

Holzforschung in der Schweiz ausbaufähig

Bestandsaufnahme zur aktuellen Forschungslandschaft im Vergleich zu Deutschland und Österreich

Von Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. Dr.h.c. Peter Niemz^{1, 2, 3}

Der Anteil an Holzbauten, insbesondere an mehrgeschossigen, steigt in den letzten Jahren ständig. Dies ist auch auf ein globales Umdenken in Richtung Ökologie, einem sehr starken Holzbau in der Schweiz, aber auch auf eine über Jahrzehnte erfolgreiche zielorientierte Forschungsarbeit zurückzuführen. Der Trend erhielt in den letzten Jahren durch die Einführung von Brettsperrholz weltweit noch einen deutlichen Schub. Zahlreiche Arbeiten zu den Materialeigenschaften, dem Brandverhalten, der Klebstoffentwicklung, der Verbindungstechnik u. a. förderten diese Entwicklung. Hochhäuser in Holzkonstruktion sind heute weltweit Prestigeobjekte. So ist in Winterthur, Schweiz ein 32-stöckiges Hochhaus aus Holz mit einer Höhe von 100 m geplant.⁴

Solche Bauwerke erfordern eine visionäre Gestaltung (architektonischer Entwurf mit Berücksichtigung holzspezifischer Materialeigenschaften), Arbeiten zur Weiterentwicklung der Werkstoffe und der Technologie (Verklebung, Materialkennwerte, Brandverhalten) aber auch begleitende Forschung und Entwicklung zu Fragen der Dimensionierung und Prüfung.

Die im Vergleich zum europäischen Umfeld einfacheren gesetzlichen Regelungen sind in der Schweiz oft vorteilhaft. Der verstärkte Holzbau erfordert bei Architekten und Bauingenieuren aber auch gleichzeitig noch mehr spezifische Kenntnisse zu Holz und Holzwerkstoffen, um Baufehler zu vermeiden und die Produkte zu optimieren. Oft werden auch ergänzende Informationen zum Eurocode 5 benötigt. Insbesondere die

- ◆ immer größer werdenden Dimensionen der Bauteile,
- ◆ Materialkombinationen (Laub-Nadelholz, die teilweise Verwendung von Laubholz oder auch Nadelholz als Beschichtungsmaterial aus rein optischen Gründen) und
- ◆ eine Blockverklebung, um größere Querschnitte herstellen zu können.

Große Querschnitte führen verbunden mit einer oft extrem niedrigen relativen Luftfeuchte bei praktischer Nutzung durch die entstehenden Feuchteprofile verstärkt zu Spannungen, Rissen und Delaminierung. Es treten auch im trockenen Innenklima (Nutzungsklasse 1) Probleme auf, nicht nur in der Nutzungsklasse 3. Trocknungsrisse sind jedoch meist weniger ein statisches als ein optisches Problem.

Auch die Frage der Blockverklebung gewinnt durch die erforderliche Vergrößerung der Querschnitte zunehmend an Bedeutung. Ebenso müssen die Rahmenbedingungen bei der Fertigung der Werkstoffe, dem Transport, der Aufrichtung und auch der Nutzung der Bauten beachtet werden, um Schäden zu vermeiden (z. B. durch Regen bei der Bauphase).

Gleichzeitig hat sich in der Schweiz, aber auch im deutschsprachigen Ausland in den letzten Jahrzehnten die Forschungslandschaft im universitären oder universitätsnahen Bereich (EPFL, Empa, PSI) deutlich verändert. Dies betrifft die Ziele der Forschung und ebenso die Forschungsförderung. Die universitäre Forschung auf materialwissenschaftlichem Gebiet verschob sich weltweit sehr stark in Bereiche extremer Grundlagenforschung. Die Forschung



Lamello-Eckverbindung Foto: Lamello

auf dem Gebiet des Holzbaus ist dagegen weiterhin meist recht praxisorientiert.

Insbesondere Österreich und teils auch Deutschland haben eine sehr gute Förderung für den Bereich Holz aufgebaut. In Osteuropa wurden, meist auch mit starker finanzieller EU-Förderung, große Forschungsbereiche/Institute neu aufgebaut, teilweise parallel zu den bereits bestehenden (z. B. Slowenien, Tschechien, Ungarn, Rumänien).

Andererseits etablierten sich große Forschungseinrichtungen für Materialprüfungen (z. B. Güteüberwachung, Emissionen, insbesondere in Deutschland). Die Fachhochschulen im Bereich Holz und Holzbau wurden im deutschsprachigen Raum, insbesondere in Deutschland, sehr stark ausgebaut. Sie bieten heute wie die klassischen Universitäten Bachelor- und auch Masterstudiengänge an. Sie führen im unterschiedlichen Umfang angewandte Forschung aus (Tendenz steigend). Hinzu kamen die Berufsakademien mit ihrem dualen Studium, die durch ihre Praxisverbundenheit (die Studenten sind in einem Betrieb angestellt) einen sehr guten Zulauf haben. An osteuropäischen Universitäten verlassen viele Absolventen die Hochschule nach dem Bachelor, dieser ist an vielen westeuropäischen Universitäten nur bedingt berufsbildend (oft nur Grundstudium wie z. B. an der ETH Zürich), an den Fachhochschulen (FH) ist er hingegen berufsbildend. Der Master an der FH stellt dann meist eine Vertiefung dar.

Im universitären Bereich der Lehre und Holzforschung (hier sind typische Universitäten wie in Göttingen, Hamburg, Dresden oder die Boku in Wien gemeint) kam es in Westeuropa zu deutlichen Verschiebungen. So wurde in Göttingen und Wien die Holzforschung deutlich ausgebaut. Göttingen ist heute im Bereich der Holzmodifizierung weltweit führend. Analog verhält es sich mit der Boku in Wien, dort muss auch die

