

RISORSA MATERASSO

Il potenziale dei materiali di scarto

RESOURCE MATTRESS

The potential of refuse materials

Alexa Kreissl

ABSTRACT

I materassi sono costituiti da materiali la cui esatta composizione è perlopiù sconosciuta ai raccoglitori di rifiuti, ragion per cui possono difficilmente essere riciclati e vengono inceneriti, perdendo una potenziale risorsa che potrebbe entrare in un processo di tipo circolare. Sebbene il riutilizzo e il riciclo del materasso oggi rappresentino una parte trascurabile del mercato del riuso, la ricerca qui presentata ne esplora il potenziale come isolamento termico e acustico nelle costruzioni civili in un'ottica di riduzione di sprechi ed emissioni di CO₂. Il caso studio illustrato propone un metodo di lavoro per identificare il potenziale riuso dei materassi su un'ampia scala, anche considerando i diversi e grandi formati presenti in commercio: lo studio parte da un'intuizione 'creativa' sui possibili riusi e solo dopo ne valuta la fattibilità tramite misurazioni e metodi scientifici.

Mattresses are multi-material products whose exact composition is mostly unknown to the waste collector, so they can hardly be recycled and continue to be incinerated. Valuable resources are lost and no longer returned to the material cycle. Foam re-use and mechanical recycling account for only a negligible share of the market. The research presented here explores the potential of re-using mattresses as thermal and acoustic insulation for construction projects and attempts to find re-purpose in order to reduce waste and emissions, save resources and provide the insulation needed. This specific case study serves as a method to identify and demonstrate the flow and potential on a much larger scale. Considering comparable and possibly compatible properties of different foams this study explores the possibility of using them in a larger format. The approach is based on an unbiased exploration of the material, which only as a second step uses scientific methods to measure the intuitive exploration of the properties.

KEYWORDS

architettura sperimentale, ricerca sui materiali, eliminazione degli sprechi, isolamento, leggerezza

experimental architecture, material research, waste elimination, insulation, lightweight

Alexa Kreissl, Artist and PhD Candidate, is a Researcher at the Institute of Architecture Related Art, Department of Architecture of the Technical University Braunschweig (Germany). Research Associate at the Leibniz Science Campus – Postdigital Participation – Braunschweig' (LSC PDP). Refuse resources, art, architecture, design and aesthetic transformation are the starting point for the interdisciplinary and experimental work. E-mail: a.kreissl@tu-braunschweig.de

Gli effetti indesiderati della produzione industriale quali l'inquinamento, il cambiamento climatico e la limitatezza di risorse non rinnovabili hanno portato il mondo occidentale a un ripensamento e a un cambiamento della produzione e dell'attitudine al consumo, modificando le catene di valore dal modello lineare a quello circolare e modificando il concetto di rifiuto. E se un prodotto potesse essere progettato già per un suo secondo utilizzo al termine del primo ciclo vita? Ogni giorno ingenti quantità di materiali e risorse di alto valore vengono conferite in discarica a causa del fatto che i costi di trasporto e di riciclo sono maggiori di quelli per il loro smaltimento e per produrne di nuovi. Molti di questi materiali potrebbero essere riutilizzati evitando l'acquisto di nuovi e ottimizzando le risorse già disponibili. Secondo Thomas Rau (Wainwright, 2020) 'un rifiuto è un materiale senza identità', al quale non si attribuisce alcun ulteriore uso e che ricava dal riciclo qualità intrinseche; solo se comprendiamo il suo valore e il suo potenziale, otteniamo nuove risorse. Modificare i materiali da recuperare ed esplorarne le potenziali applicazioni per il loro riutilizzo è operazione cruciale al fine di raggiungere una consapevolezza sociale e una comune accettazione dell'idea di rifiuto come risorsa.

Il concetto di economia circolare implica la conoscenza dell'intero ciclo vita del prodotto, dall'estrazione del materiale al fine vita, e promuove l'idea del riciclo del rifiuto e delle risorse, concorrendo a ridurre la produzione globale e il consumo di materie prime, obiettivo questo raggiungibile anche producendo beni più durevoli ed efficienti (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Fig. 1). La combinazione di questi due approcci comporterebbe come risultato una città 'ricostituente' e 'rigenerante' nella quale i materiali sono impiegati in cicli infiniti, tramite un riutilizzo o riciclo di beni/materiali di alta qualità; eppure, «[...] the construction of cities for deconstruction in the form of a material depot has hardly begun» (Heisel, 2020, p. 158). L'urban mining, vale a dire l'estrazione di risorse in ambito urbano, può ridurre la dipendenza da risorse naturali non rinnovabili, l'aumento dei prezzi delle materie prime e le importazioni, cambiando significativamente la logica commerciale: i rifiuti non saranno più il prodotto finale del metabolismo economico ma parte di nuovi cicli economici e catene di valore estese poiché alla fine del loro uso i prodotti diverranno nuovamente materiali grezzi (Umwelt Bundesamt, 2017). Quando si pensa all'urban mining ci si concentra spesso sui rifiuti domestici, sugli apparecchi elettronici e su tutta quella materia non visibile presente nelle nostre abitazioni mentre il materasso, in quanto oggetto personale e intimo, è raramente oggetto di attenzione (Fig. 2).

In Germania ogni anno vengono portati a rifiuto circa 6 milioni di materassi usati con un peso totale di quasi 100.000 tonnellate, la maggior parte dei quali è in schiuma (circa il 60%). Secondo la European Bedding Industry Association (European Commission, n.d.), dei 30 milioni di materassi che raggiungono il fine vita ogni anno, l'81% finisce nel recupero energetico, il 17% in discarica e il 2% viene incenerito senza recupero di energia. I materassi sono pro-

dotti da materiali la cui esatta composizione è perlopiù sconosciuta ai raccoglitori di rifiuti, ragione per cui possono difficilmente essere riciclati e vengono inceneriti. Gli Europei sostituiscono il proprio materasso dopo circa 10 anni: ammassati l'uno sull'altro i materassi smaltiti possono raggiungere ogni anno un'altezza di circa 6.000 km, arrivando all'orbita geostazionaria dopo soli 6 anni. Secondo la Fraunhofer ICT (2019) delle circa 450.000 tonnellate di materassi usati all'anno, il 40% viene incenerito e il 60% conferito a discarica. La mancanza di informazioni sulla composizione materica e il fatto che siano classificati come rifiuti ingombranti è una delle possibili cause dell'assenza di dati ufficiali sulla dismissione e il fine vita dei materassi. Se i materassi vengono dismessi dopo 10 anni, quelli che oggi vengono conferiti a discarica sono stati prodotti dieci anni fa: tale considerazione ci impone di riflettere su quanto sia necessario immaginare da subito come i nuovi prodotti, attraverso specifici sistemi di raccolta e di riciclaggio, possano in futuro essere mantenuti all'interno di un processo circolare (riflessione proveniente da una conversazione dell'autrice con la dirigenza della Fachverband Matratzen-Industrie).

La norma EN ISO 472:2013_2.126 definisce la plastica cellulare e quella espansa come materiali plastici la cui densità è ridotta dalla presenza di numerose piccole cavità (celle), interconnesse o meno, distribuite all'interno della massa; un materiale plastico cellulare (plastica espansa) è spesso chiamato anche semplicemente schiuma. Ci sono numerosi esempi di schiume naturali: il pane, il lievito, la birra e le ossa; tra le schiume artificiali, le più note sono quelle metalliche (ad esempio l'alluminio), quelle ceramiche e polimeriche. Oggigiorno le schiume possono essere ottenute da quasi ogni tipo di plastica, usando comuni metodi di lavorazione quali l'estrusione oppure lo stampaggio a iniezione (Meyer, 2008). Il principale mercato delle schiume 'elastiche' poliuretaneche è quello degli arredi: oltre che in materassi, arredi imbottiti e sedili di auto, le suddette schiume sono impiegate in pannelli per l'isolamento acustico, spugne da cucina, imballaggi e in molte altre applicazioni. Il poliuretano (PUR) ha molte proprietà che sono particolarmente importanti per designer e ingegneri: alta elasticità e buona flessibilità d'impiego, proprietà fisiche eccellenti, alta resistenza a compressione, leggerezza, buon assorbimento acustico, ottimo isolamento termico, variabilità di spessore senza che si generi l'effetto 'sink mark' (risucchio) e buona resistenza chimica (EUROPUR, 2015).

