

# 1

## Einführung

Holz gehört neben Kohle, Erdöl und Erdgas zu den wichtigsten auf der Erde vorkommenden Rohstoffen. Seine wirtschaftliche Bedeutung verdankt es der Existenz von großen, über das Festland der Erde verteilten Wäldern und anderen Gehölzformationen, die Holz in mehr oder weniger großen Mengen erzeugen und bevorraten (akkumulieren).

Gegenwärtig sind rund 31 % des Festlandes der Erde, das sind  $4000 \cdot 10^6$  ha, von Wäldern und anderen Gehölzformationen bedeckt. Weitere  $1100 \cdot 10^6$  ha sind andere Gehölzformen (9 %) (Schmithüsen, et al., 2014). In den Wäldern der Erde sind etwa  $1000 \cdot 10^9$  t Phytomasse (lebendes pflanzliches Material) – angegeben als organische Trockensubstanz – akkumuliert, wobei jährlich  $50 \cdot 10^9$  t zuwachsen. Dabei werden jährlich  $24 \cdot 10^9$  t Sauerstoff an die Atmosphäre abgegeben ((Steinlin, 1979) und (Thomasius, 1981)).

Wie aus Tabelle 1.1 hervorgeht, entfallen mehr als die Hälfte der Fläche (52 %), des Vorrates (56 %) und des jährlichen Zuwachses (62 %) auf Wälder in den tropischen und subtropischen Gebieten der Erde. In diesen Gebieten haben die Kleinlaubwälder, Dornbusch- und Hartlaubgehölze, Baum- und Strauchsavannen zwar einen hohen Flächenanteil, ihre Vorrats- und Zuwachswerte sind jedoch gering. Überdurchschnittlich ist die jährliche Stoffproduktion dagegen in den immergrünen tropischen Breitlaubwäldern, wo Werte von 30 bis 35 t organische Trockensubstanz je Jahr und Hektar (im Mittel 20,6 t/a und ha) erreicht werden und bis zu 400 – 600 t organische Trockensubstanz je Hektar akkumuliert sein können.

Nur etwa 22 % der Gesamtwaldfläche der Erde entfallen auf die gemäßigten Gebiete, wobei die immer- und sommergrünen Breitlaubwälder sowohl den dominierenden Anteil am Vorrat als auch am jährlichen Zuwachs haben. Bei optimaler Wasserversorgung – z. B. in den Auenwäldern an Flussläufen – können bis zu 400 t organische Trockensubstanz je Hektar akkumuliert und jährlich bis zu 20 t organische Trockensubstanz je Hektar produziert werden.

Die Wälder in den borealen Gebieten sind zu rund einem Viertel (26 %) an der Gesamtwaldfläche, zu einem Fünftel (20 %) am Gesamtvorrat und zu einem Sechstel (17 %) am gesamten jährlichen Zuwachs an Phytomasse in den Wäldern der Erde beteiligt. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Gebiet die auf der gesamten nördlichen Erdhalbkugel verbreiteten Nadelwälder, die jährlich 2 bis 8 t organische Trockensubstanz je Hektar erzeugen können und insgesamt 70 bis 200 t je Hektar akkumulieren.

Die Kohlenstoffspeicherung des Waldes (gemessen in metrischen Tonnen) betrug allein in Europa 46 Mrd. metrische Tonnen im Jahre 2010. Davon sind 80 % überirdische (Stamm-

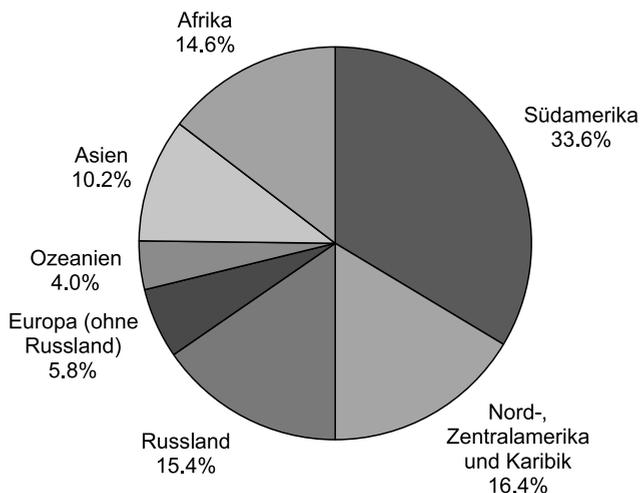
holz, Äste, Reisig) und 20 % unterirdische Biomasse (Wurzeln) (Schmithüsen, et al., 2014). Damit wird auch die Bedeutung des Waldes zur Senkung des CO<sub>2</sub> deutlich. Für die europäischen Länder stieg die Kohlenstoffspeicherung zwischen 2005 bis 2010 um jährlich 0,5 %.

