



Michael Köhl und Thomas Knoke

Bereits vor 300 000 bis 400 000 Jahren begann der Mensch Holz als Energieträger zu nutzen [3.1]. Daran hat sich bis in die Gegenwart wenig geändert; noch heute sind weltweit mehr als 2 Mrd. Menschen von Holz als primärer Energiequelle abhängig [3.2] und nutzen vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern holzartige Biomasse zum Kochen und/oder Heizen. Aber auch in Deutschland – wie in anderen Industriestaaten – ist Holz ein wichtiger regenerativer Energieträger; er wird hier primär zum Heizen und eingeschränkter zur Stromerzeugung eingesetzt.

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden die Grundlagen und Herausforderungen der Waldbewirtschaftung und der Holzproduktion dargestellt sowie die wichtigsten einheimischen Baumarten kurz beschrieben.

3.1 Forstwirtschaftliche Grundlagen

Wälder bedecken rund ein Drittel der Landflächen der Erde. Bis auf wenige Ausnahmen sind die Wälder Mitteleuropas keine Naturwälder, sondern Wirtschaftswälder. Primär- und Alterswälder bedecken etwa 3 % der Waldfläche in der EU [3.3]. Auf 2,3 % der EU-Waldfläche sind keine Anzeichen menschlicher Aktivitäten erkennbar. In ihnen sind natürliche Waldentwicklungszyklen erhalten oder wiederhergestellt oder sie weisen Merkmale der natürlichen Baumartenzusammensetzung, der natürlichen Altersstruktur, des Totholzanteils und der natürlichen Verjüngung auf [3.4].

Michael Köhl, Hamburg, Deutschland
Thomas Knoke, Freising, Deutschland

© Der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2024

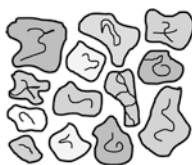

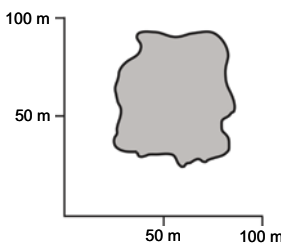
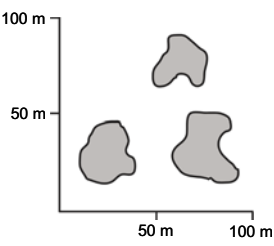
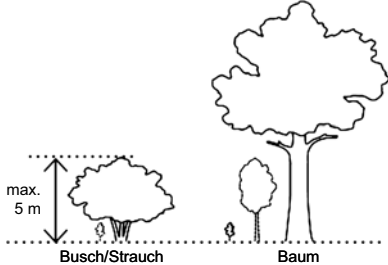
M. Kaltschmitt, K. Stampfer (Hrsg.), *Energie aus Biomasse*, Energie aus Biomasse 1, https://doi.org/10.1007/978-3-658-40828-2_3

3.1.1 Grundlagen und Grundbegriffe

Definition. Wälder sind charakteristische Pflanzenformationen, die sich in Aufbau und Zusammensetzung von anderen Vegetationsformen unterscheiden. Nach dem Bundeswaldgesetz [3.5] ist Wald als „jede mit Forstpflanzen bestockte Grundfläche“ definiert. Im ökologischen Sinne spricht man von Wald, wenn „Bäume so dicht und zahlreich stehen, dass sich ein typisches Waldinnenklima (d. h. die Temperaturen sind ausgeglichener, die Luftbewegungen und die Lichtintensität sind geringer und die Luftfeuchtigkeit höher im Vergleich zu nicht bewaldeten Freiflächen) entwickelt“.

Da sich Wald mit diesen Definitionen nur schwer gegenüber anderen Landnutzungsformen abgrenzen lässt (Tabelle 3.1), wurde zusätzlich eine Walddefinition entwickelt, die sich auf messbare Kriterien stützt [3.6]. Wald in diesem Sinne sind Flächen über 0,5 ha und einer Kronenüberschirmung über 10 %, die mit Bäumen bestockt sind, welche über 5 m Höhe erreicht haben oder erreichen können. Flächen, die eine Kronenüberschirmung von weniger als 10 % aufweisen oder mit kleineren Bäumen, Büschen oder Sträuchern bestockt sind, werden als sonstige Waldflächen (engl. other wooded land) bezeichnet.

Tabelle 3.1 Wald und sonstige Waldflächen (nach [3.6])

	Wald	Sonstige Waldfläche
Kronenüberschirmung	 <p>> 10 %</p>	 <p>< 10 %</p>
Flächengröße	 <p>> 0,5 ha</p>	 <p>< 0,5 ha</p>
Baumhöhe	 <p>max. 5 m</p> <p>Busch/Strauch Baum</p>	

Waldflächen und Holzvorräte. Die globale Waldfläche beträgt rund 4 Mrd. ha; das ist ungefähr ein Drittel der globalen Landflächen [3.7]. Abbildung 3.1 zeigt die regionale Verteilung dieser Waldflächen. Demnach befinden sich rund 20 % der Wälder in der Russischen Föderation, gefolgt von Südamerika (21 %), Nord- und Zentralamerika (19 %), Afrika (16 %), Asien (15 %), Europa ohne Russische Föderation (5 %) und Ozeanien (5 %) [3.7]. Etwa 36 % der globalen Waldfläche sind mit Primärwäldern bestockt, in denen keine Bewirtschaftung erfolgt. Rund 5 % der Wälder sind Plantagen, die vorrangig zur Holzproduktion genutzt werden.

Etwa 80 % der gesamten globalen Biomasse finden sich in Wäldern, die drei Viertel zur weltweiten Produktion beitragen [3.8], [3.9]. Die gesamte lebende ober- und unterirdische Biomasse der Wälder summiert sich auf 662 Gt bzw. durchschnittlich 163 t/ha (Tabelle 3.2) [3.7]. Die höchsten flächenspezifischen Biomassevorräte finden sich in den Tropenwäldern Südamerikas sowie West- und Zentralafrikas, in denen Werte von durchschnittlich knapp 250 t/ha erreicht werden. In Europa beträgt demgegenüber der durchschnittliche Biomassevorrat nur rund 90 t/ha (Tabelle 3.2).

In vielen Teilen der Welt werden Naturwälder durch nicht nachhaltige Holznutzung degradiert oder im Zuge von Landnutzungsänderungen gerodet. Im Zeitraum von 2000 bis 2020 hat die globale Waldfläche jährlich um durchschnittlich 5,9 Mio. ha abgenommen [3.7], [3.10]; dies entspricht rund der Hälfte der Waldfläche Deutschlands (ca. 11 Mio. ha). Geschätzte 80 % der weltweiten Entwaldung sind auf die Umwandlung von Wäldern in landwirtschaftlich genutzte Flächen zurückzuführen [3.11]. Eine ähnliche Situation wird auch für die Wälder Zentraleuropas beschrieben, wo zwei intensive Rodungsperioden von etwa 500 bis 800 n. Chr. und 1100 bis 1300 n. Chr. stattfanden [3.12].

Neben der Entwaldung (d. h. der Umwandlung von Wald in eine andere Landnutzungsform) spielt auch die Walddegradierung eine große Rolle. Darunter sind schädliche, nicht

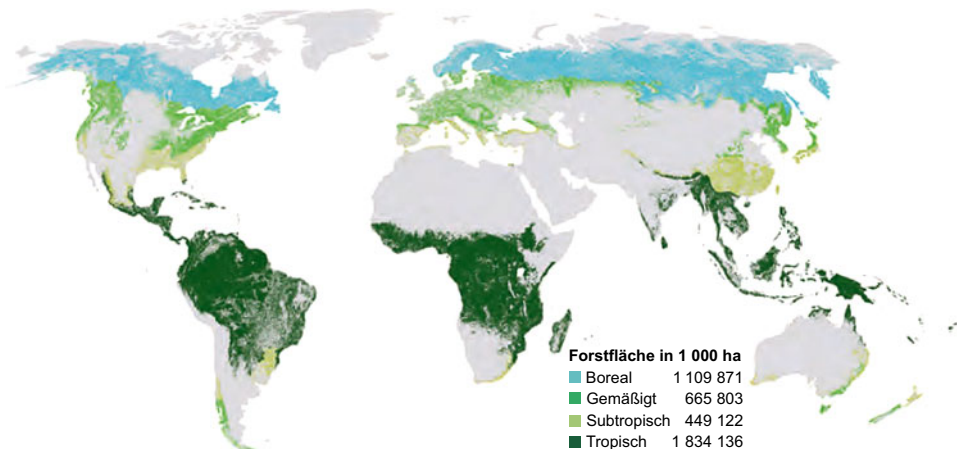


Abb. 3.1 Globale Waldverteilung (nach [3.7])

Tabelle 3.2 Biomassevorrat und Totholz in Wäldern nach Region und Subregion [3.4], [3.7]

Region/Subregion	Biomasse		Totholz	
	in Mio. t	in t/ha	in Mio. t	in t/ha
Östliches und südliches Afrika	27 855	94,2	1 577	5,3
Nördliches Afrika	2 293	65,2	17	0,5
Westliches und Zentralafrika	76 837	251,2	1 851	6,1
Afrika (Summe)	106 985	168,0	3 444	5,5
Östliches Asien	23 958	88,3	3 326	12,3
Süd- und Südostasien	49 911	168,6	320	1,1
Westliches Asien und Zentralasien	4 885	88,4	40	0,7
Asien (Summe)	78 754	126,5	3 685	5,9
Europa (ohne Russische Föderation)	28 335	140,2	1 603	7,9
Deutschland	1 222	107,0	2	2,3
Österreich	401	102,9	7	1,8
Schweiz	155	122,1	11	8,8
Europa (Summe)	109 817	107,9	16 268	16,0
Karibik	1 035	131,2	69	8,8
Zentralamerika	3 752	167,5	248	11,1
Nordamerika	78 829	109,1	19 781	27,4
Amerika (Summe, einschließlich Karibik)	83 616	111,1	20 099	26,7
Ozeanien	28 264	152,6	4 699	25,4
Südamerika	198 556	235,2	10 839	12,8
Welt (Summe)	605 993	149,3	59 029	14,5

regulierte Eingriffe in den Wald ohne Änderung der Landnutzungsform zu verstehen; beispielsweise sind vor allem in Teilen Afrikas das Sammeln von Brennholz und die Holzkohleproduktion wesentliche Ursachen für Walddegradierung.

Nachhaltige Forstwirtschaft. Der Begriff der nachhaltigen Forstwirtschaft wurde im Jahre 1713 von Hannß Carl von Carlowitz eingeführt [3.13]. Den sächsischen Oberberghauptmann trieb die Sorge um, dass die durch jahrhundertelange Übernutzung der Wälder verursachte Holzknappheit den weiteren Grubenausbau, den Erzabbau durch Feuer setzen und die Versorgung der Schmelzhütten mit Holzkohle gefährden könnte. Carlowitz prägte deshalb das Nachhaltigkeitsprinzip, welches besagt, dass nicht mehr Holz geerntet werden soll als in den Wäldern nachwächst.

Das Nachhaltigkeitsprinzip wird heute wesentlich umfassender interpretiert. Wälder werden nicht nur als Rohstofflieferanten verstanden, sondern stellen auch eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Funktionen für die Gesellschaft bereit. Deshalb wird eine nachhaltige Waldbewirtschaftung gegenwärtig definiert als „die Behandlung und Nutzung von Wäldern auf eine Weise und in einem Ausmaß, das deren biologische Vielfalt, Produktivität, Verjüngungsfähigkeit, Vitalität sowie deren Fähigkeit, die relevanten ökologischen,

Tabelle 3.3 Paneuropäische Kriterien der nachhaltigen Waldbewirtschaftung [3.14]

Kriterium 1	Erhaltung und angemessene Verbesserung der forstlichen Ressourcen und ihr Beitrag zu globalen Kohlenstoffkreisläufen
Kriterium 2	Erhaltung der Gesundheit und Vielfalt von Forstökosystemen
Kriterium 3	Erhaltung und Förderung der Produktionsfunktion der Wälder (d. h. Holz und Nichtholz)
Kriterium 4	Bewahrung, Erhaltung und angemessene Verbesserung der biologischen Vielfalt in Waldökosystemen
Kriterium 5	Erhaltung und angemessene Verbesserung der Schutzfunktionen bei der Waldbewirtschaftung (vor allem Boden und Wasser)
Kriterium 6	Erhaltung sonstiger sozioökonomischer Funktionen und Bedingungen

wirtschaftlichen und sozialen Funktionen gegenwärtig und in der Zukunft auf lokaler, nationaler und globaler Ebene zu erfüllen, gewährleistet, ohne anderen Ökosystemen Schaden zuzufügen“ [3.14].

Die breite Palette von ökologischen, ökonomischen und sozioökonomischen Anforderungen an den Wald können in sechs Kriterien für die nachhaltige Waldbewirtschaftung zusammengefasst werden (Tabelle 3.3) [3.14].

In europäischen Wäldern sollen alle in Tabelle 3.3 dargestellten Funktionen gleichzeitig auf einer Fläche erbracht werden. Ausnahmen bestehen in Gebieten, wo die Holznutzung aus Gründen des Natur- und Landschaftsschutzes begrenzt oder untersagt ist. In Deutschland liegt knapp die Hälfte der Gesamtwaldfläche (47 %) in Landschaftsschutzgebieten und 26 % der Waldfläche in einer intensiven Schutzkategorie mit deutlichen Nutzungsbeschränkungen [3.15]. In Europa (ohne Russische Föderation) steht ein Fünftel der Waldfläche nicht für die Holzversorgung zur Verfügung [3.4].

Holzvorrat. Der Holzvorrat, der auf den Waldflächen Europas (ohne Russische Föderation) stockt, beträgt 35 Mrd. m³ und ist seit 1990 jährlich um durchschnittlich 1,4 % gestiegen. Der durchschnittliche Holzvorrat lag 2020 bei 169 m³/ha [3.4]. Allerdings zeigen sich hierbei starke nationale Unterschiede zwischen 16 m³/ha in Island und 409 m³/ha in Liechtenstein.

3.1.2 Holzbildung und anatomischer Holzaufbau

Stamm, Wurzeln und Krone sind die funktionalen Einheiten von Bäumen, die es erlauben, den ober- und unterirdischen Wuchsraum bestmöglich einzunehmen. Dadurch können Bäume die natürlichen Ressourcen besser ausnutzen und sind konkurrenzfähiger gegenüber anderen Pflanzenformationen.

Die Baumbiomasse kann in die Komponenten Stamm, Wurzel und Krone mit Ästen und Zweigen unterteilt werden (Abb. 3.2) [3.16]. Eine grobe Orientierung über die an-

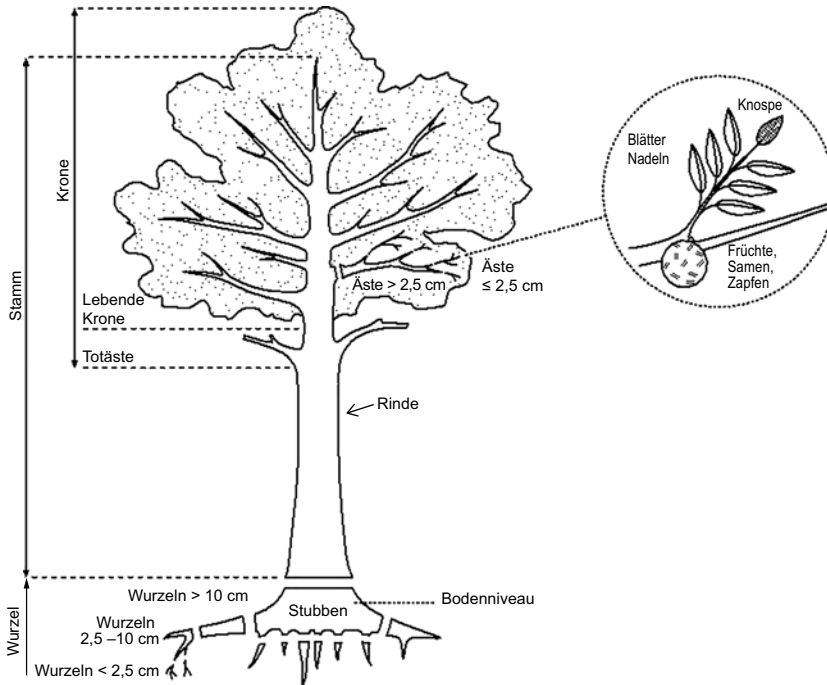


Abb. 3.2 Einteilung der Baumbiomasse in Komponenten (nach [3.16])

teilige Zusammensetzung der einzelnen Biomassekomponenten bei mitteleuropäischen Waldbäumen zeigt Tabelle 3.4.

Als Holz wird das sekundäre Dauergewebe von Stämmen, Ästen und Wurzeln bezeichnet. In einem Baum finden sich Millionen individueller Holzzellen, die sich in Größe, Form und Funktion unterscheiden. Sie sind in sichtbaren Mustern angeordnet, sodass sich im Querschnitt eines Stammes oder Astes verschiedene funktionale Bereiche erkennen lassen (Abb. 3.3) [3.18].

Tabelle 3.4 Anteile unterschiedlicher Biomassekomponenten bei einem durchschnittlichen Baum (nach [3.17])

Komponente	Anteil
Blüten und Fruchtstände	0,3 %
Laub/Nadeln	5,4 %
Äste < 7 cm mit Rinde	14,0 %
Äste > 7 cm und Stamm	55,8 %
Rinde	6,2 %
Wurzeln und Stubben	18,3 %

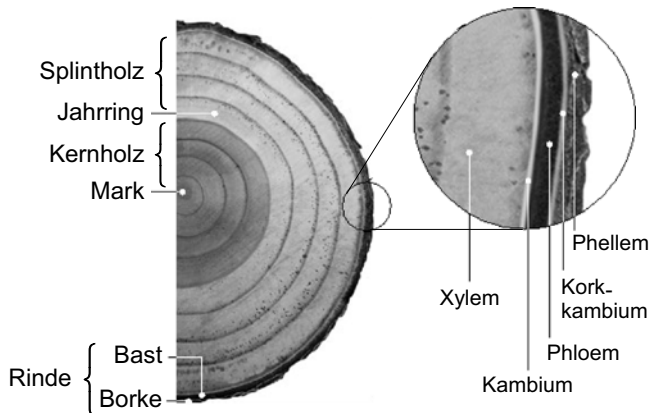


Abb. 3.3 Stammquerschnitt

Rinde. Die Rinde umhüllt das Holz und schützt es vor Umwelteinflüssen. Sie setzt sich aus der Borke (äußere Rinde) und dem Bast zusammen.

Borke. Die äußere Grenzschicht eines Baumes bildet die Borke (Rhytidom). Unter dem Borkenmantel befindet sich das Korkkambium (Phellogen), das aus meristematischem (teilungsfähigem) Gewebe besteht. Nach außen hin werden Korkzellen (Phellem) gebildet und nach innen das Phellogen (Korkrinde) aus parenchymatischen Zellen. Phellem, Phellogen und Phellogen werden zusammen als Periderm bezeichnet. Bei den meisten Baumarten stellt das Korkkambium nach einer gewissen Zeit das Teilungswachstum ein und vom darunterliegenden sekundären Phloem (Bast) wird kontinuierlich ein neues Korkkambium gebildet.

Die abgestorbenen Korkzellen tragen zur mechanischen Stabilisierung des Sprosses bei und schützen vor schädlichen Umwelteinflüssen (z. B. abiotischen (Hitze, Frost) oder biotischen (Insekten, Pilze) Faktoren). Zusätzlich hat die Borke Deponiefunktion (d. h., vom Stoffwechsel nicht mehr benötigte Substanzen werden vom Baum in Form von Borkenschuppen abgegeben). Im Zuge der Verkorkung kommt es zur Auflagerung einer wasserundurchlässigen Suberinschicht mit Wachsen, die einen Transpirationsschutz bieten, sowie zur Einlagerung von Gerbstoffen und Lignin, die zum Schutz vor Parasiten beitragen. Während der Verkorkung sterben die Phellemzellen ab. Hierdurch kann die Borke nicht mehr wachsen und sich dem Dickenwachstum der Bäume anpassen. Durch die Schichtung der abgestorbenen Periderme nimmt die Borke an Stärke zu und es können Spannungsrisse in der Borke entstehen, die ihr das typische Aussehen verleihen.

