

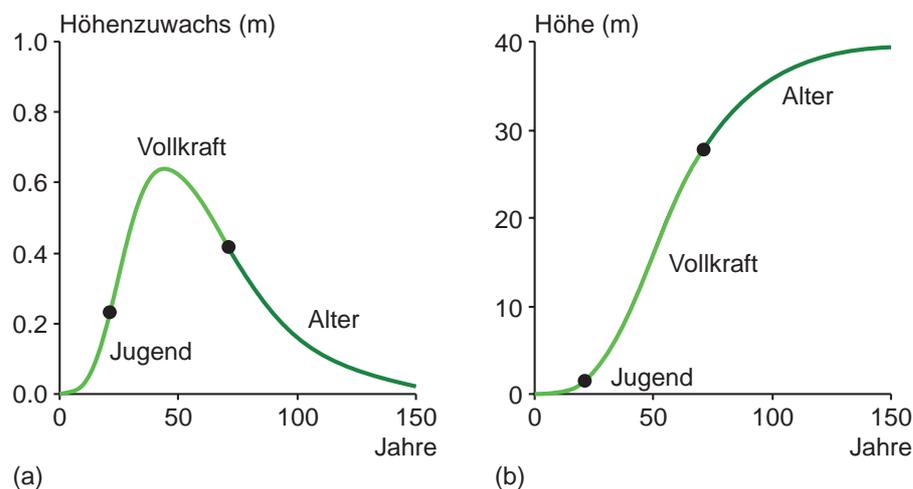
## Der Zeitfaktor in der Waldwachstumsforschung

Von HANS PRETZSCH\*

Verehrter Herr Dr. Preuhsler, lieber Teja, verehrte Festgäste, der Einladung zu einem Vortrag auf diesem Kolloquium bin ich gerne gefolgt, da mich 27 Jahre Waldwachstumsforschung mit der Hauptperson dieses Nachmittags verbinden. Und damit bin ich beim Thema „Der Zeitfaktor in der Waldwachstumsforschung“.

### Ontogenese von Baum wie Mensch: Jugend, Vollkraft und Alter

Sie alle kennen den Entwicklungsgang von Baum und Bestand. In der Jugend dominieren die aufbauenden Kräfte und führen zu einem exponentiellen Anstieg des Zuwachses (Überwiegen der Assimilation, Anabolismus). In der Folgezeit halten sich die aufbauenden und abbauenden Kräfte die Waage, wir sprechen von der Vollkraftphase von Baum oder Bestand. Daran schließt die Altersphase an, in der die abbauenden Kräfte (Dominanz der Respiration, Katabolismus) überwiegen. Es resultiert die charakteristische, unimodale Zuwachskurve (Abbildung 1a). Die Integration dieser Zuwachskurve erbringt die bekannte Wachstumskurve mit ihrem S-förmigen Verlauf und der Abfolge Jugendphase, Vollkraftphase und Altersphase (Abbildung 1b). Wir sind ergriffen von der Analogie zwischen dem Baum- und Bestandeswachstum und dem Entwicklungsgang des Menschen: Jugend, Vollkraft, Alter (ASSMANN 1961). Die Analogie trägt aber nicht besonders weit. Denn schon in ihrer Lebensspanne sind uns Bäume um zwei bis drei Zehnerpotenzen überlegen.

