkt sich somit positiv auf die UBP aus - 100% kompostierbar - geringe Herstellungsenergie	- einfacher Herstellungsprozess - kostengünstiges Rohmaterial - sehr früher Forschungsstand, langer Zeitraum bis zur Realisierung
Kunststoffe **	- gegeben durch Flammenschutzmittel, sonst brennbar - Toxizität im Brandfall möglich	- unproblematisch, dank glatten Oberflächen	- wird bereits eingesetzt	- wird bereits eingesetzt	- sehr stark gegeben	- Versprödung möglich	- 30 Jahre möglich	- begrenzter Rohstoff Erdöl - kein hohes Recycling-Potential bei Einsatz von Weichmachern, Flammenschutzmitteln und Stabilisatoren	- (noch) günstiger Rohstoff - effiziente Herstellungsverfahren - modifizierbare Eigenschaften: Hohe Performance, wenig Material
Biokunststoffe ***	- mit Flammenschutzmittel gegeben, sonst brennbar	- unproblematisch, dank glatten Oberflächen	- hohe Festigkeit zu erwarten	- vgl. Kunststoffe	- Gelatinebasiert: Keine Feuchteresistenz - PLA- basiert/Polymere: Feuchteresistenz	- hohe Robustheit zu erwarten	- keine Daten verfügbar - vgl. Kunststoffe	- weniger energieintensive Herstellung möglich (tierisch/pflanzlich) - nicht kompostierbar derzeit - Recycling fraglich	- viel Forschungspotential bzgl. biobasierter Beschichtungen und Additiven

Literaturverzeichnis

- [1] SIA, «Norm SIA 180: Wärme, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden,» Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2014.
- [2] SIA, «Merkblatt SIA 2040: SIA-Effizienzpfad Energie,» Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2017.
- [3] SIA, «Merkblatt SIA 2032: Graue Energie von Gebäuden,» Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2010.
- [4] M. e. a. Klingler, «Ökobilanzdaten für Lüftungs- und Wärmeanlagen, Schlussbericht BFE-Projekt,» ARGE LW-Bilanzen, Zürich, 2014.
- [5] D. e. a. Bionda, «SYGREN Systemkennwerte Graue Energie Gebäudetechnik, BFE-Schlussbericht der Hochschule Luzern,» Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2021.
- [6] SIA, «SN EN 1507: Lüftung von Gebäuden - Rechteckige Luftleitungen aus Blech - Anforderungen an Festigkeit und Dichtheit,» Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2006.
- [7] SIA, «SN EN 12237: Lüftung von Gebäuden - Luftleitungen - Festigkeit und Dichtheit von Luftleitungen mit rundem Querschnitt aus Blech,» Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2003.
- [8] SIA, «SN EN 15727: Lüftungen von Gebäuden - Luftleitungen und Luftleitungsbauteile, Klassifizierung entsprechend der Luftdichtheit und Prüfung,» Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2010.
- [9] A. e. a. Primas, «Vergleich von Lüftungskonzepten für Wohnbauten, Entwurf BFE-Schlussbericht der Hochschule Luzern,» Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2021.
- [10] M. M. e. al., «Analyse vereinfachter Lüftungskonzepte, Entwurf BFE-Schlussbericht der Hochschule Luzern,» Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2021.
- [11] Stahl, «Zink-Magnesium-veredelte Feinbleche - Weniger ist mehr,» Stahl-Informations-Zentrum, Düsseldorf, 2012.
- [12] S. Recycling, «Drehscheibe Kreislaufwirtschaft by Swiss Recycling,» Drehscheibe Kreislaufwirtschaft, [Online]. Available: www.circular-economy.swiss. [Zugriff am 11 02 2022].

- [13] unbekannt, «SRF Tagesschau,» SRF, 05 01 2020. [Online]. Available: <https://www.srf.ch/news/schweiz/karton-kostenpflichtig-immer-mehr-recyclinghoefe-verlangen-geld-fuer-altkarton>. [Zugriff am 11 02 2022].
- [14] M. Klee, «SRF News Regional,» SRF, 08 01 2020. [Online]. Available: <https://www.srf.ch/news/regional/basel-baselland/fast-wertloser-karton-basel-hat-ein-spezielles-altkarton-problem> . [Zugriff am 04 03 2021].
- [15] J. F. Latka, «Paper in architecture. Research by design, engineering and prototyping.,» Delft University, Delft, 2017.
- [16] H. Putz und S. S., «Der Mythos begrenzter Faserlebenszyklen,» *Wochenblatt für Papierfabrikation*, pp. 350-357, 6 2018.
- [17] A. Özlem, «Cardboard in architectural technology and structural engineering: a conceptual approach to cardboard buildings in architecture,» ETH Zürich, Zürich, 2009.
- [18] K. S. R. S. M. Cekon, «Cardboard-Based Packaging Materials as Renewable Thermal Insulation of Buildings: Thermal and Life-Cycle Performance,» Brno University of Technology, Brno, 2017.
- [19] J. S. S. B. A. Russ, «Reuse of old corrugated cardboard in constructional and thermal insulating boards,» Pulp and paper research institute, Bratislava, 2013.
- [20] «Gatorduct,» [Online]. Available: www.gatorduct.com. [Zugriff am 11 02 2022].
- [21] «CLIMAVÉR,» [Online]. Available: www.isover-technische-isolierung.de/produkte/climaverr-a2-neto-beidseitig-kaschierte-glaswolleplatte. [Zugriff am 11 02 2022].
- [22] I. S. Gobain, «CLIMAVÉR - Das selbsttragende Lüftungskanalsystem,» Saint-Gobain Isover G+H AG, Ludwigshafen D, 2018.
- [23] «Climate Recovery,» [Online]. Available: www.climaterecovery.com. [Zugriff am 11 02 2022].
- [24] A. R.-F. P. R. A. a. S. J. Hillebrandt, Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource., München: DETAIL, 2018.
- [25] E. E. A. (EEA), «Plastics, the circular economy and Europe's environment — a priority for action.,» Publications Office of the European Union, Luxemburg, 2021.