Die unterschiedliche Anordnung der abgestorbenen Periderme bestimmt dabei die Entstehung von Streifenborke (Eiche), Ringelborke (Birke, Kirsche) oder Schuppenborke (Kiefer, Platane, Lärche). Bei einigen Baumarten, den sogenannten Peridermbäumen (z. B. Buche, Hainbuche, Hasel), bleibt das erste Korkkambium dauerhaft erhalten und gleicht die Durchmesserzunahme durch das Dickenwachstum aus [3.19].

Bast/Phloem. Unter dem Periderm liegt der Bast (sekundäres Phloem), der zur Speicherung und zum Transport von Assimilaten (vor allem Saccharose, Raffinose, Stachyose, Zuckeralkohole) dient, die in den Blättern durch Photosynthese gebildet werden. Hierzu werden Siebelemente gebildet:

- Bei Nadelbäumen sind diese Siebelemente als Siebzellen ausgebildet, die über Siebporen miteinander verbunden sind.
- Bei Laubbäumen übernehmen Siebröhrenelemente den Assimilattransport, die sich über Siebplatten zu Siebröhren verbinden [3.20].

Neben den Siebzellen und Siebröhren finden sich im Phloem Bastfasern, die aus langen, dickwandigen Zellen bestehen und der Stabilität dienen, sowie stoffspeichernde Parenchymzellen, die als Baststrahlen (Phloemstrahlen) radial und als Bastparenchym axial ausgerichtet sind (Abb. 3.4).

Kambium. Zwischen sekundärem Phloem (Bast) und sekundärem Xylem (Holz) befindet sich das Kambium, das wie ein Hohlzylinder Stamm, Äste und ältere Wurzeln umspannt und aus einer dünnen Schicht meristematischer Zellen besteht. Das Kambium bildet nach außen die Bastzellen und nach innen die Holzzellen. Es bewirkt dadurch das sekundäre Dickenwachstum der Bäume. Da bei den meisten Baumarten wesentlich mehr Xylem als Phloem produziert wird, übersteigt der Holzanteil den Rindenanteil um ein Vielfaches.

Xylem. Die Zellen, die vom Kambium umschlossen werden, bilden das sekundäre Xylem – den eigentlichen Holzbestandteil der Bäume. Holz übernimmt die Aufgaben der Wasserleitung, der Speicherung von Assimilaten und der Festigung. Dazu werden verschiedene Zelltypen ausgebildet [3.20]:

- Tracheiden und Gefäßelemente dienen der Wasserleitung. Die lang gestreckten Tracheiden haben besonders an ihren Enden Aussparungen in der Zellwand (sogenannte Tüpfel), durch die Wasser von Zelle zu Zelle fließen kann. Sind die vertikalen Enden der Zellen perforiert oder weitgehend abgebaut, entstehen zusammenhängende Gefäße (Tracheen) und Röhrensysteme, in denen das Wasser wesentlich schneller fließen kann. Bei Nadelbäumen (Gymnospermen) sind nur Tracheiden ausgebildet, wohingegen bei den entwicklungs geschichtlich jüngeren Laubbäumen (Angiospermen) vermehrt Tracheen vorzufinden sind.
- Xylemparenchymzellen kommen in Laub- und Nadelbäumen vor und dienen der Speicherung u. a. von Lipiden, Stärke und Proteinen.
- Holzfasern haben verdickte Zellwände und besitzen nur wenige kleine Tüpfel. Sie dienen der Stabilität und kommen nur bei Laubbäumen vor.

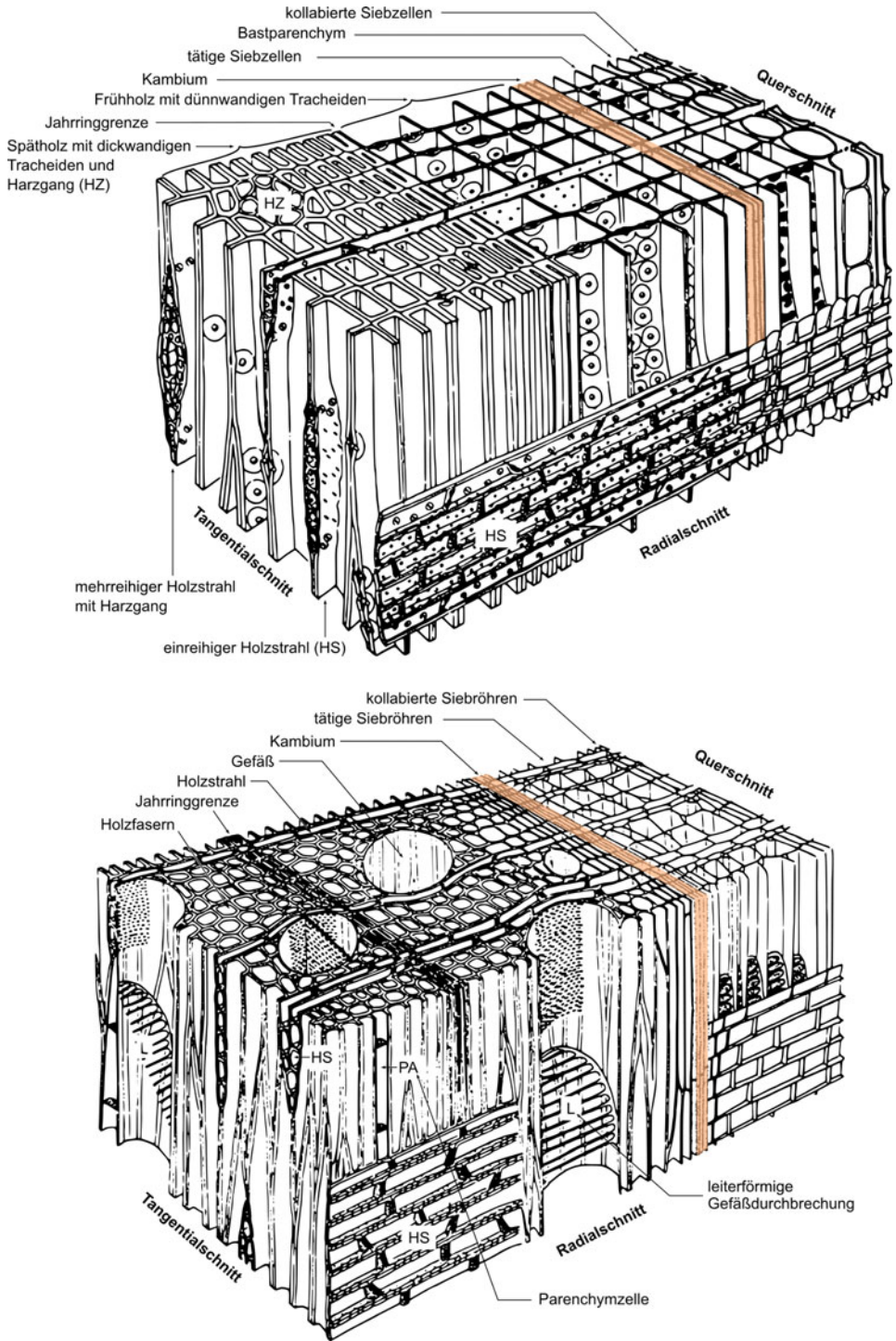


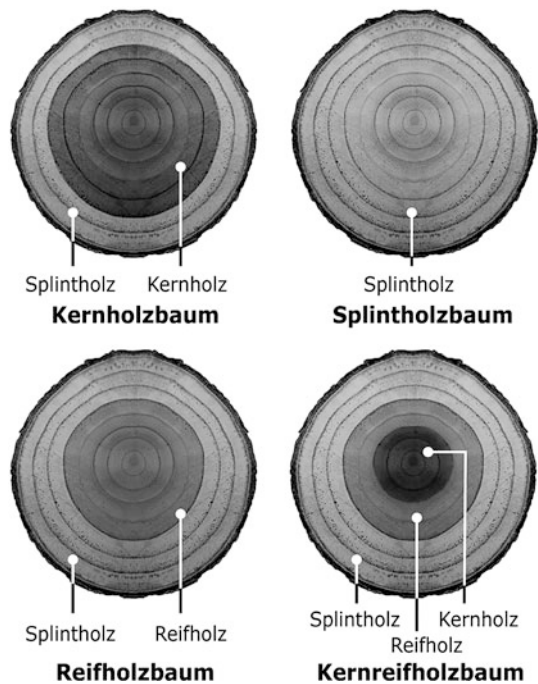
Abb. 3.4 Anatomische Struktur von Nadelholz (oben) und Laubholz (unten) [3.20]

Splint- und Kernholz. Viele Bäume weisen in ihrem Stammquerschnitt einen deutlichen Unterschied zwischen dem helleren, äußeren Ring von Splintholz und dem inneren, häufig farblich abgesetzten Kernholz auf. Das Splintholz ist der jüngere, wasserleitende Bereich des Holzes, der das Kernholz umgibt und in dem auch noch lebende Parenchymzellen auftreten. Nach der Ruhephase im Winter werden im Frühjahr zunächst Zellen mit großem Volumen und dünnen Zellwänden produziert, um die Wasserversorgung der austreibenden Knospen und Zweige zu sichern (Wachstumsphase). Die Bildung von Frühholz wird in der späteren Depositionsphase durch die Bildung von dickwandigen (und dadurch dunkleren) Holzzellen mit kleinerem Volumen abgelöst. Durch die jährliche Abfolge von Früh- und Spätholzbildung entstehen die Jahrringe.

Im Laufe der Zeit sterben die Parenchymzellen des Splintholzes ab. Speicherstoffe wie Öle, Harze, Gerbstoffe, Calcium oder Silicium werden in die Zellwände und Lumina eingelagert. Die Tracheiden und Gefäße verlieren ihre Fähigkeit zur Wasserleitung, füllen sich mit Luft und werden durch einwachsende Parenchymzellen verschlossen (Verthylung). Durch Einlagerung phenolischer Kerninhaltsstoffe werden die Zellwände verfärbt und imprägniert. Die Verkernung hat meist eine Erhöhung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz zur Folge.

Bei einem deutlichen Farbunterschied zwischen Kern- und Splintholz spricht man von Kernholzbäumen (z. B. Douglasie, Kiefer, Lärche, Eibe, Eiche, Robinie). Bei Reifholzbäumen (z. B. Tanne, Fichte, Linde, Buche, Feldahorn) ist kaum ein Farbunterschied zwi-

Abb. 3.5 Stammquerschnitte mit Kernholz, Splintholz und Reifholz



schen Splint und Kernholzbereich zu erkennen. Unterbleibt die Verkernung (d. h., lebende Zellen bleiben noch bis in das Zentrum des Stammes erhalten), handelt es sich um Splintholzbäume (Bergahorn, Erle, Birke, Pappel, Hainbuche) (Abb. 3.5).

Im innersten Zentrum eines Stammes findet sich das Mark, das aus nichtverholzten, abgestorbenen Zellen der Sprossachse gebildet wird.

3.1.3 Holzeigenschaften

Chemischer Aufbau. Holz besteht vorwiegend aus Kohlenstoff (ca. 50 %), Sauerstoff (ca. 43 %), Wasserstoff (ca. 6 %) und Stickstoff (unter 1 %). Diese Elemente bilden die organischen Makromoleküle Lignin, Cellulose und Holzpolyosen (Abb. 3.6), die als die drei Hauptkomponenten von Holz für unterschiedliche Funktionen verantwortlich sind.

- Lignin, auch Holzstoff genannt, dient als Stützmaterial und wird in das Gerüst von Cellulose und Holzpolyosen eingelagert, wodurch die komplexe Struktur der Lignocellulose entsteht. Lignin verleiht dem Holz mechanische Festigkeit [3.18].
- Cellulose ist die Gerüstsubstanz der Zellwände und trägt durch ihre Zugfestigkeit zu den komplexen Holzstrukturen bei. Sie vernetzt sich zu fibrillären Strukturen, in deren Zwischenräume Lignin eingelagert wird.
- Holzpolyosen, auch Hemicellulosen genannt, sind eine uneinheitlich aufgebaute Gruppe von Polysacchariden, die vor allem in der Mittellamelle – der Schicht zwischen benachbarten Zellen – gehäuft vorkommen. Neben der Stützfunktion in der Zellwand steuern sie die Durchlässigkeit und Verkittung der Zellmembran.

Neben Lignin, Cellulose und Holzpolyosen kommen im Holz akzessorische Bestandteile wie Harze, Fette, Alkaloide oder Mineralstoffe vor, die nicht zur Festigkeit beitragen.

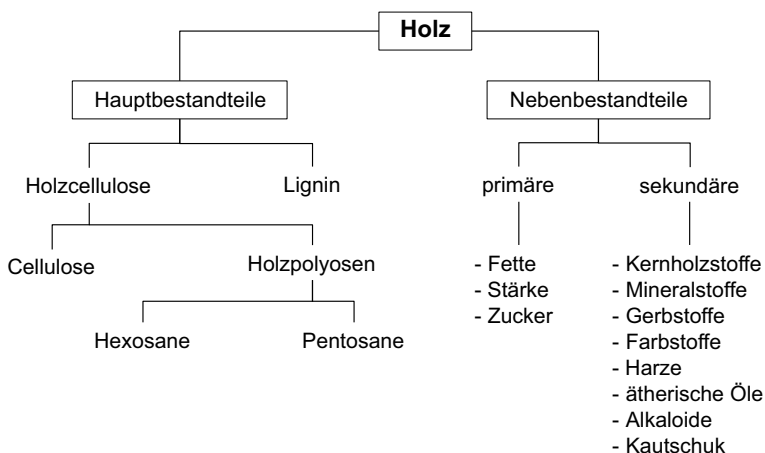


Abb. 3.6 Chemische Bestandteile von Holz

Physikalische Eigenschaften. Holz besitzt eine hohe mechanische Festigkeit, die bei fehlerfreien Holzfasern die Festigkeit von Stahl deutlich übertrifft. Besonders hervorzuheben ist das günstige Verhältnis von Festigkeit zum Eigengewicht.

Dichte. Da Holz ein poriges Material ist, hängt das Gewicht sehr stark vom Wassergehalt ab. Daher wird bei der Vermessung von Holzlieferungen an verarbeitende Betriebe meist das Gewicht in Tonnen absolut trocken (t_{atro}) oder seltener in Tonnen lufttrocken (t_{lutro}) bestimmt. Tabelle 3.5 zeigt für einige ausgewählte Baumarten die Rohdichten im absolut trockenem Zustand.

Dimensionsschwankungen. Holz ist Dimensionsänderungen durch äußere Einflüsse ausgesetzt. Quellen und Schwinden von Holz werden vom Wechselspiel der Einflüsse von Temperatur, Holzfeuchtigkeit (ober- oder unterhalb der Fasersättigung) und Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Durch seinen geringen Längenausdehnungskoeffizienten unterliegt Holz bei Temperaturänderungen nur sehr geringen Dimensionsschwankungen. Die Quell- und Schwindgrade bei einer Änderung der Holzfeuchte hängen von der Holzart und der betrachteten Richtung ab und betragen in Radialrichtung 2 bis 10 %, in Longitudinalrichtung 0,1 bis 1 % und in Tangentialrichtung 4 bis 15 %.

Festigkeit. Das Widerstandsverhalten eines Werkstoffes gegen mechanische oder plastische Verformung wird als Festigkeit bezeichnet. Beim Holz hängt die Festigkeit von der Holzart, der Richtung der Belastung zum Faserverlauf, der Temperatur, der Holzfeuchte, der Rohdichte und der Dauer der Belastung ab. Dabei werden verschiedene Festigkeiten unterschieden (Tabelle 3.6).

Tabelle 3.5 Mittel- und Grenzwerte der Rohdichte ausgewählter Baumarten (bezogen auf den absolut trockenem Zustand; nach [3.18], [3.21], [3.22])

Baumart	Rohdichte	
	Mittelwert	Grenzwerte
	in g/cm ³	
Pappel	0,41	0,27–0,65
Fichte	0,43	0,37–0,54
Douglasie	0,47	0,36–0,63
Weißkiefer	0,49	0,30–0,86
Lärche	0,55	0,40–0,82
Ahorn	0,59	0,48–0,75
Esche	0,64	0,41–0,82
Buche	0,75	0,54–0,84
Eiche	0,67	0,38–0,90
Bongossi	1,04	0,72–1,21
Pockholz	1,23	1,20–1,32

Tabelle 3.6 Festigkeiten von Holz

Festigkeit	Definition	Größenordnung
Zugfestigkeit, auch Querkzugfestigkeit	Kraft parallel zur Faserrichtung	Fichte: 82 N/mm ² Eiche: 110 N/mm ² Bongossi: 170 N/mm ²
Reißlänge	Gedachte Länge eines Materialstrangs mit einheitlichem Querschnitt, der durch sein Eigengewicht abreißt	Papier: 8 km Holz: 15–30 km Baustahl: 5 km
Druckfestigkeit	Widerstand gegen Druck quer bzw. parallel zur Faserrichtung	Fichte: 43–50 N/mm ² Eiche: 52 N/mm ² Bongossi: 109 N/mm ²
Biegefestigkeit	Kombination aus Zug- und Druckfestigkeit	Fichte: 66–78 N/mm ² Eiche: 96 N/mm ² Bongossi: 250 N/mm ²

3.1.4 Wirtschaftlich bedeutende Holzsortimente

Messgrößen. Die in der Forstwirtschaft üblichen Vorratszahlen beziehen sich auf den oberirdischen Holzvorrat stehender, lebender Bäume und dienen vor allem zur Beurteilung der forstlichen Produktion. Die gesamte Biomasse eines Baumes weist deutlich höhere Werte auf, da sie auch nichtverholzte sowie unterirdische Komponenten umfasst.

Bei den gebräuchlichsten Raummaßen zur Quantifizierung dieses Holzes kann unterschieden werden zwischen dem stehenden Holzvorrat im Wald und den im Handel üblichen Maßeinheiten. Tabelle 3.7 gibt einen Überblick über diese in der Forstwirtschaft verwendeten Raummaße.

Tabelle 3.7 In der Forstwirtschaft verwendete Raummaße für Holz

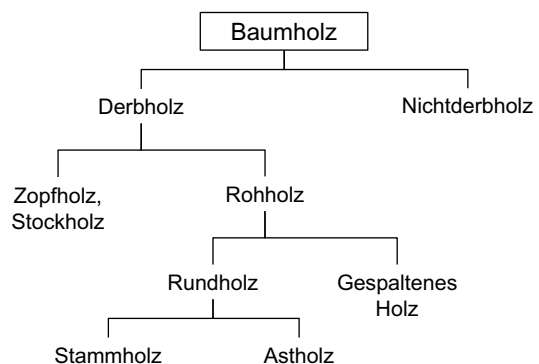
Raummaß	Definition	Einheit
Festmeter	Maß für den stehenden Holzvorrat, 1 fm entspricht 1 m ³ fester Holzmasse, bei geschichtetem Holz ohne Zwischenräume.	fm; m ³
Vorratsfestmeter	Maß für das Derbholzvolumen stehender Bäume oder Bestände (in der Regel mit Rinde).	vfm; m ³
Erntefestmeter	Maß für geerntetes Holz; es errechnet sich aus dem Vorratsfestmeter abzüglich ca. 10 % Rinde und 10 bis 20 % Ernteverlust (u. a. Krone, Wurzelanläufe, Stock, Stammteile mit Fäulnisbefall).	efm; m ³
Raummeter / Ster	Maß für geschichtetes Holz; es entspricht einem Würfel von 1 m Seitenlänge (d. h. 1 m ³) geschichteter Holzmasse einschließlich der Zwischenräume.	rm
Schüttraummeter / Schüttkubikmeter	Raummaß für eine lose geschüttete Holzmenge; es wird für Brennholz, Hackschnitzel, Stückholz, Späne oder entsprechende Granulate verwendet (häufig auch beim Verkauf von ofenfertig geschnittenem Brennholz verwendet).	srm; sm ³
Klafter	Raummaß für Schichtholz; es entspricht je nach Region 3 bis 4 rm.	