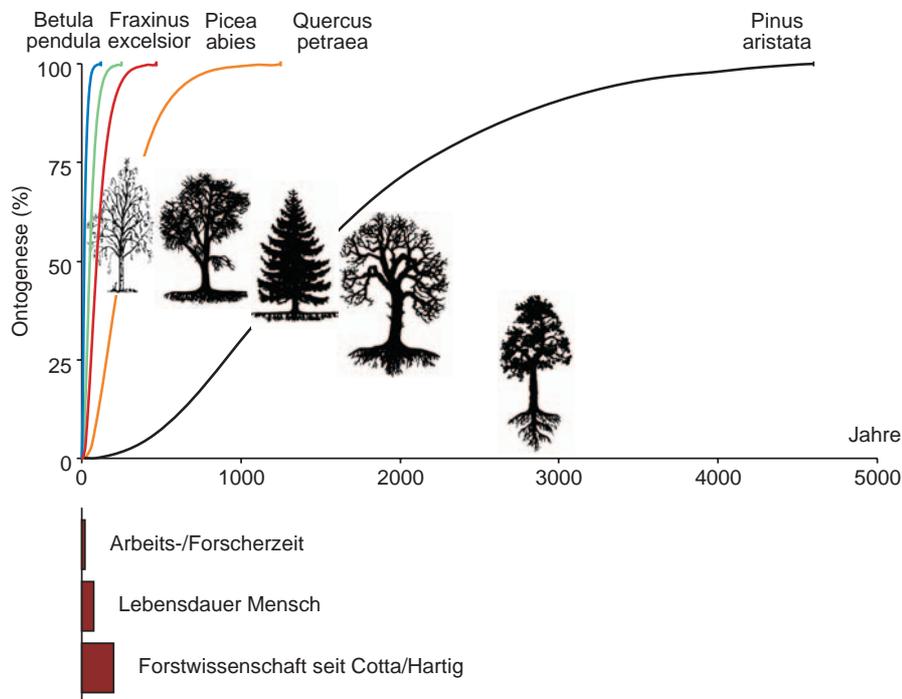


**Abb. 1:** Jugend-, Vollkraft- und Altersphase in der Ontogenese eines Baumes; (a) unimodale Zuwachskurve und (b) S-förmige Wachstumskurve nach ASSMANN (1961)

\* Prof. Dr. HANS PRETZSCH ist Leiter des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München sowie Geschäftsführer des Departments für Ökosystem- und Landschaftsmanagement am Wissenschaftszentrum Freising-Weihenstephan.

## Skalenunterschied in der Lebensspanne von Baum und Mensch

Die Baumart *Pinus aristata* kann beeindruckende vier- bis fünftausend Jahre alt werden (Abbildung 2).



**Abb. 2:** Das Wachstum von Mensch und Baum unterscheidet sich in der Zeitskala. Dargestellt ist das relative Volumenwachstum über dem Lebensalter für *Betula pendula*, *Fraxinus excelsior*, *Picea abies*, *Quercus petraea* und *Pinus aristata*. Die Zeitbalken im unteren Teil der Graphik deuten die überlegene Lebensdauer von Bäumen an im Vergleich zur Arbeits-/Forscherzeit, Lebensdauer des Menschen und Geschichte der Forstwissenschaft seit COTTA/HARTIG.

Aber selbst im Vergleich zur Lebensspanne unserer einheimischen Baumarten Eiche, Fichte, Esche oder Birke ist die Arbeits- oder Forschungszeit eines Menschen oder seine Lebensdauer insgesamt kümmerlich kurz. Wenn wir die gesamte Zeitspanne der Forstwissenschaft, seit ihrer Begründung durch Cotta und Hartig im 18. Jahrhundert betrachten, deckt dieser Zeitraum doch nur einen Bruchteil der Lebensspanne unserer Bäume ab. Ordnen wir den Menschen in eine nach Zehnerpotenzen gestufte Skala der Lebensdauer ein, so wird eine für die Erfassung, Abbildung und Modellierung von Bäumen und Waldbeständen besonders grundlegende Eigenschaft sichtbar.

Bäume	$10^4$ Jahre
Mensch	$10^2$ Jahre
Große Säugetiere	$10^1$ Jahre
Gräser, Kräuter	$10^0$ Jahre
Insekten	$10^{-1}$ Jahre
Bakterien	$10^{-2}$ Jahre

Die Zusammenstellung zeigt, dass Bäume und Waldbestände im Vergleich zu den meisten tierischen und pflanzlichen Organismen und auch im Vergleich zur Lebenserwartung des Menschen um mehrere Zehnerpotenzen langlebiger sind. Im Vergleich zur Lebensdauer von Bakterien leben Bäume  $10^6$  mal länger, also quasi eine Ewigkeit. Im Vergleich zu den ältesten Bäumen der Welt (~ 4000 Jahre) lebt der Mensch (~ 80 Jahre) nur etwa ein Fünzigstel der Zeit, womit Folgendes verdeutlicht werden soll. Experimente zum Wachstum von Bakterien, Insekten, Getreidearten, Kräutern, Säugetieren können in Stunden, Tagen, Monaten oder wenigen Tagen abgewickelt werden. Experimente zum Wachstum von Bäumen erfordern dagegen Kontinuität über mehrere Forschergenerationen (PRETZSCH 2002).