- [26] J. Schliebe, «<https://www.lueftungs.net/magazin/>,» LNET.magazin, 30 Juli 2020. [Online]. Available: https://www.lueftungs.net/magazin/lueftungsrohre-und-lueftungskanaele-in-der-uebersicht/#Lueftungsrohre_aus_PVC_von_Meltem. [Zugriff am 18 April 2021].
- [27] «Lüftungs.net,» [Online]. Available: <https://www.lueftungs.net/magazin>. [Zugriff am 11 02 2022].
- [28] M. S. A. M. H. P. Fabian Knappich, «A new approach to metal- and polymer-recovery from metallized plastic waste using mechanical treatment and subcritical solvents,» Springer, Japan, 2017.
- [29] M. D. TABONE, «Sustainability Metrics: Life Cycle Assessment and Green Design in Polymers,» *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY* /, Nr. 44, pp. 8264-8269, 13 Mai 2010.
- [30] F. Kaiserslautern, «Flüssigholz - Ein Überblick,» FH Kaiserslautern in Zusammenarbeit mit der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Kaiserslautern.
- [31] U. Stuttgart, «ITKE: Uni Stuttgart,» [Online]. Available: <https://www.itke.uni-stuttgart.de> <https://www.upmprofil.com>. [Zugriff am 11 02 2022].
- [32] F. Josef, «baubiologie-magazin.de,» 7. September 2018. [Online]. Available: <https://baubiologie-magazin.de/lueftungskanaele-holz/>. [Zugriff am 15. Dezember 2021].
- [33] B. Mgazin, «Baubiologie-Magazin.de,» [Online]. Available: <https://baubiologie-magazin.de/lueftungskanaele-holz/>. [Zugriff am 11 02 2022].
- [34] P. Sommerhuber, J. Wenker, S. Rüter und A. Krause, «Life cycle assessment of wood-plastic composites: Analysing alternative materials and identifying an environmental sound end-of-life option,» *Resources Conservation and Recycling*, pp. 235-248, 02 11 2016.
- [35] S. Materialarchiv, «MATERIALARCHIV.ch,» [Online]. Available: https://d6ytrkhvpcrff.cloudfront.net/1000x1000/materialarchiv/imported_1357_4641_material00.jpg. [Zugriff am 11 02 2022].
- [36] O. Ristau, «www.tageswoche.ch,» Tages Woche, 01 09 2014. [Online]. Available: <https://tageswoche.ch/gesellschaft/baustoff-der-zukunft-bambus-statt-stahl/>. [Zugriff am 16 10 2021].

- [37] «Tageswoche.ch,» [Online]. Available: <https://tageswoche.ch/gesellschaft/baustoff-der-zukunft-bambus-statt-stahl/>.
- [38] E. U. M. a. R. Unit, «empa.ch,» EMPA, [Online]. Available: <https://www.empa.ch/de/web/nest/urban-mining>. [Zugriff am 22 02 2022].
- [39] «paradisepackaging.co,» [Online]. Available: www.paradisepackaging.co. [Zugriff am 10 02 2022].
- [40] «Ke-fibertec.de,» Ke-Fibertec, [Online]. Available: <https://www.ke-fibertec.com/de/>. [Zugriff am 11 02 2022].
- [41] Antefil Composite Tech, «www.antefil.com,» Antefil Composite Tech, 2021. [Online]. [Zugriff am 15. Dezember 2021].
- [42] K. P. De Graaf LA., «Industrial proteins as a gree alternative for "petro" polymers; potentials and limitations,» *Macromol Symp* 127, Ney York, 1998.
- [43] KBOB, «Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022,» KBOB / ecobau / IPB, Bern, 2022.
- [44] W. Kevin, «Bio-based air ducts: The applicability of bio-based materials for the construction of air duct components,» TU Delft Architecture and the Built Environment, Delft, 2023.
- [45] G. Settembrini, A. Kretschmer und A. Primas, «16cm Betondecke sind genug - Auslegeordnung zu offen geführten Lüftungsleitungen im Wohnungsbau,» Hochschule Luzern im Auftrag des Amt für Hochbauten Zürich, Luzern, 2023.
- [46] SIA, SIA Merkblatt 2040, SIA-Effizienzpfad Energie, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2011.
- [47] A. D. L. Rosa, G. Recca, J. Summerscales, A. Latteri, G. Cozzo und G. Cicala, «Bio-based versus traditional polymer composites. A life cycle assessment perspective,» *Journal of Cleaner Production*, pp. 135-144, 7 März 2014.