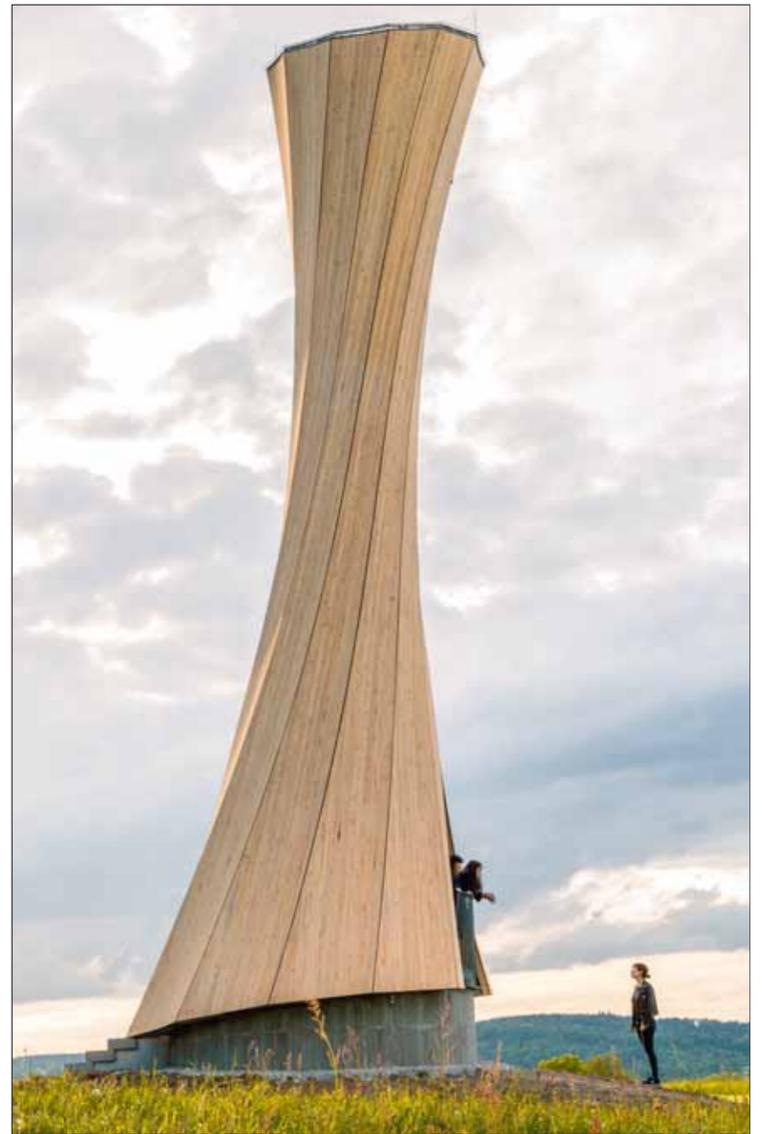
Verbindung mit Wood K Plus gesehen werden. In Wien wurde an der Boku die Anzahl der Lehrstühle im Bereich Holz stark ausgebaut. Anfang der 1990er Jahre war nur eine Professur (Prof. Dipl.-Ing. Friedrich Wassipaul, später Prof. Dr. Helmuth Josef Resch) vorhanden, die dann Prof. Dr. Alfred Teischinger bis Ende 2019 inne hatte. In der Zeit von Teischinger begann an der Boku der Ausbau des Fachbereichs Holz. Heute gibt es drei Professoren im weiteren Bereich Holzwissenschaften/Holztechnologie (Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Wolfgang Gindel-Altmutter, Dipl.-Ing. Dr. Johannes Konnerth, Dipl.-Ing. Dr. Rupert Wimmer) und zwei im Bereich Holzchemie (Dipl.-Chem. Dr. rer. nat. DDr. h.c. Thomas Rosenau und Dipl.-Chem. Dr. rer. nat. Antje Pottast). Zusätzlich gibt es Professuren im holznahen Bereichen sowie Ökonomie, Holzbau, Holzarchitektur (Nachhaltiges Gestalten und Bauen, in Ausschreibung).

An anderen Standorten, wie in Hamburg und Dresden, wurde hingegen eher reduziert. So gab es an der TU Dresden früher zwei ordentliche Professoren (Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Gerhard Kühne, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Roland Fischer) und zwei ordentliche Hochschuldozenten (seit 1993 eine Professur, Roland Fischer/heute Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ). In Hamburg waren es zwei im Bereich Holz (Prof. i. R. Dr. Arno Frühwald, Prof. Dr. Jörg B. Ressel), heute ist der Bachelor ausgesetzt, es wird an einem neuen Konzept gearbeitet. Generell ist im Bereich Holz ein Trend sinkender Studentenzahlen zu verzeichnen – genauere Angaben sind aber oft schwer verfügbar. Andererseits verzeichnete die FH Salzburg am Campus Kuchl 2022 mit mehr als 40 ein Maximum an Neuimmatrikulierten im Masterstudium (vgl. HZ Nr. 45 vom 11. November 2022, S. 773).

Industrielle Forschung in der Schweiz

Ein Großteil unserer heute genutzten Werkstoffe, Verfahren und auch Maschinen haben ihren Ursprung in der Industrie und sind auf die erforderliche Lösung von aktuellen Problemstellungen zur jeweiligen Zeit zurückzuführen. Große Maschinenhersteller, aber zunehmend auch Hersteller von Holzwerkstoffen, verfügen heute schon oft über eine konzerneigene angewandte Forschung. Dies war bereits in der chemischen Industrie seit Jahrzehnten der Fall (z. B. Klebstoffe, Lacke, Kunststoffe). In großen Konzernen der Holzindustrie werden vorhandene Produktionsdaten der Werke zusammengefasst und mit modernen Methoden zentral ausgewertet. Dies ermöglicht Vergleiche und Schlussfolgerungen für die Optimierung der Produktentwicklung und auch die Angleichung der Standorte. Die heute verfügbare Datenvielfalt in Verbindung mit moderner Rechentechnik in modernen Anlagen unterstützt diesen Trend.

Viele Entwicklungen kommen aus der Industrie (Holzindustrie, Maschinenbau, Chemie) wie 1K-PUR-Klebstoffe, Beschichtungsmaterialien, Spezialmaschinen für die Herstellung von



„Urbachtower“ – gebaut nach dem Prinzip eines Bilayers, Entwicklung M. Rüggeberg et al. ETH, Fertigung Blumer-Lehmann AG, Gossau Foto: Blumer-Lehmann

gedübeltem CLT, Vakuumpressen. Einige heute existierende Familienunternehmen im Holzbau stiegen innerhalb einer Generation vom Zweipersonenbetrieb zum Mittelständler auf. Nachfolgend einige Beispiele:

„Novopan“ – Grundlagen Spanplattenfertigung

Die Spanplattenentwicklung geht auf erste Arbeiten vor dem 2. Weltkrieg zurück. Einen maßgeblichen Anteil an der späteren erfolgreichen Umsetzung hatte Fred Fahrni (1907 bis 1970) aus Zürich als Vater der „Novopan“-Spanplatte und Pionier der Spanplattenfertigung in der Schweiz. Die Technologie wurde vom Ingenieurbüro Fahrni AG, gegründet 1951 (Stücheli & Ruch, 1964) in Zürich, ständig weiterentwickelt, das Verfahren (Lizenzen) vermarktet. Es gab in Zürich auch entsprechende Labore für Klebstoffe und die Plattenherstellung sowie Prüfung. Fahrni wurde für seine Leistungen der Ehrendokortitel der ETH Zürich verliehen.