### **Überwindung der Skalenunterschiede: Stammanalyse und künstliche Zeitreihe**

Entscheidungen in der Forstwirtschaft sollten sich auf die Kenntnis der Wachstums- und Zuwachsverläufe in Abhängigkeit von Baumart, Standort und Behandlung stützen. Wie gelangen wir nun trotz der zeitlichen Skalenunterschiede zwischen Mensch und Baum zu langfristigen Wachstums- und Zuwachskurven? Die Forstwissenschaft bedient sich einer Reihe methodischer und mathematischer Tricks, um den Skalenunterschied zu überwinden (PRETZSCH 2001). Wenn wir nicht die gesamte Lebensdauer von Baum oder Bestand synchron mit Beobachtungen abdecken können, dennoch aber zu Wachstums- und Zuwachskurven gelangen wollen, bieten sich zwei Auswege an: Die Stammanalyse und die künstliche Zeitreihe.

#### *Stammanalyse*

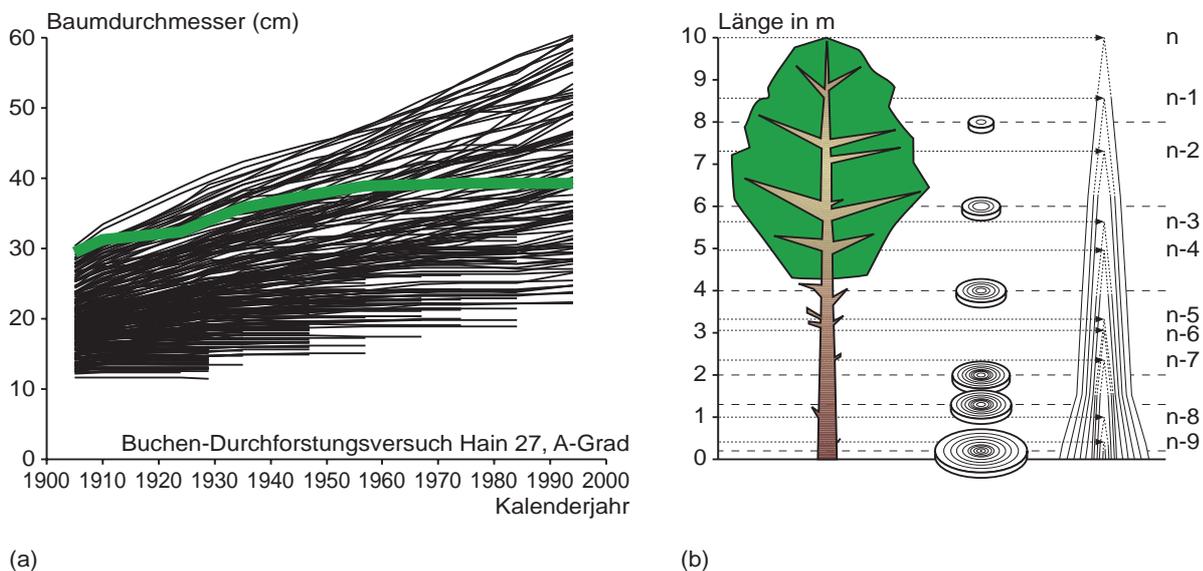
Mittels Entnahme von Stammscheiben oder Bohrkernen an reifen Bäumen wird der individuelle Entwicklungsgang von Durchmesser, Höhe, Grundfläche und Volumen (Zuwachs- und Wachstumskurve) retrospektiv ermittelt (Abbildung 3b). Ein Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass rückblickend über lange Zeiträume verlässliche Daten gewonnen werden können. Nachteil ist allerdings, dass sich die gewonnenen echten Zeitreihen immer nur auf Einzelbäume innerhalb des Bestandeskollektives beziehen. Im hiesigen Beispiel (Abbildung 3a) ist der Probebaum am Ende des Beobachtungszeitraumes als repräsentativer Mittelstamm anzusehen, er war jedoch vor 100 Jahren ein herrschender Baum auf dem Buchendurchforstungsversuch Hain 27. Stammanalysen erlauben also lediglich die Rekonstruktion individueller Entwicklungen und ermöglichen keinen Zugang zur Rekonstruktion der Bestandesdynamik, die bei forstwissenschaftlichen und forstwirtschaftlichen Überlegungen zumeist im Mittelpunkt steht.