Anhang

5.6 EPD-Vergleich verzinktes und unverzinktes Stahlband

Tabelle 11: EPD-ARC-20202027-CBD1-EN Arcelor Mittal Europe; kaltgewalztes Stahlband

PRODUCT STAGE			CONSTRUCTION PROCESS STAGE			USE STAGE							END OF LIFE STAGE				BENEFITS AND LOADS BEYOND THE
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport from the gate to Assembly	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operation as energy	Operation as water	Deconstruction	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse/Recovery/Recycling	D	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
X	X	X	MND	MND	MND	MND	MNR	MNR	MNR	MND	MND	MND	MND	X	MND	X	
RESULTS OF THE LCA - ENVIRONMENTAL IMPACT: 1 ton of cold rolled steel coil																	
Parameter		Unit	A1-A3				C3				D						
Global warming potential		[kg CO2-Eq.]	2.38E+3				2.00E+0				-1.65E+3						
Depletion potential of the stratospheric ozone layer		[kg CFC11-Eq.]	4.82E-9				6.89E-12				3.24E-10						
Acidification potential of land and water		[kg SO2-Eq.]	4.12E+0				6.78E-3				-3.98E+0						
Eutrophication potential		[kg (PO4)3-Eq.]	4.18E-1				7.99E-4				-3.41E-1						
Formation potential of tropospheric ozone photochemical oxidants		[kg ethene-Eq.]	7.04E-1				4.75E-4				-5.12E-1						
Abiotic depletion potential for non-fossil resources		[kg Sb-Eq.]	1.02E-4				9.53E-7				1.70E-4						
Abiotic depletion potential for fossil resources		[MJ]	2.06E+4				2.25E+1				-1.31E+4						
RESULTS OF THE LCA - RESOURCE USE: 1 ton of cold rolled steel coil																	
Parameter		Unit	A1-A3				C3				D						
Renewable primary energy as energy carrier		[MJ]	6.16E+2				1.12E+1				1.20E+3						
Renewable primary energy resources as material utilization		[MJ]	0.00E+0				0.00E+0				0.00E+0						
Total use of renewable primary energy resources		[MJ]	6.16E+2				1.12E+1				1.20E+3						
Non-renewable primary energy as energy carrier		[MJ]	2.06E+4				3.43E+1				-1.23E+4						
Non-renewable primary energy as material utilization		[MJ]	0.00E+0				0.00E+0				0.00E+0						
Total use of non-renewable primary energy resources		[MJ]	2.06E+4				3.43E+1				-1.23E+4						
Use of secondary material		[kg]	1.13E+2				0.00E+0				0.00E+0						
Use of renewable secondary fuels		[MJ]	0.00E+0				0.00E+0				0.00E+0						
Use of non-renewable secondary fuels		[MJ]	0.00E+0				0.00E+0				0.00E+0						
Use of net fresh water		[m³]	4.59E+0				1.53E-2				5.79E-1						
RESULTS OF THE LCA - OUTPUT FLOWS AND WASTE CATEGORIES: 1 ton of cold rolled steel coil																	
Parameter		Unit	A1-A3				C3				D						
Hazardous waste disposed		[kg]	1.37E-5				2.18E-7				-8.67E-6						
Non-hazardous waste disposed		[kg]	4.21E+0				2.01E+1				-2.63E+1						
Radioactive waste disposed		[kg]	-2.71E-3				4.70E-3				2.94E-1						
Components for re-use		[kg]	0.00E+0				0.00E+0				0.00E+0						
Materials for recycling		[kg]	0.00E+0				9.80E+2				0.00E+0						
Materials for energy recovery		[kg]	0.00E+0				0.00E+0				0.00E+0						
Exported electrical energy		[MJ]	0.00E+0				0.00E+0				0.00E+0						
Exported thermal energy		[MJ]	0.00E+0				0.00E+0				0.00E+0						