Il materasso è rappresentativo di molti altri prodotti che smaltiamo nelle nostre abitazioni dopo l'utilizzo e il cui destino è stato a lungo oggetto di scarso interesse. Esso riflette la varietà e molteplicità dei materiali contemporanei impiegati negli oggetti quale risultato di una ricerca sempre più spinta verso l'ottimizzazione dei prodotti e l'innovazione dei materiali, fattori che attraggono i consumatori anche perché fiduciosi nelle rassicurazioni degli esperti sull'inesistenza di sostanze dannose per la salute (Fig. 3). Al di là della sua materialità, il materasso può essere visto come una metafora del-

l'habitat umano e dell'aspirazione al comfort, all'innovazione, al perfezionamento della tecnologia dei materiali, alla comodità e al ristoro: rappresenta l'interfaccia tra spazio vissuto e corporalità, esprimendo un concetto multilivello di privacy (Nierhaus and Heinz, 2016; Fig. 4).

In questo contesto, il presente articolo esplora il potenziale della riconversione dei materassi come isolante termico e acustico per le costruzioni civili mirando a sostituire la produzione di prodotti isolanti equivalenti basati su combustibili fossili, ad oggi scarsamente riciclabili. Tuttavia, il caso studio sulla seconda vita dei materassi trattato in questa sede può anche stimolare riflessioni e azioni di ricerca per valutare il potenziale di una più ampia gamma di materiali e prodotti di poter essere riutilizzati in circolarità virtuose. Negli ultimi anni, la ricerca sul riuso creativo dei materiali in architettura, arte e design ha compiuto importanti passi in avanti per superare il modello lineare 'make, use, waste' ('produrre, usare, buttare') a vantaggio di modelli circolari, avvalendosi dell'urban mining per ricavare nuove materie prime dai prodotti di consumo 'di città' (cfr. Rotor DC, Brussels; Superuse, Rotterdam; Folke Köbberling, Berlin; ETH, Zürich; KIT, Karlsruhe).

L'originalità del presente contributo risiede nella proposta di soluzioni che prevedano l'impiego dei materassi dismessi per l'isolamento termo-acustico in edilizia attraverso la valutazione delle proprietà che caratterizzano questi oggetti e li rendono potenzialmente adatti a tale nuova funzione. L'articolo sarà strutturato come segue: dopo aver fornito un quadro generale degli esperimenti condotti attraverso azioni di ricerca partecipata ed empirica su materassi interi e sulle schiume che li conformano, vengono presentati i risultati di un'indagine sperimentale in camera climatica sulla conducibilità termica dei materassi al fine di ottenere parametri quantitativi per il loro utilizzo come isolanti; infine, si delineano ulteriori ipotesi di applicazione, criticità e prospettive per una loro seconda vita.

Risorsa Materasso | Secondo Folke Köbberling (n.d.), dell'Institute of Architecture Related Art (IAK) del Politecnico di Braunschweig in Germania, non è necessario comprare il materiale con cui si lavora ma si possono ottenere molte risorse da quelli che generalmente sono considerati rifiuti, materiali di nessuna utilità per gli altri. All'Istituto sperimentano, in un'ottica di riutilizzo e riciclo, usi creativi di materiali presenti nell'ambiente in cui vivono i ricercatori, ampliando costantemente il campo delle conoscenze necessarie per lavorare con materiali diversi: a ispirare il riuso e la progettazione sono le potenzialità del materiale e la sua immediata e grande disponibilità che divengono parte del loro processo di indagine.

Nel workshop Risorsa Materasso tenutosi presso l'IAK, giovani ricercatori hanno investigato il potenziale e le qualità costruttive di alcuni materassi con un approccio interdisciplinare, valutandone le potenzialità come isolante termico da utilizzare in una micro-casa. L'approccio creativo permette di cogliere il quadro generale invocando il senso comune, dall'ap-

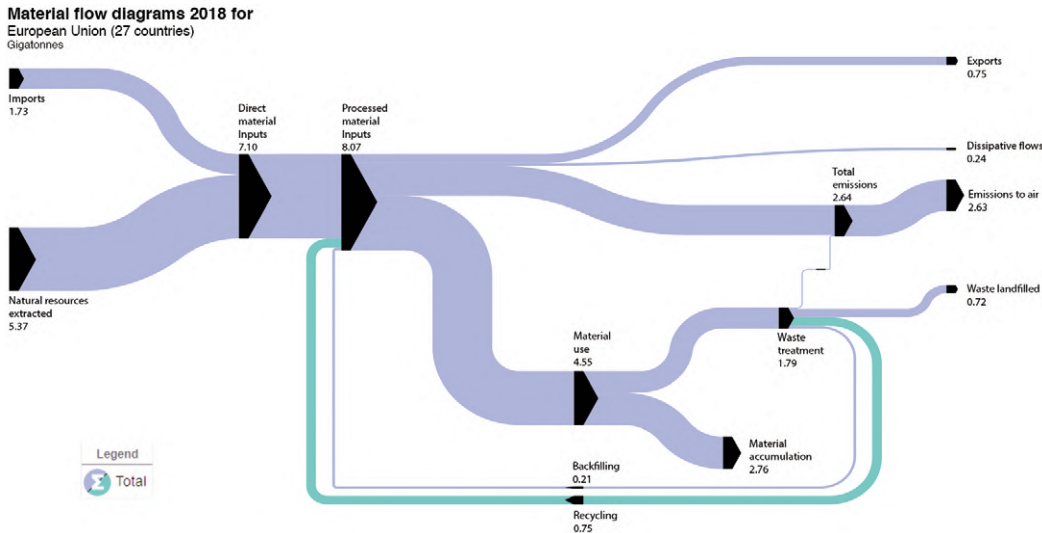


Fig. 1 | Material flows true scale in Gt/year (billion tonnes per year) in 2018, EU27: 67% (5.37 Gt) of raw materials processed in the EU-27 (8.07 Gt) originate from domestic extraction, 21% from imports (1.73 Gt) and 12 % from recycling and backfilling (0.96 Gt); 56% of raw materials processed were used to make products (4.55 Gt); the rest were mainly exported or used for producing energy (credit: ec.europa.eu; source: Eurostat, online data codes: env_wasssd; env_ac_sd; env_ac_mfa).

prezzamento estetico fino alla creazione di valore, che sembra essere assente nell'attuale produzione di beni, pertanto non traslascia dall'indagine l'industria delle costruzioni e quella dei rifiuti, l'architettura contemporanea, la sperimentazione architettonica, le prove e le misurazioni scientifiche. Dopo un'introduzione sui temi della ridotta disponibilità di risorse non rinnovabili, dell'urban mining e dell'economia circolare ai partecipanti è stato chiesto di procurarsi un materasso, usato, a costo e chilometro zero, e di fare una ricerca sull'uso delle schiume 'elastiche'. L'analisi della viabilità e l'individuazione delle vie di trasporto più brevi erano parte della strategia sostenibile, poiché anche il trasporto incide sull'energia grigia del ciclo vita. Nell'ambito di una discussione collegiale sono state individuate varie azioni sperimentali per investigare in maniera olistica le caratteristiche e le prestazioni dei materassi rispetto a isolamento, assorbimento e smorzamento acustico, e non solo. Le differenti sperimentazioni hanno riguardato:

- 1) Rigidezza/Stabilità – nel primo studio i materassi hanno assunto la funzione di elementi strutturali (muri e solai) per costruire delle stanze; lavorare con questi blocchi, ingombranti e instabili, è stato possibile solo con la collaborazione di più partecipanti, anche a causa della diversità di dimensioni, densità, peso e proprietà dei materassi a disposizione; è stata verificata la stabilità dei materassi in una configurazione tipica delle costruzioni trilitiche; materassi della stessa altezza venivano posizionati in verticale e quelli matrimoniali venivano disposti in orizzontale (simulando i solai) con sovrapposizioni su tre livelli (tre piani);
- 2) Densità e Superficie – tutti i materassi sono stati posizionati sul pavimento in un ambiente indoor, l'uno vicino all'altro in modo da misurarne la superficie e valutare le diverse densità delle schiume camminandovi sopra;
- 3) Sovrapposibilità e Isolamento Acustico – tutti i materassi di dimensioni simili sono stati accatastati l'uno sull'altro in modo da formare una

torre, quindi uniti con nastro adesivo e testati come diaframmi per migliorare l'acustica dell'ambiente (Fig. 5);

- 4) Deformazione – collocati in verticale e l'uno accanto all'altro, i materassi sono stati lasciati cadere (come le tessere di un domino) per studiarne la velocità di caduta e la deformazione;
- 5) Isolamento Acustico – è stata costruita una camera anecoica attorno a una radio in funzione, posizionando i materassi fino a che il suono emesso non fosse più percepibile;
- 6) Deformazione ed Elasticità – i materassi sono stati lanciati uno dopo l'altro da una balaustra alta 10 metri così da valutarne il grado di deformazione ed elasticità attraverso una registrazione video in slow-motion.

Nel corso del workshop sono state svolte indagini metodiche sui materassi disponibili, analizzandone la stratigrafia, i formati e le superfici dopo aver rimosso i rivestimenti (Tab. 1). La densità delle diverse schiume è stata misurata, pesata e calcolata; i differenti team hanno condotto diversi test sugli utensili da taglio più adatti, sull'assorbimento di liquidi e sul trattamento della superficie mappando i materiali. Con la rimozione dei rivestimenti è emersa un'inimmaginabile varietà di forme, colori, trame e schiume (Fig. 6); la maggior parte dei materassi era realizzata con schiume a freddo e presentava strati, colori e densità diversi, mentre altri si caratterizzavano per trame superficiali a zigzag o a griglia quadrata. Lo smontaggio dei materassi a molle, specialmente di quelli con molle metalliche, ha richiesto molto tempo per l'inadeguatezza degli utensili a disposizione del team (Fig. 7).

In gruppi differenti, i giovani ricercatori hanno esplorato anche altri possibili usi, valutando ad esempio le capacità di assorbimento e la densità delle varie lastre come oleoassorbenti in caso di disastri ambientali e come spugne per sistemi idroponici. Si è pure indagato come cambiano le proprietà elastiche dei materassi in combinazione con l'argilla e se sia possibile progettare una casa con la combinazione

dei due materiali: i risultati hanno mostrato che le caratteristiche isolanti e fonoassorbenti dei materassi non vengono alterate quando l'argilla viene applicata come finitura sulla schiuma migliorandone l'estetica e nobilitandola (Fig. 8).

Allo scopo di gestire al meglio la variabilità dimensionale delle lastre e semplificare il sistema costruttivo, si è sviluppato un sistema modulare a telaio, a partire dalla dimensione standard di un materasso (90x190 cm), nel quale vengono inserite lastre eterogenee per spessore e trama superficiale. Il telaio, in compensato riciclato, può essere facilmente assemblato con giunti e viti e posato in opera come parte di un muro, con diverse configurazioni; il telaio è progettato per essere smontato con facilità e attrezzato con pannelli di rivestimento sia sul lato interno sia su quello esterno assicurando la tenuta all'acqua dell'unità abitativa, il tutto coerentemente con quanto avviene nelle costruzioni 'riciclabili', i cui componenti sono prevalentemente mono-materiali e sono collegati tra loro per consentirne l'agevole smontaggio (Fig. 9).

Studio sperimentale sulla conducibilità termica dei materassi e risultati

Nove diversi materassi sono stati impiegati per il test di conducibilità termica all'interno della camera climatica dell'Institute for Building Climatology and Energy of Architecture presso il Politecnico di Braunschweig; laddove le superfici e le altezze non risultavano adatte al test i materassi sono stati tagliati in quadrati di 50 x 50 cm, per cui le diverse altezze e superfici non sono state uniformate. Durante il test, della durata di un'ora in stato stazionario, 5 sensori hanno misurato la temperatura superficiale e interna dei campioni per calcolare la conducibilità termica della schiuma, mentre altri 2 hanno rilevato le temperature della stanza, riscaldata a 20 °C, con una temperatura esterna di -10 °C. Le conducibilità rilevate sono state riportate nella Figura 10.

Contro ogni aspettativa si è registrata una distribuzione della temperatura piuttosto omogenea su tutti i provini (ad eccezione di quelli in fibra di cocco). Per via della composizione disomogenea dei materassi la conducibilità termica è stata calcolata come la media di tutto il campione di prova. Tutti i campioni confermano il valore atteso: i materassi in schiuma isolano più degli isolanti naturali, forniscono prestazioni simili a quelle delle lane minerali di qualità più bassa e leggermente inferiori a quelle dell'EPS (Polistirene Espanso Sinterizzato), con una conducibilità termica media rilevata pari a 0,040-0,045 W/mK (Tab. 2). Per ottimizzare l'esperimento e rilevare le temperature con maggiore precisione, le misurazioni dovrebbero sempre essere effettuate su materassi con superficie liscia o coperti con un materiale la cui conducibilità termica sia nota e possa essere detratta successivamente; peraltro, diversamente dalle schiume isolanti rigide quelle 'elastiche' vanno protette, sia perché perdono le proprietà isolanti quando assorbono acqua sia a causa dell'infiammabilità del poliuretano, motivo per il quale ulteriori ricerche potrebbero verificare la possibilità di applicare sulle superfici dei materassi rivestimenti ignifughi non nocivi. In una futura sperimentazione, si potrebbero analizzare anche i materassi sottoposti a tritramento.

Discussione | Sebbene le schiume ‘elastiche’ in poliuretano siano multifunzionali, abbiano eccellenti proprietà fisiche e un’alta resistenza meccanica, siano leggere e offrano un buon assorbimento acustico e un’eccellente isolamento termico, oggi non ci sono applicazioni che ne prevedano il riutilizzo su larga scala. Il riciclo con processo chimico è attualmente molto energivoro e potrà diventare un’opzione quando in futuro sarà possibile la neutralità energetica del processo. La BASF (2020) descrive le problematiche legate al classico riciclo meccanico come segue: l’unica ragione per cui le schiume di poliuretano oggi vengono riciclate è che il riciclo comporta costi minori dell’incenerimento; tuttavia non genera prodotti competitivi per via del basso prezzo delle schiume di poliuretano vergini.

I materassi sono prodotti a più componenti la cui onerosa separazione rende lo smaltimento con compattazione una delle principali opzioni di fine vita. Al termine del primo ciclo vita, questi prodotti risultano contaminati biologicamente (pelle, sudore, fluidi corporei, ecc.), il che li rende poco appetibili sul piano igienico e non adatti a essere fusi o estrusi anche perché potrebbero contenere residui chimici nocivi (BASF, 2020). Ai consumatori non piace l’idea di dormire su materassi di seconda mano: durante la notte, un utente sano suda circa mezzo litro di liquidi, alcali, sali e tossine, precisamente tra i 90 e i 180 litri all’anno; con una vita media di un materasso tra gli 8 e i 10 anni, ciò corrisponde a più di 1.200 litri di fluido che un materasso assorbe e rilascia. Durante la notte, il corpo umano fa aumentare la temperatura del materasso e il calore accumulato difficilmente viene disperso se la mattina il letto viene rassettato e coperto; l’assenza di ventilazione durante la giornata aiuta poi la proliferazione, all’interno del materasso, di batteri, muffe o funghi che alimentano gli acari della polvere. Queste criticità possono essere l’oggetto di future ricerche finalizzate a trovare soluzioni per sanificare e disinfettare le schiume ‘elastiche’, valutandone l’efficacia non solo direttamente sulle lastre ma anche sui materassi triturati.