**Tabelle 1.1** Rohstoffpotenzial von Wäldern und anderen Gehölzformationen (nach (Steinlin, 1979) (Thomasius, 1981))

| Vegetationsgebiete   | Fläche                | Vorrat an Trockenmasse |              | Zuwachs an Trockenmasse |             |
|--|-----------------------|------------------------|--------------|-------------------------|-------------|
|  | in 10 <sup>6</sup> ha | in 10 <sup>9</sup> t   | in t/ha      | in 10 <sup>9</sup> t/a  | in t/a ha   |
| <b>1. Tropische und subtropische Gebiete</b>                                     |                       |                        |              |                         |             |
| Immer- und regengrüne Breitlaubwälder  | 1134 (25 %)           | 484,0 (49 %)           | 426,8        | 23,4 (45 %)             | 20,6        |
| Offene Kleinlaubwälder, Dornbusch und Hartlaubgehölze, Baum- und Strauchsavannen | 1219 (27 %)           | 73,3 (7 %)             | 60,1         | 8,5 (17 %)              | 7,0         |
| <b>2. Gemäßigte (temperierte) Gebiete</b>  |                       |                        |              |                         |             |
| Immer- und sommergrüne Breitlaubwälder   | 712 (16 %)            | 218,9 (22 %)           | 307,4        | 8,7 (17 %)              | 12,3        |
| Waldsteppen, Dornbusch und Hartlaubgehölze                                       | 267 (6 %)             | 21,7 (2 %)             | 81,3         | 2,0 (4 %)               | 7,5         |
| <b>3. Boreale Gebiete</b>  |                       |                        |              |                         |             |
| Kleinlaubmischwald und Nadelwälder   | 924 (21 %)            | 184,8 (19 %)           | 200          | 7,4 (14 %)              | 8,0         |
| Waldtundra   | 217 (5 %)             | 13,0 (1 %)             | 59,9         | 1,5 (3 %)               | 6,9         |
| <b>Gesamt</b>  | <b>4473</b>           | <b>995,7</b>           | <b>224,4</b> | <b>51,5</b>             | <b>11,6</b> |

### Verfügbarkeit des Holzes

Von wirtschaftlichem Interesse ist das in der akkumulierten Phytomasse der Wälder enthaltene nutzbare Holz, dessen Menge in m<sup>3</sup> oder, forstlichem Sprachgebrauch entsprechend, in „Erntefestmetern“ (Efm oder Fm) angegeben wird. Nach FAO-Daten für das Jahr 2010 betragen die Holzvorräte der Erde 527 · 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> (Schmithüsen, et al., 2014); sie konzentrieren sich vor allem in Südamerika (ungefähr ein Drittel der gesamten Vorräte), in Russland und in Nordamerika, wie Bild 1.1 veranschaulicht.



**Bild 1.1** Territoriale Verteilung der in den Wäldern der Welt enthaltenen, stehenden Holzvorräte (nach (FAO, 2010))

Bezogen auf die Waldfläche der einzelnen Erdteile, errechnet sich Tabelle 1.2 zufolge für die Wälder der Erde ein durchschnittlicher Holzvorrat von 131 Fm, für die Wälder Europas hingegen ein durchschnittlicher Holzvorrat von 156 Fm je Hektar. Wird der Holzvorrat auf die Bevölkerungszahl bezogen, ergibt sich für jeden Bewohner der Erde ein Wert von 78 Fm und für jeden Einwohner Europas ein Wert von 52 Fm. Einer wirtschaftlichen Nutzung zugeführt werden, global gesehen, durchschnittlich 0,8 Fm je Hektar Waldfläche, in Europa dagegen 3,5 Fm je Hektar. Somit wird sowohl in Europa als auch weltweit weniger Holz wirtschaftlich genutzt als zuwächst, wobei allerdings bei dieser Betrachtung die Waldrodungen unberücksichtigt bleiben. Tabelle 1.3 zeigt die globale Bewaldung weltweit und nach Kontinenten sowie die Waldflächenänderungen zwischen 1990 und 2010 mit einem starken Rückgang in Afrika und Südamerika, dagegen erheblichen Zunahmen der Waldflächen in Europa und ab 2000 auch in Asien (besonders in China).

