

# Kreislauffeffektive Bauwende

## Auf dem Weg zu einer neuen Tektonik

Europa strebt bis 2050 an, klimaneutral zu sein. Für die Bauwirtschaft bedeutet dies neben der Reduzierung von klimaschädlicher Energie während der Gebäudenutzung v. a. die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und der grauen Emissionen bei der Herstellung und dem Abriss von Gebäuden. Die Umsetzung kann durch eine kreislauffeffektive Bauwende gelingen, wobei der Holzbau eine zentrale Rolle einnehmen wird. Hierzu bedarf es einer auf Elementierung, Standardisierung und Reversibilität gestützten andersartigen Tektonik, innovativer Architekturansätze und einer neuen Baukultur. Jetzt braucht es einen politisch initiierten Wandel in der Bauwirtschaft, parallel müssen Planer:innen einen Paradigmenwechsel vollziehen.

**Stichworte** kreislauffeffektive Bauwende; neue Tektonik; innovative Architekturansätze; graue Emissionen; Ressourcenverbrauch

### 1 Einführung

Um das gesteckte 1,5-Grad-Ziel des Pariser Abkommens aus dem Jahr 2015 in Reichweite zu halten, darf ab sofort keine Steigerung der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen mehr stattfinden und müssen die Treibhausgasemissionen weltweit zwischen 2040 und 2050 auf null zurückgefahren werden [1]. Das Bauwesen steht in der Verantwortung, Abfall zu vermeiden und CO<sub>2</sub>-Emissionen drastisch einzusparen [2]. Zukunftsweisendes, klimaneutrales und ressourcenschonendes Bauen erfordern eine Bauwende im Umgang mit dem Bestand sowie im Entwerfen und Konstruieren mit standardisierten Bauweisen für Neubauten. Das Handeln in Kreisläufen ist die Grundlage für die Bauwende. So entstehen urbane Minen, die nicht nur als Rohstofflager, sondern vielmehr als Materiallager dienen,

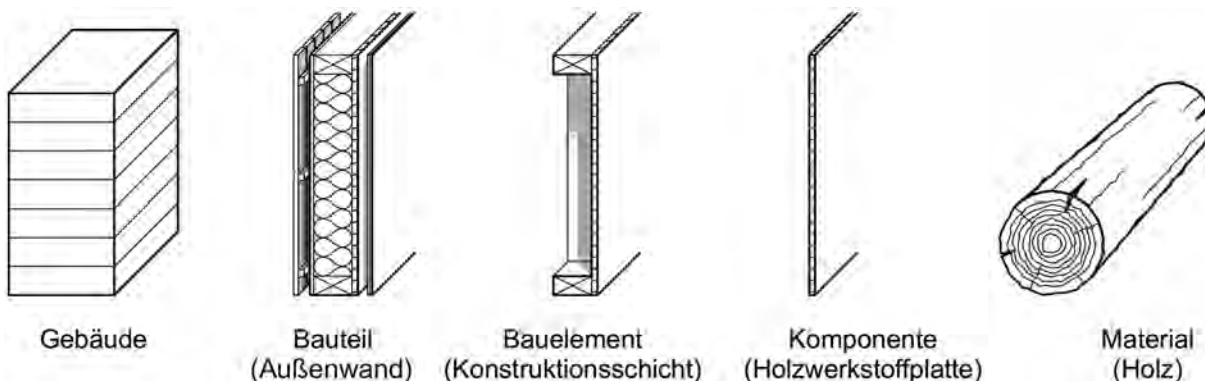
### Bauwende – towards a new tectonic

Europe aims to be climate neutral by 2050. For the construction industry, this means not only reducing climate-damaging energy during building use, but above all reducing resource consumption and grey emissions in the production and the demolition of buildings. The implementation can succeed through a cycle-effective building turnaround, in which timber construction will play a central role. This requires a different kind of tectonics based on elementation, standardisation and reversibility, innovative architectural approaches and a new building culture. What is needed now is a politically initiated change in the construction industry, and in parallel, planners must carry out a paradigm shift.

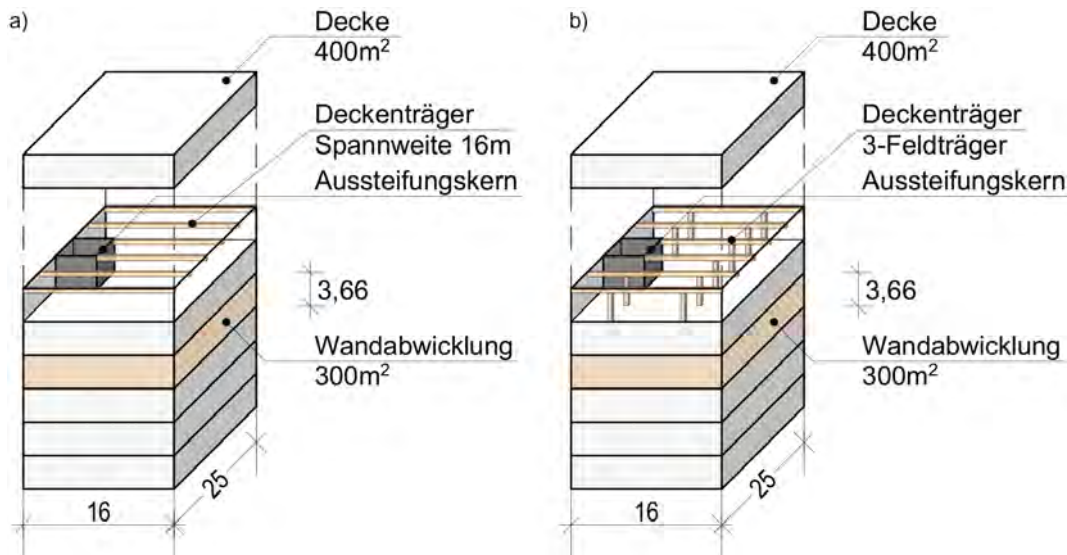
**Keywords** building transition; new tectonics; innovative architectural approaches; grey emissions; resource consumption

die „die verlustfreie und werterhaltende, wiederholende Verwendung und Verwertung von Bauteilen, Materialien und Stoffen“ erlauben [2]. Die Kreislauffähigkeit von Bauwerken findet dabei auf fünf (baukonstruktiven) Hierarchieebenen statt (Bild 1). Diese sind:

- *Die Gebäudeebene:* Die Nutzungsneutralität ermöglicht Flexibilität sowie Veränderbarkeit und bedeutet damit Langlebigkeit der Grundrissstruktur. Umnutzungs- und Aufstockungspotenziale im Bestand bedeuten Ressourcenerhalt sowie Einsparungen grauer Emissionen.
- *Die Bauteilebene* (z. B. Außenwand, Geschossdecke, Innenwand etc.): Der zerstörungsfreie Rück- bzw. Ausbau des gesamten (standardisierten) Bauteils garantiert die Wiederverwendung an anderer Stelle/in anderen Bauwerken.