Le citate criticità evidenziano la necessità di attivare linee di ricerca parallele al riciclo e riutilizzo dei materassi, immaginando usi alternativi e creativi che valorizzino le proprietà ad esempio nel settore dell’edilizia; riciclo e riutilizzo delle schiume chimiche potrebbero essere invece obiettivi a lungo termine legati all’impiego di energie rinnovabili o di materiali compostabili. È possibile quindi modificare il nostro pensiero e la nostra percezione per immaginare i materassi come isolanti delle nostre case o con nuove funzioni? Una ricerca d’ispirazione creativa può promuovere questo cambiamento e individuare nuovi usi. Sebbene gli studi illustrati rappresentino solo alcune delle possibili opzioni di riutilizzo dei materassi e abbiano bisogno di essere ulteriormente consolidati, il Gruppo di Lavoro ha ipotizzato diverse rifunionalizzazioni che, tramite un approccio creativo, valorizzano le proprietà del prodotto (isolamento, elasticità, resistenza a compressione), sia nella sua interezza sia dopo la sua triturazione, così come dei singoli strati: pannelli di isolamento termo-acustico per le costruzioni civili, spugne per sistemi idro-

ponici e supporto per muschio stabilizzato in facciate a ‘verde verticale’ (Fig. 11), cuscini oleoassorbenti da impiegare in caso di disastri ambientali, sistemi di protezione per i senzatetto, arredo urbano, etc.

Sintesi e Conclusioni | La crescente quantità di materassi smaltiti in Europa (e in altri continenti) e le diverse possibilità di riutilizzo delle schiume ‘elastiche’ rappresentano uno stimolo per attivare linee di ricerca su una seconda vita dei vecchi materassi. Il lockdown imposto dall’attuale pandemia è una delle cause che ha prodotto un aumento dei rifiuti domestici, e in particolare dei materassi usati abbandonati illegalmente nelle strade (Fastabend, 2021). Al di là della contaminazione batterica legata all’uso, il mantenimento delle proprietà dei materassi oltre la loro dismissione consente di individuare diversi campi d’utilizzo. Rispetto ai Paesi Bassi (Retourmatras), Stati Uniti (Mattress Recycling Council), Francia (Ecoval) e Gran Bretagna (Matt UK) che li raccolgono e li sottopongono a riciclo meccanico, in Germania si preferisce la compattazione dei materassi (sottoponendoli quindi a processi di downcycling che depauperano molte proprietà delle schiume) poiché lo smaltimento gratuito dei materassi rende difficile finanziarne la separazione degli strati e le successive lavorazioni per un upcycling.

Il riciclo meccanico non può costituire una soluzione sostenibile a lungo termine. Finora i materassi sono stati prodotti con la prospettiva di una sola vita e il mondo dell’industria non ha compiuto alcuno sforzo sinergico perché il loro progetto ne preveda un riutilizzo in una seconda vita. Riconoscere che la singola lastra può essere un potenziale materiale primario dopo la dismissione del materasso, valutati opportunamente gli aspetti economici e finanziari del pro-

dotto, consente di individuare un’ampia gamma di applicazioni successive (Fig. 12). Come in molte altre aree, l’uso sostenibile delle materie prime deve costituire una priorità per preservare le risorse non rinnovabili e mirare alla neutralità della CO₂.

Un primo passo verso l’obiettivo può essere l’accessibilità ai dati dei flussi materiali dei beni di largo consumo, quali sono i materassi, così come avviene per i passaporti dei materiali da costruzione che riportano l’impatto ambientale d’insieme e dei singoli componenti. Il riutilizzo creativo trova terreno fertile prevalentemente nei Paesi poco sviluppati, nei quali la difficile situazione economica e il delicato contesto sociale stimolano la ricerca di soluzioni per una seconda vita dei materiali; è il caso di un progetto di ricerca sviluppato dall’Università di Sheffield per il campo rifugiati di Zaatari in Giordania nel quale i materassi locali sono stati utilizzati per fare crescere le piante in sistemi idroponici e gli abitanti di tutte le età sono stati istruiti per continuare la coltivazione in autonomia. I Paesi industrializzati tendono invece a dormire sereni sui rifiuti di domani, sperando che spariscano nel nulla, che in futuro continueranno ad avere un tetto sopra la testa e potranno permettersi un nuovo materasso ogni 10 anni, mentre invece, ispirandoci all’esempio del campo profughi in Giordania, si potrebbero testare in laboratorio le schiume europee così da verificare se e quanto siano adatte alla coltivazione idroponica per caratterizzare lo skyline delle nostre città nelle quali i materassi di oggi potranno diventare le foreste verticali di domani.

The unintended consequences of industrial production such as pollution, climate change and re-



Fig. 2 | Mattress in the street, Berlin, 2020 (credit: A. Kreissl, 2020).

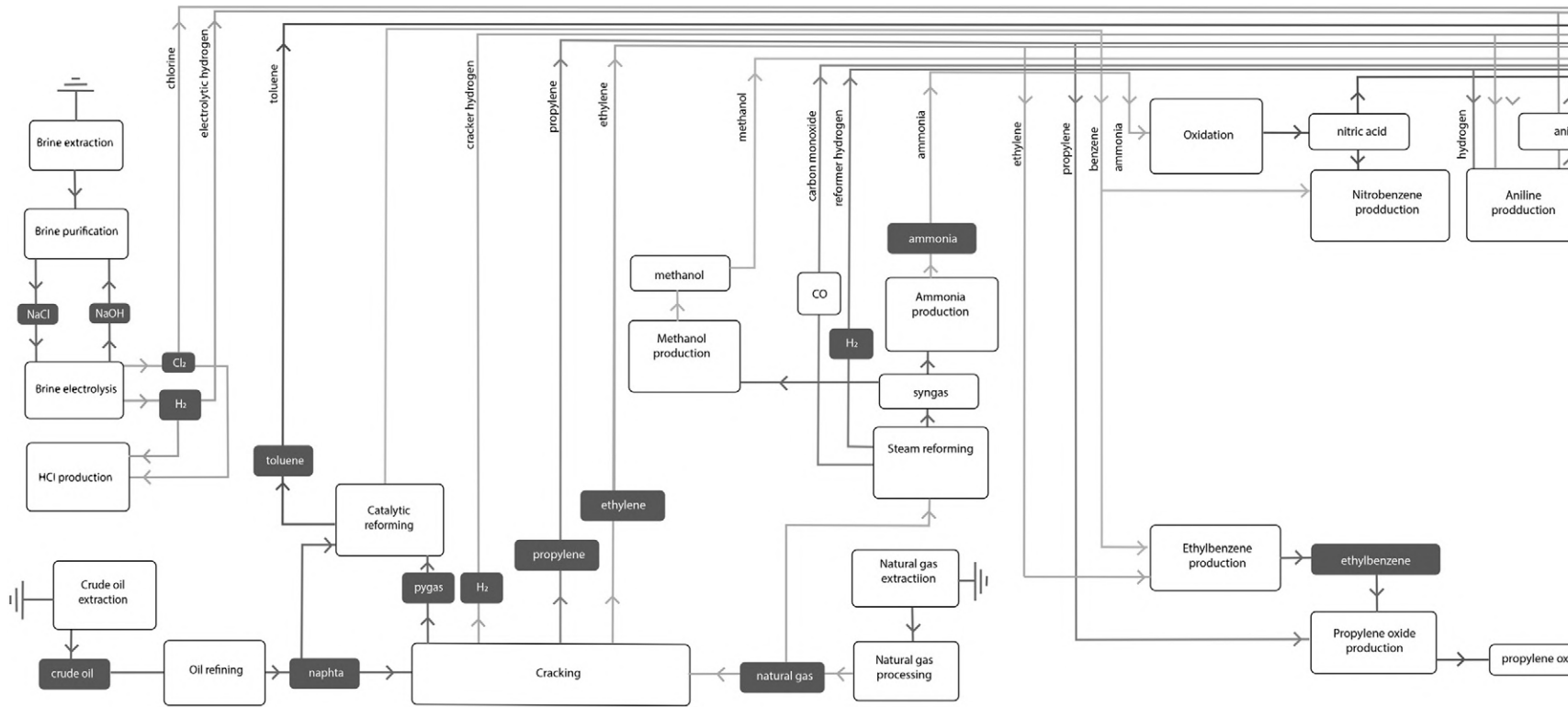


Fig. 3 | Cradle-to-gate system boundaries Flexible PU Foam (source: Eurostat, 2020).