Tabelle 12: EPD-ARM-20170140-IBD1-EN ArcelorMittal; verzinktes Stahlband

PRODUCT STAGE			CONSTRUCTION PROCESS STAGE		USE STAGE							END OF LIFE STAGE				BENEFITS AND LOADS BEYOND THE	
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport from the gate to	Assembly	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operation all energy	Operation waste water	Deconstruction demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse-Recycling	D
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
X	X	X	MND	MND	MND	MND	MNR	MNR	MNR	MND	MND	MND	MND	X	MND	X	X
RESULTS OF THE LCA - ENVIRONMENTAL IMPACT: 1 metric ton of Magnelis® coated steel																	
Parameter	Unit	A1-A3		C3	D												
Global warming potential	[kg CO2-Eq.]	2.57E+3		2.00E+0	-1.71E+3												
Depletion potential of the stratospheric ozone layer	[kg CFC11-Eq.]	5.14E-9		6.89E-12	3.36E-10												
Acidification potential of land and water	[kg SO2-Eq.]	4.53E+0		6.78E-3	-4.12E+0												
Eutrophication potential	[kg (PO4)3--Eq.]	4.69E-1		7.99E-4	-3.53E-1												
Formation potential of tropospheric ozone photochemical oxidants	[kg ethene-Eq.]	7.40E-1		4.75E-4	-5.29E-1												
Abiotic depletion potential for non-fossil resources	[kg Sb-Eq.]	5.43E-2		9.53E-7	1.75E-4												
Abiotic depletion potential for fossil resources	[MJ]	2.30E+4		2.25E+1	-1.35E+4												
RESULTS OF THE LCA - RESOURCE USE: 1 metric ton of Magnelis® coated steel																	
Parameter	Unit	A1-A3		C3	D												
Renewable primary energy as energy carrier	[MJ]	1.12E+3		1.12E+1	1.24E+3												
Renewable primary energy resources as material utilization	[MJ]	0.00E+0		0.00E+0	0.00E+0												
Total use of renewable primary energy resources	[MJ]	1.12E+3		1.12E+1	1.24E+3												
Non-renewable primary energy as energy carrier	[MJ]	2.34E+4		3.43E+1	-1.28E+4												
Non-renewable primary energy as material utilization	[MJ]	0.00E+0		0.00E+0	0.00E+0												
Total use of non-renewable primary energy resources	[MJ]	2.34E+4		3.43E+1	-1.28E+4												
Use of secondary material	[kg]	8.32E+1		0.00E+0	8.97E+2												
Use of renewable secondary fuels	[MJ]	0.00E+0		0.00E+0	0.00E+0												
Use of non-renewable secondary fuels	[MJ]	0.00E+0		0.00E+0	0.00E+0												
Use of net fresh water	[m³]	5.61E+0		1.53E-2	5.99E-1												
RESULTS OF THE LCA – OUTPUT FLOWS AND WASTE CATEGORIES: 1 metric ton of Magnelis® coated steel																	
Parameter	Unit	A1-A3		C3	D												
Hazardous waste disposed	[kg]	1.53E-5		2.18E-7	-8.97E-6												
Non-hazardous waste disposed	[kg]	1.18E+1		2.01E+1	-2.72E+1												
Radioactive waste disposed	[kg]	1.66E-1		4.70E-3	3.04E-1												
Components for re-use	[kg]	0.00E+0		0.00E+0	0.00E+0												
Materials for recycling	[kg]	0.00E+0		9.80E+2	0.00E+0												
Materials for energy recovery	[kg]	0.00E+0		0.00E+0	0.00E+0												
Exported electrical energy	[MJ]	0.00E+0		0.00E+0	0.00E+0												
Exported thermal energy	[MJ]	0.00E+0		0.00E+0	0.00E+0												

Tabelle 13: Arcelor Mittal; verzinktes Stahlband (Tabelle 11) minus unverzinktes Stahlband (

Tabelle 12).

Umweltauswirkungen	Unit	Produktion		Beseitigung		Recycling	
		A1-A3		C3		D	
Globales Erwärmungspotenzial	[kg CO2-Eq.]	1.90E+2	8%	0.00E+0	0%	-6.00E+1	4%
Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht	[kg CFC11-Eq.]	3.20E-10	7%	0.00E+0	0%	1.20E-11	4%
Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	[kg SO2-Eq.]	4.10E-1	10%	0.00E+0	0%	-1.40E-1	4%
Eutrophierungspotenzial	[kg (PO4)3--Eq.]	5.10E-2	12%	0.00E+0	0%	-1.20E-2	4%
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon	[kg ethene-Eq.]	3.60E-2	5%	0.00E+0	0%	-1.70E-2	3%
Potenzial für die Verknappung abiotischer Ressourcen - nicht fossile	[kg Sb-Eq.]	5.42E-2	53135%	0.00E+0	0%	5.00E-6	3%
Potenzial für die Verknappung abiotischer Ressourcen - fossile	[MJ]	2.40E+3	12%	0.00E+0	0%	-4.00E+2	3%
Ressourceneinsatz	Unit	A1-A3		C3 oder C4		D	
Erneuerbare Primärenergie als Energieträger	[MJ]	5.04E+2	82%	0.00E+0	0%	4.00E+1	3%
Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	[MJ]	0.00E+0	-	0.00E+0	-	0.00E+0	-
Total erneuerbare Primärenergie	[MJ]	5.04E+2	82%	0.00E+0	0%	4.00E+1	3%
Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger	[MJ]	2.80E+3	14%	0.00E+0	0%	-5.00E+2	4%
Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	[MJ]	0.00E+0	-	0.00E+0	-	0.00E+0	-
Total nicht erneuerbare Primärenergie	[MJ]	2.80E+3	14%	0.00E+0	0%	-5.00E+2	4%
Einsatz von Sekundärstoffen	[kg]	-2.98E+1	-26%	0.00E+0	-	8.97E+2	-
Erneuerbare Sekundärbrennstoffe	[MJ]	0.00E+0	-	0.00E+0	-	0.00E+0	-
Nicht-erneuerbare Sekundärbrennstoffe	[MJ]	0.00E+0	-	0.00E+0	-	0.00E+0	-
Nettoeinsatz von Süßwasserressourcen	[m³]	1.02E+0	22%	0.00E+0	0%	2.00E-2	3%
Abfallkategorien	Unit	A1-A3		C3 oder C4		D	
Gefährlicher Abfall zur Deponie	[kg]	1.60E-6	12%	0.00E+0	0%	-3.00E-7	3%
Entsorgter nicht gefährlicher Abfall	[kg]	7.59E+0	180%	0.00E+0	0%	-9.00E-1	3%
Entsorgter radioaktiver Abfall	[kg]	1.69E-1	-6225%	0.00E+0	0%	1.00E-2	3%
EPD-ARM-20170140-IBD1-EN	Arcelor Mittal	EPD-ARC-20200027-CBD1-EN	ArcelorMittal Europe				
Hot dip galvanised steel with Magnelis coating		Kaltgewalztes Stahlband (Cold Rolled Steel Coil)					