Partition der Holzmasse. Die gesamte Holzmasse eines Baumes kann in verschiedene Bestandteile untergliedert werden (Abb. 3.7). Sie sind wie folgt definiert:

- Baumholz: gesamte oberirdische Holzmasse eines Baumes; sie besteht aus Derb- und Nichtderbholz.
- Derbholz: oberirdische Masse eines Baumes (Schaft und Äste) über 7 cm Durchmesser; Derbholz untergliedert sich in Rohholz bzw. Zopf- und Stockholz.
- Nichtderbholz: Holz unter 7 cm Durchmesser.
- Zopfholz: Holz des Wipfelbereichs eines Baumes.
- Stockholz: Bei Stockholz (auch Baumstumpf, Stubben, Wurzelstock, Strunk) handelt es sich um den Rest eines Baumes, der nach der Baumfällung am Hiebsort verbleibt und aus dem Erdreich ragt; es besteht aus
 - Wurzelholz: der unterirdische Teil des Baumes,
 - Stubbenholz: das verbliebene oberirdische Stammstück.
- Rohholz: gefälltes, entwipfeltes und entastetes Holz, das zum Verkauf angeboten wird; Rohholz umfasst sowohl Rundholz als auch gespaltenes Holz.
- Rundholz: Dazu zählen der Stamm bzw. bei größeren Bäumen zusammenhängende Stammstücke und starkes Astholz, nicht aber der Wipfelbereich (Zopfholz) und Reisholz, die Durchmesser unter der Derbholzgrenze von 7 cm aufweisen, sowie das Stockholz (umgangssprachlich werden die Begriffe Rundholz, Rohholz und Derbholz oft synonym verwendet).
- Schaftholz oder Schaftbaumholz: gesamte Masse des Schaftes ohne Äste.
- Schaftderbholz: Masse des Schaftes über 7 cm Durchmesser ohne Äste.
- Reisig, Reisholz: dünne Zweige unter 7 cm Durchmesser.
- Rinde: Sie ist definiert als die vom Kambium nach außen abgegebene Schicht, die den eigentlichen Holzkörper – im gesunden Zustand vollkommen – über und unter der Erde umschließt.

Gefällte Bäume werden zur Vermarktung in der Regel bis zur Derbholzgrenze von 7 cm aufgearbeitet. Aufgearbeitetes Holz kann in Nutzholz (Langnutzholz oder Schichtnutzholz) und Brennholz aufgeteilt werden.

Abb. 3.7 Einteilung des Baumholzes



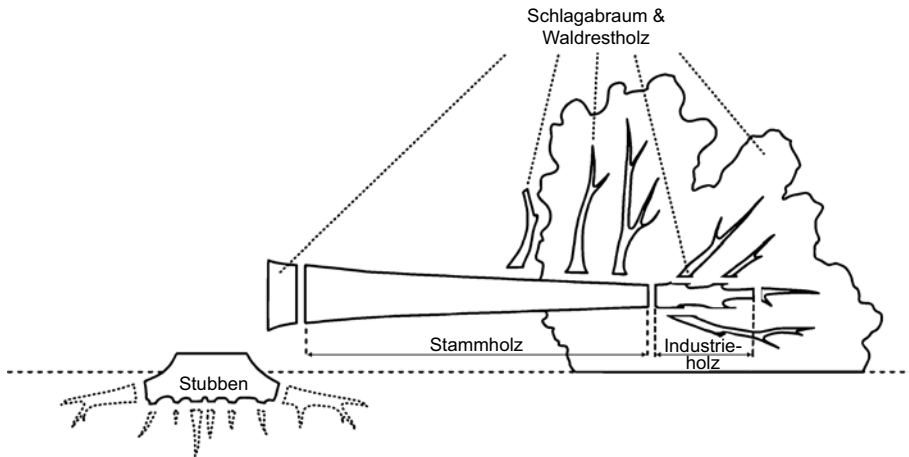


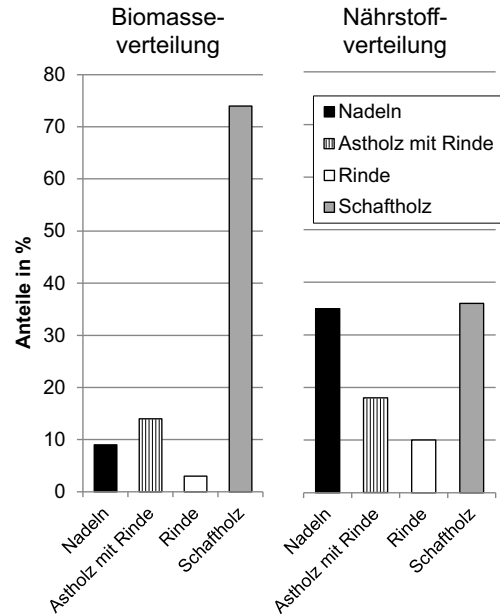
Abb. 3.8 Holzfraktionen, die bei der Aufarbeitung von Bäumen anfallen

Schlagabraum. Die im Wald verbleibenden Holzreste wie Baumkronen, Reisig oder minderwertige Stammteile werden als Schlagabraum bezeichnet (Abb. 3.8). Beim Nadelholz entspricht der Schlagabraum etwa 5 bis 10 % des stehenden Vorrats und bei den Laubhölzern sind es aufgrund der stärker ausgeprägten Kronen etwa 10 bis 15 %. Häufig werden dem Schlagabraum auch Biomassebestandteile wie Laub, Rindenreste und bei Roudungen auch Wurzelteller zugerechnet. Ein Teil des Schlagabraums kann trotz oft geringer Holzqualität und Dimension genutzt werden (z. B. als Brennholz durch Selbstwerber). Der um die nutzbare Holzmenge verringerte Schlagabraum wird als Waldrestholz bezeichnet und verbleibt im Wald.

Waldrestholz zersetzt sich über einen längeren Zeitraum und hat daher aus ökologischer Sicht eine hohe Bedeutung. Die verschiedenen Stadien des Abbaus und Zerfalls bilden den Lebensraum für Saprophyte (Totsubstanzfresser), die in quantitativer wie qualitativer Hinsicht die bedeutendste Tiergruppe in Wäldern sind [3.23], [3.24]. Von den ungefähr 14 000 Tier- und Pflanzenarten, die in deutschen Wäldern leben, ist etwa ein Drittel unmittelbar auf Totholz angewiesen [3.25]. Auch befindet sich in diesen üblicherweise technisch nicht genutzten Biomassekomponenten der größte Teil der wichtigsten Nährelemente (Abb. 3.9), die durch Zersetzungs- und Mineralisierungsprozesse im Nährstoffkreislauf des Waldökosystems erhalten bleiben.

Rohholzsortimente. Rohholz wird in definierte Sortimente unterteilt, welche die Schnittstelle zwischen Holzerzeugung und Holzverwendung bilden und den Markterfordernissen Rechnung tragen. Sortierregeln können sich am Verwendungszweck, der Holzqualität (Gütesortierung) oder an der Dimension (Stärkesortierung) orientieren. Da sich in der Vergangenheit der Holzhandel vor allem auf lokalen Märkten abspielte, hat sich eine Vielzahl historischer Sortierungsregeln entwickelt. Deshalb wurde bereits

Abb. 3.9 Verteilung von Biomasse (links) und Nährstoffen (rechts) in Baumkomponenten (nach [3.17])



1968 auf europäischer Ebene eine Richtlinie (68/89/EWG) zur Harmonisierung der Rohholzsortierung erlassen. Deutschland setzte diese Richtlinie 1969 mit dem Gesetz zur Handelsklassensortierung von Rohholz in nationales Recht um. Da die EU im Zuge ihrer Deregulierungsbemühungen diese Richtlinie 2007 wieder aufhob und somit dem deutschen Gesetz und den darauf aufbauenden Verordnungen die Grundlage entzog, musste in Deutschland eine Nachfolgeregelung erarbeitet werden, die als „Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (RVR)“ nicht mehr gesetzlichen, sondern freiwilligen Charakter hat [3.26]. Auch in der Schweiz und in Österreich sind mit den „Schweizerischen Handelsgebräuchen für Rundholz“ und den „Österreichischen Holzhandels-Usancen (ÖHU)“ vergleichbare Handelsklassensortierungen eingeführt.

Stärkesortierung. Die Stärkesortierung verwendet die Längen- und Durchmesserdimension zur Bildung von Klassen und unterscheidet häufig Langholz und Schichtholz. Bei Langholz werden Stämme auf bestimmte Längen geschnitten („abgelängt“), die in der Regel 5 bis 6 m lang sind. Die früher in Deutschland gebräuchliche „Gesetzliche Handelsklassensortierung für Rohholz“ (Forst-HKS) unterschied zwischen einer Langholzsortierung nach Mittendurchmessern (Mittenstärkesortierung), einer in Süddeutschland gebräuchlichen Sortierung nach Mindestlänge und Mindestzopfdurchmesser (Heilbronner Sortierung) und der Stangensortierung für schwächere Durchmesser bis 13 cm. Tabelle 3.8 zeigt auszugsweise die Stärkeklassen der Mittenstärkesortierung. Ausschlaggebend für die Klasseneinteilung ist hierbei der Stammdurchmesser, der in halber Stammlänge ohne Rinde gemessen wird. Langholz wird in der Regel einzeln handvermessen. Das Volumen

Tabelle 3.8 Stärkeklassen der Mittenstärkensortierung

Klasse	Mittendurchmesser (ohne Rinde)
L0	< 10 cm
L1a	10–14 cm
L1b	15–19 cm
L2a	20–24 cm
L2b	25–29 cm
L3a	30–34 cm
L3b	35–39 cm
L4	40–49 cm
L5	50–59 cm
L6	60–69 cm

der Stämme wird ermittelt, indem über den Mittendurchmesser die Kreisfläche berechnet und mit der Stammlänge multipliziert wird (d. h., es wird unterstellt, dass sich die Durchmesserabnahme entlang des Stammes (Abholzigkeit) durch die Verwendung des Mittendurchmessers ausgleicht). Beispielsweise hat ein Fichtenstamm mit einem Mittendurchmesser von 35 cm bei einer Länge von 10 m ein Volumen von rund 1,0 fm.

Bei der gezeigten Mittenstärkensortierung wird das Holz in Baumängen ausgehalten, wie sie nach Abzopfen und ggf. dem Gesundheitschneiden (d. h. Entfernen von meist unteren Stammteilen, die z. B. von Fäule befallen sind) entstehen. Dieses Langholz wird als „baumlang“ bezeichnet. Stammholz kann aber auch auf Standardlängen eingeschnitten werden, die entweder auf den Zentimeter genau (Fixlängen) oder als eine mittlere Länge mit einem vorgegebenen Schwankungsmaß (Zufallslängen) festgelegt werden. Üblich sind Standardlängen zwischen 2 und 7 m. Das in Standardlängen eingeschnittene Langholz wird als „Abschnitt“ bezeichnet.

Schichtholz resultiert aus einer Stärkesortierung von Stämmen mit minderer Qualität, die in Längen zwischen 1 und 2 m, selten auch 3 m, eingekürzt und schichtweise in Holzstößen gestapelt werden. Der Verkauf erfolgt nach Raummeter. Schichtholz wird als Brennholz oder Industrieholz verwendet.

Gütesortierung. Die Gütesortierung stellt auf die Qualität von Stämmen ab, die anhand von Holzmerkmalen beurteilt wird, die den natürlichen Aufbau des Stammes sowie biotisch und abiotisch verursachte Veränderungen (Tabelle 3.9) beschreiben. In Deutschland werden vier Qualitätsklassen unterschieden, die von gesundem Holz mit geringen Fehlern (Qualitätsklasse A) bis zu Holz, das noch zu rund 40 % gewerblich verwertbar ist (Qualitätsklasse D), abstufen. Sogenannte Klammerstämme weisen Stammteile auf, die verschiedenen Qualitätsstufen zugeordnet werden.

Sortierung nach Verwendungszweck. Die Sortierung nach dem besonderen Verwendungszweck ist meist eine Kombination aus Güte- und Stärkensortierung. Solche Sortierregeln definieren beispielsweise die Anforderungen an Grubenholz, Schwellenholz für

Tabelle 3.9 Holzmerkmale (nach [3.27])

Im natürlichen Aufbau begründete Holzmerkmale	Formveränderungen des Stammes	Abholzigkeit (Durchmesserabnahme über die gesamte Stammlänge, stark abholzig ($\Delta d > 1 \text{ cm/m}$))
		Krummschaftigkeit Zwieselbildung
		Unrundigkeit (d. h. Ovalität, exzentrischer Wuchs, Hohlkehle, Spannrückigkeit)
	Astigkei	Äste, Astnarben
	Farbveränderungen anatomischer Bau	Falschkern, Rotkern, Spritzkern unregelmäßiger Jahringaufbau, Einwüchse, Reaktionsholz, Orientierung des Faserverlaufs
Biotisch verursachte Holzmerkmale	Viren, Bakterien, Pilz	Moderfäule, Weißfäule, Braunfäule
		Rostpilze
		Nekrosen
		Krebse
	Mensch / Tiere	Insektenschäden
		Wirbeltiere (u. a. Schälschäden, Fegeschäden, Nageschäden)
Forstlicher Betriebsvollzug (u. a. Rückeschäden, Ernteschäden, Harznutzungsschäden)		
Pflanzen	Splitterschäden	
Abiotisch verursachte Holzmerkmale	Temperatur- und Feuchteeinwirkung	Rindenbrand
		Frostrisse
		Trockenrisse
		Waldbrand
		Blitzschlag
	Wind- und Schneeeinwirkung	Faserstauchung, Faserbruch
		Astabriss Schaftbruch
Steinschlag		

Bahnschwellen, Papierholz, Spanholz für die Zellstoff- und Spanplattenherstellung, Furnierholz oder Mastenholz. Industrieholz wird überwiegend für Holzverarbeitungsprozesse verwendet, die durch chemische oder mechanische Verfahren die gewachsene Struktur des Holzes auflösen (z. B. Papier, Holzschliff, Spanplatten). Schwächere Stammteile sowie Äste können auch als Brennholz aufgearbeitet werden.

In den Österreichischen Holzhandels-Usancen wird Brennholz als eigenes Sortiment ausgewiesen [3.28]. Hierbei werden die beiden Klassen „hartes“ Brennholz (Rotbuche, Weißbuche, Eiche, Ahorn, Esche, Birke, Ulme) und „weiches“ Brennholz (Fichte, Tanne, Weißkiefer, Lärche) unterschieden. Für den Verkauf werden die Stämme auf 1 m abgelängt und im Schichtmaß aufgesetzt. Rundlinge über 16 mm Durchmesser sind zu spalten. Einzelne Stücke mit weichfaulen Stellen sind zulässig; es dürfen aber keine komplett

weichfaulen Stücke enthalten sein. Daneben gibt es weitere handelsübliche Brennholzsortimente (ofenfertiges Brennholz und Hackgut). Für Hackgut werden Qualitätsklassen nach dem Wassergehalt gebildet, der für den Heizwert und die Lagerfähigkeit entscheidend ist.

3.2 Waldbewirtschaftung und Holzproduktion

Die forstliche Produktion ist geprägt von langen Zeiträumen, Risiken wie Sturm oder Kalamitäten und der Notwendigkeit, eine Vielzahl von gesellschaftlichen Ansprüchen zu befriedigen, die z. T. im Widerstreit mit den angestrebten ökonomischen Zielen stehen. Wäre forstliches Handeln ausschließlich auf die Holzproduktion ausgerichtet, würden ähnlich wie in der großtechnischen Landwirtschaft uniforme Strukturen angestrebt, die eine gleichförmige und kosteneffiziente Bewirtschaftung ermöglichen. Dies würde eine Plantagenbewirtschaftung mit gleichaltrigen Bäumen einer Baumart im Kahlschlagbetrieb nahelegen. Im Gegensatz hierzu setzt sich in Deutschland, Österreich und der Schweiz eine naturnahe Waldbewirtschaftung immer mehr durch, die ungleichaltrige, strukturreiche Mischbestände fördert und auf Kahlschläge weitgehend verzichtet.

3.2.1 Waldstruktur und -aufbau

Kriterien. Der Aufbau von Wirtschaftswäldern kann durch die folgenden drei Kriterien beschrieben werden:

1. Textur: Reinbestände oder Mischbestände

Die Textur eines Reinbestandes ist gekennzeichnet durch das Vorkommen lediglich einer (Haupt-)Baumart. Mischbestände hingegen lehnen sich an natürliche Waldgesellschaften an und sind meist aus zwei bis drei Baumarten aufgebaut; von einem Mischbestand spricht man dann, wenn weder Laub- noch Nadelholzbaumarten mehr als 75 % der Kronenfläche einnehmen.

2. Struktur: horizontaler oder vertikaler Schluss

Die Struktur beschreibt den vertikalen Aufbau von Beständen. Einschichtige Wälder füllen einen einzigen horizontalen Raum mit Kronen aus (meist bei gleichaltrigen Reinbeständen anzutreffen), während sich in mehrschichtigen Wäldern die Kronen auf mehrere, deutlich abgrenzbare Ebenen verteilen. In plenterartigen Strukturen ist die Vertikalstruktur aufgelöst und alle räumlichen Ebenen sind mit Individuen gefüllt (Abb. 3.10). Gleichförmige Wälder weisen einen horizontalen Schluss auf und die einzelnen Stämme sind deutlich erkennbar; die Kronenschicht nimmt einen klar abgegrenzten Bereich ein. Demgegenüber findet sich in strukturreichen Wäldern ein vertikaler Schluss, in dem die Sichttiefe durch die Ausformung von Kronen in unterschiedlicher Höhe begrenzt ist.

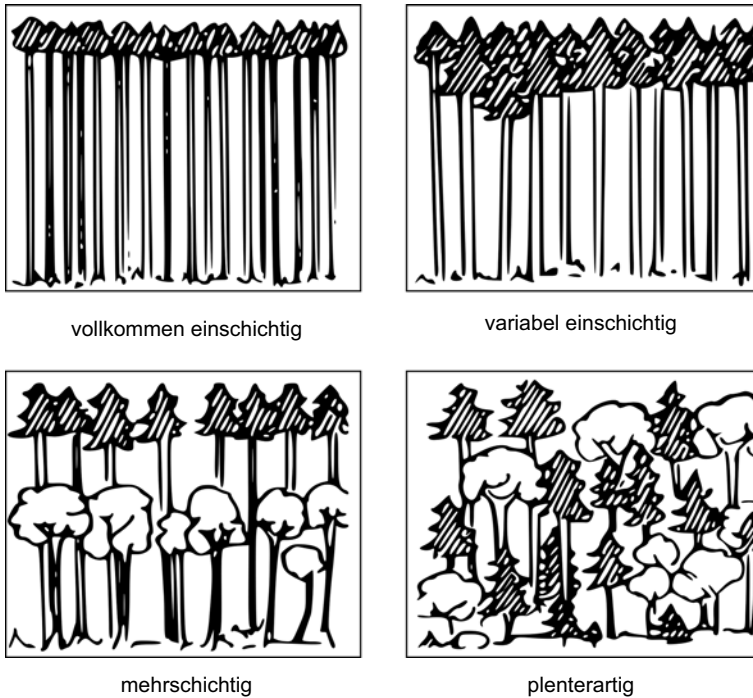


Abb. 3.10 Vertikalstruktur von Wäldern [3.29]

3. Mischung: Mischungsart (Artenspektrum), Mischungsgrad (Artenanteile) und Mischungsform (einzeln, Baumgruppen unterschiedlicher Größe)

In Mischbeständen kann neben den verschiedenen bestandsbildenden Baumarten (Mischungsart) und ihren Anteilen (Mischungsgrad) auch nach der räumlichen Verteilung der Baumarten (Mischungsform) unterschieden werden (Tabelle 3.10). Baumarten können in Einzelmischung, als Gruppen oder flächig (500 bis 5 000 m²) vorkommen.