source scarcity have triggered a radical rethink and change in western production and consumption behaviour, which transform linear value chains into circular models and eliminate the idea of waste. What if product design could take secondary use into account from the very beginning? Every day valuable resources are disposed of in large quantities as transport and processing costs exceed the material and disposal costs. Many of these materials could be used elsewhere, avoiding the need to purchase new materials and therefore saving resources. According to Thomas Rau (Wainwright, 2020) 'waste is material without identity', to which we attribute no further use and withdraw its inherent qualities from recycling; if we understand its value and potential, we gain resources. Aesthetic transformation and the exploration of new fields of use and practical applications of recovered material are crucial for raising awareness, acceptance and the necessary social restructuring to understand waste as a resource.

The concept of the circular economy calls for consideration of the entire life cycle of the product, from material extraction to the 'end-of-life', and promotes the idea of the waste and resource cycle. More durable and efficient goods reduce global production and consumption of raw materials (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Fig. 1); «The result would be a city that is restorative and regenerative by design, where materials circulate in endless cycles from one use phase and application to the next through reuse or high-quality recycling. Yet the construction of cities for deconstruction in the form of a material depot has hardly begun» (Heisel, 2020, p. 158). Urban mining, i.e. the extraction of secondary resources in urban areas, will reduce dependence on reserves in primary deposits, on rising commodity prices and imports and will significantly

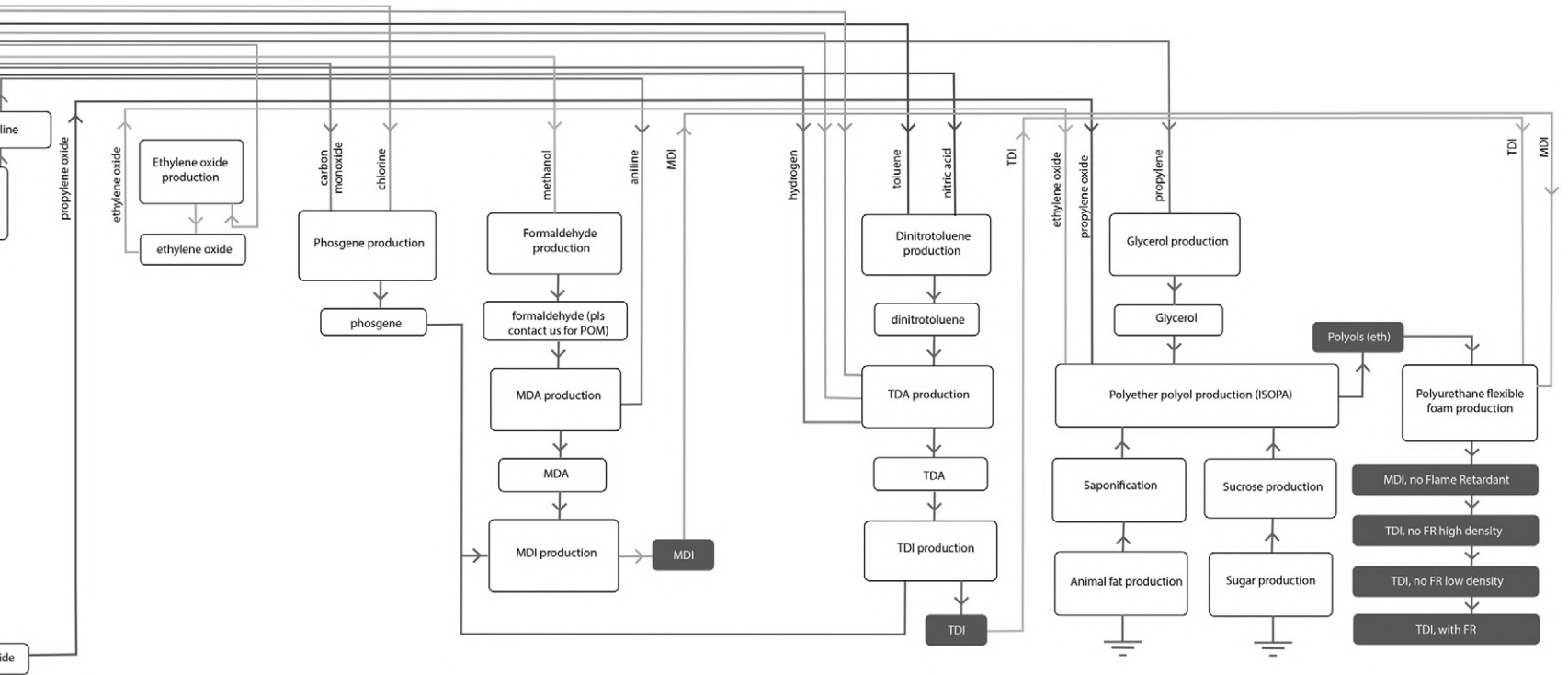
change business logic. Waste will no longer be the end product of economic metabolism, but part of new economic cycles and extended value chains. At the end of their use, products will be suppliers of raw materials (Umwelt Bundesamt, 2017). When thinking of urban mining, we often focus on domestic waste, electronic devices and all the material hidden in our built environment. The mattress as a personal and intimate object connecting our body to the interior as the space we are living in, is rarely in focus (Fig. 2).

In Germany around 6 million used mattresses with a total weight of almost 100,000 tonnes are being discarded every year, the majority are foam mattresses (approx. 60%). According to the European Bedding Industry Association (European Commission, n.d.), up to 30 million mattresses annually reach their end of life and it is estimated that 81% end up in energy recovery, 17% in landfill and 2% are incinerated without energy recovery. Mattresses are multi-component products whose exact composition is often unknown to the waste collector, so they can hardly be recycled and continue to be incinerated. Europeans replace their mattress after about 10 years. Piled on top of each other, this would produce a height of about 6,000 km per year, after 6 years the geostationary orbit would be reached. Of the approximately 450,000 tonnes of used mattresses per year, 40% are currently incinerated and 60% landfilled (Fraunhofer ICT, 2019). The present figures and the diverging information on disposal and handling make it obvious that no consistent information and verified quantities are available: as mattresses are considered bulky waste, they are not considered as a separate waste fraction and no data is collected. Mattresses disposed of today are usually 10 years and older. To evaluate which types are discarded today, one needs to backtrack accord-

ingly. For the mattresses currently designed for future recycling, the collection and recycling systems must be adapted within the next decade to hold these foams in the cycle (based on a conversation with the Fachverband Matratzen-Industrie).

EN ISO 472:2013_2.126 gives the following definition for cellular plastic, expanded plastic, and foamed plastic: «plastic the density of which is reduced by the presence of numerous small cavities (cells), interconnecting or not, dispersed throughout the mass». A cellular plastic (foamed plastic) is often simply called a foam. There are already numerous examples of naturally foamed materials, such as bread, cake, beer and bones. In technology, the best-known representatives of foams are metallic foams (e.g. aluminium), ceramic foams and polymer foams. Today, foams can be made from almost any plastics, using all common processing methods, such as extrusion or injection moulding (Meyer, 2008). The main market for flexible polyurethane foam is the bedding and furniture sector. Slabstock foam is used to manufacture mattresses, upholstered furniture, car seats, acoustic insulation boards, household sponges, packaging and many other applications. Polyurethane (PUR) has a variety of favourable material properties, which are particularly important for designers and engineers: extensive design and construction flexibility, excellent physical properties, high mechanical strength, low weight, good sound absorption, excellent thermal insulation, wall thickness differences without the disadvantage of sink marks. The material polyurethane is characterised by good chemical resistance (EUROPUR, 2015).