#### *Künstliche Zeitreihe*

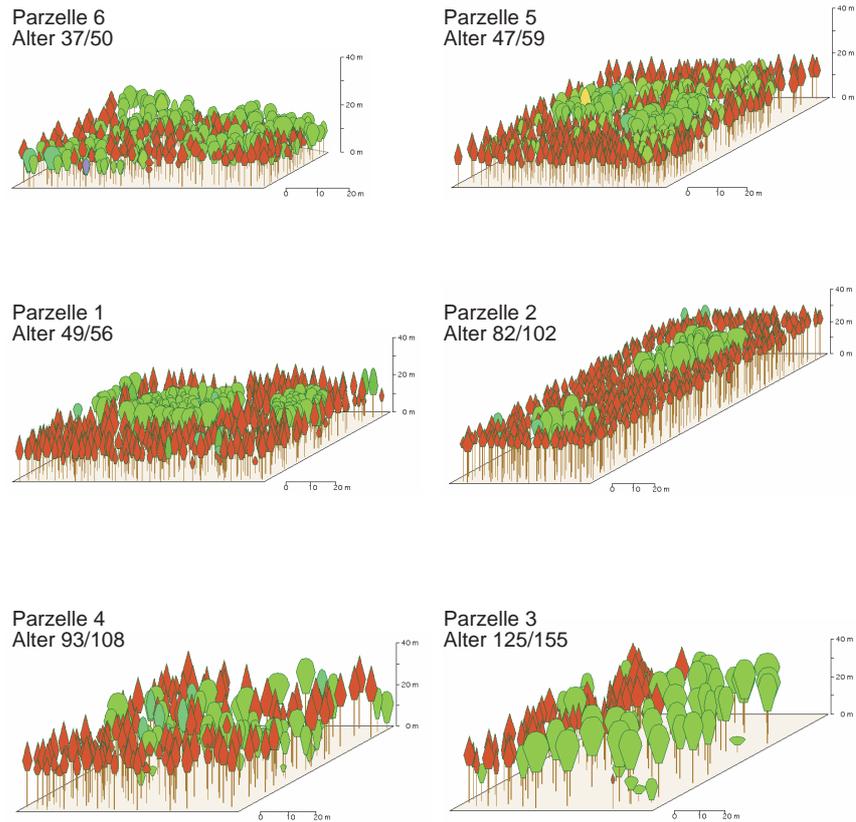
Einen zweiten Ausweg bietet die Anlage von Wuchsreihen (Abbildung 4). Auf gegebener Standorteinheit werden Probeflächen in Beständen unterschiedlicher Alter angelegt und dendrometrisch aufgenommen. Wuchsreihen, wie die hier beispielhaft dargestellte im Kranzberger Forst (PRETZSCH et al. 1998), wurden in den zurückliegenden zehn Jahren für die wichtigsten Mischungsarten in ganz Bayern angelegt (ca. 100 Versuchseinheiten). Das räumliche Nebeneinander unterschiedlicher Ent-

wicklungsphasen bildet dann einen Ersatz für das unbekannte zeitliche Nacheinander von Bestandesentwicklungsphasen. Von jeder Parzelle werden die aus Wiederholungsaufnahmen oder Bohrkernanalysen gewonnenen 10- bis 20-jährigen Zuwachsentwicklungen über der Zeitachse aufgetragen und regressionsanalytisch ausgeglichen (Abbildungen 5a, b). Auf diese Weise ergibt sich aus den räumlich nebeneinander gewonnenen Bestandesinformationen eine künstliche Zeitreihe. Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass ohne langes Warten für eine bestimmte Fragestellung ad hoc eine (künstliche) Zuwachszeitreihe aufgebaut werden kann. Ein Nachteil liegt darin, dass künstliche Zeitreihen zumeist nicht die wirklichen Wuchsbedingungen widerspiegeln, insbesondere dann nicht, wenn junge, mittelalte und alte Bestände der Wuchsreihe unterschiedlichen Wuchsbedingungen ausgesetzt waren. Nur unter Steadystate-Bedingungen erbringen zeitliches Nacheinander und räumliches Nebeneinander dieselben Zuwachs- und Wachstumskurven.