**Tabelle 1.2** Waldflächen, Holzzuwachs und Holznutzung auf der Erde und in Europa (nach (FAO, 2010) und (Schmithüsen, et al., 2014))

| Kenngröße                                       | Erde  | Europa (ohne Russland) |
|---|-------|------------------------|
| Gesamtfläche ohne Gewässer (10 <sup>6</sup> ha) | 13011 | 577                    |
| Waldfläche (10 <sup>6</sup> ha)                 | 4033  | 196                    |
| Waldflächenanteil (%)                           | 31    | 34                     |
| Waldfläche pro Kopf der Bevölkerung (ha)        | 0,60  | 0,3                    |
| Waldfläche pro Kopf der Bevölkerung (Fm)        | 78    | 52                     |
| Holzvorrat je ha Waldfläche (Fm)                | 131   | 156                    |
| Jährlicher Zuwachs je ha Waldfläche (Fm)        | 1,0*  | 4,2                    |
| Jährliche Nutzung je ha Waldfläche (Fm)         | 0,8*  | 3,5                    |
| Holznutzung pro Kopf der Bevölkerung (Fm)       | 0,50  | 0,93                   |

\*geschätzt bezogen auf die globale Waldfläche

Tabelle 1.3 Globale Bewaldung (nach (FAO, 2010))

|                                   | Waldfläche | Anteil an weltweitem Wald | Anteil an Landfläche | Waldflächenänderung 1990/2000 | Waldflächenänderung 2000/2010 |
|-----------------------------------|------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                                   | (1000 ha)  | (%)                       | (%)                  | (1000 ha/Jahr)                | (1000 ha/Jahr)                |
| Afrika                            | 674 419    | 16,7                      | 23                   | -4067                         | -3414                         |
| Asien                             | 592 512    | 14,7                      | 19                   | -595                          | 2235                          |
| Russland                          | 809 090    | 20,1                      | 49                   | 32                            | -18                           |
| Europa (ohne Russland)            | 195 911    | 4,9                       | 34                   | 845                           | 694                           |
| Nord-, Zentralamerika und Karibik | 705 393    | 17,5                      | 33                   | -289                          | -10                           |
| Südamerika                        | 864 351    | 21,4                      | 49                   | -4213                         | -3997                         |
| Ozeanien                          | 191 384    | 4,7                       | 23                   | -36                           | -700                          |
| Weltweit                          | 4 033 060  | 100                       | 31                   | -8323                         | -5210                         |

Die ständige, nachhaltige Reproduktion in nach menschlichen Vorstellungen überschaubaren Zeiträumen ist einer der wesentlichen Vorzüge des Holzes gegenüber anderen mit ihm konkurrierenden Rohstoffen, wie z. B. Kohle, Erdöl oder Erdgas. Für die wirtschaftliche Nutzung des Holzes ist dabei wichtig, dass der Holz-, insbesondere der Schaftholzanteil an der Masse des lebenden Baums (Dendromasse) in Abhängigkeit von der Baumart mit dem Baumalter zunimmt. So haben wipfelschäftige, monopodial wachsende Baumarten, wie z. B. die Fichte, in Reinbeständen mittlerer Bonität im Alter von über 80 Jahren einen Schaftholzanteil von über 80%, während in Dickungen und Jungbeständen der Nadel- und Astanteil überwiegt (Bild 1.2).