The mattress is representative of many other artefacts that we banish from the house after their use and whose further whereabouts have



long been disregarded. It reflects today's possible and ubiquitous diversity of materials as a result of our striving for optimisation and innovation. The search for the perfect mattress makes consumers aware of today's material science and chemical production methods. He relies on the expert to follow the complexity of advantages and disadvantages and has to trust that the mostly unfamiliar ingredients do not emit harmful substances (Fig. 3). Besides its pure materiality, the mattress can be understood as a metaphor of the human habitat and the aspiration for comfort, innovation, highest material technology, ergonomics and recovery. It represents the interface of living space and corporeality and reveals the ambivalences of the multi-layered concept of privacy (Nierhaus and Heinz, 2016; Fig. 4).

This paper explores the potential of repurposing mattresses as thermal and acoustic insulation for construction projects. This will reduce new production of fossil fuel-based insulation, which currently is barely recyclable. This specific case study on the second life of mattresses serves as a method to identify and demonstrate the flow and potential of a much larger scope of materials. In recent years, research on the creative reuse of materials in architecture, art and design has advanced and different concepts are emerging to promote repurpose, to overcome the linear pattern of 'make, use, waste', to close material cycles and to establish urban mining as an integral management of the anthropogenic stockpile for secondary raw material extraction (see Rotor DC, Brussels; Superuse, Rotterdam; Folke Köbberling, Berlin; ETH, Zürich; KIT, Karlsruhe).

Our main contribution in this regard is the practical evaluation and construction of applications for the reuse of random mattress foams in

the context of architecture. In this context, practical applications are presented and the required properties of the mattresses are characterised. The remainder of this paper is structured as follows. First, an overview is given of the experiments conducted in the participatory and empirical research on mattresses as a whole and on the foams they contain. Then, the results of an experimental investigation of the thermal conductivity of mattress foams in a climate chamber are presented in order to further specify their use as insulation materials. Finally, further areas of application, limitations and perspectives for a second life of mattresses are mentioned before the article is concluded.

Resource Mattress | Folke Köbberling (n.d.), from the Institute of Architecture Related Art (IAK) of the Technical University Braunschweig in Germany, says: «We explore the artistic and constructional qualities of a variety of materials. It is our firm conviction that it is not necessary to buy material to work with, but that there are significant resources to be gained from what is generally considered to be trash and of no use to others. Most working materials we obtain from our immediate surrounding. Through our daily artistic practice as well as in more extensive collaborative works, we develop the manual skills needed to work with many different materials, learning how to reuse and recycle. The possibilities lying within the material inspire the design and the acquisition of the work material become part of the exploration process».

In the workshop Resource Mattress at the IAK, young researchers investigated the potential and constructive qualities of different mattress foams focussing on their thermal insulation qualities for a micro house. The method is an interdisciplinary loop. The creative approach en-

ables to grasp the bigger picture by invoking common sense, from aesthetic appreciation through to value creation, which seems to be absent in current commodity production. These include construction and waste industry and contemporary architecture, intertwined with architectural experimentation and scientific measurements and testing. After an introduction to the resource scarcity issue, urban mining and the goals of the circular economy, the participants were given the challenge of sourcing a local used mattress free of charge and researching the use of flexible foams in general. Local mapping and the shortest transport route were part of the sustainable strategy to keep transport as part of the included grey energy in the life cycle consideration. In a joint think tank, we defined various experimental set-ups to holistically investigate the insulating, absorbing and dampening properties of the different foams through group observation and different approaches by the participants:

- 1) Rigidity/Stability – in the first study, the mat-



Fig. 4 | Berlin, 2014 (credit: A. Kreissl).

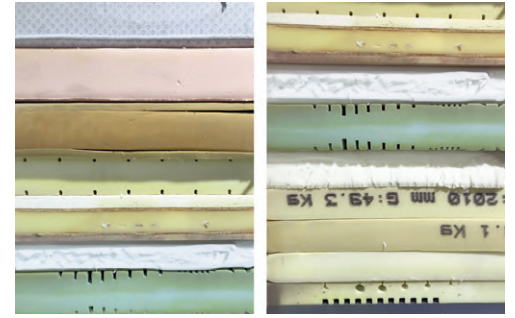


Fig. 5 | House of Cards / Mattress Tower / Room Divider (credit: IAK, A. Kreissl, 2020).

Fig. 6 | Different shapes, colours, textures of mattress foams (credit: IAK, A. Kreissl, 2020).

Samples	Material	Dimensions			Volume [m³]	Weight [kg]	Density [kg/m³]	Core	Foam h [cm]	Foam Surface	Color	Absorption	
		w [cm]	l [cm]	h [cm]								Water [%]	Oil (0,918 kg/cm³) [%]
1	foam-latex-metal	100	190	15	0.285	18	63.16	innerspring	14.5	perforated smooth	creme light pink	Latex: 833	210
2	foam-felt-metal	90	190	18	0.308	13.3	42.9	innerspring		smooth	creme	2266 / 1700	410 / 130
3	foam-cocos	70	140	13	0.127	n.a.		layered	9	padded	beige, mint brown		
4	cold foam	140	200	20	0.56	14	7.84	foam	14	smooth	light pink		
5	cold foam	90	200	12	0.216	5.3	24.53	foam	12	differently waved	white		
6	cold foam	90	200	12	0.216	5.3	24.53	foam		smooth	white		
7	cold foam	80	200	13	0.208	n.a.	n.a.	foam		smooth	white		
8	cold foam	140	210	15	0.441	12	27.21	foam	14	smooth	white		
9	cold foam	90	200	14	0.252	10	40	foam	12	indented square grid	white		
10	cold foam	140	200	14	0.392	10	25.51	foam		differently waved	white	2000	130
11	cold foam	140	200	16	0.448	14.6	32.6	foam	14	differently waved	white		
12	cold foam	140	200	18	0.5	17.3	34.33	foam	15	differently waved	blue		
13	cold foam	90	200	18.5	0.33	11.9	35	2 foams	17	differently waved	grey white	2666	160

Tab. 1 | Mattress Data (credit: IAK, A. Kreissl, 2020).

tresses served as building blocks to construct rooms with walls and ceilings; it was only possible to work constructively with the foam blocks which were bulky and wobbly by joining forces; this was also because their dimensions, densities, weights and properties were all different; 2) Format and Similarities – the next experiment used the stability of triangular constructions; mattresses of the same height were placed lengthwise and double mattresses formed the floors of a 3-storey house of cards; 3) Density and Surface Area – all mattresses were laid out on the ground in an enclosed surface next to each other in order to record the surface area and to investigate the different degrees of density by walking over them; 4) Stackability and Acoustic Isolation – all mat-

tresses were piled up according to size to form a tower, then fixed with straps and tested as room dividers for improved room acoustics in the hall (Fig. 5); 5) Deformation – lined up in a row, we let the mattresses fall over like dominoes in order to show the speed of the fall; 6) Acoustic Insulation – we built an anechoic room around a running radio, the sound of which faded away; 7) Deformation and Elasticity – at the end, we threw the mattresses one after the other from a 10-metre-high balustrade and were able to see the degree of deformation and elasticity of the mattresses on the basis of a slow-motion film recording. In the course of the workshop, we then carried out methodical investigations into the differ-

ent foams, material layers, formats and shapes that emerged after the covers were removed (Tab. 1). We measured, weighed and calculated the density. Various series of tests were conducted on suitable cutting tools, absorption behaviour and liquid absorption, surface treatment and material mapping in teams. With the removal of the covers, different shapes, colours, textures and foams emerged, whose properties merited aesthetic investigation (Fig. 6). Among the mattresses examined, the majority consisted of cold foam in different densities and colours, partly in a material composite with various surface structures of wave-zigzag and square grids. Dismantling the spring mattresses, especially the metallic springs, turned out to be very time-consuming and difficult with hand tools (Fig. 7).