Tabelle 3.10 Waldstrukturen (Beispiele)

Struktur	Textur			
	Reinbestand	Mischbestand		
Horizontaler Schluss, gleichförmiger Bestand	Fichten-Hochwald	Mischungsart	Fi, Ta	Fi-Ta-Hochwald
		Mischungsgrad	Fi 40 %, Ta 60 %	
		Mischungsform	einzeln	
Vertikaler Schluss, ungleichförmiger Bestand	Tannen-Plenterwald	Mischungsart	Fi, Ta, Bu	Fi-Ta-Bu-Plenterwald
		Mischungsgrad	Fi 30 %, Ta 35 %, Bu 35 %	
		Mischungsform	einzeln	

Fi Fichte; Ta Tanne; Bu Buche

3.2.2 Waldbau

Durch waldbauliche Maßnahmen wird ein neuer Waldbestand etabliert oder in ein bestehendes Bestandsgefüge eingegriffen, um die Bestandsentwicklung hinsichtlich Zusammensetzung, Wachstum, Vitalität und Qualität entsprechend den Zielvorstellungen zu steuern. Hierzu werden Verfahren zur Bestandsbegründung bzw. Bestandsverjüngung, zur Bestandspflege und zur Ernte kombiniert. Während im Kahlschlagbetrieb diese Maßnahmen nacheinander erfolgen, gehen in Dauerwäldern Verjüngung, Pflege und Ernte ineinander über [3.30].

Bestandsbegründung. Die Bestandsbegründung kann entweder künstlich durch eine Saat oder eine Pflanzung oder durch eine Naturverjüngung erfolgen. Die Naturverjüngung wird in der Regel durch die Entnahme von Einzelstämmen aus der herrschenden Kronenschicht initiiert (was durch mehr Licht für die verbleibenden Bäume die Samenbildung anregt) und durch das dadurch veränderte Lichtregime gefördert. Der Hauptbestand wird in mehreren Hieben aufgelichtet und schließlich in einem Endhieb abgeräumt, sodass der Naturverjüngungsbetrieb einen Zeitraum von zwei bis drei Jahrzehnten erfordert. In Waldgebieten mit hohen Wilddichten ist die Entwicklung der Naturverjüngung vor allem von Laubbaumarten oder von Tannen ohne weitergehende Schutzmaßnahmen erschwert oder unmöglich.

Bestandspflege. An die Bestandsverjüngung schließen sich Eingriffe zur Bestandspflege und Bestandserziehung an. Im schlagweisen Hochwald (Kahlschlagbetrieb) erstreckt sich dieser Zeitraum über mehrere Jahrzehnte. Bei Dauerwäldern ist dieser Pflegezeitraum nicht zeitlich definierbar, sondern richtet sich nach dem Durchmesserbereich der Bäume. Maßnahmen der Bestandspflege sind u. a. Läuterung, Durchforstung, Randgestaltung, Unterbau und Ästung (Tabelle 3.11).

Die heute empfohlene Durchforstungsart ist die Hochdurchforstung, bei der in die obere Bestandsschicht eingegriffen wird und dadurch der Wertzuwachs und die Bestands-

Tabelle 3.11 Maßnahmen der Bestandspflege (nach [3.30])

Maßnahme	Beschreibung
Läuterung	Hiebsmaßnahmen bis zum Erreichen des Stangenholzalters (Bäume mit Durchmesser bis 20 cm); meist fallen keine verwertbaren Sortimente an
Durchforstung	Hiebsmaßnahmen zur zielgerechten Ausformung von Stämmen
Randgestaltung	Maßnahmen zur Ausformung der Waldaußen- und Waldinnenränder
Unterbau	Schaffung und Erhaltung einer dienenden Unterschicht unter dem Kronendach zur Pflege höherer Bestandsschichten (z. B. zur Vermeidung von Wasserreißern bei der Eiche)
Ästung	Mechanische Entfernung von Ästen zur Beschleunigung des natürlichen Astreinigungsprozesses zur Verbesserung der Holzqualität, besonders bei Totasterhaltern (z. B. Fichte, Kiefer, Douglasie, Roteiche)

stabilität gefördert werden. Hierdurch soll sich ein Nebenbestand herausbilden, der die Schäfte der Bäume des Hauptbestandes beschatten und der Förderung der Bodenfruchtbarkeit dienen soll. Die früher praktizierte Niederdurchforstung entnimmt die unteren Bestandsschichten und führt bei manchen Baumarten zu Zuwachsverlusten durch den höheren Dichtstand der herrschenden Schicht. Meist werden Durchforstungen im Sinne einer Auslesedurchforstung durchgeführt, bei der potenzielle Wertträger eines Bestandes gefördert werden. Je nach angestrebtem Zieldurchmesser und Baumart werden je Hektar 50 bis 350 „Zukunftsbäume“ (Z-Bäume) im frühen Bestandsalter ausgewählt und systematisch gefördert, indem ihnen ein ausreichender Standraum zum ungehinderten Kronen- und Stammwachstum geschaffen wird.

Betriebsarten. Die Art der waldbaulichen Behandlung prägt den Wirtschaftswald. Meist wird hierbei ein Bewirtschaftungskonzept von der Bestandsbegründung über die Bestandspflege bis zur Nutzung beibehalten. In der Forstwirtschaft werden derartige waldbautechnische Konzepte als Betriebsarten bezeichnet (Tabelle 3.12). Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Bestandsbegründung sowie der räumlichen und zeitlichen Abfolge der Hiebsführung bei der Holzernte und beeinflussen den Aufbau der Wälder und die jeweiligen Produktionsziele. Hier werden die drei Betriebsarten Niederwald, Hochwald und als Zwischenform Mittelwald unterschieden und nachfolgend diskutiert.

Niederwald. Bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts wurden in Mitteleuropa zur Deckung des regelmäßigen Bedarfs an Holz für den Hausbrand und die Herstellung von Holzkohle Niederwälder bewirtschaftet. Mit dem Aufkommen von Braun- und Steinkohle als Energieträger ist diese Bewirtschaftungsform deutlich zurückgegangen. Heute finden sich flächenmäßig bedeutende Niederwaldvorkommen nur noch auf der Alpensüdseite, wo sie vor allem in Berglagen zum Schutz vor Steinschlag und Lawinen angebaut werden.

Niederwälder (Abb. 3.11) nutzen die Fähigkeit zahlreicher Laubbaumarten (z. B. Kastanie, Hainbuche, Ahorn, Esche, Erle, Pappel, Weide) zum Stockausschlag, wenn sie

Tabelle 3.12 Betriebsarten, Betriebsformen, Verjüngung und Produktionsziel

Betriebsart	Niederwald	Mittelwald	Hochwald	
Betriebsform			Schlageweiser Hochwald	Plenterwald
Verjüngungsart	Stockausschlag Wurzelbrut	Stockausschlag Naturverjüngung Pflanzung	Naturverjüngung Saat Pflanzung	Naturverjüngung
Verjüngungsform	Kahlschlag	Schirmschlag	Kahlschlag Femelschlag Schirmschlag Saumschlag	
Produktionsziel	Brennholz	Wertholz und Brennholz	Wertholz	Wertholz

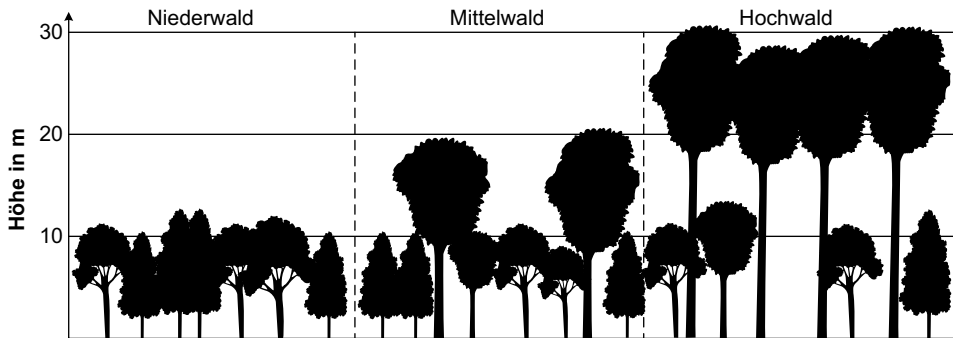


Abb. 3.11 Hoch-, Mittel- und Niederwald

in einem relativ jungen Alter gefällt werden. Daher sind die Umtriebszeiten von Niederwäldern vergleichsweise kurz und betragen bei Laubharthölzern 25 bis 40 Jahre, bei Laubweichhölzern ca. 20 Jahre und bei Weiden 6 bis 10 Jahre. Zum Ende der Umtriebszeit werden die Stämme genutzt. Die Verjüngung erfolgt vegetativ durch Stockausschlag. Das Ertragspotenzial von Niederwäldern bewegt sich zwischen $4 \text{ m}^3/(\text{ha a})$ (Buche) und über $10 \text{ m}^3/(\text{ha a})$ (Pappel, Weide, Erle, Linde Esche, Ahorn) [3.29].

Bei Energieholzplantagen, die der Betriebsart Niederwälder zugeordnet werden können, konzentriert sich die Bewirtschaftung auf energieträgerrelevante Aspekte und die Maximierung des Biomasseertrags. Daher werden hier dann üblicherweise schnellwüchsige Baumarten (in Mitteleuropa beispielsweise Pappel oder Weide; in den Tropen und Subtropen beispielsweise Eukalyptus oder Akazie) mit aus waldbaulicher Sicht sehr kurzen Umtriebszeiten angebaut. Sind die Umtriebszeiten deutlich unter 10 Jahren, spricht man von Kurzumtriebsplantagen (KUP) (Kapitel 4, Band 1). Derartige Kurzumtriebsplantagen können vergleichsweise extensiv auf landwirtschaftlichen Flächen produzieren und so zu einer nachhaltigeren Landnutzung beitragen [3.31]. Da Kurzumtriebsplantagen in der Regel mit landwirtschaftlichen Methoden produziert werden – und eine forstliche Bewirtschaftung im eigentlichen Sinne nicht erfolgt –, werden derartige Holzproduktionsverfahren üblicherweise den landwirtschaftlichen Produktionsmethoden zugerechnet (Kapitel 4, Band 1).

Mittelwald. Eine ebenfalls historische Betriebsform sind Mittelwälder, bei denen auf Niederwaldflächen über mehrere Niederwaldgenerationen einzelne Stämme als Oberholz erhalten werden. Diese Stämme sind entweder aus Samen (Kernwüchse) oder durch das Belassen von Stockausschlägen (Lassreitell) entstanden. Das ungleichaltrige Oberholz dient als Nutzholz und als Mastbäume für die häufig ausgeübte Waldweide (Abb. 3.11). Das gleichaltrige Unterholz (Hauschicht) wird als Brennholz genutzt.

Hochwald. Hochwälder sind durch lange Produktionszeiträume gekennzeichnet und dienen vor allem der Wertholzproduktion. Sie sind die in Mitteleuropa derzeit vorherrschende

Betriebsart, die zu Waldformen mit hohen Einzelbäumen führt (Abb. 3.11). Die Betriebsart Hochwald wird in die beiden Betriebsformen schlagweiser Hochwald und schlagfreier Hochwald, auch Plenterwald genannt, unterteilt.

Schlagweiser Hochwald. Im schlagweisen Hochwald ist der Produktionszeitraum genau festgelegt, an dessen Ende die Endnutzung und die Verjüngung des Bestandes eingeleitet wird. Demnach wird die Holzernte beim Kahlschlagbetrieb beim Erreichen des Zieldurchmessers eingeleitet. In diesem Kahlschlagbetrieb werden alle Bäume eines Bestandes in einem oder in kurz aufeinanderfolgenden Hieben entnommen. Der Waldcharakter der Fläche geht damit zeitweise verloren. Vorteile des Kahlschlags sind die einfache Hiebsführung und der Anfall einer großen Holzmenge pro Flächeneinheit; dadurch wird die Vermarktung des eingeschlagenen Holzes vereinfacht. Nachteilig wirken sich aber u. a. die Entkopplung des Nährstoffkreislaufs zwischen Boden und Bestand, die Störung des ökologischen Gleichgewichts und der Verlust von Habitaten aus. Der Kahlschlagbetrieb wird häufig als Plantagen mit kurzen Umtriebszeiten realisiert. Plantagen bestehen überwiegend aus einer Baumart, die in regelmäßigen räumlichen Mustern gepflanzt werden. Die Bewirtschaftung von Forstplantagen zielt auf eine möglichst hohe und kosteneffektive Produktivität. Dies wird durch eine gezielte Auswahl der Baumarten und Pflanzenherkünfte bei der Begründung und eine intensive Bestandspflege erreicht. Plantagen dienen üblicherweise der Produktion von Holz für industrielle Zwecke (insbesondere für die Papier- und Zellstoffindustrie), für Konstruktionsholz oder für nicht unmittelbar industrielle Zwecke (u. a. Erzeugung von Brennholz, Früchten, Ölen, Harz, Gerbstoffen oder Kautschuk).

Obwohl Kahlschlag das weltweit am meisten verbreitete Bewirtschaftungsverfahren ist, wird er in Mitteleuropa nur noch in Ausnahmefällen praktiziert und ist ab einer bestimmten Fläche genehmigungspflichtig. Statt einer abrupten, vollständigen Ernte der Bestände (d. h. Kahlschlag) erstreckt sich der Verjüngungszeitraum alternativ dazu über mehrere Jahrzehnte. Dadurch bleibt eine dauerhafte Waldbestockung erhalten und die Holzernte und die Verjüngung des Bestandes werden verknüpft. Gebräuchliche Verjüngungsverfahren sind der Schirmschlag, der Femelschlag oder der Saumschlag.

- Beim Schirmschlag wird der Altbestand auf einer größeren Fläche gleichmäßig aufgelichtet.
- Beim Femelschlag wird das Altholz nicht flächig, sondern in der Größe von Gruppen (sogenannte Femelstellungen) aufgelichtet (Durchmesser ein bis zwei Altbaumlängen); dadurch werden Lücken im ansonsten geschlossenen Kronendach erzeugt. In weiteren Hieben werden die Femel erweitert und der Altbestand wird sukzessive entnommen.
- Der Saumschlag setzt an den Randbereichen eines Bestandes an. In mehreren Hieben wird der Altbestand streifenweise entfernt, wobei an dem Rand des Bestandes begonnen wird, welcher der Hauptgefahrenrichtung abgewandt ist. Der Saumhieb kann gerade, keilförmig oder gebuchtet und im Kahlhieb-, Femelschlag- oder Schirmschlagverfahren durchgeführt werden.

Bei allen diesen Eingriffsformen wird das Kronendach des Altbestandes über einen längeren Zeitraum durch die Ernte von Bäumen sukzessive aufgelöst und dadurch die Naturverjüngung eingeleitet bzw. Ergänzungspflanzungen durchgeführt.

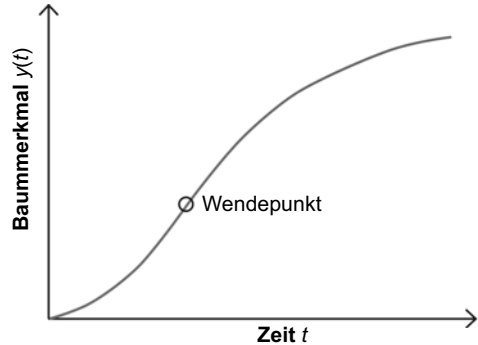
Schlagfreier Hochwald (Plenterwald). Vor allem in Süddeutschland, in der Schweiz und in Frankreich hat sich als weitere Ausprägung des Hochwaldes die Betriebsform des Plenterwaldes entwickelt. In einem Plenterwald sind Bäume aller Dimensionen kleinflächig und einzelstammweise vermischt. Jährlich oder in kurzen Intervallen werden einige wenige Stämme genutzt, welche die Hiebsreife (d. h. den gewünschten Zieldurchmesser) erreicht haben. Kann dauerhaft der jährliche Holzzuwachs entnommen werden, dann befinden sich Plenterwälder im sogenannten Plentergleichgewicht, das sich durch konstante Vorräte und eine gleichbleibende Verteilung der Stammdurchmesser auf Durchmesserklassen auszeichnet. Da in Plenterwäldern auch auf kleiner Fläche nachhaltig Starkholz erzeugt werden kann, hat sich diese Bewirtschaftungsform besonders im bäuerlichen Kleinprivatwald etabliert. In Plenterwäldern muss die Verjüngung auch im Schatten unter dem Altholzschirm erfolgen. Daher kommen Plenterwälder oft im Verbreitungsgebiet der schattentoleranten Tanne vor. Neben der Tanne finden sich in Plenterwäldern hauptsächlich Buchen und Fichten. Beispielsweise in Thüringen finden sich darüber hinaus Laubholz-Plenterwälder ohne Beteiligung von Tannen.

3.2.3 Waldwachstum

In Wäldern geht die Biomasseproduktion einher mit langen Produktionszeiträumen, die durch das Wachstumsverhalten der Baumarten vorgegeben sind. Als Wachstum bezeichnet man dabei die Größenzunahme (Dimension und Masse) in einem organischen System. Bei Waldbeständen wird vorrangig das Volumen- und Wertwachstum untersucht, das wiederum durch das Wachstum von Stammdurchmesser, Baumhöhe, Stammform und Kronenfläche bestimmt wird.

Baumwachstum. Unter Wachstum versteht man die Zunahme eines bestimmten Merkmals oder einer Variablen (z. B. der Baumbiomasse) über der Zeit. Die Zunahme dieses Merkmals pro Zeiteinheit stellt die Wachstumsrate dar und wird in der Forstwissenschaft als Zuwachs bezeichnet. Das erreichte Wachstum eines Baumes ist beispielsweise zu jedem Zeitpunkt als aktuelles Baumvolumen messbar und in Form einer Wachstumskurve darstellbar. Diese Wachstumskurve kann man sich modellhaft als asymmetrische Sättigungskurve vorstellen, welche über der Zeit ansteigt und durch einen Wendepunkt gekennzeichnet ist. Dieser markiert die beginnende Abnahme der Wachstumsraten. Die Wachstumskurve stellt die erreichte Größe des Merkmals grafisch oder mathematisch als Funktion der Zeit dar (Abb. 3.12). Hierbei bezeichnet t die Zeit, die üblicherweise in Jahren angegeben wird, und y ist ein Platzhalter für Merkmale wie Durchmesser, Baumhöhe, Volumen oder Biomasse.

Abb. 3.12 Wachstumskurve als Entwicklung eines Baumerkmals $y(t)$ in Abhängigkeit von der Zeit t



Das Baumwachstum ist gekennzeichnet durch eine exponentielle Größenzunahme im Jugendstadium, solange die Entwicklung nicht behindert wird. Nach einem Wendepunkt schwächt sich das Wachstum ab und nähert sich asymptotisch einem Maximum.

Bestandswachstum. Das Wachstum eines Bestandes ist schwieriger zu beschreiben als das Wachstum eines Baums, da es sich aus den Baumindividuen des Bestandes und deren Wachstumsverhalten zusammensetzt. Aktuelle Merkmale von Beständen werden dabei nicht nur vom Wachstum der Bäume, sondern auch von vorhergehenden oder aktuellen waldbaulichen Eingriffen in den Bestand und von der natürlichen Mortalität beeinflusst. Das Bestandswachstum wird entweder als die Summe der Beiträge der Einzelbäume bezogen auf eine Flächeneinheit (z. B. Stammzahl pro Hektar, Volumen pro Hektar, Wert pro Hektar) oder als Mittelwert (mittlere Höhe, mittlerer Durchmesser, mittleres Volumen) bestimmt. Zudem müssen für den Bestand jene Größen oder Eigenschaften charakterisiert werden, die beim Einzelbaum keine Rolle spielen (u. a. statistische Verteilung eines bestimmten Merkmals (z. B. Durchmesserverteilung), Dichte (z. B. Stammzahl pro Hektar, Grundfläche pro Hektar), Baumartenzusammensetzung, vertikale Struktur). Bei einem Bestand wird unterschieden zwischen dem stehenden oder dem verbleibenden Bestand, dem ausscheidenden Bestand und der Gesamtproduktion (Abb. 3.13).

Zuwachs. Das Wachstum in einem definierten Zeitintervall wird als Zuwachs bezeichnet. Je nach der Dauer des beobachteten Zeitintervalls ergeben sich verschiedene Zuwachsdefinitionen:

- laufender jährlicher Zuwachs; er beschreibt den Zuwachs im Laufe eines Zeitintervalls von einem Jahr,
- periodischer jährlicher Zuwachs; er entspricht näherungsweise dem laufenden jährlichen Zuwachs und wird als durchschnittlicher Zuwachs für Zeitintervalle von 2 bis 20 Jahren berechnet,
- durchschnittlicher jährlicher Zuwachs; er bezieht sich auf die Gesamtproduktion innerhalb des Zeitintervalls von der Bestandsbegründung bis zu einem bestimmten Alter (in der Regel 100 Jahre).