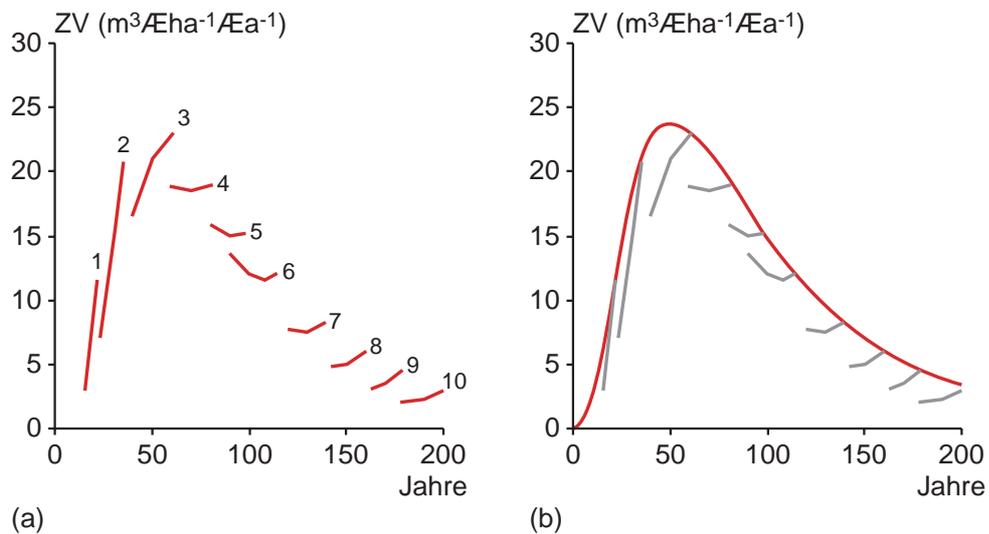
Bestehen dagegen, wie gegenwärtig auf Grund großregional veränderter Wuchsbedingungen, in allen Altersphasen Abweichungen vom Steadystate, so kommt es zu gravierenden Verzerrungen der künstlichen Zeitreihen gegenüber echten Zeitreihen der Zuwachs- und Wachstumsentwicklung. Die künstliche Zeitreihe vernachlässigt dann z. B., dass bei günstigerem Wachstum Bestände nicht nur früher und höher im Zuwachs kulminieren, sondern auch rascher in ihrer Entwicklung wieder absinken (d. h. schneller altern).



**Abb. 3:** Retrospektive Zuwachsanalyse auf der Grundlage von Stammscheiben; (a) Rekonstruktion des Durchmesserwachstumsgangs einer Buche auf der Buchen-Durchforstungsversuchsfläche Hain 27 A-Grad (fett ausgezogene Linie) im Vergleich zum Durchmesserwachstum des Gesamtkollektives (dünn ausgezogene Linien); (b) Prinzip der Stammanalyse