In groups, the young researchers explored the absorption capacities, the densities of the different foams in order to think about further uses such as oil absorption pads for disasters, acoustic absorbers, heat insulators and sponges for hydroponic systems. In combination with clay, it was investigated to what extent the elastic properties change and a new material can be designed. The results show an optical upgrading of the material, giving it a natural-looking finish and no longer identifying it as an artificial foam material (Fig. 8).

In order to better handle the different flexible foams and to reach a uniform construction size, we developed a modular frame system from the standard mattress size (90x190 cm), into which the foams can be fitted, regardless of their material thickness and surface texture. The frames out of recycled plywood can be assembled by a screw and keyhole fitting into wall elements in different configurations. It is designed for disassembly and allows the installation of additional interior and exterior cladding to create weather-proof walls for a micro house. In the recycling-friendly construction, components are as mono-material as possible and are joined together in such a way that separation by type is possible again (Fig. 9).

Experimental study of the thermal conductivity of mattresses and results | Nine different foams were prepared for thermal conductivity

test in the climate chamber of the Institute for Building Climatology and Energy of Architecture at the TU Braunschweig. They were cut into 50 x 50 cm squares, whereby the different heights and surfaces were not adjusted. During the one-hour steady-state test, 5 sensors measured the surface and internal temperature of the samples to calculate the thermal conductivity of the foam, while 2 others measured the temperatures of the room, heated to 20 °C, with an external temperature of -10 °C. The results of the climate chamber are shown in Figure 10.

Against the expectations, a quite homogeneous distribution of the temperature on the surface (except the cocos mattress) could be observed. Due to the composition of mattresses itself, which can be described as inhomogeneous, the thermal conductivity was averaged over the whole test sample. All samples confirm the expected value: Mattress foams insulate better than natural insulation materials, their insulation values are similar to those of the 'inferior' mineral wool and slightly worse than those of EPS (Polystyrene). The average thermal conductivity is 0.040-0.045 W/mK (Tab. 2). To optimise the experiment, the measurements should always be carried out on foams with a smooth surface or covered with a material whose thermal conductivity is determined and can be extracted later, otherwise the measured values cannot be recorded accurately. Compared to conventional solid insulation foams, flexible foams

lose their insulating qualities when absorbing water and have to be covered. In a future experiment, shredded mattresses could be analysed.

Discussion | Polyurethane-flexible foams are multi-purpose and have excellent physical properties, high mechanical strength, low weight, good sound absorption, excellent thermal insulation. So far there are no applications on a large scale for the reuse of foam as such. Chemical recycling is energy-intensive and will only become interesting in the future when regenerative energies are sufficiently available. BASF (2020) describes the challenges upon classical mechanical recycling as follows: the only reason PU foams are recycled today is that incineration also generates costs. Low price of virgin and trim PU foams makes reuse economically non-viable and recycling to low-value products is not competitive.

As mattresses are multiple component products, the separation is costly. End of Life (EoL) products which have been contaminated biologically (skin, sweat, body fluids, etc.) raise hygienic concerns, cannot be molten or extruded, only compacting is possible. Consumers don't like the idea of sleeping on a second-hand mattress, which requires a marketing effort. EoL product might contain legacy chemicals whose reuse is forbidden (BASF, 2020). A healthy sleeper sweats out about half a litre of liquid, alkalis, salts and toxins every night, i.e. between 90 and



Fig. 7 | Mattress cross-sections (credit: IAK, H. Rotzinger, J. Böhnlein, A. Engel, 2020).



Fig. 8 | Experiment: Foam soaked in clay and covered with different thicknesses and densities (credit: IAK, S. Jaza, M. Schulze Gronover).

Fig. 9 | Modular lightweight wall system in different configurations (credit: IAK, A. Kreissl, 2021).

Overview complete spectrum

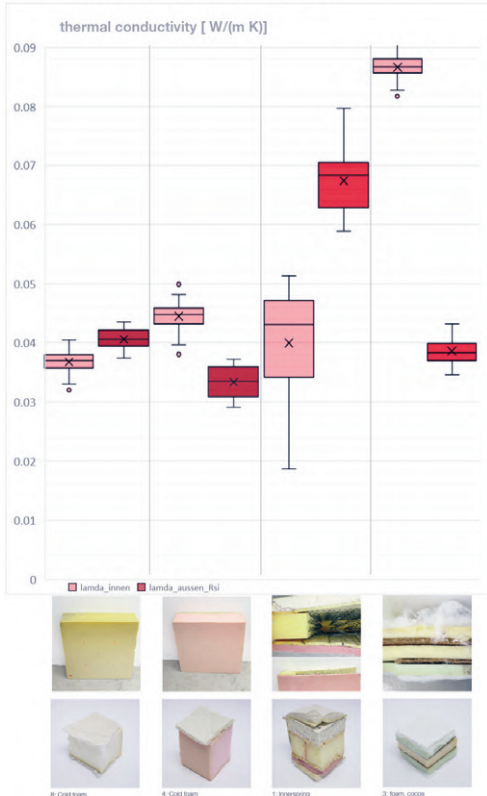


Fig. 10 | Experimental study of the thermal conductivity of mattresses ad IGS (credit: IBEA; A. Kreissl, 2011).

180 litres per year. With an average mattress life of 8-10 years, that's over 1,200 litres of fluid that the mattress has to absorb and release. It is in the nature of things that some mattresses turn into a hothouse, especially since the carefully made and covered bed hardly has a chance to be thoroughly aired during the day. The result: generations of bacteria and moulds thrive largely undisturbed in the mattress jungle. The millions of fungi alone either serve as food for the house dust mites themselves or they convert other organic material into mite food. Further studies and material tests must ensure that these contaminants can be rendered harmless

by disinfection. Previous tests were based on the found material in its whole size, further studies with shredded foams should be carried out, this would also simplify the disinfection possibilities.

Due to the flammability of polyurethane, a first step is to focus on material use in micro houses with a short escape route. Further research should include investigations on non-harmful fire retardant to be applied where needed. The studies conducted represent only a fraction of the possible reuse of mattresses and need to be further consolidated: thermal and acoustic insulation – surface treatment i.e with clay for room climate improvement – different processing: whole, in parts and shredded – application sectors for elasticity and compression capacity – water storage for vertical gardens, hydroponic systems, moss walls (Fig. 11) – absorbents for environmental disasters – weatherproof covering and impregnation for the homeless or street furniture.

Is it possible to change our thinking and perception to imagine mattresses as a future insulation or find other repurpose? Could creative research inspire and catalyse this change? The long-term goal should be renewable energy for chemical foam recycling or compostable materials. Would it be conceivable to store the foam in architecture as insulation or find other adequate uses until recycling is economically and ecologically affordable and then return the foams to the material cycle?

Summary and Conclusions | In view of the constant number of mattresses to be disposed of in Europe and beyond, the numbers of which will continue to rather rise than diminish, and the diverse uses and possibilities of flexible foams in different areas, it seems promising to think about the further use and a second life of old mattresses. The new domesticity caused by the pandemic became the reason for nationwide increase in waste and especially of used mattresses that were illegally disposed of in the streets (Fatabend, 2021). Beyond the contamination, the positive properties of the foams are retained even after the initial use and, quite reasonable areas of use can be found. Compared to the Netherlands (i.e. Retourmatras), USA (i.e. Mattress Recycling Council), France (i.e. Ecoval) and Great Britain (i.e. Matt UK), where mattress-

es are collected and mechanically recycled, the free disposal of mattresses in Germany makes it difficult to finance the dismantling and further processing. Through compaction in existing down-cycling processes, many positive properties of the foams are lost.

The objections towards mechanical recycling only prove that there are multiple reasons to push the research further and to defuse it with counter-arguments. The moment we recognize foam as a future raw material and develop it economically, a wide range of applications will certainly be opened up. Until now, mattresses have only been developed with one life in mind and no holistic effort has been made to design a second life for them in advance. Like in many other areas where the sustainable use of raw materials and resources is at issue, resource preservation, climate neutrality and long-term solutions should be given greater priority than purely economic short-term savings.