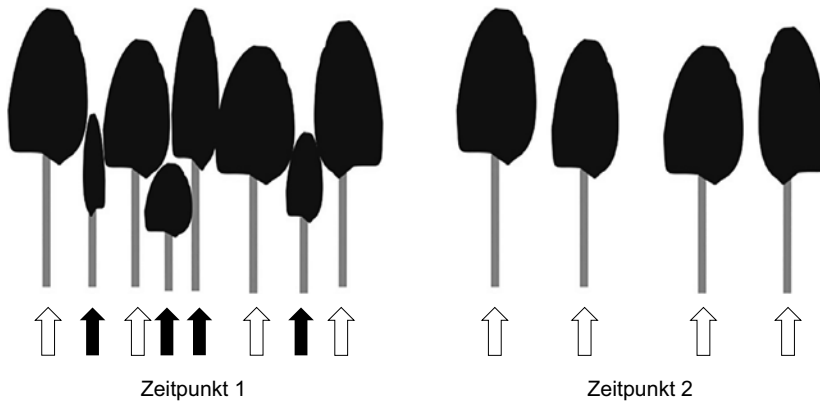


Abb. 3.13 Verbleibender (weiße Pfeile) und ausscheidender (schwarze Pfeile) Bestand vor (Zeitpunkt 1) und nach der Maßnahme (Zeitpunkt 2)

Zuwachskurven stellen die Wachstumsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit grafisch dar. Sie haben oft die Form einer asymmetrischen Kurve (Abb. 3.14) und gelten für verschiedene Merkmale wie Biomasse, Volumen oder Durchmesser.

Zuwachs- und Wachstumsverlauf. Da der Zuwachs die erste Ableitung der Wachstumskurve ist, kulminiert die Zuwachskurve zu dem Zeitpunkt, in dem die Wachstumskurve ihren Wendepunkt erreicht, wo sie definitionsgemäß die größte Steigung aufweist. Umgekehrt entspricht die zu einem bestimmten Zeitpunkt erreichte Wachstumsgröße dem Integral der Kurve des laufenden Zuwachses. Die Tangente vom Nullpunkt aus berührt die Wachstumskurve im Zeitpunkt der Kulmination des durchschnittlichen jährlichen Zuwachses (Abb. 3.14).

Gesamtwuchsleistung. Die Wachstumskurve (Abb. 3.14, oben) kann beispielsweise herangezogen werden, um die Gesamtwuchsleistung GWL eines Bestandes zu beschreiben. Diese Gesamtwuchsleistung GWL eines Bestandes bis zu einem bestimmten Alter entspricht folglich der Summe aus dem aktuell messbaren Holzvolumen (wird als Vorrat bezeichnet) V_t im Alter t sowie der Gesamtmenge der Nutzungen $N_{0...t}$ und der Mortalität $M_{0...t}$ bis zum Alter t . Sie ist gleich der Summe aller laufenden jährlichen Volumenzuwächse bis ins Alter t (Gleichung (3.1)).

$$GWL = V_t + \sum N_{0...t} + \sum M_{0...t} \quad (3.1)$$

Abbildung 3.15 zeigt schematisch den Verlauf von Gesamtwuchsleistung GWL und Vorrat V in einem bewirtschafteten Waldbestand. Der Vorrat wird durch mehrere, zeitlich versetzte Eingriffe reduziert. In einem unbewirtschafteten Bestand verlaufen beide Kurven näher beieinander, da sich der Vorrat nur durch das Absterben von Einzelbäumen (Mortalität), nicht aber durch Nutzungseingriffe verringert.

Abb. 3.14 Zusammenhang zwischen Wachstumskurve (oben) sowie laufendem jährlichem Zuwachs und durchschnittlichem jährlichem Zuwachs eines Bestandes (unten)

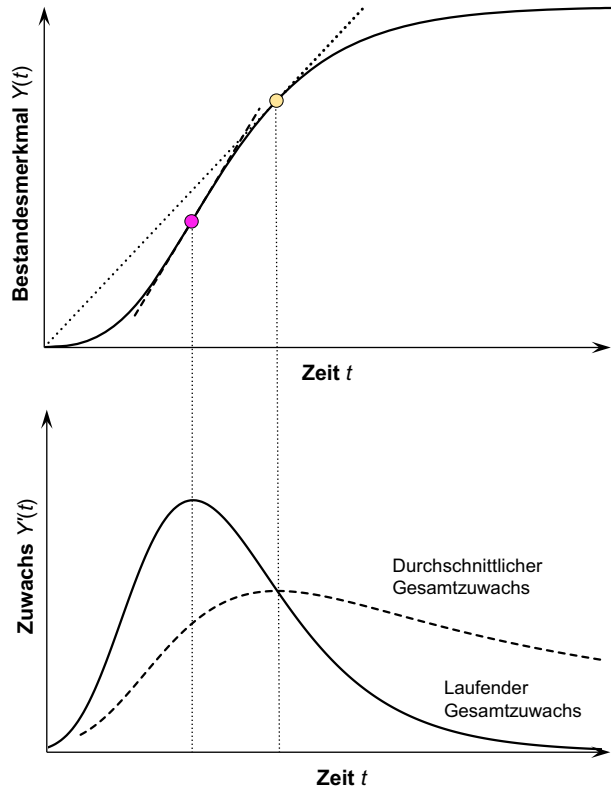
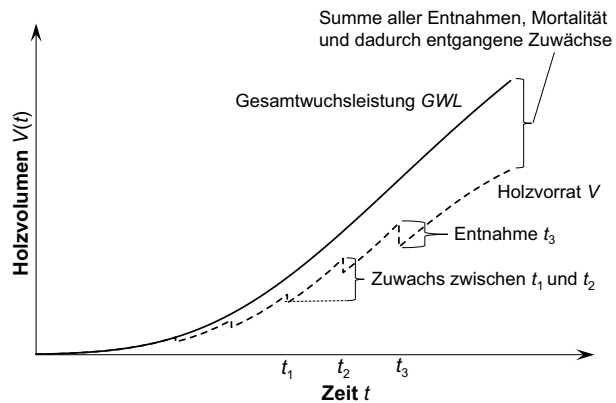


Abb. 3.15 Entwicklung von Gesamtzuwachsleistung (GWL) und Vorrat (V) in einem Bestand über der Zeit (t)



Ertragstafeln. Die Gesamtzuwachsleistung eines Bestandes ist abhängig von Standortqualität, Baumart, Bewirtschaftung, Umtriebszeit und dem Auftreten von Störungen der Biomasseproduktion. Als Hilfsmittel für den praktischen Vollzug wurden vor allem in Europa sogenannte Ertragstafeln erarbeitet, die aus Daten von Dauerbeobachtungsflächen die

Tabelle 3.13 Holzvorrat (*V*) und Gesamtwuchsleistung (*GWL*) für ausgewählte Baumarten bei einer starken Durchforstung (nach [3.32])

Baumart	Standort- güte	Alter							
		30 Jahre		60 Jahre		80 Jahre		120 ^a Jahre	
		<i>V</i> in m ³	<i>V</i> in m ³	<i>GWL</i> in m ³	<i>V</i> in m ³	<i>GWL</i> in m ³	<i>V</i> in m ³	<i>GWL</i> in m ³	
Eiche	1. EK	84	202	390	252	554	326	835	
	3. EK	18	118	176	161	290	224	493	
Buche	1. EK	28	216	297	315	531	438	961	
	3. EK		82	94	164	230	264	478	
Fichte	1. EK	157	462	726	565	1 001	644	1 376	
	3. EK	32	261	379	356	584	452	870	
Kiefer	1. EK	149	277	490	322	647	362	881	
	5. EK	26	80	90	115	157	135	260	
Douglasie	1. EK	261	569	1 001	743	1 346	854 ^a	1 636 ^a	
	3. EK	121	372	564	478	779	547 ^a	940 ^a	

^a bei der Douglasie Alter 100 Jahre; die Ertragsklasse (EK) bezeichnet die Standortgüte

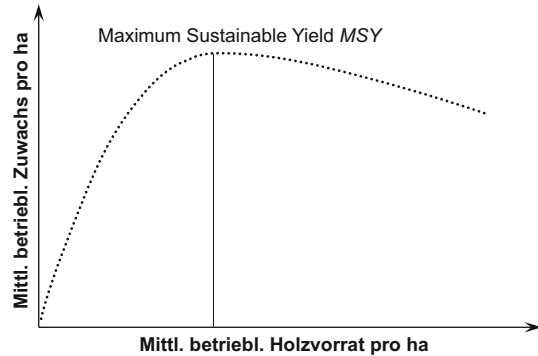
Wachstumsverhältnisse für Bestände getrennt nach Baumart, Standortqualität und Durchforstungsstärke modellmäßig abbilden. Die Werte aus derartigen Ertragstabellen können nicht direkt auf beliebige Bestände übertragen werden, da örtliche Unterschiede zu erheblichen Wachstumsverschiebungen führen können. Sie geben jedoch allgemeine Hinweise auf die Vorratsentwicklung verschiedener Baumarten und Standorte. Tabelle 3.13 zeigt beispielhaft derartige Werte einer Ertragstafel [3.32]. Zur Bezeichnung der Standortgüte wird die sogenannte Ertragsklasse herangezogen, die ein Maßstab für die Leistungsfähigkeit eines Waldbestandes ist. Demnach sind die Wachstumsunterschiede zwischen Baumarten und Ertragsklassen offensichtlich.

Die Produktivität der einzelnen Baumarten(-gruppen) zeigt deutliche Unterschiede. Beispielsweise lag in Deutschland zwischen 2002 und 2012 der jährliche Zuwachs von Nadelholz bei 12,8 m³/(ha a) und der von Laubholz bei 8,7 m³/(ha a). Die Douglasie weist mit 18,9 m³/(ha a) den höchsten jährlichen Zuwachs auf und liegt damit deutlich über dem der anderen Baumarten [3.33].

Im deutschen Wald werden vom gesamten jährlichen Zuwachs etwa 87 % genutzt oder scheiden durch natürliche Mortalität aus; der durchschnittliche Vorrat je Hektar beträgt 336 m³ und liegt bei der Tanne mit 488 m³/ha am höchsten [3.33], [3.34].

Biomasseproduktion in einem Forstbetrieb. Ein Forstbetrieb bewirtschaftet in der Regel zahlreiche Waldbestände; beispielsweise können es in Skandinavien mehrere Tausend sein. In einem Altersklassenwald hat man es dann mit einer „Population“ verschieden alter Waldbestände zu tun, deren Zuwachs insgesamt von der Höhe des vorhandenen Holzvorrats aller Waldbestände abhängt. Es handelt sich somit um eine von der Holzmenge und

Abb. 3.16 Durchschnittlicher Zuwachs und nachhaltig maximal nutzbares Holzvolumen in einem Forstbetrieb bei variabler Höhe des Durchschnittsholzvorrats (mittl. mittlerer, durchschnittlicher; betriebl. betrieblicher)



damit von der Populationsdichte abhängige Funktion des Biomassezuwachses, die man mit der Zuwachsfunktion von Fischpopulationen vergleichen kann [3.35].

Ein perfekt nachhaltig aufgebauter Forstbetrieb würde für jedes Bestandsalter eine genau gleich große Waldfläche aufweisen, sodass jedes Jahr eine konstante Fläche mit erntereifen Bäumen geerntet werden könnte. Für einen solchen Forstbetrieb ist ein jährlicher durchschnittlicher Zuwachs pro Hektar in Höhe des durchschnittlichen jährlichen Gesamtzuwachses eines repräsentativen Waldbestandes zu erwarten (Abb. 3.14, unten). Die Waldmanager können dann über die Wahl der Produktionszeit unterschiedliche Durchschnittsvorräte und -zuwächse erreichen; dabei würden die resultierenden Zuwächse mit unterschiedlichen durchschnittlichen Holzvorräten pro Hektar Betriebsfläche einhergehen. Der maximal mögliche Zuwachs beschreibt schließlich die größte nachhaltig nutzbare Erntemöglichkeit (engl. maximum sustainable yield (*MSY*)) (Abb. 3.16).

Welche Vorratshöhe anzustreben ist, hängt insbesondere von der Zeitpräferenzrate der Waldbesitzer und damit von der Höhe des verwendeten Kalkulationszinsfußes ab. Links der größten nachhaltig nutzbaren Erntemöglichkeit *MSY* (Abb. 3.16) können durch den Aufbau von Holzvorrat höhere Zuwächse erzielt werden. Solche Vorratsaufstockungen erfordern jedoch zeitweise verminderte Holznutzungen, da ein Teil des Zuwachses für den Vorratsaufbau benötigt wird. Es handelt sich somit um eine klassische Investition, indem heute auf eine mögliche Holznutzung verzichtet wird, um in Zukunft mehr nutzen zu können [3.36].

Ob Vorratshöhen rechts vom Vorrat der größten nachhaltig nutzbaren Erntemöglichkeit *MSY* (Abb. 3.16) ökonomisch sinnvoll sind, hängt insbesondere von den Kosten der Holzernte ab, d. h. ob bei sehr hohen Durchschnittsvorräten (Populationsdichten) eine kostengünstigere Holzernte möglich wird. Optima rechts von der größten nachhaltig nutzbaren Erntemöglichkeit *MSY* (Abb. 3.16) wurden bislang allerdings nur bei Fischbeständen [3.37], nicht jedoch für Wälder beschrieben.

Störungen in der Waldbiomasse-Produktion. Bäume sind ortsgebunden und können somit Ereignissen wie Stürmen, Schneebruch, Feuer, Frost, Dürre und Insektenbefall nicht

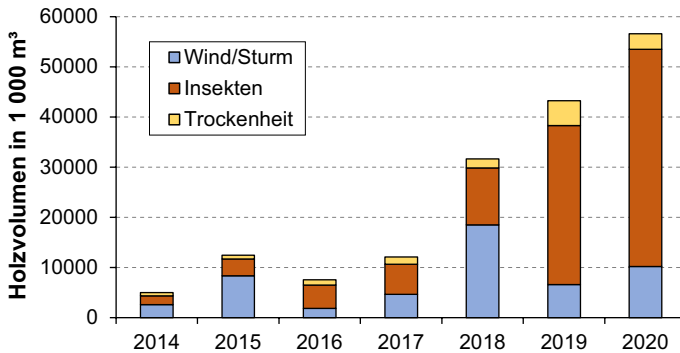


Abb. 3.17 Entwicklung des ungeplanten Holzeinschlags in Deutschland, verteilt auf die wichtigsten Einschlagsursachen [3.43]

ausweichen. Solche Ereignisse führen zu einer Unterbrechung der Vegetationsentwicklung und werden somit als Störungen bezeichnet [3.38]. Derartige Störungen der Biomasseentwicklung in Wäldern sind ein bekanntes Phänomen, das insbesondere aus forstökonomischer Sicht schon seit Langem analysiert wird [3.39]; beispielsweise traten in Deutschland im Zeitraum von 1981 bis 2018 98 schwere Winterstürme auf, von denen Sturm „Lothar“ (1999) die schwerste derartige Störung war [3.40].

Der globale Klimawandel führt zu häufiger werdenden Störungen [3.41]; dabei scheint vor allem Trockenheit als Auslöser an Bedeutung zu gewinnen [3.42]. Dies zeigt sich beispielsweise in den statistisch dokumentierten Holzeinschlagsmengen für Deutschland (Abb. 3.17). Nach dieser Einschlagsstatistik [3.43] mussten allein in den Jahren 2018 bis 2020 rund 138 Mio. m³ Holz ungeplant geerntet werden. Während der Anteil derartigen unplanmäßig geernteten Holzes 2014 bei 10 % lag, waren es beispielsweise 2020 75 %. Dabei ist ein klarer Trend hin zu einem Borkenkäferbefall (Insektenbefall) und zu Schäden durch Trockenheit als mittlerweile wichtigste Einschlagsursachen zu erkennen. Beide Einschlagsursachen bedingten im Jahre 2020 58 % des gesamten Holzeinschlags in Deutschland (der Gesamteinschlag lag 2020 bei gut 80 Mio. m³). Sowohl die Zahl der Borkenkäfergenerationen als auch die Trockenheit sind vom Klima abhängig, sodass sich in diesen Zahlen der Einfluss des Klimawandels sehr deutlich abzeichnet.

Neben der klimatisch bedingten Zunahme von Störungen bilden auch neuartige invasive Schädlinge eine erhebliche Bedrohung für den Wald in Mitteleuropa. Solche Schädlinge werden durch den globalisierten Handel und durch die generell erhöhte Mobilität der Menschen aus verschiedenen Ländern eingeschleppt bzw. verbreitet [3.44].

Derartige Störungen beeinträchtigen nicht nur die Biomasseproduktion, sondern auch wichtige Ökosystemleistungen. So sind rund 10 % des in Wäldern gebundenen Kohlenstoffs durch Einschleppung neuartiger invasiver Schädlinge gefährdet [3.44]; d. h., durch den Ausfall von Waldbeständen infolge von natürlichen Störungen können erhebliche Mengen an zuvor gebundenem Kohlenstoff freigesetzt werden [3.45]. Szenarien zeigen,

Tabelle 3.14 Bisherige Überlebenswahrscheinlichkeit unserer wichtigsten Baumarten bis zum Alter 100 Jahre (nach [3.48])

Baumart	Überlebenswahrscheinlichkeit bis Alter 100 Jahre	Durchschnittliche Jahrestemperatur auf den Untersuchungsflächen	Durchschnittlicher Jahresniederschlag auf den Untersuchungsflächen
Eiche	0,77	9,2 °C	783 mm
Buche	0,79	8,0 °C	912 mm
Fichte	0,57	6,6 °C	957 mm
Kiefer	0,73	6,7 °C	734 mm
Douglasie	0,71	9,1 °C	894 mm
Tanne	0,82	7,4 °C	1 124 mm

dass Europas Wälder durch eine Kombination aus Klimawandel und veränderten Störungsregimen in den 2020er-Jahren von Kohlenstoffsenken zu Kohlenstoffquellen werden könnten [3.46].

In Mitteleuropa wachsende Baumarten zeigen verschiedene Anfälligkeiten für natürliche Störungen. Besonders die Fichte, deren Anbau wegen hoher Produktivität und guter Holzqualität stark ausgedehnt wurde [3.47], hat schon unter den günstigeren Anbaubedingungen in der Vergangenheit eine sehr hohe Anfälligkeit gezeigt. Die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit, mit der die Fichte ein Alter von 100 Jahren erreichte (S100), betrug nur 57 % [3.48] (Tabelle 3.14). Dagegen ist die Tanne in ihrem derzeitigen Anbaubereich unter dem in den vergangenen Jahrzehnten herrschenden Klima die stabilste Baumart mit einer S100 von 82 %; jedoch fielen auf den Untersuchungsflächen mit Tanne sehr hohe Jahresniederschläge.

Beeinträchtigungen durch Störungen werden in Zukunft insbesondere in reinen Fichtenbeständen noch weiter zunehmen [3.49]. Abbildung 3.18 veranschaulicht für ein Fall-

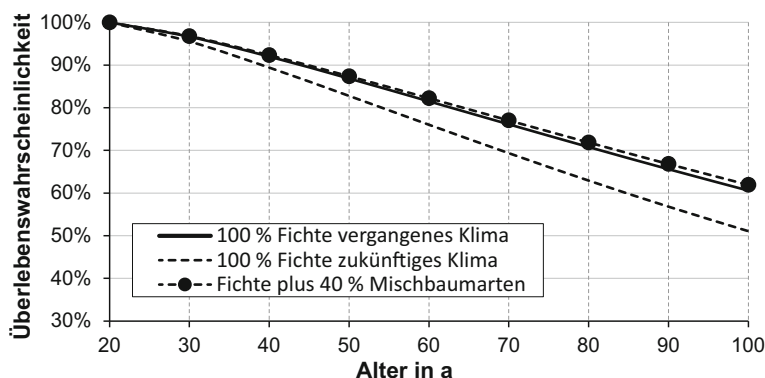


Abb. 3.18 Mögliche Verlagerung der Überlebenswahrscheinlichkeit der Fichte bei trockener und wärmer werdendem Klima für ein Fallbeispiel aus dem vorderen Bayerischen Wald (Überlebenswahrscheinlichkeit nach [3.48], Klimaszenarien nach [3.50])

beispiel aus dem vorderen Bayerischen Wald (ein bisher optimales Anbauggebiet für Fichte), wie sich die Überlebenswahrscheinlichkeit beim Übergang vom bisherigen zu einem möglichen zukünftigen Klima nach unten verlagert (Klimadaten aus [3.50], Klimaszenario RCP 8.5).