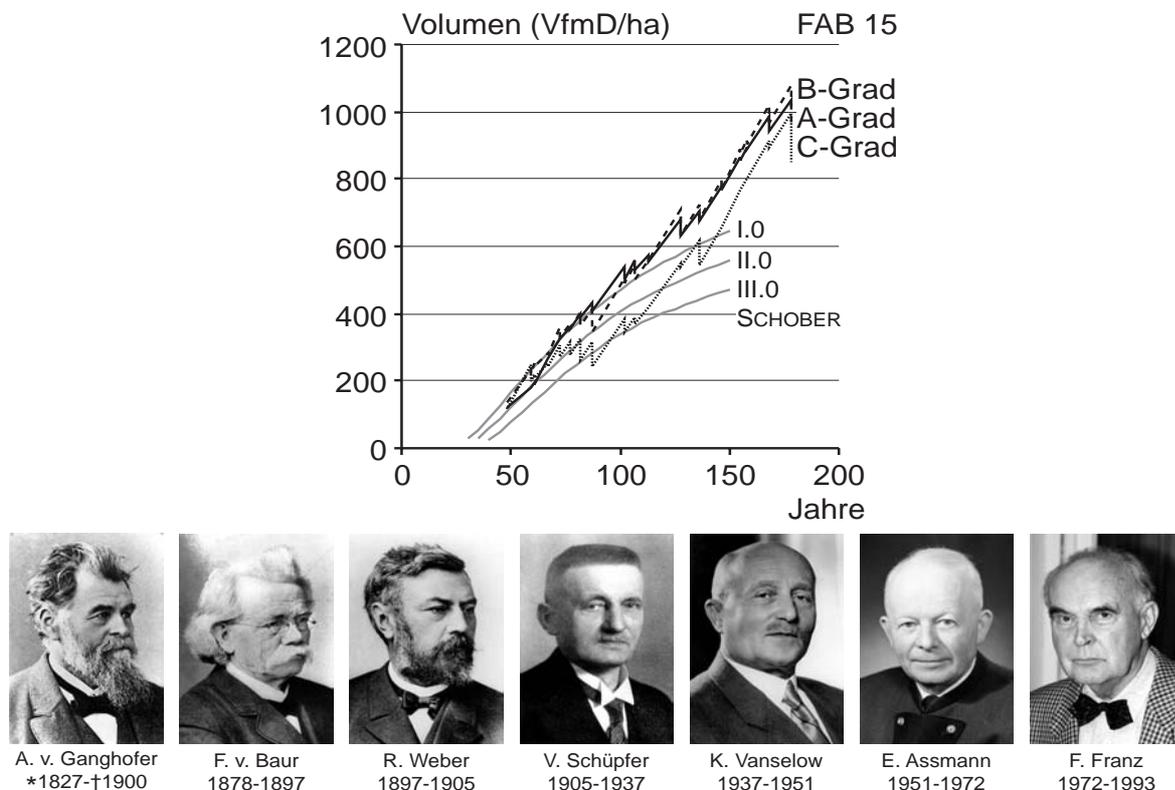
**Abb. 4:** Auszug aus der Wuchsreihe Freising 813 in Fichten-Buchen-Mischbeständen; die sechs dargestellten Parzellen repräsentieren ein Altersspektrum, das bei der Fichte von 37 bis 125 Jahren und bei der Buche von 50 bis 155 Jahren reicht (nach PRETZSCH et al. 1998).



**Abb. 5:** Prinzip der künstlichen Zeitreihe in schematischer Darstellung; (a) auf insgesamt zehn Parzellen werden durch Wiederholungsaufnahme oder Zuwachsbohrung Ausschnitte des Volumenzuwachsganges erfasst; (b) durch regressionsanalytischen Ausgleich der Streckenzüge ergibt sich eine künstliche Zuwachszeitreihe.

## Langfristige Versuche als ultimative Datenquelle der Waldwachstumsforschung

Beide genannten Auswege, die Stammanalyse wie die künstliche Zeitreihe, weisen also bestimmte Defizite und Mängel auf. Die ultimative Datenquelle bilden echte Zeitreihen, je länger, desto besser. Besonders wertvoll für die Forstwissenschaft im Allgemeinen und die waldwachstumskundliche Forschung im Speziellen sind jene langfristigen Versuchsflächen, die seit Gründung des Vereins Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten (1872 in Braunschweig) bis heute unter Beobachtung stehen (FRANZ 1972). Sie sehen auf Abbildung 6 die langfristige Volumenentwicklung des Durchforstungsversuchs Fabriksschleichach 15, der in der Gründerzeit der Forstlichen Versuchsanstalten im Jahr 1870 angelegt wurde und seitdem permanent unter Beobachtung gehalten wird (FRANZ et al. 1993).



**Abb. 6:** Langlebige Organismen erfordern langfristige Forschung: Die Buchen-Durchforstungsversuchsfläche Fabriksschleichach 15 (A-, B- und C-Grad) ist dank generationenübergreifender Betreuung seit über 130 Jahren unter regelmäßiger ertragskundlicher Beobachtung.

Die auf langfristigen Versuchsflächen gewonnenen Datensätze spielten eine zentrale Rolle bei der Entwicklung waldbaulicher Behandlungsprogramme, der Konstruktion von Wachstumsmodellen und bei der Detektierung von Wachstumstrends (Biomonitoring). Unser verehrter akademischer Lehrer, Prof. Dr. FRANZ, bezeichnet solche Versuchsflächen als „Juwelen der Forstwissenschaft“. BORIS ZEIDE, führender US-amerikanischer Forstwissenschaftler, spricht mit Blick auf die langfristigen Versuchsflächen von der „Schatztruhe der zentraleuropäischen Forstwissenschaft“.