A first necessary step would be to make the contents and material flows of regularly occurring goods, such as mattresses, accessible. This would be similar to the envisaged material passports for future buildings to calculate the volume and environmental impact in separate fractions. The further research in our project will look at the acoustic insulation capacities and options for use (Fig. 12). Many of the sustainable possibilities are disregarded in industrialised countries. We all sleep peacefully on the waste of tomorrow, wishing that it will vanish into thin air, that we have a roof over our heads in the future and be able to afford a new mattress after every 10 years.

Where the economic situation makes the second life of materials worth thinking about without marketing effort, innovative solutions arise. A research project of the University of Sheffield at the Zaatari refugee camp in Jordan showed that the local mattresses can be used to grow plants in hydroponic systems. Refugees of all ages are taught about hydroponic rearing and are enabled to continue and develop the experiments independently. The next step would be to test the European foams in the laboratory to investigate their suitability for hydroponic cultivation. Let's hope that today's mattresses become tomorrow's vertical farms.

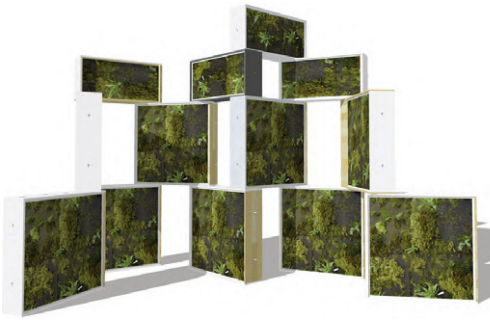


Fig. 11 | Moss Wall visualisation (credit: A. Kreissl, 2021).

Fig. 12 | Acoustic insulation testing at the Institute of Architecture Related Art (IAK) of the Technical University Braunschweig in Germany (credit: IAK, A. Kreissl, 2021).

Material	Typical Thermal Conductivity W/(m*K)	Commonly available formats
Natural Materials		
Wood fibre	0.038–0.050	Boards, semi-rigid boards and batts
Paper (cellulose)	0.035–0.040	Loose batts, semi-rigid batts
Hemp	0.038–0.040	Semi-rigid slabs, batts
Wool	0.038–0.040	Semi-rigid boards, rolls
Flax	0.038–0.040	Semi-rigid boards, rolls
Cork	0.038–0.070	Boards, granulated
Synthetic Materials		
Mineral fibre	0.032–0.044	Boards, semi-rigid boards, rolls
Glass fibre	0.038–0.041	Boards, semi-rigid boards, rolls
Extruded polystyrene (XPS)	0.033–0.035	Boards
Expanded polystyrene (EPS)	0.037–0.038	Boards
Polyurethane(PUR) Polyisocyanurate (PIR)	0.023–0.026	Boards
Polyurethane (PUR) flexible foam	0.040-0.045	Mattresses

Tab. 2 | Properties of insulation materials (source: Sutton, Black and Walker, 2011).

Acknowledgements

Leibniz ScienceCampus – Postdigital Participation – Braunschweig’ (LSC PDP); Funding: Leibniz Association (Funding line: Strategic networks), Lower Saxony Ministry for Science and Culture; Institute of Architecture Related Art (IAK) of the Technical University Braunschweig: Prof. F. Köbberling, Max Jeromin; Institute for Building Climatology and Energy of Architecture, TU Braunschweig: Prof. E. Endres, J. Mehnert, D. Houschka; Dr. M. Peschken, Dr. I. Schmidt, B. Schmeling, N. Miodragovic, C. Winter, and M. Rohwetter. Young researchers: H. Rotzinger, J. Böhnlein, H. Brüning, A. Engel, B. Gatzke, A. Grimm, S. Janaviciute, S. Jaza, C. Qin, T. Schamp, M. Schulze Gronover, R. Stockbauer, N. Sui, N. Tramp, H. Weber, W. Xu.

References

BASF (2020), “BASF working toward circularity in recycling of mattresses”, in *BASF*, 29/06/2020. [Online] Available at: [basf.com/global/en/media/news-releases/2020/06/p-20-226.html](https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2020/06/p-20-226.html) [Accessed 06 April 2021].

Ellen MacArthur Foundation (2013), *Towards the Circular Economy – Economic and business rationale for an accelerated transition*. [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf [Accessed 06 April 2021].

European Commission (n.d.), *Treatment of mattresses for improved recycling of materials*. [Online] Available at: greenbestpractice.jrc.ec.europa.eu/node/139 [Accessed 15 May 2021].

EUROPUR (2015), *Flexible Polyurethane (PU) Foam – Eco-profiles and Environmental Product Declarations*

of the European Plastics Manufacturers – August 2015. [Online] Available at: europur.org/sustainability/ecoprofile-of-pu-flexible-foam [Accessed 06 April 2021].

Fastabend, A. (2021), “Matratzen, setzt doch uns vor die Tür! – Alltag in Coronazeiten”, in *Taz*, newspaper, 22/02/2021. [Online] Available at: [taz.de/Alltag-in-Coronazeiten/!5749866/](https://www.taz.de/Alltag-in-Coronazeiten/!5749866/) [Accessed 06 April 2021].

Fraunhofer ICT (2019), “Was passiert mit 30 Millionen Matratzen pro Jahr?”, in *ict.fraunhofer.de*, 09/04/2019. [Online] Available at: [ict.fraunhofer.de/de/pressemediathek/pressemitteilungen/2019/2019-04-09.html](https://www.ict.fraunhofer.de/de/pressemediathek/pressemitteilungen/2019/2019-04-09.html) [Accessed 06 April 2021].

Heisel, F. (2020), “Reuse and Recycling – Materializing a Circular Construction”, in Ruby, I. and Ruby, A. (eds), *The Material Book*, Ruby Press, Berlin, pp. 156-160.

Köbberling, F. (n.d.), “Resources”, in *iak-tu-bs.de*. [Online] Available at: [iak-tu-bs.de/forschung.html](https://www.iak-tu-bs.de/forschung.html) [Accessed 06 April 2021].

Meyer, F. (2008), “Wie entsteht ein Polyurethanschaum? – Grundlagen der PUR-Schaumherstellung”, in *FSK Magazin / Polyurethane*, pp. 4-7. [Online] Available at: [pur-schaumkunststoffe.de/wp-content/uploads/2016/05/FSK_Magazin_Polyurethan_2008.pdf](https://www.pur-schaumkunststoffe.de/wp-content/uploads/2016/05/FSK_Magazin_Polyurethan_2008.pdf) [Accessed 06 April 2021].

Nierhaus, I. and Heinz, K. (eds), *Matratze / Matritze – Möblierung von Subjekt und Gesellschaft – Konzepte in Kunst und Architektur*, transcript Verlag, Bielefeld. [Online] Available at: [transcript-verlag.de/978-3-8376-3205-7/matratze/matritze/](https://www.transcript-verlag.de/978-3-8376-3205-7/matratze/matritze/) [Accessed 06 April 2021].

Sutton, A. Black, D. and Walker, P. (2011), “Natural fibre insulation – An introduction to low-impact building materials”, in *BRE publications*, IP 18/11. [Online] Available at: [bre.co.uk/filelibrary/pdf/projects/low_impact_materials/IP18_11.pdf](https://www.bre.co.uk/filelibrary/pdf/projects/low_impact_materials/IP18_11.pdf) [Accessed 22 April 2021].

Wainwright, O. (2020), “The case for ... never demolishing another building”, in *The Guardian*, newspaper, 13/01/2020. [Online] Available at: [theguardian.com/cities/2020/jan/13/the-case-for-never-demolishing-another-building](https://www.theguardian.com/cities/2020/jan/13/the-case-for-never-demolishing-another-building) [Accessed 06 April 2021].

Umwelt Bundesamt (2017), “Urban Mining”, in *umweltbundesamt.de*, 08/05/2017. [Online] Available at: [umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining](https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining) [Accessed 06 April 2021].