**Bild 1** Die verschiedenen Ebenen der Kreislauffähigkeit von Bauwerken  
The different levels of reusability of buildings



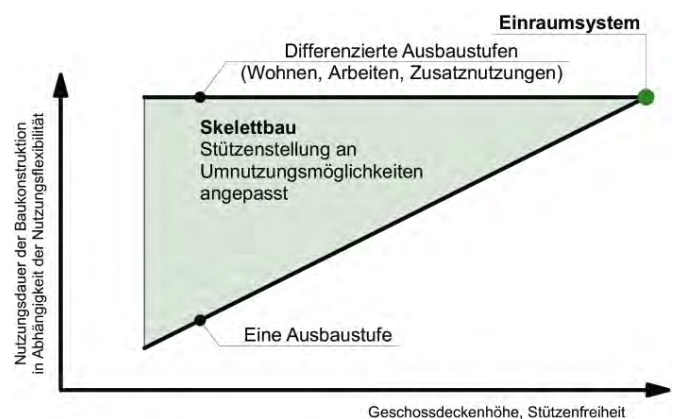
**Bild 2** Statische Gebäudegrundformen kreislaueffektiven Bauens (schematische Darstellung): a) freier Grundriss/Einraumsystem als z. B. Aufstockung eines Gebäudebestands, b) Skelettbau als z. B. mehrgeschossiger Neubau  
 Static basic building forms of circular construction (schematic representation): a) free floor plan/one-room system as e. g., heightening storey to a building stock, b) skeleton construction as e. g., multi-storey new building

- *Die Bauelementebene* (z. B. Tragelement/Konstruktionsschicht, Fenster, Türe, Sonnenschutzelement etc.): Die standardisierte Elementierung gliedert systematisch das Bauteil und steigert die Wiederverwendbarkeit. Die Ausbaufähigkeit aus der Bauteilebene erlaubt in Abhängigkeit von tektonisch lösbaren Elementgruppen (z. B. außen- und raumseitige Bekleidung) die Anpassung an Austauschzyklen [3].
- *Die Komponentenebene* (z. B. Rähm, Schwelle, Holzwerkstoffplatte, Verbindungsmittel, Elektrodose etc.): Sortenreinheit und reversible Verbindungen garantieren die Rückbaubarkeit aus der Bauelementebene und die anschließende Wieder- und Weiterverwendung der Komponenten.
- *Die Materialebene* (z. B. Holz, Lehm, Stahl, Fasern etc.): Kreislauffähig sind Materialien wie Holz oder Lehm im biologischen Kreislauf bzw. wie Stahl und Kupfer im technischen Kreislauf. Die sortenreine Wiederverwertung (Recycling) verstärkt die Kreislaufwirkung.

## 2 Kreislaueffektives Bauen mit Holz

Konstruktionen und Bauweisen mit Holz haben das Potenzial, auf allen (fünf) Hierarchieebenen kreislauffähig zu sein. Dies wird nachfolgend verdeutlicht.

In urbanen Zentren wird aufgrund von Flächenknappheit das mehrgeschossige Bauen für Wohnen und Arbeiten die vorherrschende Bauart sein. Dies gilt gleichermaßen für Neubauten wie für Gebäudeaufstockungen. Hochverdichtete Bauweisen sind per se flächigen, niedrigen Strukturen aufgrund maßgeblicher Kriterien wie Landverbrauch und Versiegelungsgrad vorzuziehen. Diese Bauten und Aufstockungen müssen, um über viele Jahrzehnte im Sinne urbaner Ansprüche langlebig zu sein, mit flexiblen Grundrissen entworfen und konstruiert werden und so für

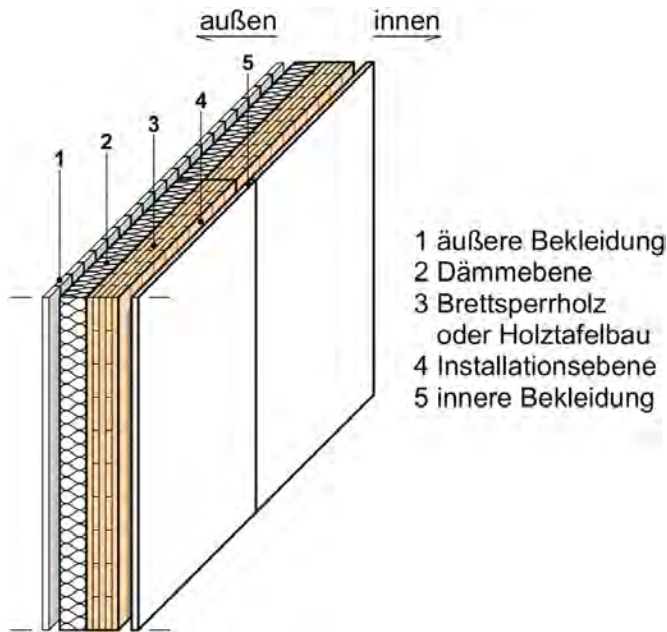


**Bild 3** Abhängigkeit der Langlebigkeit der lastabtragenden Baukonstruktion von der Nutzungsflexibilität des Gebäudes; oberer Grenzwert ist das Einraumsystem  
 Dependence of the longevity of the load-bearing structure on the flexibility of use of the building; the upper limit is the one-room system

unterschiedlichste Nutzungen Raum bieten. Nutzungsflexibel werden mehrgeschossige Bauwerke, wenn die statische Struktur für alle unterschiedlich geplanten Nutzungen für die gesamte Lebensdauer eines Bauwerks unveränderlich bleibt. Diese statischen Gebäudegrundformen kreislaueffektiven Bauens bestehen grundsätzlich aus wenigen statisch erforderlichen Bauteilen (Bild 2).