3.2.4 Anpassung der Wälder an den Klimawandel

Vor dem Hintergrund zukünftig zunehmender Störungen [3.51] müssen Anpassungen der Wälder erfolgen. Dies kann beispielsweise durch Anwendung folgender Prinzipien erreicht werden (nach [3.52] mit Veränderungen):

- Wahl resistenter Baumarten, Integration gut angepasster einheimischer Baumarten,
- kleinräumige Waldbauverfahren und Förderung eines heterogenen Bestandsaufbaus,
- Förderung von Baumarten- und genetischer Diversität,
- Vermeidung intensiver Eingriffe (z. B. großflächige Kahlschläge),
- Integration von Naturverjüngung.

Diese Aspekte werden nachfolgend vertieft.

Resistente Baumarten. Die wichtigsten mitteleuropäischen Baumarten weisen eine unterschiedliche Resistenz gegenüber Störungen auf. Unter Resistenz wird die Fähigkeit einer Baumart verstanden, Störungsereignisse unverändert zu überdauern; dies inkludiert auch die Fähigkeit eines Waldes, nach einer Störung rasch wieder in einen Zustand wie vor der Störung zurückzukehren [3.54]. Insbesondere an Trockenheit angepasste, oft lichtbedürftige Baumarten (z. B. Traubeneiche) zeigen eine vergleichsweise hohe Resistenz unter einem sich verändernden Klima. Dabei sind Baumarten mit hoher Resistenz jedoch nicht immer auch die profitabelsten Investitionsmöglichkeiten für Waldbesitzer [3.55]. Durch die Beimischung von resistenten Baumarten zu solchen mit geringerer Resistenz, um Mischbestände zu erzielen, können jedoch stabilisierende Effekte erreicht werden. Abbildung 3.18 zeigt exemplarisch einen solchen Effekt für Fichtenbestände, wo die sehr labilen Fichten durch Beimischung von anderen Baumarten mit einem Anteil von 40 % eine Überlebenswahrscheinlichkeit erreichen können, die in reinen Fichtenbeständen nur bei unverändertem Klima möglich wäre.

Kleinräumiger Waldbau. Die Forstpraxis in naturnah bewirtschafteten Betrieben lichtet schon früh das Kronendach der Waldbestände auf und pflanzt kleinflächig junge Bäumchen oder stimuliert die natürliche Verjüngung durch eine Umlichtung der Kronen von Mutterbäumen. Dieses Vorgehen ruft heterogene Waldbestände hervor, welche auf kleiner Fläche aus mehreren Baumkohorten mit einem unterschiedlichen Alter bestehen. Solche ungleichaltrigen Wälder haben einerseits eine hohe Resistenz gegenüber Störungen [3.56]. Andererseits können sich heterogene Wälder nach Störungen schneller erholen

und weisen damit auch diesbezüglich eine erhöhte Resilienz auf [3.57]. Derartige Störungen treffen insbesondere schon ältere Baumkohorten, wobei junge Kohorten oft verschont bleiben. Die jungen Baumkohorten entwickeln sich nach einer Störung rasch und tragen zu einem beschleunigten Wiederaufbau des geschädigten Waldes bei.

Baumarten- und genetische Diversität. Die Mischung von Baumarten mit unterschiedlichen funktionellen Merkmalen erhöht die Anpassungsfähigkeit der Wälder bei sich ändernden Bedingungen. Funktionelle Merkmale bestimmen die Fitness der Baumarten, also ihr Wachstum, ihre Reproduktion und ihr Überleben [3.58]. Solche Merkmale umfassen beispielsweise die erreichbare Baumhöhe, die Holzdichte, die Blattfläche und Blattmasse pro Flächeneinheit, die Stickstoffkonzentration im Blatt sowie die Diasporenmasse (Ausbreitungseinheiten wie z. B. Früchte, Samen oder Sporen) [3.59]. Baumarten mit hohen Reproduktionsraten (z. B. Birke) können große Flächen nach Störungen schnell wieder besiedeln, während andere eher in späteren Sukzessionsstadien auftretende Baumarten eine höhere Holzdichte und oft auch Biomasseproduktion aufweisen. Trockenheitstolerante, aber schattenintolerante Baumarten können die Anpassungsfähigkeit der mitteleuropäischen Wälder aufgrund ihrer sonst seltenen funktionellen Merkmale verbessern [3.60]. Trockenheitsresistenz ist jedoch keine statische Eigenschaft. Sie wird durch physiologische, aber auch durch langfristige (Selektion [3.61]) und kurzfristige genetische Anpassung (Elternbäume vererben Umwelterfahrungen) insbesondere in Gegenden mit heute schon vorherrschender Trockenheit gefördert. Interessant ist die kurzfristige Anpassungsmöglichkeit der Nachkommenschaft. Dabei wird das „Umweltgedächtnis“ der Elternbäume vererbt [3.62], indem der genetische Code bei veränderten Umweltbedingungen anders abgelesen wird als bei historischen Umweltbedingungen. Die Einbringung von Baumarten, deren Samen in solchen trockenen Gegenden gebildet wurden, in Bereiche mit trockener werdendem Klima kann daher eine sinnvolle Anpassungsmaßnahme sein [3.63]. Genetische Diversität sorgt zudem für eine bessere Anpassungsfähigkeit an neu eingeführte Schädlinge [3.44], [3.64].

Vermeidung intensiver Eingriffe. Nach großflächigen Kahlschlägen können oft lediglich homogene Bestände aus nur einer Baumart begründet werden. Daher gilt es solche intensiven Eingriffe zu vermeiden. Auch im Rahmen der natürlichen Verjüngung sind kleinflächiges Vorgehen und zeitlich verteilt ankommende Bäumchen günstiger für die genetische Vielfalt als eine großflächige und homogene natürliche Verjüngung [3.61]. Darüber hinaus empfiehlt sich nach großflächigen Störungen eine differenzierte Aufarbeitung und Bergung des Schadholzes, da eine zu gründliche Flächenräumung zu hohen Verlusten an Biodiversität führen kann [3.65] und auch nicht immer ökonomisch vorteilhaft ist [3.49].

Integration von Naturverjüngung. Natürliche Verjüngung kann eine gute Option zur Anpassung von Waldbeständen sein, wenn die Elternpopulation eine hohe genetische Vielfalt besitzt und generell gut an die Standortverhältnisse angepasst ist. Allerdings kann eine

Anreicherung von Laubholznaturverjüngung mit künstlich eingebrachten Nadelbaumarten sowohl höhere Kohlenstoffspeicher als auch attraktivere finanzielle Ergebnisse ermöglichen [3.66].

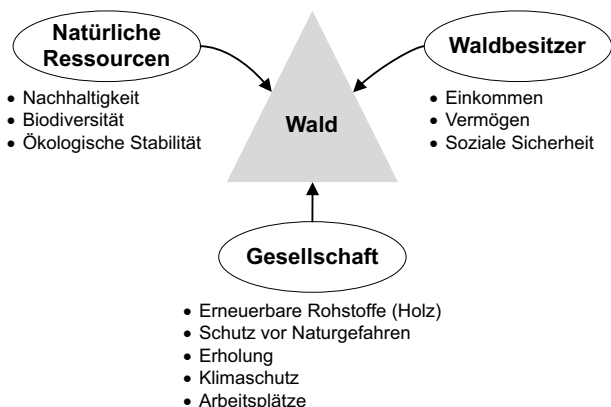
3.2.5 Zielkonflikte bei der Waldbewirtschaftung

Die Wälder in Deutschland sind überwiegend Wirtschaftswälder. Auf rund 5 % (592 661 ha) der deutschen Waldfläche finden sich besonders geschützte Biotope [3.67]. Trotz des hohen Anteils an Wirtschaftswäldern dienen Wälder nicht nur der Biomasseproduktion, sondern stellen im Sinne einer multifunktionalen Waldwirtschaft eine Vielzahl von Dienstleistungen und Funktionen zur Verfügung (Abb. 3.19). So dienen Wälder auch der Erholung, sie schützen vor Naturgefahren, sind eine Kohlenstoffsenke, erhalten die Biodiversität und leisten Beiträge zur sozialen Sicherheit und zur Bioökonomie.

Unterschiedliche Ansprüche an den Wald führen allerdings zu Zielkonflikten bei der Ausrichtung der Waldbewirtschaftung. So sollen die Verwendung von Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft und der Anteil erneuerbarer Energien – im Jahr 2017 machte in der EU Biomasse aus Wäldern 69 % der gesamten für die Energieerzeugung genutzten Biomasse aus [3.68] – gefördert werden [3.69], [3.70]. Andererseits sollen 30 % der europäischen Wälder unter Schutz und 10 % unter strengen Schutz gestellt werden; dies wird zu deutlichen Einschränkungen in der Holzproduktion führen [3.71].

Zum Erreichen der THG-Emissionsreduktionsziele und der Kohlenstoffneutralität sollen Wälder entscheidend beitragen. Die Überarbeitung der LULUCF-Verordnung [3.72] zielt darauf ab, die natürlichen Kohlenstoffsinken in der EU zu erhöhen. Damit sollen unvermeidbare zukünftige Kohlenstoffemissionen durch die Entfernung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre kompensiert werden. Das EU-Klimapaket „Fit for 55“ [3.73] konzentriert sich auf die Kohlenstoffsenke der Wälder und zielt darauf ab, deren Senkenwirkung von

Abb. 3.19 Ansprüche an den Wald



268 Mio. t CO₂ jährlich auf 310 Mio. t CO₂ im Jahr 2030 zu erhöhen. Dies wird nur durch Einschränkungen der Holznutzung möglich sein [3.74].

Planungen zur großflächigen Einschränkung der Holznutzung stehen im Widerspruch zu dem Bestreben, möglichst viel Holz zu produzieren, um der Atmosphäre CO₂ zu entziehen und dieses Holz dann im Bauwesen für langlebige Holzkonstruktionen zu verwenden [3.75]. Diese Option stellt eine sehr effektive Möglichkeit für eine langfristige und vermutlich weniger durch Risiken und Störungen gefährdete Kohlenstoffbindung dar als bei der Anhebung der Waldspeicher. Zukünftig sollten daher die sich widersprechenden Empfehlungen und Zielsetzungen im Rahmen einer umfassenden Gesamtplanung besser aufeinander abgestimmt werden.

3.3 Baumarten

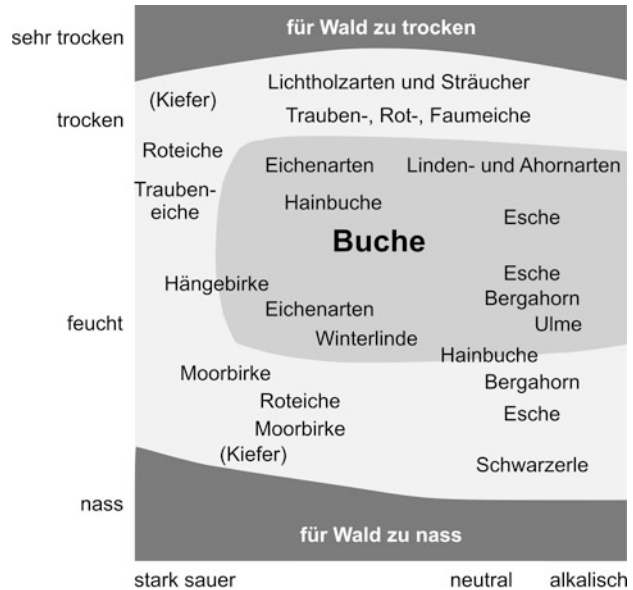
In der Pflanzensystematik werden Bäume in Nadelhölzer, Laubhölzer und Ginkgogewächse als Zwischenstellung zwischen Laub- und Nadelhölzern eingeteilt. Aus Sicht der Holzverwendung wird zwischen Harthölzern und Weichhölzern unterschieden. Weichholz hat eine Rohdichte von unter 0,55 g/cm³ und damit bezogen auf das Volumen einen geringeren Heizwert als Hartholz, dessen Rohdichte über 0,55 g/cm³ liegt. Zu Weichholz zählen fast alle Nadelhölzer (Ausnahme z. B. Schwarzkiefer mit einer Rohdichte von 0,57 g/cm³) und Weichlaubhölzer wie Weide, Pappel, Linde oder Erle. Zu den (Laub-) Harthölzern werden beispielsweise Buche, Eiche, Bergahorn, Birke, Esche oder Robinie sowie praktisch alle eingeführten Tropenhölzer gezählt (Ausnahme z. B. Balsaholz mit einer Rohdichte von 0,06 bis 0,34 g/cm³).

Die am häufigsten vorkommenden Baumarten in Deutschland, Österreich und der Schweiz sind die Fichte (D: 28,2 %, A: 53,7 %, CH: 44,0 %), Kiefer (D: 23,2 %, A: 4,9 %), Lärche (A: 4,6 %), Buche (D: 14,8 %, A: 9,6 %, CH: 18,0 %) und Eiche (D: 9,6 %, A: 2,0 %). Nur etwa ein Viertel der Waldfläche Deutschlands ist mit Reinbeständen bestockt, die meist aus Fichten oder Kiefern bestehen; Mischbestockung mit zwei oder mehr Baumarten dominiert im Wald in Deutschland, in der Schweiz und in Österreich [3.33], [3.76], [3.77].

3.3.1 Standortansprüche

Ohne den Einfluss der Waldbewirtschaftung würden in Mitteleuropa vor allem Buchenwaldgesellschaften vorherrschen. Auf nährstoffreichen Standorten wäre die potenzielle natürliche Vegetation durch derartige Laubholzgesellschaften und auf nährstoffärmeren Standorten durch Eiche und Kiefer geprägt, da hier die Buche an Konkurrenzkraft verliert. Abbildung 3.20 stellt diesen Zusammenhang in einem Ökogramm dar, das auch die optimalen Standorte der direkten Konkurrenten der Buche zeigt. Findet eine Pflanze idea-

Abb. 3.20 Ökogramm der Buche in Mitteleuropa (nach [3.78])



le physische Bedingungen wie Wärme, Licht, Wasser oder Nährstoffe vor, ist sie in ihrem physiologischen Optimum. Wird zusätzlich die Konkurrenz durch andere Arten berücksichtigt, kann das ökologische Optimum der Pflanze beschrieben werden. Das Ökogramm in Abb. 3.20 zeigt im grauen Bereich das physiologische Optimum und im dunkelgrauen Bereich das ökologische Optimum der Buche.

3.3.2 Produktivität

Unterschiede in den standörtlichen Gegebenheiten und der Waldbewirtschaftung sind bei einem weltweiten Vergleich der Produktivität von Wäldern entscheidend. Beispielsweise haben die Länge der Vegetationsperiode, die Baumartenwahl und die Bewirtschaftungsform einen deutlichen Einfluss auf den Zuwachs. In Deutschland, Österreich und der Schweiz wird das Wachstum von Bäumen vor allem durch das Wasserangebot während der Vegetationszeit, die mit der Höhenlage abnehmende Temperatur und das Nährstoffangebot des Bodens bestimmt. Tabelle 3.15 zeigt beispielhaft Zuwachs und Umtriebszeit für ausgewählte Länder und Baumarten. Tropische Forstplantagen, die mit Eukalyptus bestockt sind, sind demnach mit einem jährlichen Zuwachs von bis zu $70 \text{ m}^3 / (\text{ha a})$ die produktivsten Forstflächen.

Tabelle 3.15 Zuwachs und Umtriebszeit in verschiedenen Regionen und Waldformen

	Zuwachs	Umtriebszeit
	in m ³ /(ha a)	in a
Deutschland (alle Baumarten)	11,2	80–150
Deutschland (Douglasie)	18,9	~ 80
Kanada (alle Baumarten)	1,0	
Schweden (alle Baumarten)	3,3	60–100
USA (alle Baumarten)	2,6	
Tropischer Regenwald (bewirtschaftet)	0,5–7,0	
Neuseeland (Kiefer)	18–30	20–40
Costa Rica (Teak)	bis zu 45	30–40
Tropisches Hartholz	25–45	8–20
Tropischer Eukalyptus	bis zu 70	6–20

3.3.3 Darstellung ausgewählter Baumarten

Fichte. Die Gemeine Fichte ist ein Nadelbaum aus der Familie der Kieferngewächse. In Mitteleuropa ist sie eine der wichtigsten Wirtschaftsbaumarten (Tabelle 3.16).

Natürliches Verbreitungsgebiet und Standortansprüche. Das natürliche Ausbreitungsgebiet der Fichte erstreckt sich von Skandinavien bis zum Balkan und reicht in den Schweizer Alpen bis in Höhenlagen von 2 200 m. Im hochmontanen bis subalpinen Bereich ist sie dominant und in kollin-montanen Gebieten kommt sie als Mischbaumart vor. Das Anbauggebiet der Fichte geht deutlich über ihr natürliches Verbreitungsgebiet hinaus [3.47]. In ihrer Jugend hat sie mittlere und im Alter hohe Lichtansprüche. Sie ist auf ausreichende Niederschläge angewiesen. Optimale Wachstleistungen werden auf tiefgründigen,

Tabelle 3.16 Steckbrief Fichte [3.30], [3.33]

Wissenschaftlicher Name	<i>Picea abies</i>
Alternative Bezeichnungen	Rotfichte, Rottanne, in Hunsrück und Eifel: Preußenbaum
Familie	Kieferngewächse (Pinaceae)
Gattung	<i>Picea</i>
Art	Abies
Wuchshöhe	bis 40 m
Wurzelsystem	Flachwurzler
Zuwachs	15,3 m ³ /(ha a)
Kulmination Höhenzuwachs im Alter	40 Jahre
Kulmination Volumenzuwachs im Alter	105 Jahre
Durchschnittlicher Holzvorrat	427 m ³ /ha
Umtriebszeit	80–120 Jahre

Abb. 3.21 Fichte und Fichtenast mit Zapfen (© Ulrich Schmidt)



bodenfrischen, sandig-lehmigen, Braunerde-artigen Böden mittlerer Basenversorgung gefunden. Fichten weisen eine starke morphologisch-phänotypische Variabilität auf. Durch die Ausprägung verschiedener Kronenformen (Kamm-, Bürsten-, Plattenfichte) ist sie an unterschiedliche Witterungsverhältnisse (Eis, Schnee, Nassschnee) angepasst (Abb. 3.21). In subalpinen und montanen Mischwäldern erreicht die Fichte ein Lebensalter von 200 bis 400 Jahren und in Ausnahmefällen auch bis 600 Jahren [3.30], [3.79].

Wuchsleistung. In Deutschland, Österreich und der Schweiz ist die Fichte eine der bedeutendsten Wirtschaftsbaumarten. 120-jährige Bestände erreichen auf mittleren bis besseren Standorten Vorräte von 500 bis über 1 100 m³/ha. Die Gesamtwuchsleistung im Alter von 100 Jahren kann auf besten Standorten bis zu 1 400 m³/ha betragen [3.80].

Produktionsrisiko. Die weitgehend frostharte Fichte zählt zu den am stärksten gefährdeten Baumarten in der deutschen Forstwirtschaft. In der Vergangenheit erreichte sie unter den wichtigsten Wirtschaftsbaumarten in Europa die niedrigste durchschnittliche Überlebenswahrscheinlichkeit (57 % bis Alter 100; Tabelle 3.14) [3.48]. Bei Hitze und Dürre kommt es vor allem auf trockenen und wechselfeuchten Standorten zu Wurzelverlusten mit anschließenden Vitalitätseinbußen und sekundärem Borkenkäferbefall. Auf flachgründigen Standorten sowie nassen Böden sind besonders Reinbestände stark Windwurfgefährdet. Auf verschiedenen Standorten kann die Rotfäule (*Heterobasidion annosum*) die Wurzeln befallen und sich in den Stamm ausbreiten. Auch kann Wildverbiss (u. a. Reh, Rotwild, Gams) vor allem in Reinbeständen zu erheblichen wirtschaftlichen Verlusten führen.