Das Grundstück der Fahrni AG liegt im Stadtkreis 2 von Zürich zwischen der Bellaria- und der Kappelstrasse in einem Villenviertel. 1946 wurde in Klingnau das erste Spanplattenwerk der Welt eröffnet. Dem folgten mehrere andere in der Schweiz. Heute produziert nunmehr Swiss Krono in Menznau. Als letztes der „alten Generation“ wurde das Spanplattenwerk Fideris der Hiag-Gruppe im Jahr 2002 geschlossen.

Lamello – Verbindungstechnologie

Hermann Steiner (1913 bis 2005) aus Bubendorf im Liestal entwickelte linsenförmige Eckverbindungen aus verdichtetem Buchenholz für (zunächst) Spanplatten, heute weltweit bekannt unter der Marke „Lamello“. Das System wird bis heute ständig weiterentwickelt und als Kompletttechnologie angeboten. Das Grundprinzip der Verdichtung und der Nutzung des Rückquellens bei

Feuchteinwirkung wird heute z. B. bei Holznägeln aus verdichtetem Holz („Lignoloc“, Raimund Beck KG, Mauerkirchen, Oberösterreich) eingesetzt.

Hannes Nägeli (Nägeli Holz + Innenausbau, Gais) entwickelte Ende der 1990er Jahre in Zusammenarbeit mit dem Maschinenbauer Urs Steinmann (Techno Wood AG, Alt St. Johann) das „Appenzellerholz“ – ein verdübeltes Brettsperrholz, ohne Klebstoffeinsatz und der Nutzung von lokal anfallendem Holz. Aufbau, Verdübelung und Kennwerte wurden stetig optimiert, z. B. Dichtungsmaterial (Folie aus Filz). Die Fertigung startete 2005 mit vier Mitarbeitern, heute sind es 100. Aus „Appenzellerholz“ werden heute komplette Häuser gefertigt.

Auf dem Gebiet der Holzverdichtung laufen heute in der Schweiz und weltweit weitere zahlreiche Arbeiten. Einige Beispiele sind der Ersatz von Tropenholz („Sonowood“) und Kreditkarten aus Holz („Swiss Wood Cards“) von der Swiss Wood Solutions, Altdorf, sowie Arbeiten der Berner Fachhochschule (BFH) zu Uhrengehäusen. Zur kontinuierlichen Deckschichtverdichtung für Parkett wird in Schweden gearbeitet (u. a. Neyes, B. (2019); Scharf, A.; Neyes, B.; Sandberg, D. (2022)).

Bauwerk – Mehrschichtparkett

1935 brachte Ernst Göhner die Idee vom „Klötzli-Parkett“ vom Patent zur Serienreife und gründete damit 1944 die Firma Bauwerk Parkett mit Sitz in St. Margrethen (heute Bauwerk Group AG). Die Firma war früher Zulieferer für Holzteile der Fahrzeugindustrie. Göhner (1900–1971), war Pionier der Holzindustrie und gründete zahlreiche Unternehmen oder übernahm Firmen aus der Holzindustrie, die auch heute noch tätig sind (Bauwerk, Tufa/ heute Ego Kiefer AG).



Gebäude der früheren Fahrni AG um 2012 (heute als Verwaltungsgebäude genutzt), Foto: Peter Niemz

¹ Ehemals ETH Zürich, Institut für Baustoffe, Laura-Hetzner-Weg 7, 8093 Zürich, Schweiz

² Gastprofessor Luleå University of Technology, Wood Science and Engineering, Forskargatan 1, 931 87 Skellefteå, Schweden

³ Czech University of Life Sciences Prague, Department of Forestry and Biomaterials, 16500 Prague, Suchbát, Tschechische Republik

⁴ Der Fachbeitrag basiert auf einem Vortrag des Verfassers auf dem 53. „Fortbildungskurs – Holzbau heute und morgen“ am 25. und 26. Oktober 2022 in Weinfelden in der Schweiz. Der Autor dankt Charles von Büren recht herzlich für seine Hinweise und Ergänzungen.

Holzforschung in der Schweiz ausbaufähig

Fortsetzung von Seite 704

Göhner entwickelte seine Betriebe von der Schreinerei und Glaserei zum Konzern. Er war auch stark im Wohnungsbau tätig. Noch heute gibt es die Ernst-Göhner-Stiftung in Zug (ernstgoehner-stiftung.ch).

Von 1964 bis zu seinem Tod 1969 war er in der Holzforschung sehr bekannte Prof. Dr. Rudolf Keylwerth (früher Mitarbeiter bei F. Kollmann an der Reichsanstalt für Holzforschung in Eberswalde, später Leiter der holztechnologischen Abteilung am heutigen Thünen-Institut in Hamburg (damals noch Reinbek) Leiter der Forschung und Entwicklung bei Bauwerk. In dieser Zeit führte er zahlreiche Untersuchungen durch: zum Sorptionsverhalten von Parkettholz, zur Quellung/Schwindung aber auch zum, durch Temperaturdifferenzen initiierten Feuchtetransport in Parkett und Türen, einer Thematik, die heute wieder zunehmend an Bedeutung gewinnt (z. B. bei unzureichender Beschattung im Fenster- oder Türbereich).

Microtec – Entwicklungen zu Holzsortierung

Ludwig von Tetmajer führte bereits 1885 an der Empa umfangreiche Versuche zum Knickverhalten von Holz durch (Tetmajer, 1884). Er erweiterte damit den Ansatz von Euler. Emil Staudacher führte 1936 an der ETH Zürich im Rahmen seiner Dissertation Untersuchungen zu den Eigenschaften von Bauholz durch.

Die Holzsortierung gewann international, insbesondere in Deutschland in den 1980er Jahren an Bedeutung. Hervorzuheben sind u. a. Arbeiten von Peter Glos, TU München (Glos, 1982). Auch in der Schweiz wurden ab Ende der 80er-Jahre umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Dazu liefen Arbeiten mit Ultraschall an der EPFL (Sandoz, 1990), (Sandoz, JL, 1993), (Leitung Prof. Julius Natterer) und später an der ETH Zürich (Leitung Prof. Ernst Gehri, Dissertation Rene Steiger (Steiger, 1996). Sandoz entwickelte ein spezielles Gerätesystem „Sylvatest“, das noch heute hergestellt und eingesetzt wird. Die Arbeiten zur Sortierung wurden auch später an der ETH fortgeführt z. B. Fink, 2014. Letztendlich führte al-

les dazu, dass heute industriell verfügbare Systeme bereitstehen (z. B. Microtec Srl, Brixen).

Zu Laubholz wurden in der Schweiz und insbesondere an der TU Graz (z. B. Hübner, 2013) und der TU München zahlreiche Arbeiten durchgeführt. Für die industrielle Reife waren umfangreiche Großversuche notwendig. Pionierarbeit auf dem Gebiet leistete Peter Glos von der TU München.