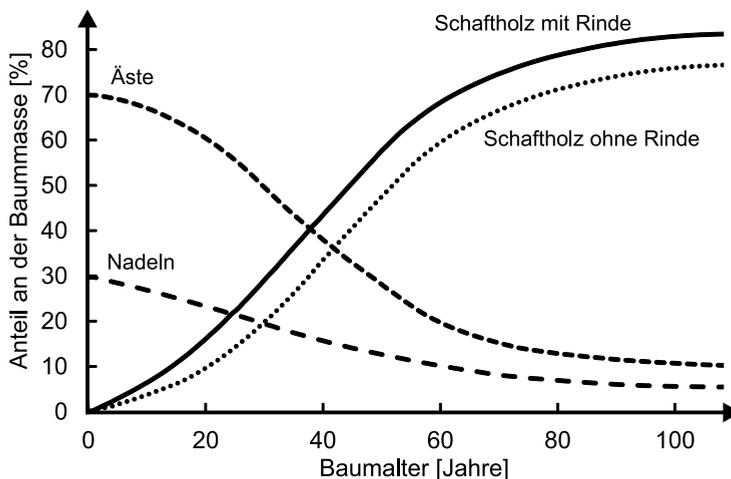


Bild 1.2 Anteil von Schaftholz, Ästen und Nadeln an der gesamten Baummasse von Fichte in Abhängigkeit vom Alter (Bloßfeld, Fiedler & Wienhaus, 1979)

Starkholz, was insbesondere im Alpenraum vorkommt, muss mit speziellen Technologien (Bandsägen) verarbeitet werden. Die großen Fortschritte in der Holzverarbeitung (Keilzinkung, Flächenverklebung, automatisierte Fehlererkennung und Holzsortierung) haben das Anforderungsprofil an das Holz jedoch zu schwächeren Sortimenten hin, welche kostengünstiger verarbeitbar sind als Starkholz, verschoben. Praktisch werden deshalb heute in Sägewerken bevorzugt relativ schwache Holzsortimente verarbeitet (Zerspanertechnologie).

In den letzten Jahren wird insbesondere aus Gründen der Biodiversität in Deutschland, Österreich und der Schweiz verstärkt Laubholz angebaut. Der Bestand an Laubholz im Wald steigt, der von Nadelholz sinkt. Heute wird dieses aus Kostengründen noch überwiegend energetisch genutzt. Der frühere Einsatz geringwertigerer Stammabschnitte für Eisenbahnschwellen ist stark reduziert. Erste Ansätze zum stärkeren Einsatz von Laubholz im Bauwesen sind vorhanden. Es gibt jedoch noch zahlreiche Probleme zu lösen.

Zum Vergleich wird Plantagenholz (insbesondere in Chile und Neuseeland) der Radiata-Kiefer nach etwa 20 Jahren für Sägeholz, nach etwa 7 Jahren für Zellstoff verwertet. Bei Eukalyptus sind die Umtriebszeiten noch geringer. Die Qualität wird dabei durch genetische, aber auch gezielte waldbauliche Maßnahmen (z.B. Astung, Pflanzungsdichte) beeinflusst. Selbst an der gezielten genetischen Veränderung des Cellulose- bzw. Ligninanteils der Bäume wird gearbeitet.

### **Physikalisch-mechanische Eigenschaften des Holzes**

Holz ist ein anisotroper, inhomogener und poröser Werkstoff. Alle Holzeigenschaften sind richtungsabhängig, variieren sehr stark und sind abhängig von den Umweltbedingungen. Kenntnisse der mechanischen Eigenschaften (einschließlich Einfluss von Feuchte, Temperatur, des Langzeitverhaltens (rheologische Eigenschaften), der Alterung (von Holz, Verbindungsmitteln, Werkstoffen)) sind für den Holzeinsatz fundamental für die Nutzung des Holzes als Festkörper und seine Verarbeitung. Das beginnt mit der Kenntnis der Struktur-Eigenschafts-Beziehungen und dem Wissen über die Variabilität der Holzeigenschaften.

Die Kenntnis der Holzeigenschaften ist sowohl wichtig für die Verarbeitung des Holzes (Zerspanung, Trocknung, Verklebung, Beschichtung), als auch für die Herstellung von Werkstoffen und Produkten (z. B. Wärmeübertragung, Ausrichtung der Strukturelemente, Einfluss technologischer Prozesse wie Trocknung, Wärmebehandlung und chemische Vergütung). Moderne Berechnungsmethoden wie Finite Elemente erfordern eine Vielzahl von Materialkennwerten und sind eine neue Herausforderung für die holzphysikalische Forschung. Komplette Datensätze sind bisher nur wenig verfügbar. Die in älterer Literatur oft nur aufgeführten Kennwerte E-Module bei Biegung und Biegefestigkeit oder Zug- und Druckfestigkeit in Faserrichtung sind nicht immer ausreichend. Zunehmend werden Parameter für die Berechnung der orthotropen Eigenschaften in den Hauptachsen sowie für plastische und viskoelastische Eigenschaften benötigt. Auch neuere Angaben zu Eigenschaften bei dynamischer Belastung fehlen weitgehend. Letztmalig wurden umfangreiche Arbeiten zur Mechanik in der Zeit um den 2. Weltkrieg durchgeführt, um insbesondere die erforderlichen Kennwerte für den damals starken Einsatz von Holz im Flugzeugbau zu erhalten. Seit Aufkommen der faserverstärkten Kunststoffe und dem starken Einsatz von Metallen ging die Bedeutung des Holzes im Flug- und Fahrzeugbau deutlich zurück. Heute ist die Tendenz zum Holzeinsatz wieder steigend. So werden Kunststoffe zunehmend mit