5.7 Beispiele zur Umweltbelastung von Kartonleitungen

5.7.1 Materialvergleich

Tabelle 14: Kenndaten zu Kartonanwendungen

Versandhülse rund					
Durchm.	Länge	Gewicht	Gewicht spez.		
mm	mm	kg	kg/m	kg/m ²	
80	0.83	0.48	0.58	2.30	
80	2.5	1.086	0.43	1.73	
80	0.86	0.349	0.41	1.61	
80	0.85	0.36	0.42	1.69	
80	1.655	0.825	0.50	1.98 verwendet	
80	1.1	0.47	0.43	1.70	
80	0.43	0.19	0.44	1.76	
80	0.61	0.25	0.41	1.63	
80	0.86	0.349	0.41	1.61	
120	1.3	1.105	0.85	2.25	
Vollpappe spiralgewickelt			1.83	Mittelwert	
Sehr stabil und gutes Ploppgeräusch beim Öffnen!					
Wandstärke ca 3 mm					
Tragkraft: 5 Kg					
Material: Wickelpappe spiralgewickelt					
Testliner pappbraun					
Verschluss: Plastikkappen mit Klemmlippen weiß					
Bodenkappe eingehaftet					
Deckelkappe lose beiliegend					




Tabelle 15: Kenndaten zu Kartonanwendungen

Versandhülse quadratisch					
Hersteller 1					
B / H	Länge	Gewicht	Gewicht spez.		
mm	mm	kg	kg/m	kg/m ²	
105	0.315	0.105	0.33	0.79	
108	0.43	0.12	0.28	0.65	
105	0.51	0.173	0.34	0.81	
108	0.61	0.16	0.26	0.61	
140	0.61	0.308	0.50	0.90	
108	0.705	0.18	0.26	0.59	
108	0.86	0.2	0.23	0.54	
140	0.86	0.392	0.46	0.81	
105	1.005	0.288	0.29	0.68 verwendet	
108	1.008	0.19	0.19	0.44	
105	1.17	0.327	0.28	0.67	
			0.68	Mittelwert	
Hersteller 2					
75	1.005	0.16	0.16	0.53	
Hersteller 3					
105	0.43	0.34	0.79	1.88	
105	0.65	0.49	0.75	1.79	
105	0.86	0.693	0.81	1.92	
125	1.15	0.992	0.86	1.73	
Material 1.3 B braun/braun					
Stabile Wellpappe bietet Schutz					
Keine zusätzlichen Verbund- oder Verschlussmittel wie Klebeband, Plastikdeckel oder Metallklammern notwendig					
Material: Spiralgewickelte Pappe; Stärke: 2 mm					