Brettstapelelemente und -sperrholz

Die Idee der Brettstapelelemente wurde zunächst von Julius Natterer entwickelt (genagelte Elemente). Später entwickelte Alois Tschopp (Tschopp Holzbau AG, Hochdorf) mit „Bresta“ ein System für verdübelte Holzelemente. Heute werden nach dem Grundprinzip vielfach gedübelte (verschiedene Arten der Holzverdichtung), genagelte und geklebte Elemente gefertigt.

Brettsperrholz wurde Anfang der 1990er Jahre insbesondere in Deutschland und Österreich entwickelt. Gerhard Schickhofer promovierte 1994 an der TU Graz zu Brettsperrholz, er erhielt 2019 dafür den „Marcus Wallenberg Preis“. In der Schweiz fertigt seit 1994 die Pius Schuler AG Brettsperrholz nach einer speziellen Technologie, die aus der Tischlerplattenfertigung abgeleitet wurde.

Die Schilliger Holz AG begann ihre Fertigung im Jahr 1999 mit einer Anlage in Haltikon. Nach dem Großbrand 2017 wurde eine neue, hochautomatisierte Anlage aufgebaut. Schilliger zählt heute europaweit zu den führenden Herstellern. Das Unternehmen wurde 1861 gegründet und ist Familienbetrieb in fünfter Generation. Gefertigt wird heute an drei Standorten in Haltikon (Schwyz), Perlen (Luzern) und in Volgelsheim im Elsass. Unter Ernest Schilliger, dem derzeitigen Geschäftsführer, wurden sehr viele neue Technologien eingeführt. Geplant ist aktuell eine Anlage für Faserdämmplatten nach dem Trockenverfahren.

Auch Prof. Ernst Gehri arbeitete an der ETH an der BSP-Herstellung. Die Tschopp Holzindustrie AG, Buttisholz, fertigt seit 1958 Schalungsplatten aus Vollholz, die Fertigung wurde ständig

ausgebaut, das Produkt optimiert. Hermann Blumer entwickelte kastenförmige Elemente mit zahlreichen Funktionen (Schallschutz, Wärmeschutz usw., heute Lignatur, Waldstatt). Auch hinsichtlich Verbindungstechnik wurden unter Leitung von Blumer sehr erfolgreiche Entwicklungen durchgeführt (z. B. „BSB“). Herman Blumer ist Honorarprofessor an der FH Aachen.

Holzbau

Julius Natterer (1938 bis 2021) war von 1978 bis 2005 Professor an der EPFL Lausanne und leitete dort den Studiengang Holztechnik und Architektur und das Institut für Holzkonstruktion Ibois. Natterer war ein wesentlicher Impulsgeber für den Schweizer Holzbau. Es wurden zahlreiche wegweisende Gebäude in Holzkonstruktion auf Basis seiner Ideen entwickelt und errichtet. An der ETH war Prof. Mario Fontana einer der Pioniere der Arbeiten zum Brandverhalten von Holz in der Schweiz. Zahlreiche Schweizer Holzbaubetriebe (z. B. Blumer-Lehmann, Neue Holzbau Lungern) setzen mit innovativen Bauten neue Maßstäbe, die durch Entwicklungen in der Verklebungstechnik, Verbindungstechnik und Fertigungstechnik möglich wurden (insbesondere auch Freiformbauten mit 3D-Modellierung).

Collano – Entwicklungen zur Holzverklebung

Auch bei der Entwicklung von 1K-PUR-Klebstoffen kamen wesentliche Impulse aus der Schweiz. Unter der Marke „Purbond“ entwickelte die Collano AG, Sempach Station, 1988 einen 1K-PUR-Klebstoff für Holz in der Schweiz. 1994 erhielt „HB 110“ eine Zulassung für die Verklebung in Deutschland. 2003 gründeten Collano und National Starch and Chemical das Gemeinschaftsunternehmen Purbond. Seit 2008 bzw. 2011 gehört Purbond zur Henkel AG & Co. KGaA, Düsseldorf. Die Systeme werden heute unter dem Namen „Loctite Purbond“ vertrieben. Walter Stampfli, Joseph Gabriel und Carlos Ammen waren wesentlich an der Entwicklung beteiligt. Henkel fertigt heute 1K-PUR für Flächen- und Keilzinkenverklebung, 2K-PUR für eingeklebte Gewindestangen und Klebstoffe für die Stirnverklebung (TS3). Henkel gehört zu den Weltmarktführern im Klebstoff-



Verdichtetes Holz: Produktbeispiele von Swiss Wood Solutions

Werkfotos

bereich. Auf diesem Gebiet gab es stets eine intensive Zusammenarbeit von Henkel mit Forschungseinrichtungen in der Schweiz und weltweit.

2K-PUR wird heute auch für die stirnseitige Verklebung von Platten eingesetzt. Die Timber Structure Technologie TS 3.0 (TS3) wurde unter Leitung von Stefan Zöllig in Zusammenarbeit mit BFH und ETH entwickelt. Es ist ein sehr gutes Beispiel für eine sehr innovative Entwicklung, mit industrieller Umsetzung. Auch die Entwicklung der „Stabbuche“ (Fagus Suisse SA, Les Breuleux, zusammen mit der BFH) ist ein gutes Beispiel.

Gemeinsam ist nahezu allen Beispielen eine sehr gute Idee, verbunden mit industrieller Forschung/Entwicklung und ein hervorragendes unternehmerisches Gefühl und Können, oft von ausgewählten Führungspersonen.

Lehre und Forschung in Hochschulen der Schweiz

Neue Produkte benötigen angewandte Forschung und Entwicklung, aber auch visionäre Vorarbeiten zum Erkenntnisgewinn. Im Idealfall entsteht auch ein Spin-off, das die Idee weiterführt und umsetzt. Beispiele sind die Myco Solutions AG, St. Gallen, und Swiss Wood Solutions AG, Altdorf. Typisch für die Forschungslandschaft ist, dass gewisse Themen in Zyklen von 20 bis 30 Jahren natürlich auf verändertem (höheren) Niveau wiederkehren. So gab es bereits in den 1960er Jahren sehr umfangreiche Arbeiten zur Holzmodifizierung, die in einem Bericht von Burmester (1970) prägnant zusammengefasst sind (Burmester, 1970).

Ähnliches trifft auch auf das sogenannte „Mykohol“ zu (Luthardt, 1958). Erste Arbeiten führte Luthardt in Steinach/Deutschland in den 1950er Jahren durch. Noch heute ist die gleiche Thematik aktuell (Stange und Wagenführ, 2022). Sehr gut trifft das auch auf Thermoholz zu. Das von Giebler (DeGussa) 1983 publizierte Verfahren der Modifizierung im Autoklav setzte die Balz Holz AG unter Leitung von Rudolf Balz in Langnau 2001 um. Die Fertigung erfolgt noch heute. Neben thermisch modifiziertem Holz werden auf der Anlage auch „Baladur“ (Fichte mit Altholzcharakter) und Eiche druckgedämpft als Ersatz für geräucherte Eiche hergestellt. Der Markt für reines thermisch modifiziertes Holz ist jedoch nach wie vor relativ gering.