Waldkiefer. Die Kiefer gehört, wie auch die Fichte, zur Familie der Kieferngewächse (*Pinus*; Abb. 3.22, Tabelle 3.17). Sie besitzt aufgrund ihrer klimatischen Anpassungsfähigkeit das im Vergleich zu anderen einheimischen Baumarten größte natürliche Verbreitungsgebiet.

Natürliches Verbreitungsgebiet und Standortansprüche. Das Verbreitungsareal der Kiefer reicht von Skandinavien über Nord- und Mittelrussland bis in die Alpen. Sie zeigt eine große klimatische Anpassungsfähigkeit und kommt bei Sommertemperaturen von 9 bis 20 °C, Jahresniederschlägen von 400 bis 2 500 mm und Wintertemperaturen von –20 bis 0 °C vor. Auf frischen und nährstoffreichen Böden neigt die Kiefer zu starker Wüchsigkeit, die zu Krummwuchs und Starkastigkeit führen kann. Als Wirtschaftsbaum wird sie daher besonders auf nicht zu frischen und weniger nährstoffreichen Standorten angebaut.

Wuchsleistung. Die Kiefer ist eine lichtbedürftige und konkurrenzschwache Pionierbaumart. Auf mittleren Standorten können 140-jährige Kiefernbestände Vorräte von knapp 400 m³/ha erreichen [3.80]. Die Zuwächse liegen bei rund 10 m³/(ha a) [3.33].

Produktionsrisiko. Die Kiefer ist weitgehend sturmfest. Ihre durchschnittliche Überlebenswahrscheinlichkeit (73 % bis zum Alter von 100 Jahren; Tabelle 3.14) übersteigt diejenige der Fichte deutlich [3.48]. Die Kiefer ist aber durch eine Vielzahl von phytophagen Insektenarten wie Kiefernspinner (*Dendrolimus pini*), Kiefernspanner (*Bupalus piniaria*), Kiefernknospentriebwickler (*Rhyacionia buoliana*), Waldgärtner (*Tomicus ssp.*) oder Nonne (*Lymantria monacha*) gefährdet.

Tabelle 3.17 Steckbrief Kiefer [3.30], [3.33]

Wissenschaftlicher Name	<i>Pinus sylvestris</i>
Alternative Bezeichnungen	Kiefer, Wald-Föhre, Forche
Familie	Kieferngewächse (Pinaceae)
Gattung	<i>Pinus</i>
Art	<i>Sylvestris</i>
Wuchshöhe	20 m bis maximal 40 m
Wurzelsystem	Pfahlwurzler
Zuwachs	9,5 m ³ /(ha a)
Kulmination Höhenzuwachs im Alter	15 Jahre
Kulmination Volumenzuwachs im Alter	75 Jahre
Durchschnittlicher Holzvorrat	312 m ³ /ha
Umtriebszeit	80–140 Jahre

Abb. 3.22 Kiefer und Kiefernast mit Zapfen (© Ulrich Schmidt)



Douglasie. Die Douglasie zeichnet sich durch hohe Wuchseleistungen aus. Sie wurde Ende des 19. Jahrhunderts aus Nordamerika eingeführt (Tabelle 3.18).

Tabelle 3.18 Steckbrief Douglasie [3.30], [3.33], [3.80]

Wissenschaftlicher Name	<i>Pseudotsuga menziesii</i>
Alternative Bezeichnungen	Douglastanne, Douglasfichte, Douglaskiefer
Familie	Kieferngewächse (Pinaceae)
Gattung	<i>Pseudotsuga</i>
Art	Menziesii
Wuchshöhe	20 m bis maximal 55 m
Wurzelsystem	Pfahlwurzler
Zuwachs	18,9 m ³ / (ha a)
Kulmination Volumenzuwachs im Alter	100 Jahre
Durchschnittlicher Holzvorrat	327 m ³ / ha
Umtriebszeit	60–100 Jahre

Natürliches Verbreitungsgebiet und Standortansprüche. Das natürliche Verbreitungsgebiet der Douglasie erstreckt sich im Westen Nordamerikas von British Columbia bis nach Mexiko. Erste Samen wurden in den 1820er-Jahren nach Europa eingeführt und erste Versuchsanbauten erfolgten Ende des 19. Jahrhunderts [3.81]. Der Anbau von Douglasien in Europa wird kontrovers diskutiert; die Meinungen reichen von der Einstufung als invasive Baumart [3.82] bis zu einer wichtigen Komponente des europäischen Waldes [3.83]. Derzeit werden wenig negative Auswirkungen eines Douglasienanbaus auf die einheimische Pflanzenwelt gesehen; jedoch könnte diese Baumart eventuell den Lebensraum für die heimische Tierwelt einschränken [3.83]. Daher wird oft eine Beimischung von lediglich bis zu 30 % Douglasie zu einheimischen Baumarten angeraten. In einem ähnlichen Sinne wurden integrierte Konzepte zum Anbau der Douglasie entwickelt und ihr Anbau im Hinblick auf den zukünftigen Klimawandel empfohlen [3.83], [3.84], [3.85].

Die Douglasie ist in ihrer Jugend eine Halbschattenbaumart. Frische, humusreiche, tiefgründige, sandige Lehmböden sind besonders günstig für das Wachstum. Die Ansprüche an Feuchtigkeit sind geringer als bei der Fichte [3.79]. Der Anbau auf nassen und stau-nassen Standorten ist nicht zu empfehlen [3.79].

Wuchsleistung. Die Douglasie ist im Vergleich zu einheimischen Baumarten wesentlich schnellwüchsiger und erreicht höhere Volumenzuwächse. In 100-jährigen Beständen im Harz und im Pfälzer Wald wurden Wuchshöhen von über 40 m beobachtet [3.81]. Gesamtwuchsleistungen von über 700 m³/ha scheinen eher die Regel als die Ausnahme zu sein, die wüchsigste Provenienz im Douglasien-Herkunftsversuch Kaiserslautern erreichte in einem Alter von 90 Jahren eine Gesamtwuchsleistung von 1 958 m³/ha [3.86]. Auf besten Standorten werden im Alter von 100 Jahren stehende Holzvorräte von bis zu 1 700 m³/ha erreicht [3.79].

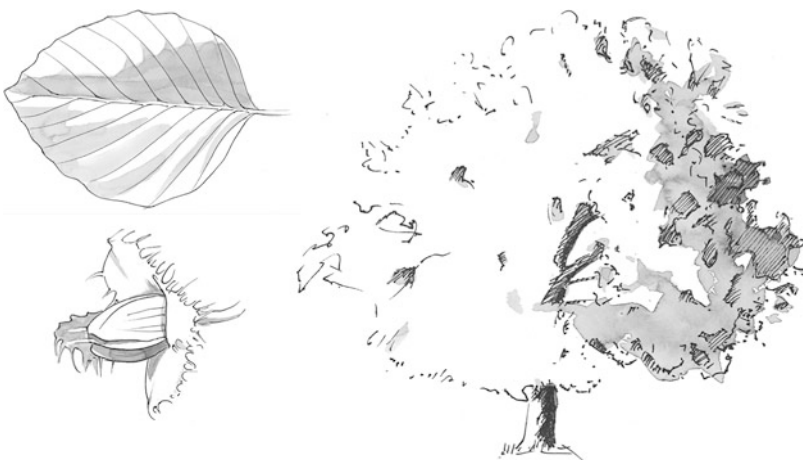
Produktionsrisiko. Die Douglasie zeigt derzeit noch eine verhältnismäßig moderate Disposition gegenüber biotischen Schädlingen, was auch auf ihre vergleichsweise geringe Anbauperiode in Europa zurückgeführt werden kann. Dennoch liegt ihre durchschnittliche Überlebenswahrscheinlichkeit bis zum Alter von 100 Jahren mit 71 % in etwa auf dem Niveau der einheimischen Kiefer (Tabelle 3.14). Damit zeigen sich auch bei dieser Baumart bereits durchaus belangvolle Risiken [3.48]. Durch eine Nachführung von Schadorganismen aus dem natürlichen Herkunftsgebiet sowie die Anpassung einheimischer Schädlinge an die Douglasie ist zudem eine erhöhte Gefährdung zu erwarten [3.80]. Die Douglasie ist durch *Phomopsis*, Douglasienschütte (*Rhabdocline pseudotsugae*) und Rußige Douglasienschütte (*Phaeocryptopus gaeumannii*) gefährdet. Einige Douglasienherkünfte scheinen besonders gut an Trockenheit und Hitze angepasst zu sein [3.87].

Tabelle 3.19 Steckbrief Buche [3.30], [3.33]

Wissenschaftlicher Name	Fagus sylvatica
Alternative Bezeichnungen	Gemeine Buche, Rotbuche
Familie	Buchengewächse (Fagaceae)
Gattung	Fagus
Art	Sylvatica
Wuchshöhe	35 m
Wurzelsystem	Herzwurzler
Zuwachs	10,3 m ³ /(ha a)
Kulmination Höhenzuwachs im Alter	45 Jahre
Kulmination Volumenzuwachs im Alter	> 150 Jahre
Durchschnittlicher Holzvorrat	356 m ³ /ha
Umtriebszeit	120–160 Jahre

Buche. Die Buche (Abb. 3.23) ist die in Deutschland und der Schweiz am häufigsten vorkommende Laubbaumart (Tabelle 3.19).

Natürliches Verbreitungsgebiet und Standortansprüche. Die Buche hat ihren Verbreitungsschwerpunkt in Mittel- bis Westeuropa; in Skandinavien und Osteuropa kommt sie nur vereinzelt vor. Sie ist im Süden ihres Verbreitungsgebiets ein Gebirgsbaum, der in den Südalpen bis an die Baumgrenze vordringt. Sie benötigt submontanes bis montanes Klima mit Jahresniederschlägen über 600 mm und eine Vegetationszeit von 5 Monaten. Niederschlagsarme Gebiete werden ebenso gemieden wie wechselfeuchte oder staunasse Böden. Für ein optimales Wachstum benötigt die Buche gut durchlüftete, physikalisch stabile, tiefgründige sowie nährstoff- und basenreiche Böden [3.79].

**Abb. 3.23** Buche (Blatt, Baum, Früchte) (© Ulrich Schmidt)

Wuchsleistung. Die Buche ist die wichtigste Laubholzbaumart in Deutschland. Mit jährlich rund 8 Mio. m³ geerntetem Buchenholz liefert sie rund zwei Drittel des in Deutschland produzierten Laubschnittholzes. Ein hoher Anteil des Buchenholzes wird aber auch als Brennholz genutzt. Die Buche ist eine Schattenbaumart, deren Zuwachs nach langsamem Wachstum im Jugendstadium spät kulminiert. 150-jährige Buchenbestände können Vorräte von 450 bis über 600 m³/ha aufweisen. Im Alter von 100 Jahren beträgt die Gesamtwuchsleistung auf guten Standorten 780 m³/ha [3.79].

Produktionsrisiko. Die Buche gilt im Vergleich zu anderen Hauptbaumarten immer noch als die stabilste Baumart; sie weist eine geringe Gefährdung durch Stürme oder Insekten auf, leidet aber in sehr trockenen Jahren zunehmend. Mit 79 % übersteigt ihre durchschnittliche Überlebenswahrscheinlichkeit bis zum Alter von 100 Jahren (Tabelle 3.14) diejenige der Fichte und Kiefer jedoch deutlich [3.48]. Besonders nach extremen Wintern und Trockenjahren ist die Buche durch das Rindensterben bedroht; dies wird auch durch ihre dünne Rinde begünstigt. Bei geringen Mischungsverhältnissen ist sie stark von Wildverbiss bedroht. In höherem Alter (100 bis 120 Jahre) neigt die Buche zur Rotfärbung des Holzes im Stamminnern. Der sogenannte Rotkern beeinträchtigt allerdings nicht die technologischen Eigenschaften des Holzes.

Eiche. Die Eiche (Abb. 3.24) ist ein langlebiger Laubbaum aus der Familie der Buchengewächse (Tabelle 3.20).

Natürliches Verbreitungsgebiet und Standortansprüche. In Mitteleuropa kommen vor allem die beiden Eichenarten Stieleiche (*Quercus robur*) und Traubeneiche (*Quercus petraea*) vor. Ihr Verbreitungsgebiet erstreckt sich von Großbritannien und Irland über Westeuropa bis nach Nordspanien und auf die Apenninen- und Balkanhalbinsel. Die Eiche

Tabelle 3.20 Steckbrief Eiche [3.30], [3.33]

Wissenschaftlicher Name	Quercus
Alternative Bezeichnungen	Sommereiche
Familie	Buchengewächse (Fagaceae)
Gattung	Quercus
Art (Stieleiche)	Robur
Wuchshöhe	25 m
Wurzelsystem	Tiefwurzler
Zuwachs	8,3 m ³ /(ha a)
Kulmination Höhenzuwachs im Alter	> 25 Jahre
Kulmination Volumenzuwachs im Alter	130 Jahre
Durchschnittlicher Holzvorrat	305 m ³ /ha
Umtriebszeit	180–300 Jahre

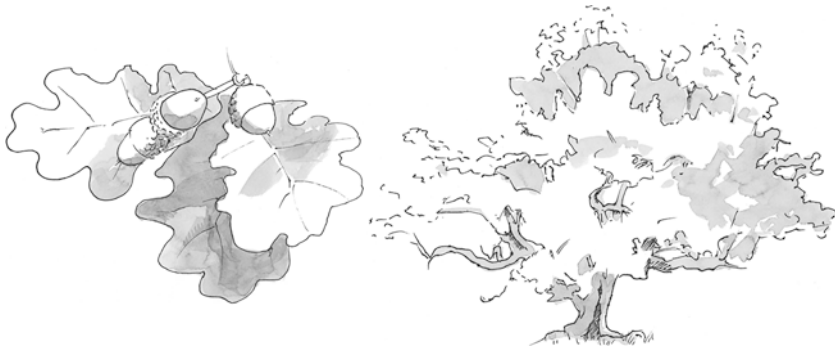


Abb. 3.24 Eiche (Astausschnitt mit Eicheln, Baum) (© Ulrich Schmidt)

bevorzugt Tieflagen bis 400 m. Traubeneichen kommen im Gebirge bis etwa 1 200 bis 1 800 m (z. B. in den Zentralalpen) und Stieleichen bis rund 1 000 m vor.

Auf nachhaltig frischen, tiefgründigen Braunerden finden beide Eichenarten optimale Wachstumsbedingungen. Die Traubeneiche meidet jedoch stark bodenfeuchte Standorte und stellt geringere Ansprüche an die Bodenfeuchte und die Nährstoffversorgung als die Stieleiche [3.30]. In ihrer Jugend haben beide Eichenarten mittlere, im Alter hohe (Traubeneiche) bis sehr hohe (Stieleiche) Lichtansprüche [3.79].

Wuchsleistung. Eichen sind sehr langlebig und erreichen ein Alter von 500 bis 800 Jahren, selten auch bis 1 000 Jahre. Die Gesamtwuchsleistung im Alter von 100 Jahren beträgt auf guten Standorten 670 m^3 und ist damit geringer als die der Buche [3.79].

Produktionsrisiko. Bei richtiger Bewirtschaftung erweist sich die Eiche als äußerst standfest gegenüber Stürmen. Sie ist allerdings einer Vielzahl von biotischen Schädlingen ausgesetzt. So liegt die durchschnittliche Überlebenswahrscheinlichkeit der Eiche bis zum Alter von 100 Jahren mit 77 % (Tabelle 3.14) etwas niedriger als diejenige der Buche [3.48]. In Gebieten mit hohen Wilddichten sind im Jugendstadium häufig Maßnahmen gegen Wildverbiss erforderlich. Auf Massenvermehrungen von laubfressenden Insekten reagiert sie empfindlich. Besonders Schmetterlingsarten wie Forstspanner (*Operophtera brumata*), Eichenprozessionsspinner (*Thaumetopoea processionea* L.), Schwammspinner (*Lymantria dispar*) und Eichenwickler (*Tortrix viridana*) können zu großflächigen Fraßschäden und einem Folgebefall durch den Zweipunktigen Eichenprachtkäfer (*Agilus biguttatus*) führen.

3.3.4 Vorräte, Zuwachs und Nutzung

Der Holzvorrat in Deutschland beträgt rund $3,7 \text{ Mrd. m}^3$ [3.33]. Davon entfallen 61 % auf Nadelholz. Die vorratsreichsten Baumarten sind Fichte ($1,2 \text{ Mrd. m}^3$), Kiefer

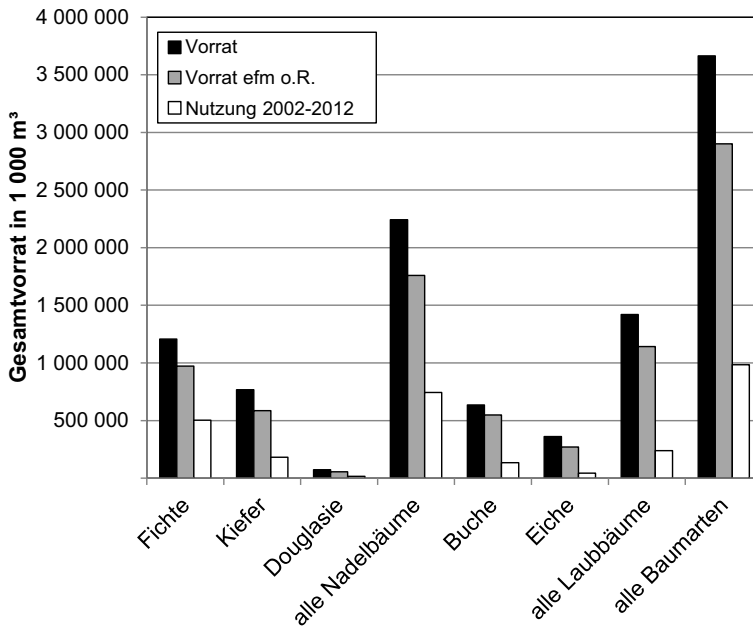


Abb. 3.25 Gesamtholzvorrat in Deutschland (efm Erntefestmeter; o.R. ohne Rinde) [3.33]

(768 Mio. m³), Buche (635 Mio. m³) und Eiche (361 Mio. m³). Douglasie trägt mit knapp 73 Mio. m³ nur zu einem geringen Anteil zum Gesamtvorrat bei. Berücksichtigt man die Ernteverluste und die Rinde, reduziert sich der Gesamtvorrat von 3,7 Mrd. m³ auf etwa 2,9 Mrd. m³ (Abb. 3.25).

Abbildung 3.26 zeigt zusätzlich die durchschnittlichen hektarspezifischen Holzvorräte, die sich im Mittel aller Baumarten auf 336 m³/ha bzw. 266 efm/ha (efm Erntefestmeter) belaufen. Von 2002 bis 2012 wurde durch Nutzungsmaßnahmen etwa 1 Mrd. m³ Holz vom stehenden Bestand entfernt; nach Abzug der Ernteverluste, die als Totholz im Wald verbleiben, entspricht dies einer jährlichen Nutzungsmenge von 76 Mio. efm [3.33]. Die Schweiz verfügt über einen Holzvorrat von knapp 424 Mio. m³, von dem jährlich rund 7 Mio. m³ genutzt werden [3.77].

In deutschen Wäldern wuchsen zwischen 2002 und 2012 jährlich 10,8 m³/ha Holz zu. Davon wurden durchschnittlich 8,9 m³/ha genutzt (Abb. 3.27). Um die Zuwächse der einzelnen Baumarten besser vergleichen zu können, werden die Ergebnisse für ideale Reinbestände hergeleitet. Demnach zeigt die Douglasie mit 18,9 m³/(ha a) den höchsten Zuwachs, gefolgt von der Tanne (16,3 m³/(ha a)), der Fichte (15,3 m³/(ha a)) und der Buche (10,3 m³/(ha a)). Dabei übersteigt der Zuwachs der Nadelbäume (12,8 m³/(ha a)) den der Laubbäume (8,7 m³/(ha a)) deutlich. Die jährliche Nutzung liegt bei allen Baumarten merklich unter den Zuwachswerten [3.33]. Dies gilt beispielsweise auch für die Schweiz; hier steht ein Zuwachs von 9,2 m³/(ha a) einer Nutzung von 6,3 m³/(ha a) gegenüber [3.77].