Wenn es bei mehrgeschossigen Neubauten gelingt, differenzierte Ausbaustufen im architektonischen und konstruktiven Entwurf zu fixieren, ist nicht nur die Langlebigkeit von Einraumssystemen, sondern auch von Skelettbauten gegeben (Bild 3).

Ideal ist der freie Grundriss, bei dem das Tragwerk über die gesamte Gebäudetiefe frei spannt und die größte Grundrissflexibilität freigibt (Bild 2a). Typische Vertreter



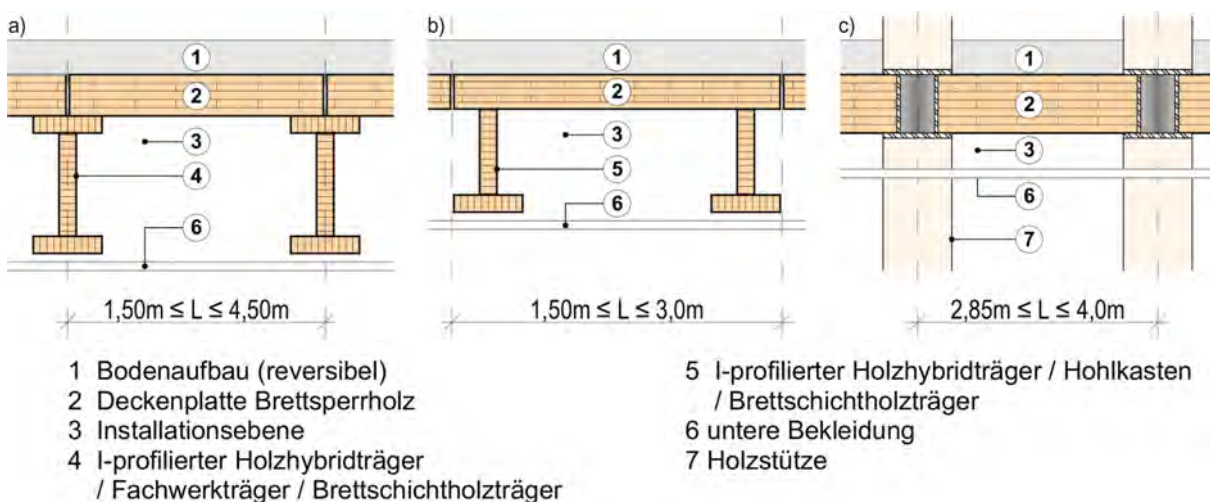
**Bild 4** Trennungseinheit im Sinne der Bauteilfunktionen eines Bauteils – statischer, versorgungstechnischer und raumbildender Art  
Separation purity in the sense of the structural element and component functions of a building part – static, supply-technical and space-forming kind

sind eingeschossige Aufstockungen und Hallentragwerke: Auf mehrgeschossige Wohn- und Bürogebäude bezogen würden zur Einhaltung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Geschossdecken höhere Deckenaufbauten erforderlich (Bild 5a). Ist dies wirtschaftlich nicht abbildbar oder stehen bautechnische Gründe (bspw. Schallschutz oder Bauteilbewegungen) dem entgegen, ist die nutzungsflexible Skelettbauweise über mehrere Geschosse hinweg kreislaueffektiv (Bild 2b). In vertikaler Richtung sind Stützen geschossübergreifend im Raster positioniert. Aussteifungswände, z.B. die Treppenhauswände, werden ebenfalls zur vertikalen Lastabtragung herangezogen. Alle zusätzlichen raumgestaltenden Bauteile

sind temporärer Art und können versetzt oder entfernt werden, je nach sich verändernder Nutzung. Dies hat auch für Trennwände von Nutzungseinheiten, vertikale Erschließungen oder für raumabschließende Fassadenelemente Gültigkeit, die nicht gleichzeitig der Gebäudeaussteifung und dem Brandschutz dienen. Für einen Brandabschnitt mit einem nutzungsflexiblen Grundriss von bspw. 400 m<sup>2</sup> – 16 m breit und 25 m lang – sowie einer Geschosshöhe von 3,66 m (Bild 2) beträgt die Abwicklungsfläche der Außenwände je Geschoss 300 m<sup>2</sup>, also 3/4 der Grundrissfläche. Die Kreislauffähigkeit beachtend, machen raumabschließende Außenwandbauteile ohne vertikal lastabtragende und aussteifende Funktion Sinn, weil damit eine große Bauteilmenge zur Wiederverwendung bereitsteht. Rückbaubare Holzaußenwände sind in vielen Anwendungen bereits Stand der Technik [3]. Um einen hohen Wiederverwendungsgrad zu erzielen, müssen neben der Elementierung der Außenwände die Standardisierung und die Reversibilität der Bauteile über geeignete Bauteilverbindungen weiterentwickelt werden.

Unter Berücksichtigung aller Innen- und Außenwände sind bei günstigen Tragkonstruktionen von Gebäuden je Geschoss ca. 50% aller flächigen Bauteile (Decke und Wände) nichttragend und können rückbaufähig zur Wiederverwendung konstruiert werden. Dazu müssen Mehrfachfunktionen – statischer, versorgungstechnischer und raumprägender Art – dieser nichttragenden Bauteile kreislaufgerecht so ausgebildet werden, dass die innere und äußere Bekleidung sowie die Dämm- und Installationsebene trennbar von stützenden Elementen sind (Bild 4).

Dieses tektonisch sortenreine Denken und Handeln ist auch für lastabtragende Bauteile anzuwenden. Dies ist effektiv, weil bei lastabtragenden Bauteilen der statische Teil der Bauteile fest im Bauwerk über dessen gesamte Lebensdauer eingebaut bleibt bzw. bei nichttragenden Bauteilen der stützende Teil der Bauteile (Bild 4, Pos. 3)



**Bild 5** Deckentragwerke: a) Beispiel für weitgespannte Tragwerke [5], b) Beispiel für mittlere Deckenspannweiten, c) Beispiel für punktgelagerte Brettsperrholzplatten mit engem Stützenraster (z. B. Studentenwohnheim in Vancouver)  
Ceiling structures: a) example of long-span structures [5], b) example of medium slab spans, c) example of point-supported cross-laminated timber panels with a narrow column grid (e. g., student residence in Vancouver)

geschützt durch Bekleidungen unversehrt bleibt und damit wiederverwendet werden kann. Der raumbildende Teil, v. a. die Bekleidung, wird demgegenüber in regelmäßigen Intervallen während der Lebensdauer des Gebäudes erneuert und muss daher leicht entfernbar von den tragenden und stützenden Strukturen sein.