ETH

Die Schweizer Holzforschung hatte ihren Ursprung an der ETH Zürich in den Forstwissenschaften und in der Biologie. Nägeli publizierte 1858 die Mecelltheorie, Albert Frey-Wyssling (1900 bis 1988) forschte zur Zellwand. Ein wichtiger Vertreter aus dem Bereich Forstwissenschaften war Hermann Knuchel (1884 bis 1964), der zu Holzfehlern arbeitete und publizierte. Ihm folgte Hans Heinrich Bosshard (1925 bis 1996), der insbesondere durch sein dreibändiges Buch zur Holzkunde be-

kannt wurde. In der Zeit waren zudem Prof. Dr. Mihály Bariska und Rudolf Popper sehr aktiv im Bereich Holzphysik, Modifizierung und auch Holzbiologie. Nach Bosshards Pensionierung wurde Ernst Gehri von 1990 bis 1999 Professor für Holztechnologie an der Fakultät Forstwissenschaften (2022 wurde Gehri die Ehrendoktorwürde der TU Graz verliehen) sowie Ladislav J. Kucera (1942 bis 2000) Professor für Holzwissenschaften zwischen 1994 und 2000. Es bestanden also zeitgleich zwei Professuren im Holzbereich.

Nach Auflösung der Forstfakultät wurde die materialkundliche Forschung im Bereich Holz ab etwa 2002 unter Leitung von Prof. Peter Niemz (2000 bis 2015, Professur für Holzphysik) in das Institut für Baustoffe des D-BAUG integriert (Institutsleiter damals Jan G. van Mier). Dort ist seit 2011 auch die Process Wood Material Science angeschlossen (Prof. Dr. Ingo Burgert). Diese wird von der ETH und der Empa getragen.

Burgert ist zudem an der Empa als Gruppenleiter tätig. Der Fokus seiner Arbeiten ist die Zellwandforschung, die Funktionalisierung von Holz. Es werden ausgewählte materialwissenschaftliche Arbeiten realisiert, z. B. zur Verklebung, Oberflächenhandlung und unter Leitung von Falk Wittel Arbeiten zur Modellierung und zum Kriechverhalten. Auch Arbeiten zu speziellen Werkstoffen (Prinzip des Bilayers) wurden durchgeführt (Prof. Markus Rüggeberg, heute TU Dresden).

Zusätzlich wurde im Institut für Baustatik und Konstruktion 2010 die Professur Holzbau (Andrea Frangi) geschaffen. Damit wurde im D-BAUG der ETH Zürich insgesamt das Holz aufgewertet als Einheit von Materialforschung und Holzkonstruktion. Der Fokus der Arbeiten von Frangi liegt im experimentellen Bereich des Holzbaus (u. a. Brandverhalten, Bauteilprüfung). Eine kurze Übersicht zur Entwicklung der Holzforschung in der Schweiz ist in Niemz (2009) detailliert beschrieben.

An der EPFL Lausanne war bis 2004 eine starke Holzforschung im Bereich des Holzbaus (einschließlich Architektur) vorhanden. Am Ibois bestanden die Professuren von Julius Natterer und die Assistenzprofessur von Jean-Luc Sandoz. Letztere wurde nicht nachbesetzt. Zusätzlich war im Bereich Materialwissenschaft Parvic Navi von 1989 bis etwa 2009 sehr aktiv tätig (Arbeiten zur Mikromechanik, Kriechen, Holzverdichtung). Die Breitenwirkung war sehr hoch, auch die Arbeiten von Navi sind international sehr geschätzt. Seit 2004 ist Yves Weinand Professor und Leiter des Ibois. Er ist insbesondere im Entwurf von Holzkonstruktionen tätig.

Empa Dübendorf, St. Gallen, Thun

An der Empa wird seit 1936 am Werkstoff Holz geforscht. Erste Abteilungsleiter waren Emil Staudacher (1897 bis 1977), später folgten Hellmut Kühne (1911 bis 1989), Jürgen Sell

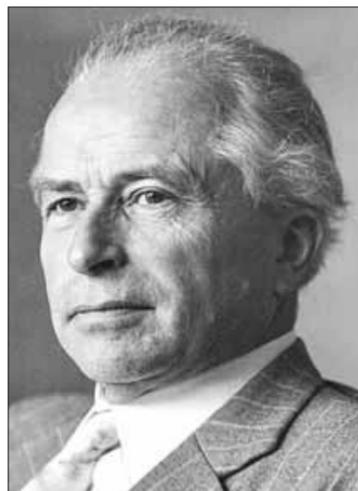
Fortsetzung auf Seite 706



Rudolf Keylwerth (1912–1969)



Hermann Steiner (1913–2020)
Foto: Lamello AG



Albert Frey-Wyssling (1900–1988)
Foto: ETH



Ernst Göhner (1900–1971),
Foto: Göhner-Stiftung, Zug



Fred Fahrni (1907–1970)
Foto: Peter Fahrni



Hans-Heinrich Bosshard (1925–1996),
Foto: ETH

Holzforschung in der Schweiz ausbaufähig

Fortsetzung von Seite 705

(1939 bis 2020), Klaus Richter (2003 bis 2011) und danach Tanja Zimmermann (seit 2022 Direktorin der Empa und Professorin an der ETH und der EPFL). Die ersten Abteilungsleiter (Staudacher, Kühne) waren Bauingenieure. Ihnen folgten drei Holzwirte aus Hamburg und jetzt ist es ein Physiker.

Auch Jürgen Sell hatte zumindest in den früheren Jahren einen gewissen Fokus seiner Arbeiten auf den Einsatz des Holzes im Bauwesen (Oberflächenbehandlung) gerichtet. Er promovierte 1984 an der ETH Zürich zum sehr praxisnahen Thema „Physikalische Vorgänge in wetterbeanspruchten Fenster- rahmen aus Fichtenholz“ bei Hans-Heinrich Bossard an der damaligen Forstabteilung der ETH Zürich.

1996, als der Autor seine Tätigkeit an der ETH begann, gab es an der Empa noch die beiden Abteilungen Holz (Prof. Jürgen Sell) und Biologie (Holzschutz, Dr. Erwin Graf). Die Abteilung Biologie war im Holzschutz zu jener Zeit führend. Sie wurde nach Graf's Pensionierung geschlossen und der Holzschutz als Gruppe in die Holztechnologie integriert (Leitung: Prof. Francis Schwarze). Auch dort erfolgte aber eine Neuausrichtung.