Naturfasern verstärkt, am Einsatz von Holz im Fahrzeugbau wird bereits gearbeitet. Auch die chemische und energetische Nutzung des Holzes spielt eine zunehmende Rolle.

Die Holzphysik ist heute in der Lage, mithilfe neuer Prüfverfahren den Kenntnisstand über physikalisch-mechanische Eigenschaften auf verschiedenen Strukturebenen deutlich zu verbessern. Moderne Messmethoden wie die Digital Image Correlation (Prinzip der Kreuzkorrelation, angewendet in der Photogrammetrie), die Computertomographie oder im Mikro- bzw. Nanobereich nutzbare Methoden wie Nanoindentation, Raman-Spektroskopie, AFM, NIR-Spektroskopie und viele weitere Verfahren geben dazu gute Möglichkeiten. Hinsichtlich der Materialkennwerte existieren vielfach noch große Lücken für FE-Berechnungen, besonders auch bezüglich der rheologischen und plastischen Eigenschaften, die es künftig zu schließen gilt.

### Technologien zur Verarbeitung von Holz

Holz hatte in der bisherigen Menschheitsgeschichte eine große wirtschaftliche Bedeutung; es war Roh- und Werkstoff zugleich und wurde als Brenn- und Baumaterial, in der Frühzeit der Menschheitsentwicklung auch zur Herstellung von Werkzeugen vielseitig genutzt. Beim Übergang von der Stein- zur Bronze- und Eisenzeit erlangte Holz bzw. Holzkohle eine regelrechte Monopolstellung als Energieträger und Reduktionsmittel bei der Verhüttung von Erzen, die zumeist mit einer beträchtlichen Verwüstung der Wälder verbunden war.

Mit Beginn der industriellen Revolution wurde Holz ein vielbegehrter Industrierohstoff, ohne jedoch seine Bedeutung für den individuellen Verbrauch, z. B. als Brennmaterial, zu verlieren. So werden noch heute rund 50% des geernteten Holzes zur Energiegewinnung verbrannt; in einigen Entwicklungsländern ist Holz nach wie vor der wichtigste Brennstoff. Die Tendenz der energetischen Nutzung ist in den letzten Jahren auch in Europa wieder steigend, insbesondere bei Laubholz. Die Förderung der Verwendung nachwachsender Rohstoffe für die Energieerzeugung hat wesentlich dazu beigetragen (Hackschnitzelheizungen, Holzpellets). Sinnvoller wäre, besonders unter dem heute wichtigen Aspekt der CO<sub>2</sub>-Reduzierung, die Eigenschaft von Holz als CO<sub>2</sub>-Speicher auszuschöpfen und es erst als Altholz energetisch zu verwerten (Kaskadennutzung). Teilweise führt die vermehrte Verwendung von Holz als Brennstoff in der Holzwerkstoffindustrie bereits zu Versorgungsengpässen.

Auch an der Nutzung von Holz als Chemierohstoff wird weltweit intensiv gearbeitet. Neben der industriellen Erzeugung von Schnittholz, später von Sperrholz und Tischlerplatten wurde in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts mit der Zellstoffherstellung begonnen, nachdem die chemischen Holzaufschlussverfahren einen entsprechenden Entwicklungsstand erreicht hatten. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts kamen die Herstellung von Faserplatten, um die Mitte des 20. Jahrhunderts die Herstellung von Spanplatten aus Holz hinzu, die in der Folgezeit in nahezu allen Industrieländern ein wirtschaftlich bedeutendes Ausmaß erreichten. Neben Span- und Faserplatten werden heute insbesondere Werkstoffe auf Massivholzbasis (Brettschichtholz, Brettsperrholz, Brettstapelelemente) im Bauwesen eingesetzt. Tabelle 1.4 gibt eine Übersicht zur Produktion von Industrie- und Brennholz weltweit von 1980 bis 2012. Der hohe Anteil an Brennholz ist deutlich erkennbar. Die Bruttowertschöpfung der Forst- und Holzwirtschaft betrug 2014 606 Mrd. US-Dollar. Tabelle 1.5 zeigt die Struktur der Bruttowertschöpfung einiger ausgewählter Länder.