Zusammenfassend folgt: Trennungseinheit im Sinne der Bauelement- und Komponentenfunktionen ist zu wahren. Das gelingt mit reversiblen Verbindungen. Für die einzelnen Bauteilfunktionen gilt zusätzlich Sortenreinheit, um eine Kreislauffähigkeit im Sinne des Recyclings zu garantieren.

Eine kreislaueffektive Tektonik erfordert auch einfache Bauteilaufbauten [4], wohl wissend, dass brand-, schall- und wärmeschutztechnische Anforderungen Vereinfachungen erschweren können. Ein Optimum an Vereinfachung und konstruktiver Durchbildung wird in mehrfach durchlaufenden Optimierungsschritten erreicht und spricht auch aus wirtschaftlichen Gründen für elementierte, standardisierte Bauteile.

Dach, Geschossdecken und Bodenplatte tragen außer dem Eigengewicht vertikal die Nutzlasten ab, horizontal steifen sie das Gebäude aus. Da Nutzlasten von Deckentragwerken nutzungsabhängig unterschiedlich sind, ist über alle Geschosse hinweg die Nutzungsvielfalt dadurch gegeben, dass die höchste Nutzlast angesetzt wird. Somit können alle Geschossdecken gleich ausgebildet und damit standardisiert werden. Mittlere Deckenspannweiten bis ca. 8 m, wie sie im mehrgeschossigen Holzbau vorkommen, können als Verbundtragwerk aus Deckenplatte und Trägerstruktur hergestellt werden (Bild 5b). Dies können auch Hohlkastensysteme sein, die auch dann als sortenrein anzusehen sind, wenn sie aus verschiedenen Holzwerkstoffen zu Verbundelementen verklebt sind. Werden diese als Deckenelemente gleicher Breite, Höhe und Länge reversibel auf stützenden Bauteilen eingebaut, sind sie wiederverwendbar. Die Stützungen sind im Skelettbau nutzungsneutral im Raum zu verteilen und auf die Deckenelemente abzustimmen.

Punktgelagerte Decken aus reinen Brettsperrholzelementen sind im mehrgeschossigen Holzbau möglich und ergeben den einfachsten Deckenaufbau (Bild 5c). Allerdings ist die Elementierung dieser Plattenformate auf die Herstellungsbreiten und das Durchstanzvermögen der Brettsperrholzplatten beschränkt. Daher ist ein enges Stützenraster erforderlich, welches eine Nutzungsflexibilität des Grundrisses erschwert. Beispielhaft soll das 18-geschossige Studentenwohnheim in Vancouver mit einem Stützenraster von 2,85 m/4 m und 166 mm hohen Brettsperrholzplatten genannt werden [6].

### 3 Neue Tektonik im Holzbau

Die im Bau befindliche Werk- und Forschungshalle des t-lab Campus Diemerstein (Bild 6) veranschaulicht die



**Bild 6** Werk- und Forschungshalle des t-lab Campus Diemerstein  
Work and research hall of the t-lab campus Diemerstein



**Bild 7** 100 % Reversibilität aller Bauteile der Werk- und Forschungshalle  
100 % reversibility of all structural elements of the work and research hall

architektonischen und konstruktiven Möglichkeiten kreislaueffektiven Bauens und damit eine neue Tektonik im Holzbau. Der t-lab Campus Diemerstein liegt auf dem Gelände der Stiftung für die TU Kaiserslautern in Frankenstein, mitten im Pfälzer Wald ([www.architektur.uni-kl.de/tlab](http://www.architektur.uni-kl.de/tlab)).

Das rund 360 m<sup>2</sup> große Gebäude bietet als Einraum eine flexibel nutzbare Fläche, die außer als Werk- und Forschungshalle auch für Workshops, Seminare und Veranstaltungen genutzt werden kann. Für die Primärkonstruktion, die Fassaden sowie den Ausbau wird Holz zum Einsatz kommen. Alle Bauteile sind reversibel lösbar und können wiederverwendet werden (Bild 7).

Die Halle ist 12,5 m breit, 27,5 m lang, 7 m hoch bei ca. 4 m Traufhöhe. Das Tragwerk besteht aus zwei Giebelwänden und zehn Dreigelenkrahmen aus Buchenfurnierschichtholz (BauBuche GL 75) und Kunstharzpressholz



Foto: t-lab/Bernhard Frieze, Pforzheim

**Bild 8** Detailmodell der Werk- und Forschungshalle  
Detailed model of the work and research hall



Foto: t-lab

**Bild 10** Detaildarstellung des reversiblen Anschlusses einer elementierten BSP-Decken- und Wandplatte an den Dreigelenkrahmen im Bereich des Traufknotens

Detailed view of the reversible connection of a elemented CLT ceiling and wall panel to the three-hinged frame in the area of the eaves node



Foto: t-lab/DEUTSCHE HOLZVEREDELUNG Schmeing GmbH & Co. KG, Kirchhundem

**Bild 9** Traufknoten aus Kunstharzpressholz (KP) – Querkraftanschluss über Schubnocken  
Eaves node made of synthetic resin pressed wood (KP) – lateral force connection via thrust cam

(KP) im Abstand von 2,50 m. KP ist ein unter hoher Temperatur stark verdichtetes Buchenfurnierschichtholz, imprägniert und verfestigt mit Phenolharz. Die 12,5 m weit spannenden Dreigelenkrahmen sind in Stabtragwerke aufgelöst und damit effizient (Bild 8). Sie werden durch die vertikalen und horizontalen Lasten aus dem Dach- und Wandtragwerk beansprucht und übernehmen auch die Queraussteifung der Halle.