Die Empa wurde etwa ab dem Jahr 2000 von der Prüfanstalt mit vielen fest angestellten Mitarbeitern zur Materialforschungsanstalt mit starker Grundlagenorientierung, gemeinsamen Professoren mit der ETHZ/EPFL und sehr vielen Doktoranden umgebaut. Der Anteil fest angestellter Mitarbeiter wurde reduziert. Die Empa hat heute eine ähnliche wissenschaftliche Ausrichtung wie die ETH. Heute ist Gustav Nystrom Leiter der Abteilung Cellulose & Wood Materials, die aus der Holzabteilung nach Wechsel von Tanja Zimmermann in die Direktion hervorging. Die Abteilung Cellulose & Wood Materials hat folgende Forschungsgruppen:

- ◆ Cellulose Biohybrids (Gustav Nystrom)

- ◆ Bio Engineered wood (Francis Schwarze)

- ◆ Wood Tec (Ingo Burgert, Marc Schubert)

Zusätzlich sind in der Abteilung Ingenieurstrukturen Rene Steiger und Pedro Palma tätig, mit bauorientierter Forschung und Erfahrungen. Es erfolgt eine enge Zusammenarbeit mit der ETH. Diese Gruppe wurde aus der Holzabteilung ausgegliedert.

BFH Biel

Biel wurde in den letzten Jahrzehnten sehr stark ausgebaut, insbesondere die Forschung. Um 1996 war es noch eine kleine Einheit mit Balz Gfeller (in Lehre und Forschung). Heute hat die Forschung rund 130 Personen, der Drittmittelanteil liegt bei 8,7 Mio CHF, davon 50 % Innosuisse, 27 % Bundesämter, ein Teil der Mittel kommt aus Zuwendungen von Stiftungen und Direktmandaten.

Im Holzbereich gibt es die Institute:

- ◆ Werkstoffe und Holztechnologie (Frederic Pichelin),

- ◆ Holzbau, Tragwerke und Architektur (Martin Geiser) und

- ◆ Digitales Bauen und Holzwirtschaft (Norbert Winterberg).

Die Bearbeitung der Projekte an der BFH erfolgt überwiegend durch befristet angestellte Mitarbeiter, vielfach auch durch Masterstudenten mit Teilzeitanstellung über die Projekte. Es gibt aber auch wenige festangestellte technische und wissenschaftliche Mitarbeiter (meist Professoren, Kompetenzbereichsleiter).

Genereller Trend

War Anfang der 1990er Jahre die Fachsprache noch meist deutsch (siehe auch Titel der Zeitschriften: wie „Holz als Roh- und Werkstoff“, heute „Europ. Journal of Wood and Wood Products“, „Holzforschung“ heute „Wood Research and Technology – Holzfor- schung“), kommen heute viele neue Zeitschriften auf rein materialwissen- schaftlichem Gebiet hinzu, die wegen ihres höheren Impactfaktors oft auch von Wissenschaftlern aus dem Holzbe- reich bevorzugt werden. Weltweit wird

seit Jahren auf ein hohes Ranking der Universitäten, viele Publikationen und einen hohen Hirsch-Faktor (h-Faktor) fokussiert. Dieser ist aber von Fachgebiet, Zeitschrift und Größe des Leserkreises abhängig. Viele Autoren aus dem Holzbereich weichen daher auf Zeitschriften mit höherem Ranking aus.

Die Tabelle zeigt die Entwicklung der Publikationen am Beispiel der Zeitschrift „Wood Science and Technology“. Die Anzahl an Publikationen stieg sprunghaft an, auch die Zahl der Autoren. Ebenso veränderte sich die Länderstruktur sehr stark. Heute kommen die meisten Publikationen aus China, auch viele mit sehr hoher Qualität.

Der beschriebene Trend gilt weltweit, z. B. an Universitäten und Instituten des ETH-Bereichs sowie der Max-Planck- und Helmholtzgesellschaft in Deutschland. Die Zahl der Publikationen und der Autoren stieg drastisch. Es ist daher heute oft schwer, noch die Übersicht zum aktuellen Wissenstand zu bewahren. Ein Werk wie F. Kollmann „Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe“, Springer (1952) wäre in der Vollständigkeit der Darstellung des Wissensstandes heute unmöglich.

Angewandte Forschung – Materialprüfungen

Angewandte Forschung wird in der Schweiz überwiegend an Fachhochschulen, in Deutschland an den Fraunhofer-Instituten, Forschungsinstituten wie WKI in Braunschweig, IHD in Dresden und den Materialprüfanstalten durchgeführt. Materialprüfanstalten erzielen einen großen Teil ihres Umsatzes durch Prüfaufträge (oft 50 % und mehr) und brauchen dazu auch permanentes Personal mit viel Erfahrung. Andere Institute werden weitgehend vom Staat finanziert (z.B. Thünen-Institut für Holzfor- schung sowie Thünen-Institute im Bereich Wald weitgehend durch Landwirtschaftsministerium). Aber auch diese haben Drittmittelprojekte und Doktoranden.

Der Schweiz fehlt derzeit etwas die angewandte Materialforschung und eine Güteüberwachung mit mehr fest angestellten Mitarbeitern, die Erfahrungen über Jahre generiert haben. Dies war früher die Stärke der Empa. Die FH Biel deckt heute einen Teil davon ab. Die folgende Übersicht zeigt Holzfor- schungsinstitute im deutschsprachigen Ausland:

IHD in Dresden
~150 Mitarbeiter
13,8 Mio Euro Umsatz

WKI in Braunschweig
~160 Mitarbeiter
15,3 Mio Euro Umsatz

Holzforchung Austria in Wien
~100 Mitarbeiter
7,4 Mio Euro Umsatz

Zum Vergleich: Die BFH in Biel beschäftigt 130 Mitarbeiter, die jedoch teilweise auch aus der Lehre finanziert werden, d.h. nur bedingt vergleichbar mit den o.g. Einrichtungen ist. Von den 7,8 Mio CHF Umsatz wurden zuletzt 50 % über Innosuisse, 27 % über die Bundesländer, Bundesämter und weitere Mittel über Stiftungen oder/und Prüfaufträge generiert.

Ein sehr gutes Beispiel mit sehr guter Breitenförderung im Bereich Holz ist Österreich mit Wood K plus. An der Boku in Wien gibt es mehrere Lehrstühle in Materialwissenschaften „Holz“, Holzchemie, Betriebswirtschaft. Derzeit läuft die Besetzung von drei neuen Stiftungsprofessuren im Bereich Holz: an der TU Wien, Boku Wien und in Innsbruck. Zudem werden in Österreich aktuell zusätzliche Mittel für Forst und Holz in Höhe von 60 Mio. Euro im Rahmen der Initiative „Mit Holz unsere Zukunft nachhaltig gestalten“ bereitgestellt.

Große Projekte werden in Deutschland von der AIF (Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschung) und der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) vergeben, zudem gibt es die Deutsche Forschungsgesellschaft DFG

für Grundlagenforschung – analog SNF in der Schweiz.