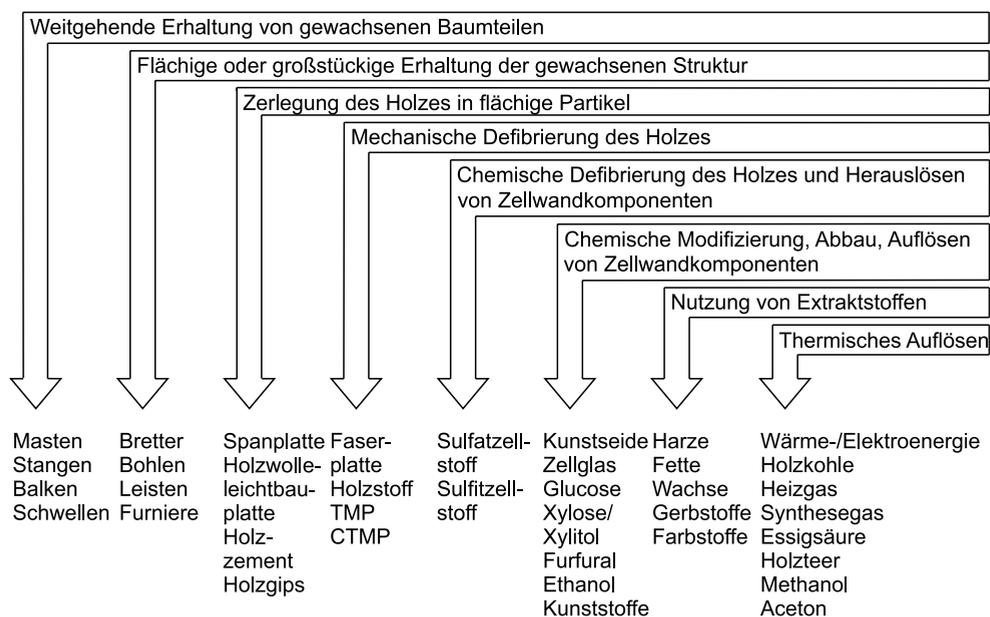
**Tabelle 1.4** Produktion von Industrie- und Brennholz in der Welt in Mio. m<sup>3</sup> (Bemmann, 2014)

| Produkt       | Jahr |      |      |      |
|---------------|------|------|------|------|
|               | 1980 | 1990 | 2000 | 2012 |
| Industrieholz | 1446 | 1697 | 1622 | 1657 |
| Brennholz     | 1681 | 1827 | 1810 | 1870 |
| Gesamt        | 3127 | 3524 | 3432 | 3527 |

**Tabelle 1.5** Bruttowertschöpfung der Forst- und Holzwirtschaft in Mrd. US-Dollar (Bemmann, 2014)

| Land/Region | Rundholz | Holzbe- und -verarbeitung | Zellstoff und Papier | Gesamt |
|-------------|----------|---------------------------|----------------------|--------|
| Weltweit    |          |                           |                      | 606    |
| China       | 32,4     | 41,1                      | 53,0                 | 126    |
| USA         | 20,3     | 22,1                      | 53,3                 | 96     |
| Japan       | 2,0      | 9,2                       | 28,8                 | 40     |
| Indien      | 28,1     | 0,4                       | 2,5                  | 31     |
| Deutschland | 3,0      | 9,2                       | 13,9                 | 26     |
| Brasilien   | 7,0      | 5,8                       | 9,7                  | 22     |
| Kanada      | 5,8      | 6,7                       | 7,4                  | 20     |

Bild 1.3 veranschaulicht die vielseitigen Möglichkeiten der Holznutzung, angefangen von der Schnittholzherstellung durch Aufteilen von gewachsenen Baumteilen bis zur Gewinnung chemischer Grundstoffe durch thermischen Abbau der Holzsubstanz.

**Bild 1.3** Technologie und Produkte der Holzverwertung (nach (Schulz & Wegener, 1983), verändert)