Das Dach- und Wandtragwerk besteht aus einschichtigen Dach- und Wandplatten aus Brettsperrholz (BSP), die 2,50 m zwischen den Dreigelenkrahmen von Fußkante bis Traufkante und von Traufkante bis Firstkante spannen. Die BSP-Platten dienen auch der Längsaussteifung. Die Gebäudehülle als Ganzes besteht aus vorgefertigten dreischichtigen Bauelementen: Weichfaserplatte, Konterlattung sowie vertikale Verschalung – mit 2,50 m Breite zwischen den Dreigelenkrahmen. Diese vorgefertigten Elemente werden reversibel auf den BSP-Platten befestigt. Im Bereich der aufgeständerten Bodenplatte und der Fundamente wird auf Stahlbeton verzichtet, indem historisch bekannte Kriechkellerkonstruktionen als Vorbild dienen. Das Bauwerk schließt nach unten mit einer selbsttragenden BSP-Bodenplatte ab.

Aktuelle Forschungen zu Kriechkellerkonstruktionen haben gezeigt, dass unter Beachtung ausreichender Lüftung und bei ausreichendem Schutz gegenüber Boden-

feuchte eine Kriechkellerkonstruktion dauerhaft ist. Dies wird durch Monitoring am Objekt verifiziert. Bodenplatte und Rahmentragwerk werden auf Stahlträgern und Pfählen rückbaubar gegründet.

Die konstruktiven Besonderheiten der reversiblen Bauteilanschlüsse fußen auf diversen Forschungsergebnissen des t-lab Holzarchitektur und Holzwerkstoffe. Für das Primärtragwerk kommen erstmals hocheffiziente Ringknoten aus KP zum Einsatz [7] (Bild 9). Die bauliche Umsetzung wird mit ausgesuchten Firmen für das Haupttragwerk durchgeführt, da die Forderung der Reversibilität wesentlich höhere Anforderungen an die Bauteilgenauigkeiten der Verbindungen stellt als normativ gefordert. Der Ausbau wird unter Beteiligung der Studierenden als Design-Build-Projekt durchgeführt. Der Baubeginn der Gebäudestruktur erfolgte im Frühjahr 2022.

Der Dreigelenkrahmen selbst besteht aus BauBuche-Stäben und KP-Knoten, die komplett in ihre Einzelteile sortenrein zerlegbar sind. Die Rahmenecken am Trauf sind fachwerkartig aufgelöst – Druckstäbe innen zum Raum hin, Zugstäbe außen entlang von Wand und Dach. Der kurze Diagonalstab ist druckbeansprucht. Alle Druckstäbe sind 160 mm breit und 200 mm hoch. Alle Zugstäbe, die durch die Schnee- und Windbeanspruchungen auch querkraft- und biegebeansprucht sind, sind 160 mm breit und 300 mm hoch. Die Verschneidung der Druck- mit den Zugstäben erfolgt über Treppenversätze [8] (Bild 12). Die Wand- und Dachelemente werden durch Scheibendübel aus KP, vergleichbar mit historischen Schubdübeln aus Eichenholz, oder durch Konusdübel aus KP mit den Dreigelenkrahmen formschlüssig und damit ebenfalls reversibel verbunden [9] (Bild 10). Zur Lagesicherung werden rein auf Zug beanspruchte Zylinderkopfschrauben verwendet, die in Einschraubmuttern und nicht direkt ins Holz eingedreht werden, um sicherzustellen, dass die Reversibilität auch nach 50 oder 100 Jahren gewährleistet ist.

Auch die Vorspannung wird zukünftig neben den Dübelvarianten – Scheibendübel und Konusdübel – ein wichtiges Mittel zur Umsetzung reversibler Verbindungen sein.



**Bild 11** Mock-up (M 1:1) des reversiblen Trauf- und inneren Druckknotens  
Mock-up (scale 1:1) of the reversible eaves and inner pressure node