Tendenziell gibt es in Deutschland und Österreich mehr angewandte Forschung als in der Schweiz. Auch die universitären Einrichtungen haben oft einen Teil angewandter Forschung mit hohem Praxisbezug.

In der Schweiz gibt es für die Grundlagenforschung den Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (SNF). Vornehmlich werden hier aber Projekte der Eidgenössischen Technischen Hochschulen und deren Institute finanziert. Die Förderung von Empa, Paul-Scherer-Institut (PSI), Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und insbesondere der Berner Fachhochschule (BFH) ist eher eine Ausnahme. Vom Bundesamt für Umwelt (Bafu) werden gewisse Projekte im Bereich Forst- und Holz gefördert. Innosuisse fördert eine Zusammenarbeit zwischen Hochschulen und Industrie; ein hoher Anteil der Forschung an den Fachhochschulen wird darüber finanziert. Zunehmend nutzen auch ETH, EPFL (École polytechnique fédérale de Lausanne) sowie Empa und PSI Innosuisse-Projekte als Finanzierungsquelle für Dissertationen.

Sehr gute Beispiele für erfolgreiche Innosuisse-Projekte sind: TS3 (Stefan Zöllig), Stabbuche (Fagus Suisse, zusammen mit BFH Biel), der Urbachtower (ETH Zürich zusammen mit Fa. Blumer Lehmann) sowie viele Projekte der ETH, Empa und BFH zur Verklebung (oft gemeinsam mit Henkel, Collano, Jowat). Auf diesem Gebiet laufen aktuell an der BFH auf dem Campus sehr viele Projekte.

Offene Fragestellungen für die Materialforschung

Insgesamt kann man sagen, dass die Schweizer Forschungslandschaft im Bereich der Vorlauforschung (Funktionalisierung von Holz, Nanofibrillen) sehr gut aufgestellt ist und weltweit zu den führenden Ländern zählt, siehe z. B. (Chen, et al., 2022). Hier gibt es auch über SNF recht gute Förderportale und international vernetzte Projekte. Das Gebiet wird weitgehend von ETH, Empa und teilweise auch vom PSI (Neutron Imaging, Synchrotron-Strahlung) abgedeckt. Die Schweiz ist hier personell und technisch sehr gut ausgestattet. Auch international erfolgt eine Kooperation auf hohem Niveau. Das gilt teilweise auch für den Bereich der Produktentwicklung im Rahmen von Innosuisse-Projekten. Hier gibt es viele erfolgreiche Projekte mit der Industrie (BFH Biel, Empa, ETH (Professuren Holzbau, Holzbasierte Materialien)).

Die Fragen der Verklebung und der holzphysikalischen Forschung haben noch Ausbaupotenzial, obwohl auch dort ausgewählte Projekte laufen. Das ist sicher auch mit Veränderungen im Bereich der Klebstoffhersteller in den letzten Jahren zu begründen (z.B. Schließung von Firmen, Konzentration der Forschung in Deutschland). Etwas angewandte Forschung läuft im Bereich Verklebung (ETH, Empa, BFH). Aber auch dort ist die Tendenz derzeit eher etwas rückläufig. International wird die Thematik wieder verstärkt bearbeitet, das zeigt die Anzahl der Publikationen.

Die verfügbaren personellen und materiellen Ressourcen für solche angewandten Arbeiten sind in der Schweiz deutlich geringer als z. B. in Österreich (bei vergleichbarer Einwohnerzahl), wo z. B. ein großes Projekt zur Kennwertermittlung von Holz im Fahrzeugbau läuft (derzeit Wood Car 2, Dr. U. Müller). Auch in Deutschland wurde 2022 ein Verbundprojekt nahezu aller Forschungseinrichtungen Deutschlands zu Kennwerten von Holz und Holzwerkstoffen (Holz im Maschinenbau, Leitung Klaus Richter, TU München) abgeschlossen. Es muss allerdings die unterschiedliche wirtschaftliche Bedeutung des Holzes in beiden Ländern gesehen werden. Insbesondere in Österreich hat Holz einen sehr hohen gesamtwirtschaftlichen Stellenwert.

Hervorzuheben ist im Bereich der holzphysikalischen Forschung ein SNF-Projekt von Dr. Falk Wittel, ETH, zum Kriechverhalten von Holz (drei Dissertationen). Weit fortgeschritten ist an der ETH (F. Wittel) die Thematik der

Publikationen in »Wood Science Technology«

(G. Wegener, Paris 2016, 50 Jahre IAWs), (Wegener, 2016)

	Zahl der Länder	Länderranking nach Autorenanzahl	
1967/vol. 1	9	1. USA 2. Deutschland	
2015/vol. 49	27	1. China 2. Japan	
	Artikel	Autoren	Autor/Artikel
1967/vol. 1	30	41	1,4
2015/vol. 49	80	329	4,1

Modellierung von Spannungen im Holz. Dies erfordert aber auch stetig eine Aktualisierung der Materialkennwerte. Hier müssen einfachere Rechenmodelle entwickelt werden, die z. B. auf einem PC nutzbar sind. Daran wird auch gearbeitet.

Forschung im Materialbereich läuft an der ETH Zürich auch bei Andrea Frangi (Brandverhalten, Gebäudeevaluierung im Innenbereich, z. B. BFH Biel).

Folgende technische Fragen gilt es – unabhängig von der Art der Finanzierung – zu lösen:

- ◆ Weitere Optimierung „neuer Werkstoffe“ (BSH aus Laubholz, BSP, Materialverbunde), die noch nicht so viel erforscht sind (z. B. Rissbildung im Trockenklima, Modellierung und Optimierung der mechanischen Eigenschaften, des Wärmetransports, des Feuchte- transports, Alterungsverhalten z. B. von Klebverbindungen), optischer und funktioneller Holzschutz für Holzeinsatz außen und innen. Hier laufen auch Arbeiten an der BFH in Biel (Franke et al., 2019).

- ◆ Optimierung des Laubholzeinsatzes (z. B. Verstärkung, Nutzung optischer Eigenschaften und dünne Decklagen aus Laubholz), neue Nutzungsformen des Laubholzes wie chemische Nutzung, Funktionalisierung, Partikelwerkstoffe. Die Preise für Brettschichtholz aus Laubholz sind heute noch sehr hoch (viele Anpassungen notwendig, Laubholz ist heute oft noch eher ein Nischenprodukt für Gebäude mit „Möbelcharakter“ und eine spezielle Kundschaft).