Solche langfristigen Versuchsanlagen spiegeln eindrucksvoll die viele Forscherleben verschlingende Lebensspanne von Bäumen und Beständen wider: AUGUST VON GANGHOFER (\* 1827, † 1900) und FRANZ VON BAUR (1878 - 1897) begründeten die gezeigte Versuchsfläche, RUDOLF WEBER (1897 - 1905), VINZENZ SCHÜPFER (1905 - 1937), KARL VANSELOW (1937 - 1951), ERNST ASSMANN (1951 - 1972) und FRIEDRICH FRANZ (1972 - 1993) erfassten sie kontinuierlich dendrometrisch und begleiteten sie wissenschaftlich. Dennoch decken selbst diese sieben Forscherleben nur einen Ausschnitt der Lebensspanne des heute circa 170-jährigen Bestandes ab. Schon die schiere Lebensspanne von Bäumen beeindruckt den Menschen, fordert ihn zu Lösungen heraus, macht ihn neidisch. Das gilt erst recht für den Alterungsprozess an sich, also die Art und Weise wie Bäume ihre Lebensspanne durchlaufen.



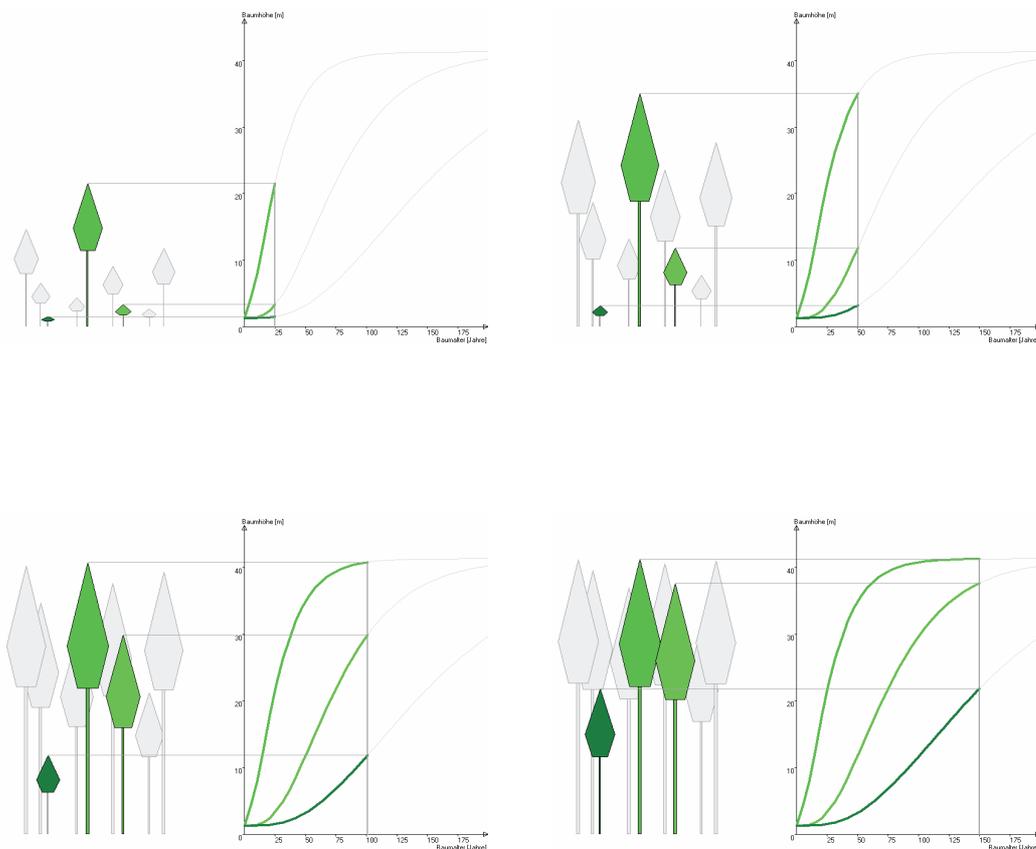
*Abb. 7: Stundenglas in der mittelalterlichen Kirche von Nyker, Bornholm, Dänemark; der Sandfluss durch das Stundenglas erinnert den Menschen an die Vergänglichkeit seines Lebens; den Geistlichen mahnt er zur Einhaltung seiner Redezeit auf der Kanzel (Foto: H. PRETZSCH).*