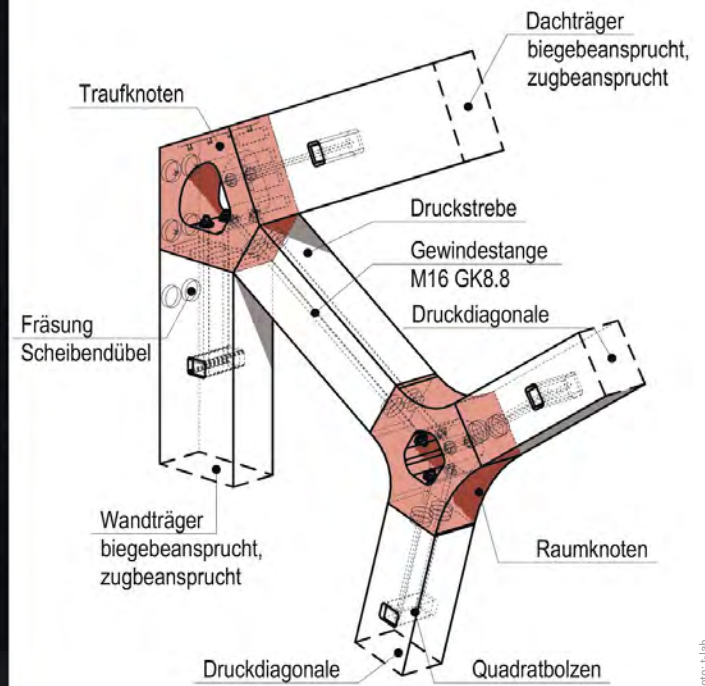


Foto: t-lab



**Bild 12** Mock-up (M 1:1) des reversiblen Firstknotens  
Mock-up (scale 1:1) of the reversible ridge knot

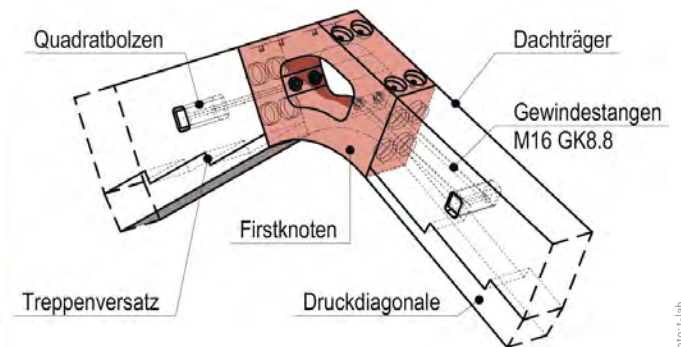
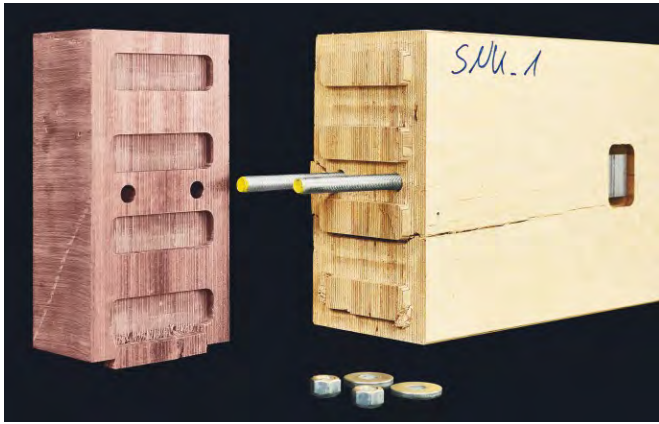


Foto: t-lab

Durch Vorspannung lassen sich zugbeanspruchte Stabverbindungen rückbaubar gestalten, die bisher im Holzbau mit unlösbaren Verbindungen, z. B. mit Stabdübeln, ausgeführt werden. Dies gelingt, indem die aufzunehmende Zugkraft durch die Vorspannkraft überdrückt wird.

Sämtliche KP-Knoten der Werk- und Forschungshalle, also Fußpunkte, Traufknoten (Bilder 11, 13) und der Firstknoten (Bild 12), sind kraft- und formschlüssig mit den BauBuche-GL-75-Stäben verbunden. Jeweils zwei Gewindestangen M16 GK 8.8 werden gegen die Innenwand der KP-Knoten und die in den BauBuche-Stäben eingelassenen Quadratbolzen (50 mm/50 mm) vorgespannt. Die Quadratbolzen liegen 300 mm von der Kontaktfläche der beiden Materialien entfernt. In den Kontaktflächen werden zur Übertragung der Querkräfte und zur Knotenversteifung formschlüssige Anschlüsse vorgesehen. Dies sind an den Traufknoten Schubnockenverbindungen (Bilder 9, 13) und an den inneren Druckknoten und am Firstknoten (Bild 12) KP-Scheibendübel.

Die vorgespannten Knoten wurden durch Bauteilveruche auf ihre Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit hin untersucht. Dazu wurden Querkraftversuche der formschlüssigen Kontaktflächenverbindung mit Schubnocken am Traufknoten (Bild 13), Zugversuche an den Gewindestangen zur Verankerung der KP-Knoten mit den BauBuche-GL-75-Stäben sowie Zugversuche des KP-Traufknotens selbst durchgeführt. Das Versagen der Querkraftversuche trat auf hohem Lastniveau und grundsätzlich horizontal im BauBuche-GL-75-Stab im Bereich der Lochöffnung ein (Bild 13). Bei den Zugversuchen der Verbindung KP-Knoten und BauBuche-GL-75-Stab hat sich einheitlich gezeigt, dass sich ein für das Tragwerk günstiges, weil duktileres Versagen durch den Bruch der Gewindestangen eingestellt hat. Die Quadratbolzenverbindung in der BauBuche war nicht versagensrelevant. Auch ein Blockscherversagen der BauBuche trat nicht ein. Das gleiche günstige Versagensmuster, der Zugbruch der Gewindestangen, zeigte sich beim reinen Bauteilversuch der KP-Knoten.



**Bild 13** Bruchbild einer Querkrafttragfähigkeitsprüfung für den reversiblen Traufknoten mit Schubnocken  
Fracture pattern of a shear force load-bearing capacity test for the reversible eaves node with shear cams

Vorgespannt werden die Knoten über die Muttern im KP-Knoten. Da Holz auf Feuchteinflüsse durch Schwinden und Quellen und auf Temperaturschwankungen durch Verformungen reagiert sowie zusätzlich unter konstantem Druck kriecht, sind nach [10] die daraus entstehen-

den Vorspannkraftverluste zu ermitteln und auf die statisch erforderliche Vorspannkraft aufzuschlagen. Gleiches gilt für die Relaxation der vorgespannten Gewindestangen sowie die Ausdehnungen des Stahls bei Temperaturschwankungen. Quellen von Holz führt zum Anstieg der Vorspannung und bleibt deshalb genauso unberücksichtigt wie der nach Bild 13 nicht vorhandene Ankerschlupf. Die Vorspannkraftverluste ( $\Delta P_{\text{gesamt}}$ ) sind nach (Gl. (1)) wie folgt [10]:

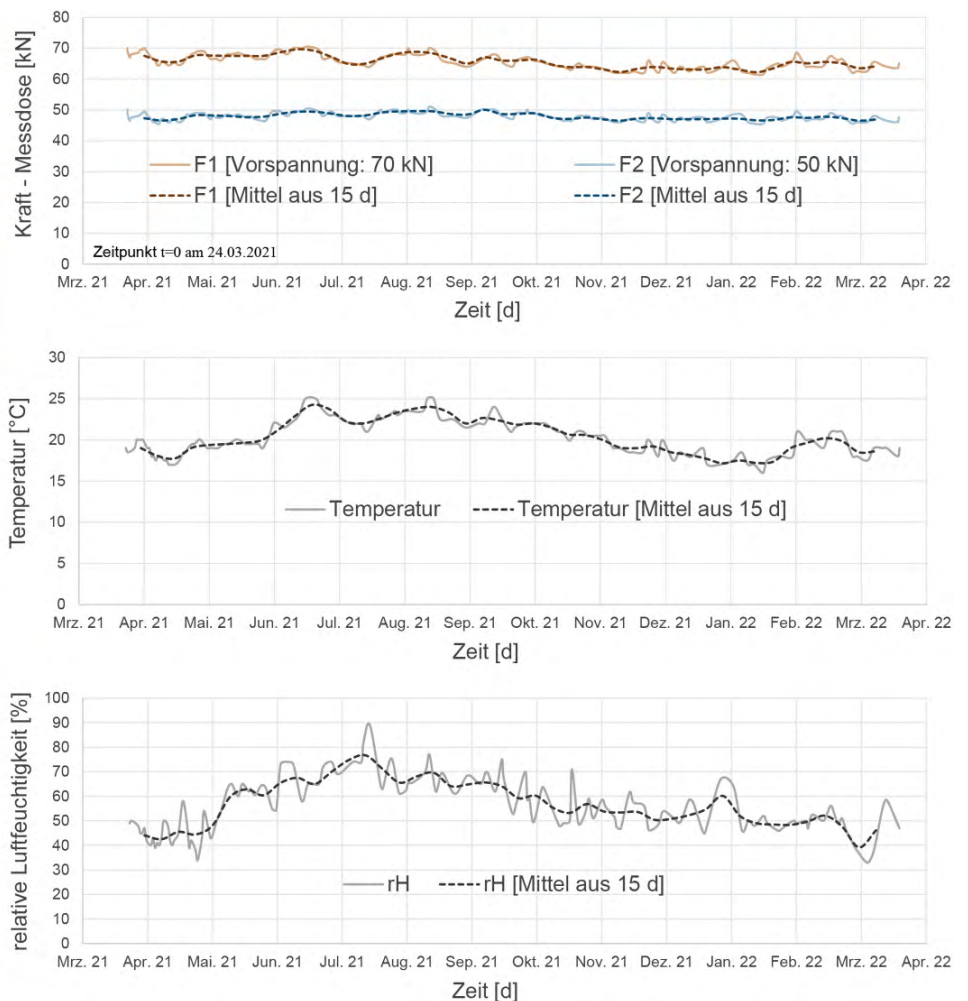
$$\Delta P_{\text{gesamt}} = \Delta P_{\text{cr}} + \Delta P_{\text{pr}} + \Delta P_{\Delta T} + \Delta P_{\text{s}} \quad (1)$$

Die Vorspannkraft zum Zeitpunkt  $t = \infty$  ergibt sich damit zu (Gl. (2)):

$$P_{\infty} = P_{m,0} - \Delta P_{\text{gesamt}} \quad (2)$$

mit:

- $P_{\infty}$  Vorspannkraft zum Zeitpunkt  $t = \infty$  in kN
- $P_{m,0}$  Vorspannkraft zum Zeitpunkt  $t = 0$  in kN
- $\Delta P_{\text{gesamt}}$  Summe der Vorspannkraftverluste in kN
- $\Delta P_{\text{cr}}$  Spannkraftverlust infolge Kriechen der Hölzer in kN



**Bild 14** Langzeitversuche zum Vorspannkraftverlust der reversiblen Knotenverbindungen der Dreigelenkrahmen der Werk- und Forschungshalle unter Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Kriechen und Relaxation  
Long-term tests on the loss of prestressing force of the reversible node connections of the three-hinged frames of the work and research hall under humidity, temperature, creep and relaxation

$\Delta P_{pr}$	Spannkraftverlust infolge Relaxation der vorgespannten Gewindestangen in kN
$\Delta P_{\Delta T}$	Spannkraftverlust infolge Dehnungsdifferenz zwischen Stahl und den angrenzenden Holzbaukomponenten bei Temperaturänderung in kN
$\Delta P_s$	Spannkraftverlust infolge Schwinden der Hölzer in kN

Zur Beurteilung der Spannkraftveränderungen im Knotenpunkt zwischen KP und BauBuche wurden bereits seit März 2021 zwei Langzeitversuche im Bauteilmaßstab 1:1 durchgeführt (Bild 14). Der eine Versuchskörper ist mit 50 kN, der andere mit 70 kN vorgespannt. Dazu sind knotenseitig am KP Kraftmessdosen unter den Unterlegscheiben der Gewindestangen zur Dokumentation der zeit- und umgebungsabhängigen Vorspannkraftverläufe angeordnet. Gleichzeitig werden Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit gemessen.

Die Versuchskörper sind in einer niedrig beheizten Werkhalle aufgestellt, keiner direkten Sonneneinstrahlung sowie wechselnden Luftfechtigkeiten durch natürliche Konvektionsströme ausgesetzt. Die Temperatur- und Feuchteverläufe sind dadurch gleichartig (Bild 14) und entsprechen auch den zukünftig zu erwartenden Bedingungen in der Werk- und Forschungshalle in Diemerstein.

Es hat sich gezeigt, dass die Vorspannkraften (15-d-Mittelwertkurven in Bild 14) beim Versuchsaufbau mit  $P_{m,0} = 50$  kN um ca. 7% und beim Versuchsaufbau mit  $P_{m,0} = 70$  kN um ca. 11% abfallen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass in Nutzungsklasse 1 nach DIN EN 1995-1-1 die Vorspannung zur Umsetzung reversibler Zugverbindungen sehr gut geeignet ist. Diese Erfahrung wurde mit ca. 13% Vorspannkraftverlust auch in [10] für die Vorspannung von BSP-Wänden mit Spannritz gemacht.

Unter Beachtung der auftretenden Spannkraftschwankungen infolge der bauphysikalischen Randbedingungen einer Werkhalle, der Verwendung von steifen Gewindestangen sowie der reibungsfreien Vorspannlänge wird daher konservativ empfohlen, dass ein Vorspannkraftverlust von 15% beim statischen Knotennachweis berücksichtigt wird. Grundsätzlich ist die Vorspannung von Holz in Faserrichtung dauerhaft möglich.

#### 4 Schlussfolgerungen

Das Bauwesen verursacht weltweit maßgeblich die klimaschädlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen und den ungezügelt Ressourcenverbrauch. Beides ist zur Einhaltung der Pariser Klimaziele von 2015 – die auf der COP26 in Glasgow bestätigt wurden [11] – nicht länger hinnehmbar. Es bedarf eines sofortigen Wandels des Bauens: die kreislaueffektive Bauwende.

Im Einzelnen beinhaltet eine kreislaueffektive Bauwende folgende Punkte:

- Der Bestandserhalt ist dem Neubau vorzuziehen. Dem kreislaueffektiven Bauen im Bestand, allen voran der Gebäudeaufstockung, muss viel mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden. Dies muss durch politische Vorgaben und Anreize erreicht werden.
- Alles neu Gebaute und Umgebaute sollte nutzungsflexibel und rückbaubar sein.
- Die Standardisierung von reversiblen Bauteilen, Bauelementen und Komponenten ist für eine umfassende Wiederverwendung unerlässlich.
- Einfaches Bauen mit wenigen sortenreinen Komponenten sowie die damit verbundene kreislaueffektiv angepasste Tektonik sind umzusetzen.
- Eine Dokumentation (Digitaler Zwilling), d. h. ein digitaler Material- und Bauteilkatalog, ist verpflichtend für alle Bauten zu erstellen und zu veröffentlichen.