Tabelle 16: Vergleich verschiedener Kartonqualitäten zu Prozess Hartfaserplatte

LocalName	Unit	UBP, 2013**	Primärenergie, total MJeQ	Primärenergie, nicht erneuerbar MJeQ	Treibhausgas emissionen kg CO2	UBP, 2006	Primärenergie, total	Primärenergie, nicht erneuerbar	Treibhausgas emissionen	UBP, 2006	
							%	%	%	%	
Wellkartonrohpapier, Kraftliner, ab Werk	kg	1203	44,5	11,8	0,66	1152	99%	110%	79%	63%	
Wellkartonrohpapier, Semichemical Fluting, ab Werk	kg	1283	37,8	13,8	1,04	1192	105%	94%	92%	100%	
Wellkartonrohpapier, Testliner, ab Werk	kg	795	13,0	12,2	0,82	698	65%	32%	82%	79%	
Wellkartonrohpapier, Wellenstoff, ab Werk	kg	798	12,9	12,2	0,82	702	65%	32%	82%	79%	
Wellkarton, Frischfaser, einwellig, ab Werk	kg	1521	45,4	15,0	0,99	1436	125%	113%	101%	95%	
Wellkarton, Frischfaser, einwellig, ab Werk	kg	1533	47,2	16,2	1,03	1444	126%	117%	109%	99%	
Wellkarton, gemischte Fasern, einwellig, ab Werk	kg	1190	25,2	14,5	0,94	1088	98%	63%	97%	90%	
Wellkarton, gemischte Fasern, einwellig, ab Werk	kg	1157	26,2	15,1	0,95	1055	95%	65%	101%	91%	
Wellkarton, Recycling, zweiwellig, ab Werk	kg	1139	21,3	14,5	0,96	1033	93%	53%	97%	92%	
Wellkarton, Recycling, zweiwellig, ab Werk	kg	1101	22,1	15,1	0,97	993	90%	55%	101%	93%	
Wellkarton, Recycling, einwellig, ab Werk	kg	1068	15,8	14,6	0,99	953	88%	39%	98%	95%	
Wellkarton, Recycling, einwellig, ab Werk	kg	1021	16,4	15,0	0,99	905	84%	41%	101%	95%	
Chromokarton, F&B, ab Werk	kg	1897	59,9	23,8	1,31	1779	156%	149%	160%	126%	
Liquid Packaging Board, ab Werk	kg	1118	45,1	11,8	0,60	1068	92%	112%	79%	57%	
Wellkartonverpackung, gemischte Fasern, einwellig, ab Werk	kg	1442	30,0	17,9	1,14	1320	118%	74%	120%	110%	
Wellkartonverpackung, gemischte Fasern, einwellig, ab Werk	kg	1602	35,2	20,4	1,24	1471	131%	87%	137%	119%	
Produktion von Kartonverpackungen, Tiefdruck, ab Werk	kg	1104	11,7	10,6	0,30	1078	90%	29%	71%	29%	
Produktion von Kartonverpackungen, Offsetdruck, ab Werk	kg	698	11,5	9,0	0,36	661	57%	29%	60%	35%	
Produktion von Liquid Packaging Board Verpackungen, ab Werk	kg	1917	62,4	34,4	1,47	1795	157%	155%	231%	142%	
Zellstoffkarton, gebleicht, S&B, ab Werk	kg	2161	66,8	18,0	1,08	2081	177%	166%	121%	104%	
Zellstoffkarton, ungebleicht, S&B, ab Werk	kg	1806	62,0	16,9	0,91	1745	148%	154%	114%	87%	
Duplex-/Triplex-Karton, WLC, ab Werk	kg	1185	20,4	16,9	1,08	1068	97%	51%	113%	104%	
Kraftpapier gebleicht, ab Werk	kg	2697	82,0	30,3	1,69	2546	221%	203%	203%	163%	
Kraftpapier, ungebleicht, ab Werk	kg	1725	60,4	15,4	0,85	1669	141%	150%	103%	82%	
KBOB Liste 2016							KBOB Liste 2016 als 100% da ca. vergleichbare Daten				
	kg	1'220	40,3	14,9	1,04	k.A.	100%	100%	100%	100%	
	kg	91.1	0.222	0.219	0.126	k.A.	100%	100%	100%	100%	
	kg	1'310	40,3	15,1	1,16	k.A.					
KBOB Liste 2022											
	kg	1700	40,0	14,5	1,03	k.A.	139%	99%	98%	99%	
	kg	68.8	0.347	0.325	0.044	k.A.	76%	156%	149%	35%	
	kg	1'770	40,3	14,9	1,07	k.A.					
Entsorgung, Verpackungskarton, 19.6% Wasser, in Kehrichtverbrennung	kg	752	0,4	0,4	0,03	752	826%	168%	164%	20%	
Entsorgung, Verpackungskarton, 19.6% Wasser, in Reaktordeponie	kg	5256	0,5	0,4	1,37	5256	5770%	207%	200%	1084%	
Entsorgung, Verpackungskarton, 19.6% Wasser, in Inertstoffdeponie	kg	12	0,2	0,2	0,01	12	13%	89%	90%	6%	
Entsorgung, Papier, 11.2% Wasser, in Kehrichtverbrennung	kg	735	0,3	0,3	0,02	736	807%	132%	130%	19%	
Entsorgung, Papier, 11.2% Wasser, in Kehrichtverbrennung	kg	86	0,4	0,4	0,04	k.A.	95%	169%	167%	32%	
Mittelwert alle "Kartonprozesse" Ei 2.2	kg	1306	33	16	1	1214	107%	83%	107%	90%	