- ◆ Ermittlung zuverlässiger Kennwerte für das Langzeitverhalten (Werte in Eurocode 5) zum Kriechen, Dauerstandfestigkeit, Ermüdung durch dynamische Belastung (auch geklebte Werkstoffe wie BSP, BSH). Zumeist fehlen neuere Arbeiten (Niemz & Sonderegger, 2021)

- ◆ Feuchteverteilung und Spannungsverteilung in großen Querschnitten z. B. bei Hochhäusern, Fragen der Rissbildung und Delaminierung. Hier handelt es sich um sehr langwierige Prozesse, die Feuchteaufnahme oder Abgabe aus der Luft erfolgt durch Diffusion und ist extrem langsam (Einfluss Klebfugen, Aufbau der Werkstoffe). Ziel muss die Vermeidung oder Reduzierung der Rissbildung und Delaminierung sein (siehe Niemz, 2022, und Angst-Nicollier, 2012). Es muss nach Lösungswegen wie Oberflächenbehandlung, angepasste Holzfeuchte bei der Fertigung, Ausgleichsschichten für den Spannungsabbau gesucht werden. Ebenso die Erfassung, Erkennung, Behandlung von Wasserschäden und Brandschäden in großen Gebäuden, aber auch Schäden durch trockenes Klima (funktionalisierte Klebstoffe, in situ Messungen an Gebäuden)

- ◆ Entwicklung biobasierter Klebstoffe, Funktionalisierung der Klebstoffe (z. B. Nutzung zum Nachweis von Rissbildung, Feuchtemessung) und auch schrittweise der Werkstoffe (vielleicht ist ein erster praktischer Schritt über die Beschichtung), siehe z. B. dazu (Winkler, 2022), (Dreimohl, et al., 2022), transparentes Holz (siehe Wikipedia), Mineralisierung (Arbeiten ETH I. Burgert und BFH T. Volkmer).

Generell muss man sagen, dass in der Schweiz in den letzten Jahrzehnten eine deutliche Reduzierung der Holzindustrie erfolgte. Dies betrifft Holzwerkstoffe (Span- und Faserdämmplatten), Furnier, Sperrholz, die Zellstoffherstellung. Einige wenige vergrößerten sich (Swiss Krono, Schilliger Holz). Im Holzbau und bei speziellen Werkstoffen wie CLT kam es hingegen zu einem Ausbau. Hier

gibt es große und auch international agierende Unternehmen, wie beispielsweise die Renggli AG.

Literaturverzeichnis

- Anonym 2021. Reich mit Holz. 160 Jahre Schilliger Holz. Handelszeitung, 49. S. 51-52
- Angst-Nicollier, V., 2012. Moisture induced stresses in glulam. Trondheim: Diss. Norwegian University of Science and Technology, NTNU-Trondheim.
- Burmester, A., 1970. Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit. Grundlagen und Vergütungsverfahren, Bericht No.4. Berlin: BAM.
- Chen, C. et al., 2022. Structure-property-function relationships of natural and engineered wood. Nature Reviews: Materials, Band 5, pp. 642-666.
- Dreimohl, C. et al., 2022. Sustainable wood electronics by iron-catalyzed laser-induced graphitization for large-scale applications. Nature Communications, Band 13:5680, pp. 1-12.
- Fink, G., 2014. Influence of varying material properties on the load-bearing capacity of glued laminated timber. Zürich: Diss., ETH Zürich.
- Franke, B.; Franke, S.; Schiere, M.; Müller, A. 2019. Moisture content and moisture-induced stresses of large glulam members: laboratory tests, in-situ measurements and modelling Wood Material Science & Engineering, 14(4), S. 243-252.
- Giebler, 1985. Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/Druck-Behandlung. Holz. Holz als Roh- und als Roh- und Werkstoff, Band 41, pp. 87-94.
- Glos, P., 1982. Die maschinelle Festigkeitsortierung von Schnittholz. Holz-Zentralblatt, Band 108, pp. 153-155.
- Hou, J., Nolan, G. & Taoum, A., 2002. Bibliometric and visualization study of Glulam research: overview and global research trends over the 10-year period (2011-2020). THE 65TH SWST International Convention. Kingscliff, NSW, Australia, s.n.
- Hübner, U., 2015. Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile. Graz: Diss., Technische Universität Graz.
- Kühne, H., 1979. 70 Jahre geleimte Holztragwerke in der Schweiz. Schweizer Ingenieur und Architekt 97: pp. 577-595
- Luthardt, W., 1958. Was ist Myco- Holz. Steinach: Eigenverlag.
- Niemz, P., 2022. Rissbildung bei BSH und BSP in Innenräumen. Holz Zentralblatt, Band 26, pp. 427-429.
- Niemz, P. & Sonderegger, W., 2021. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Auflage, München: Hanser Verlag.
- Niemz, P. 2009. Historischer Überblick und heutiger Stand von Lehre und Forschung im Bereich Holz. Schweiz Z Forstwes 160 :4: 95-104
- Neyes, B. (2019). Surface densification of solid wood. Paving the way towards industrial implementation, Dissertation, Luleå University of Technology.
- Sandoz, J.L., 1993. Grading of construction timber by ultrasound. Wood sci. and Technology. Wood Sci. and Technology, Band 27, pp. 373-380.
- Sandoz, J., 1990. Triage et fiabilité des bois de construction. Validité de la méthode ultrason (Dissertation). Lausanne: EPFL.
- Sell, J. 1984. Physikalische Vorgänge in Wetterbeanspruchten Fensterrahmen aus Fichtenholz. Dissertation ETH Zürich
- Scharf, A.; Neyes, B.; Sandberg, D.: Hardness of surface-densified wood. Part 1: material or product property?. Holzforschung, vol. 76, no. 6, 2022, pp. 503-514.
- Schickhofer, G., 1994. „Starrer und nachgiebiger Verbund bei geschichteten, flächenhaften Holzstrukturen“ Dissertation, TU Graz.
- Stange, S. & Wagenführ, A., 2022. 70 years of wood modification with fungi. Fungal Biology and Biotechnology, 9(7), pp. 2-6.
- Staudacher, E., 1936. Der Baustoff Holz. Beiträge zur Kenntnis der Materialeigenschaften (Dissertation). Zürich: ETH.
- Steiger, R., 1996. Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierter M/N Beanspruchung: Sortierung von Rund- und Schnittholz mittels Ultraschall. Zürich: Diss., ETH Zürich.
- Stücheli, W.; Wartmann J.P. und Rüch, J., 1964. Fahmi Institut AG. Schweizerische Bauzeitung, 85(37), pp. 648-650.
- Tetmajer, L., 1884. Methoden und Resultate der Prüfung der Schweizerischen Bauhölzer. Zürich: Mitteilungen Anstalt für Prüfung von Baumaterialien, Eidgenössisches Polytechnikum.
- Wegener, G., 2016. Science and use of wood in a changing world (Scientific lecture IAWs 1966-2016). Paris, 2. Juli 2016, IAWs.
- Winkler, C., 2022. Process and material features influencing piezoresistive wood adhesives, Diss. Boku Wien, 2021