Auf dem Weg dorthin bedarf es verschiedener Maßnahmen, Anreize und Förderungen:

- Die Rückbaubarkeit von Gebäuden und die Wiederverwendung von Bauteilen, Bauelementen und Komponenten müssen politisch eingefordert und gesetzlich fixiert werden.
- Staatliche Förderung zur Weiterentwicklung zirkulärer Bauteile und Verbindungen mit innovativen Firmen ist zu gewähren.
- Eine Veränderung der Bauordnung und des Vergaberichts ist zugunsten kreislaueffizienter Bauweisen vorzunehmen. Dafür ist eine Abkehr von der rein auf die Erstellungskosten ausgerichteten Definition von Wirtschaftlichkeit hin zu einer Betrachtung des gesamten Lebenszyklus von Bauteilen und Gebäuden erforderlich.
- Reallabore sind einzurichten, zu finanzieren und deren bundesweite Zusammenarbeit ist zu fördern.
- Wissenschaftliche Erkenntnisse, Ergebnisse aus Reallaboren und angewandter Forschung sind schnell zu verbreiten.
- Bestehenden Hemmnissen und fehlendem Wissen bei Planer:innen und Entscheidungsträger:innen muss mit finanzierten Fort- und Weiterbildungsangeboten entgegengewirkt werden.
- Öffentliche Hand und Politik müssen den Rahmen setzen und durch Pilotprojekte in der Umsetzung von kreislaueffektiven Bauwerken als Vorbilder voranschreiten.
- In der Ausbildung (Architektur, Bauingenieurwesen, Handwerk) müssen für die Schwerpunkte der Baukonstruktion, des Entwurfs, der Materialverwendung und -verarbeitung sowie der Emissionseffizienz neue Wege beschritten werden. Dafür sind durch die Länder Personal und finanzielle Mittel für einen Umbau der Ausbildungen bereitzustellen.



## Literatur

- [1] Figueres, C. et al. (2017) *Three years to safeguard our climate*. Nature 546, pp. 593–595. <https://doi.org/10.1038/546593a>
- [2] Heisel, F.; Hebel, D. E. (2021) *Einführung* in: Heisel, F.; Hebel, D. E. [Hrsg.] *Urban Mining und kreislaufgerechtes Bauen – Die Stadt als Rohstofflager*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, S. 9–15.
- [3] Fischer, O.; Lang, W.; Winter, S. (2019) *Hybridbau Holzaußenwände*. München: Detail Business Information GmbH.
- [4] Nagler, F. [Hrsg.] (2021) *Einfach Bauen – Ein Leitfaden*. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH.
- [5] Shi, W.; Klopfer, R.; Ciesla, E.-M., Graf, J.; Birk, S. (2021) *Standardisierte Buchenholz-Hybridträger großer Spannweite – Steigerungspotential von Produktspeicher und stofflicher Substitution durch Buchenholzprodukte niedriger Holzqualität*. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet für Tragwerk und Material.
- [6] Kaufmann, H.; Krötsch, S.; Winter, S. (2017) *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau*. 1. Aufl. München: Detail Business Information GmbH, S. 166–169.
- [7] Röver, D. (2020) *Entwicklung neuartiger Knotenverstärkungen von Holztragwerken mit Kunstharzpressholz (KP)* [Dissertation]. Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet für Tragwerk und Material.
- [8] Enders-Comberg, M.; Blaß, H. J. (2014) *Treppenversatz – Leistungsfähiger Kontaktanschluss für Druckstäbe*. Bauingenieur 89, H. 4, S. 162–171.
- [9] Graf, J.; Shi, W.; Birk, S. (2021) *Kreislaueffektives Potential von Holz im Hallenbau*. Bautechnik (zur Veröffentlichung angenommen). <https://doi.org/10.1002/bate.202100105>
- [10] Gräfe, M. (2020) *Vorgespannte Konstruktionen aus Brettsperrholz. Entwicklung, experimentelle und theoretische Untersuchungen, Entwurf und Bemessung* [Dissertation]. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- [11] United Nations [eds.] (2021) *The Glasgow Climate Pact – Cop26 Achievements at a Glance* [online]. New York: UN. <https://ukcop26.org/wp-content/uploads/2021/11/COP26-Presidency-Outcomes-The-Climate-Pact.pdf> [Zugriff am: 22. März 2022]

### Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Graf (Korrespondenzautor)  
juergen.graf@architektur.uni-kl.de  
Technische Universität Kaiserslautern  
Fachbereich Architektur  
Fachgebiet Tragwerk und Material  
Forschungsleitung: t-lab Holzarchitektur und Holzwerkstoffe  
Pfaffenbergstraße 95  
67663 Kaiserslautern

Univ.-Prof. Stephan Birk, Architekt BDA  
s.birk@tum.de  
Technische Universität München  
TUM School of Engineering and Design  
Lehrstuhl für Architektur und Holzbau  
Mitglied TUM.wood Gruppe  
Arcisstraße 21  
80333 München

Dipl.-Ing. Viktor Poteschkin  
Technische Universität Kaiserslautern  
Fachbereich Architektur  
Fachgebiet Tragwerk und Material  
Pfaffenbergstraße 95  
67663 Kaiserslautern

Master of Engineering (M.Eng.) Yannick Braun  
Technische Universität Kaiserslautern  
Fachbereich Architektur  
Fachgebiet Tragwerk und Material  
Pfaffenbergstraße 95  
67663 Kaiserslautern

### Zitieren Sie diesen Beitrag

Graf, J.; Birk, S.; Poteschkin, V.; Braun, Y. (2022) *Kreislaueffektive Bauwende – Auf dem Weg zu einer neuen Tektonik*. Bautechnik 99, Sonderheft Holzbau, Ausgabe 2, S. 76–84.  
<https://doi.org/10.1002/bate.202100111>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.  
Eingereicht: 17. November 2021; angenommen: 21. März 2022.