Tabelle 17: Vergleich verschiedener Kartonqualitäten zu Prozess Kraftpapier

LocalName	Unit	UBP, 2013**	Primärenergie, total MJeQ	Primärenergie, nicht erneuerbar MJeQ	Treibhausgas emissionen kg CO2	UBP, 2006	Primärenergie, total	Primärenergie, nicht erneuerbar	Treibhausgas emissionen	UBP, 2006	
							%	%	%	%	
Wellkartonrohpapier, Kraftliner, ab Werk	kg	1203	44,5	11,8	0,66	1152	41%	55%	41%	40%	
Wellkartonrohpapier, Semichemical Fluting, ab Werk	kg	1283	37,8	13,8	1,04	1192	43%	47%	48%	63%	
Wellkartonrohpapier, Testliner, ab Werk	kg	795	13,0	12,2	0,82	698	27%	16%	43%	50%	
Wellkartonrohpapier, Wellenstoff, ab Werk	kg	798	12,9	12,2	0,82	702	27%	16%	43%	50%	
Wellkarton, Frischfaser, einwellig, ab Werk	kg	1521	45,4	15,0	0,99	1436	52%	56%	53%	60%	
Wellkarton, Frischfaser, einwellig, ab Werk	kg	1533	47,2	16,2	1,03	1444	52%	58%	57%	62%	
Wellkarton, gemischte Fasern, einwellig, ab Werk	kg	1190	25,2	14,5	0,94	1088	40%	31%	51%	57%	
Wellkarton, gemischte Fasern, einwellig, ab Werk	kg	1157	26,2	15,1	0,95	1055	39%	32%	53%	58%	
Wellkarton, Recycling, zweiwellig, ab Werk	kg	1139	21,3	14,5	0,96	1033	39%	26%	51%	58%	
Wellkarton, Recycling, zweiwellig, ab Werk	kg	1101	22,1	15,1	0,97	993	37%	27%	53%	59%	
Wellkarton, Recycling, einwellig, ab Werk	kg	1068	15,8	14,6	0,99	953	36%	20%	51%	60%	
Wellkarton, Recycling, einwellig, ab Werk	kg	1021	16,4	15,0	0,99	905	35%	20%	53%	60%	
Chromokarton, F&B, ab Werk	kg	1897	59,9	23,8	1,31	1779	64%	74%	83%	79%	
Liquid Packaging Board, ab Werk	kg	1118	45,1	11,8	0,60	1068	38%	56%	41%	36%	
Wellkartonverpackung, gemischte Fasern, einwellig, ab Werk	kg	1442	30,0	17,9	1,14	1320	49%	37%	63%	69%	
Wellkartonverpackung, gemischte Fasern, einwellig, ab Werk	kg	1602	35,2	20,4	1,24	1471	54%	44%	71%	75%	
Produktion von Kartonverpackungen, Tiefdruck, ab Werk	kg	1104	11,7	10,6	0,30	1078	37%	15%	37%	18%	
Produktion von Kartonverpackungen, Offsetdruck, ab Werk	kg	698	11,5	9,0	0,36	661	24%	14%	31%	22%	
Produktion von Liquid Packaging Board Verpackungen, ab Werk	kg	1917	62,4	34,4	1,47	1795	65%	77%	120%	89%	
Zellstoffkarton, gebleicht, S&B, ab Werk	kg	2161	66,8	18,0	1,08	2081	73%	83%	63%	66%	
Zellstoffkarton, ungebleicht, S&B, ab Werk	kg	1806	62,0	16,9	0,91	1745	61%	77%	59%	55%	
Duplex-/Triplex-Karton, WLC, ab Werk	kg	1185	20,4	16,9	1,08	1068	40%	25%	59%	66%	
Kraftpapier gebleicht, ab Werk	kg	2697	82,0	30,3	1,69	2546	91%	102%	106%	103%	
Kraftpapier, ungebleicht, ab Werk	kg	1725	60,4	15,4	0,85	1669	58%	75%	54%	51%	
KBOB Liste 2016							KBOB Liste 2016 als 100% da ca. vergleichbare Daten				
	kg	2'950	80,6	28,6	1,65	k.A.	100%	100%	100%	100%	
	kg	86.2	0.374	0.367	0.041	k.A.	100%	100%	100%	100%	
	kg	3'040	81,0	29,0	1,69	k.A.					
KBOB Liste 2022											
	kg	3'250	74,2	27,2	1,62	k.A.	110%	92%	95%	98%	
	kg	207	0.666	0.623	0.059	k.A.	240%	178%	170%	145%	
	kg	3'460	74,5	27,9	1,67	k.A.					
Entsorgung, Verpackungskarton, 19.6% Wasser, in Kehrichtverbrennung	kg	752	0,4	0,4	0,03	752	813%	100%	98%	62%	
Entsorgung, Verpackungskarton, 19.6% Wasser, in Reaktordeponie	kg	5256	0,5	0,4	1,37	5256	6098%	123%	119%	3374%	
Entsorgung, Verpackungskarton, 19.6% Wasser, in Inertstoffdeponie	kg	12	0,2	0,2	0,01	12	14%	53%	54%	18%	
Entsorgung, Papier, 11.2% Wasser, in Kehrichtverbrennung	kg	735	0,3	0,3	0,02	736	853%	78%	78%	59%	
Entsorgung, Papier, 11.2% Wasser, in Kehrichtverbrennung	kg	86	0,4	0,4	0,04	k.A.	100%	100%	100%	100%	
Mittelwert alle "Kartonprozesse" Ei 2.2	kg	1306	33	16	1	1214	44%	41%	56%	57%	