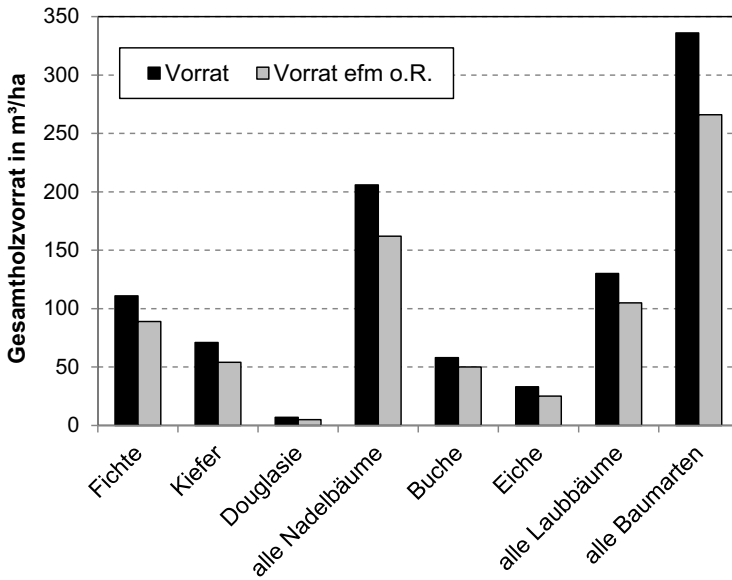
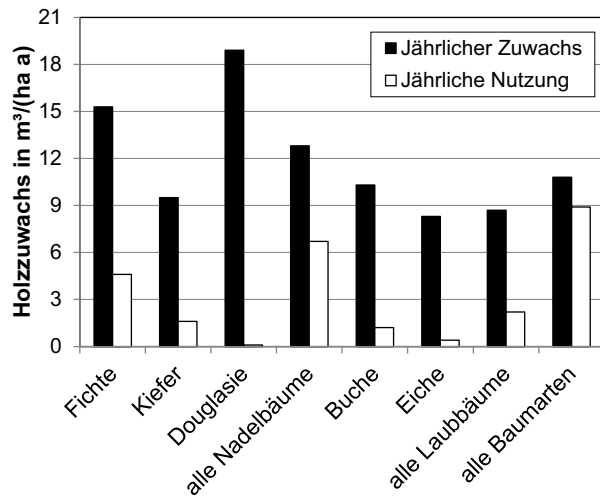


Abb. 3.26 Durchschnittlicher flächenspezifischer Holzvorrat in Deutschland (efm Erntefestmeter; o.R. ohne Rinde) [3.33]

Abb. 3.27 Durchschnittlicher Holzzuwachs in Deutschland [3.33]



Literatur

- [3.1] Roebroeks W, Villa P (2011) On the earliest evidence for habitual use of fire in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) USA* 108:5290–5214 (<https://doi.org/10.1073/pnas.1018116108>)
- [3.2] FAO (Eds.) (2015) *Wood Energy*. FAO, Rome, Italy (<http://www.fao.org/forestry/energy/en/>) Zugegriffen: 26.10.2023
- [3.3] Barredo JI, Brailescu C, Teller A, Sabatini FM, Mauri A, Janouskova K (2021) Mapping and assessment of primary and old-growth forests in Europe. JRC Science for Policy Report, Luxembourg (<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC124671> <https://data.europa.eu/doi/10.2760/797591>). Zugegriffen: 26.10.2023
- [3.4] Köhl M, Linser S, Prins K (Eds.) (2020) *State of Europe's Forests 2020*. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe – FOREST EUROPE, Bratislava (https://foresteurope.org/wp-content/uploads/2016/08/SoEF_2020.pdf) Zugegriffen: 26.10.2023
- [3.5] Bundesregierung (Hrsg.) (2021) *Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (BWaldG)*, Bundesamt für Justiz, Bonn (<http://www.gesetze-im-internet.de/bwaldg/BJNR010370975.html>) Zugegriffen: 26.10.2023
- [3.6] FAO (Eds.) (2012) *FRA 2015 Terms and Definitions*. Forest Resources Assessment Working Paper 180. FAO, Rome (<https://www.fao.org/3/ap862e/ap862e00.pdf>) Zugegriffen: 26.10.2023
- [3.7] FAO (Eds.) (2020) *Global Forest Resources Assessment 2020 – Main report*. FAO, Rome (<https://www.fao.org/3/ca9825en/ca9825en.pdf>) Zugegriffen: 26.10.2023
- [3.8] Kindermann GE, McCallum I, Fritz S, Obersteiner M (2008) A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics. *Silva Fennica* 42.3:244 (<https://doi.org/10.14214/sf.244>)
- [3.9] Beer C, Reichstein M, Tomelleri E et al. (2010) Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science* 329.5993:834–838 (<https://doi.org/10.1126/science.1184984>)
- [3.10] Knoke T, Hanley N, Roman-Cuesta RM et al. (2023) Trends in tropical forest loss and the social value of emission reductions. *Nature Sustainability* (2023) (<https://doi.org/10.1038/s41893-023-01175-9>)
- [3.11] Kissinger G, Herold M, De Sy V (2012) *Drivers of Deforestation and Forest Degradation: A Synthesis Report for REDD+ Policymakers*. Lexeme Consulting, Vancouver, Canada
- [3.12] Mantel K (1990) *Wald und Forst in der Geschichte – Ein Lehr- und Handbuch*. M. & H. Schaper, Alfeld und Hannover
- [3.13] von Carlowitz HC (1713) *Sylvicultura Oeconomica oder Haußwirthliche Nachricht und naturgemäße Anweisung zur Wilden Baum-Zucht*. J.F. Braun, Leipzig
- [3.14] Forest Europe (2015) *The updated pan-European indicators for sustainable forest management*. Forest Europe – Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, Bonn (https://foresteurope.org/wp-content/uploads/2017/03/CI_4pages.pdf) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.15] Polley H (2009) *Wald in Schutzgebieten – ein Überblick*. *Landbauforschung. vTI Agriculture and Forestry Research Sonderheft* 327:75–82
- [3.16] Young HE, Strand L, Altenberger R (1964) *Primary dry and fresh weight tables for seven tree species in Maine* *Tech Bul*, Bd 12. Agr Exp Station, Maine
- [3.17] Kramer H (1988) *Waldwachstumslehre*. P. Parey, Hamburg, Berlin
- [3.18] Kollmann FFP, Cotè WA (1968) *Principles of wood sciences*. Springer, New York
- [3.19] Kupferschmid A (2001) *Rindenkunde und Rindenverwertung*, ETH Zürich, Departement-Forstwissenschaften, Professur Holzwissenschaften, Zürich (<http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:26434/eth-26434-04.pdf>) Zugegriffen: 27.10.2023

- [3.20] Matussek R, Fromm J, Rennenberg H, Roloff A (2010) *Biologie der Bäume*. Eugen Ulmer, Stuttgart
- [3.21] Knigge W, Schulz H (1966) *Grundriß der Forstbenutzung*. P. Parey, Hamburg, Berlin
- [3.22] Lohmann U (2012) *Holz-Handbuch*, DRW, Stuttgart
- [3.23] Otto HJ (1994) *Waldökologie*. Ulmer, Stuttgart
- [3.24] Angelstam PK, Büttler R, Lazdinis M, Mikusinski G, Roberge J (2003) Habitat thresholds for focal species at multiple scales and forest biodiversity conservation – Dead wood as an example. *Annales Zoologici Fennici* 40:473–482
- [3.25] Schmidt O (2006) Totes Holz voller Leben. *LWF aktuell* 53(1):2006
- [3.26] Deutscher Forstwirtschaftsrat e.V., Deutscher Holzwirtschaftsrat e.V. (2023) Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (RVR), Berlin (<https://rvr-deutschland.de/downloads/>) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.27] Richter C (2019) *Holzmerkmale der Bäume*. DRW, Leinfelden-Echterdingen
- [3.28] Sandler J (2001) Holz richtig ausgeformt – höherer Erlös. *Niederösterreichische Landeslandwirtschaftskammer*, St. Pölten, Österreich (https://www.forstholzpapier.at/images/Publikationen/Holz_richtig_gesamt_small.pdf) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.29] Keller M (2005) *Schweizerisches Landesforstinventar: Anleitung für die Feldaufnahmen der Erhebung 2004–2007*. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Schweiz
- [3.30] Burschel P, Huss J (2003) *Grundriss des Waldbaus*. Ulmer, Stuttgart
- [3.31] Rössert S, Gosling E, Gandorfer M, Knoke T (2022) Woodchips or potato chips? How enhancing soil carbon and reducing chemical inputs influence the allocation of cropland. *Agricultural Systems* 198:103372 (<https://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103372>)
- [3.32] Schober R (1995) *Ertragstabellen wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung*. Sauerländer, Frankfurt
- [3.33] BMEL (2018) *Der Wald in Deutschland – Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur*, BMEL, Bonn. (<https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/bundeswaldinventur3.html>) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.34] BMEL (2012) *Vorrat nach Land und Baumartengruppe*, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig ([https://bwi.info/inhalt1.3.aspx?Text=3.04%20Baumartengruppe%20\(rechnerischer%20Reinbestand\)&prRolle=public&prInv=BWI2012&prKapitel=3.04](https://bwi.info/inhalt1.3.aspx?Text=3.04%20Baumartengruppe%20(rechnerischer%20Reinbestand)&prRolle=public&prInv=BWI2012&prKapitel=3.04)) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.35] Gordon HS (1991): The economic theory of a common-property resource: The fishery. *Bulletin of Mathematical Biology* 53:231–252 (<https://doi.org/10.1007/BF02464431>)
- [3.36] Knoke T, Paul C, Friedrich S et al. (2020) The optimal rotation for a fully regulated forest is the same as, or shorter than, the rotation for a single even-aged forest stand: comments on Helmedag's (2018) paper. *European Journal of Forest Research*, 139.1:1–11 (<https://doi.org/10.1007/s10342-019-01242-x>)
- [3.37] Grafton RQ, Kompas T, Hilborn RW (2007): Economics of overexploitation revisited. *Science* 318.5856:1601 (<https://doi.org/10.1126/science.1146017>)
- [3.38] Wohlgemuth T, Jentsch A, Seidl R (Hrsg.) (2019) *Störungsökologie*. Haupt, Bern, Schweiz (https://www.wsl.ch/fileadmin/user_upload/WSL/Mitarbeitende/wohlgemu/teaser_stoerungsoekologie_2019.pdf) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.39] Montagné-Huck C, Brunette M (2018) Economic analysis of natural forest disturbances: A century of research. *Journal of Forest Economics* 32:42–71 (<https://doi.org/10.1016/j.jfe.2018.03.002>)
- [3.40] Jung C, Schindler D (2019) Historical Winter Storm Atlas for Germany (GeWiSA). *Atmosphere* 10.7:387 (<https://doi.org/10.3390/atmos10070387>)
- [3.41] Senf C, Seidl R (2020) Mapping the forest disturbance regimes of Europe. *Nature Sustainability* 4:63–70 (<https://doi.org/10.1038/s41893-020-00609-y>)

- [3.42] Senf C, Seidl R (2021) Persistent impacts of the 2018 drought on forest disturbance regimes in Europe. *Biogeosciences* 18:5223–5230 (<https://doi.org/10.5194/bg-18-5223-2021>)
- [3.43] Statistisches Bundesamt (2021) Forstwirtschaftliche Bodennutzung – Holzeinschlagsstatistik – Fachserie 3 Reihe 3.3.1 – 2014 bis 2020. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden (<https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Wald-Holz/Publikationen/Downloads-Wald-und-Holz/holzeinschlag-2030331207004.html>) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.44] Seidl R, Klonner G, Rammer W et al. (2018) Invasive alien pests threaten the carbon stored in Europe’s forests. *Nature Communications* 9:1626 (<https://doi.org/10.1038/s41467-018-04096-w>)
- [3.45] Thom D, Seidl R (2015) Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society* 91.3:760–781 (<https://doi.org/10.1111/brv.12193>)
- [3.46] Seidl R, Schelhaas M-J, Rammer W, Verkerk, PJ (2014) Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change* 4:806–810 (<https://doi.org/10.1038/nclimate2318>)
- [3.47] Spiecker H (2003) Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe – temperate zone. *Journal of Environmental Management* 67.1:55–65 ([https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(02\)00188-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(02)00188-3))
- [3.48] Brandl S, Paul C, Knoke T, Falk W (2020) The influence of climate and management on survival probability for Germany’s most important tree species. *Forest Ecology and Management* 458:117652 (<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117652>)
- [3.49] Knoke T, Gosling E, Thom D et al. (2021) Economic losses from natural disturbances in Norway spruce forests – A quantification using Monte-Carlo simulations. *Ecological Economics* 185, Issue C:107046 (<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107046>)
- [3.50] Paul C, Brandl S, Friedrich S et al. (2019) Climate change and mixed forests: how do altered survival probabilities impact economically desirable species proportions of Norway spruce and European beech? *Annals of Forest Science* 76:14 (<https://doi.org/10.1007/s13595-018-0793-8>)
- [3.51] Seidl R, Thom D, Kautz M et al. (2017) Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change* 7:395–402 (<https://doi.org/10.1038/nclimate3303>)
- [3.52] Brang P, Spathelf P, Larsen JB et al. (2014): Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. *Forestry* 87.4:492–503 (<https://doi.org/10.1093/forestry/cpu018>)
- [3.53] Larsen JB, Angelstam P, Bauhus J et al. (2022) Closer-to-Nature forest management. From Science to Policy. European Forest Institute, Joensuu, Finland (https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2022/EFI_fstp_12_2022.pdf) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.54] Nikinmaa L, Lindner M, Cantarello E et al. (2020) Reviewing the Use of Resilience Concepts in Forest Sciences. *Current Forestry Reports* 6:61–80. (<https://doi.org/10.1007/s40725-020-00110-x>)
- [3.55] Beinhofer B (2009) Comparing the financial performance of traditionally managed beech and oak stands with roomy established and pruned stands. *European Journal of Forest Research* 129.2:175–187 (<https://doi.org/10.1007/s10342-009-0311-5>)
- [3.56] Hanewinkel M, Kuhn T, Bugmann H, Lanz A, Brang P (2014): Vulnerability of uneven-aged forests to storm damage. *Forestry* 87.4:525–534 (<https://doi.org/10.1093/forestry/cpu008>)
- [3.57] Knoke T, Paul C, Gosling E et al. (2022) Assessing the Economic Resilience of Different Management Systems to Severe Forest Disturbance. *Environmental and Resource Economics* 84:343–381 (<https://doi.org/10.1007/s10640-022-00719-5>)

- [3.58] Violle C, Navas M-L, Vile D et al. (2007) Let the concept of trait be functional! *Oikos – Advancing Ecology* 116.5:882–892 (<https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x>)
- [3.59] Díaz S, Kattge J, Cornelissen JHC et al. (2016) The global spectrum of plant form and function. *Nature* 529:167–171 (<https://doi.org/10.1038/nature16489>)
- [3.60] Aquilué N, Messier C, Martins KT et al. (2021) A simple-to-use management approach to boost adaptive capacity of forests to global uncertainty. *Forest Ecology and Management* 481:118692 (<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118692>)
- [3.61] Höltken AM, Hardtke A, Steiner W (2021) Anpassungspotenziale heimischer Baumarten. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt und Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2021 für Hessen. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Wiesbaden (https://zenodo.org/record/5569170#.YgTWN_gxmF4) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.62] Bose AK, Moser B, Rigling A et al. (2020) Memory of environmental conditions across generations affects the acclimation potential of scots pine. *Plant Cell and Environment* 43.5:1288–1299 (<https://doi.org/10.1111/pce.13729>)
- [3.63] Lefèvre F, Boivin T, Bontemps A et al. (2014) Considering evolutionary processes in adaptive forestry. *Annals of Forest Science* 71.7:723–739 (<https://doi.org/10.1007/s13595-013-0272-1>)
- [3.64] Guyot V, Castagneyrol B, Vialatte A et al. (2015) Tree Diversity Limits the Impact of an Invasive Forest Pest. *PloS one* 10, 9, e0136469 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136469>)
- [3.65] Thorn S, Bässler C, Brandl R et al. (2018) Impacts of salvage logging on biodiversity: a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology* 55.1:279–289 (<https://doi.org/10.1111/1365-2664.12945>)
- [3.66] Knoke T, Kindu M, Jarisch I et al. (2020) How considering multiple criteria, uncertainty scenarios and biological interactions may influence the optimal silvicultural strategy for a mixed forest. *Forest Policy and Economics* 118, Issue C:102239 (<https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102239>)
- [3.67] BMEL (2021) Waldbericht der Bundesregierung 2021, BMEL, Bonn, (<https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/waldbericht2021.html>) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.68] Bioenergy Europe (2020) Statistical Report 2019-Biomass Supply. Bioenergy Europe, Brussels, Belgium (<https://bioenergyeurope.org/article/240-statistical-report-2021.html>) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.69] European Commission (2021) Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council, Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council and Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652. European Commission, Brüssel, Belgium (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0557>) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.70] European Commission (2021) New EU Forest Strategy for 2030. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM(2021) 572 final, European Commission, Brüssel, Belgium (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0572>) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.71] European Commission (2021) EU Biodiversity strategy for 2030. European Commission, Brussels, Belgium. (https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030_en) Zugegriffen: 27.10.2023

- [3.72] European Commission (2018) Regulation (EU) 2018/841 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry in the 2030 climate and energy framework, and amending Regulation (EU) No 525/2013 and Decision No 529/2013/EU. European Commission, Brüssel, Belgium (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018R0841>) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.73] European Commission (2021) 'Fit for 55' Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality, European Commission, Brussels, Belgium (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0550>) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.74] Köhl M, Linser S, Prins K, Talarczyk A, (2021) The EU climate package "Fit for 55" – a double-edged sword for Europeans and their forests and timber industry. *Forest Policy and Economics* 132.9:102596 (<https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102596>)
- [3.75] Churkina G, Organschi A, Reyer, CPO et al. (2020) Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability* 3:269–276 (<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>)
- [3.76] BFW (Hrsg.) Österreichische Waldinventur, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, Österreich (<http://bfw.ac.at/rz/wi.home>) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.77] WSL (Hrsg.) Schweizer Landesforstinventar, Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, Schweiz (<https://www.lfi.ch>) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.78] Ellenberg H, Leuschner C (2010) *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen*. 6. Aufl. Eugen Ulmer, Stuttgart
- [3.79] Mayer H (1980) *Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage*. Gustav Fischer, Stuttgart
- [3.80] Franz F (1983) Zur Behandlung und Wuchsleistung der Kiefer. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 102.1:18–36
- [3.81] Kownatzki D, Kriebitzsch WU, Bolte A et al. (2011) Zum Douglasienanbau in Deutschland. Ökologische, waldbauliche, genetische und holzbiologische Gesichtspunkte des Douglasienanbaus in Deutschland und den angrenzenden Staaten aus naturwissenschaftlicher und gesellschaftspolitischer Sicht. *Landbauforschung* 344(Sonderheft):67
- [3.82] Nehring S, Essl F, Rabitsch W (2013) Methodik der naturschutzfachlichen Invasivitätsbewertung für gebietsfremde Arten, Version 1.2 BfN-Skripte, Bd 340. Bundesamt für Naturschutz, Bonn
- [3.83] Thomas FM, Rzepecki A, Werner W (2022) Non-native Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) in Central Europe: Ecology, performance and nature conservation. *Forest Ecology and Management* 506.16:119956 (<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119956>)
- [3.84] Leder B (2012) Douglasie – Integrierte waldbauliche Strategien und Optionen für die Zukunft. Landesbetrieb Wald und Holz NRW, Münster (https://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/Regionalforstamt/Dokumente/2012_05_Douglasie_DrLeder.pdf) Zugegriffen: 27.10.2023
- [3.85] Schmidt O, Konnerth M (2012) Die Douglasie in Bayern – Perspektiven im Klimawandel. *AFZ-DerWald* 67.18:30–34
- [3.86] Stimm B, Dong PH (2001): Der Douglasien-Herkunftsversuch Kaiserslautern nach neun Jahrzehnten Beobachtung. *Forstwissenschaftliches Centralblatt vereinigt mit Tharandter forstliches Jahrbuch* 120:173–186 (<https://doi.org/10.1007/BF02796090>)
- [3.87] Bender JB, Spiecker H (2010) Impact of water availability on wood density patterns in Douglas-fir tree rings. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung* 85:17