Tabelle 18: Ökobilanzdaten und Annahmen zu den verschiedenen Materialien

ID	Name	Locatic	LocalName	Category	SubCategory	Unit	UBP, 2013	Primärenergie, total	Primärenergie, nicht erneuerbar	Treibhausgas emissionen
							UBP	MJeq	MJeq	kg CO2
30286	Stahlblech, verzinkt	CH	KBOB ID: 06.011 (2021)	KBOB 2021	Herstellung +	kg	1.52E+04	61.2	56.16	4.49E+00
31001	Kraftpapier; KBOB 2022	CH	Kraftpapier; KBOB 2022 ID: 09.006	KBOB 2022	Herstellung +	kg	3.46E+03	7.45E+01	2.79E+01	1.67E+00
31002	Hartfaserplatte; KBOB 2022	CH	Hartfaserplatte; KBOB 2022 ID: 07.004	KBOB 2022	Herstellung +	kg	1.77E+03	4.03E+01	1.49E+01	1.07E+00
31003	Annahme Mittelwert für Kartonkanal	CH	Annahme Mittelwert für Kartonkanal	Annahme	Herstellung +	kg	2.62E+03	5.74E+01	2.14E+01	1.37E+00

Tabelle 19: Vergleich der Ökobilanzdaten für verschiedene Rohrtypen (Basis für Abbildung 32)

Fall für Wohnungslüftung mit DN 80 (Luftmenge pro Rohr 30... max 54 m ³ /h)							
Bauteil	Gewicht	Einheit	Unit	UBP, 2013	Primärenergie, total	Primärenergie, nicht erneuerbar	Treibhausgas emissionen
				UBP	MJeq	MJeq	kg CO2
Lüftungsrohr DN 80, Stahl verzinkt	1.1	kg/m	m	1.72E+04	6.94E+01	6.37E+01	5.09E+00
Lüftungsrohr DN 80, Karton	0.3	kg/m	m	8.74E+02	1.92E+01	7.14E+00	4.58E-01
Lüftungsrohr DN 80, Karton, hoch	0.5	kg/m	m	1.72E+03	3.71E+01	1.39E+01	8.31E-01
Lüftungsrohr DN 80, Karton, tief	0.2	kg/m	m	3.02E+02	6.89E+00	2.54E+00	1.83E-01
Differenz							
Plus (hoch)	0.16	kg/m	m	8.48E+02	1.79E+01	6.72E+00	3.73E-01
Minus (tief)	0.16	kg/m	m	5.72E+02	1.23E+01	4.60E+00	2.75E-01

Fall für Bürolüftung mit DN 315 (Luftmenge pro Rohr ca. 500... max 1100 m ³ /h)							
Bauteil	Gewicht	Einheit	Unit	UBP, 2013	Primärenergie, total	Primärenergie, nicht erneuerbar	Treibhausgas emissionen
				UBP	MJeq	MJeq	kg CO2
Lüftungskanal DN 315, Stahl verzinkt	5.4	kg/m	m	8.15E+04	3.28E+02	3.01E+02	2.41E+01
Lüftungsrohr DN 315, Karton	1.3	kg/m	m	3.44E+03	7.56E+01	2.81E+01	1.80E+00
Lüftungsrohr DN 315, Karton, hoch	2.0	kg/m	m	6.78E+03	1.46E+02	5.46E+01	3.27E+00
Lüftungsrohr DN 315, Karton, tief	0.7	kg/m	m	1.19E+03	2.71E+01	1.00E+01	7.20E-01
Differenz							
Plus (hoch)	0.64	kg/m	m	3.34E+03	7.04E+01	2.65E+01	1.47E+00
Minus (tief)	0.64	kg/m	m	2.25E+03	4.84E+01	1.81E+01	1.08E+00

Fall für grosse Bürolüftung mit DN 630 (Luftmenge pro Rohr ca. 4000... max 6700 m ³ /h)							
Bauteil	Gewicht	Einheit	Unit	UBP, 2013	Primärenergie, total	Primärenergie, nicht erneuerbar	Treibhausgas emissionen
				UBP	MJeq	MJeq	kg CO2
Lüftungskanal DN 630, Stahl verzinkt	14.3	kg/m	m	2.17E+05	8.75E+02	8.03E+02	6.42E+01
Lüftungsrohr DN 630, Karton	2.6	kg/m	m	6.88E+03	1.51E+02	5.62E+01	3.61E+00
Lüftungsrohr DN 630, Karton, hoch	3.9	kg/m	m	1.36E+04	2.92E+02	1.09E+02	6.54E+00
Lüftungsrohr DN 630, Karton, tief	1.3	kg/m	m	2.38E+03	5.43E+01	2.00E+01	1.44E+00
Differenz							
Plus (hoch)	1.29	kg/m	m	6.68E+03	1.41E+02	5.30E+01	2.94E+00
Minus (tief)	1.29	kg/m	m	4.50E+03	9.69E+01	3.62E+01	2.17E+00