### **Alterung des Menschen: „Eins, Zwei, Drei! Im Sauseschritt läuft die Zeit; wir laufen mit“**

Die Lebenszeit des Menschen verrinnt stetig, unaufhaltsam, unumkehrbar; sie verrinnt wie der Sand durch eine Sanduhr (Abbildung 7). Die physikalische Zeit steuert die Alterung des Menschen. Sonne, Mond, Sterne steuern unsere Lebensfunktionen. Um diese unerbittliche Vergänglichkeit vor Augen zu stellen, finden sich in skandinavischen Kirchen zuweilen Stundengläser. Sie erinnern den Menschen an das Verrinnen seiner Lebenszeit - und sie disziplinieren den Geistlichen zugleich hinsichtlich seiner Redezeit auf der Kanzel. „Eins, Zwei, Drei! Im Sauseschritt läuft die Zeit; wir laufen mit“, so bringt WILHELM BUSCH (1924) in der Knopp-Trilogie die Alterung des Menschen in Abhängigkeit von der physikalischen Zeit auf seine Art zum Ausdruck.

## Bäume altern anders - Entkopplung von Wachstum und Zeit

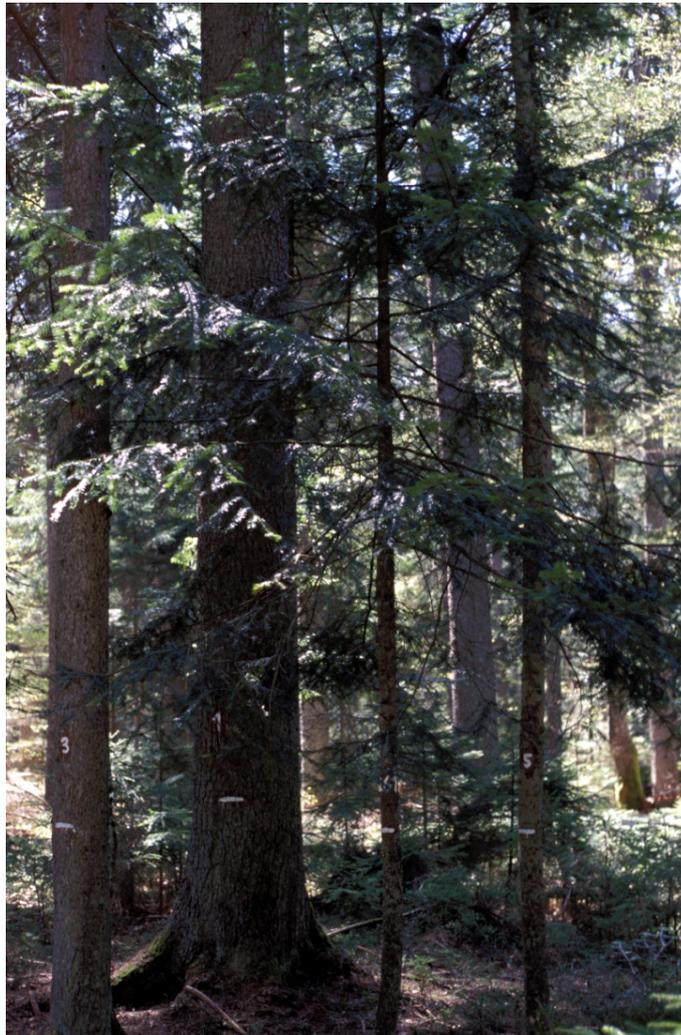
Bäume altern anders als der Mensch. Lassen Sie mich das an einem kleinen Film demonstrieren. In der vorliegenden Textfassung zeigen die Abbildungen 8a - d nur Auszüge aus dem im Vortrag gezeigten Film. Den kompletten Film finden Sie unter <http://www.wwk.forst.tu-muenchen.de/info/Zeitfaktor/>. Dargestellt sind drei Bäume in einem Bergmischwald, die in der Jugendphase dieselbe Höhe und dasselbe Alter haben. Betrachten wir ihren Alterungsprozess über der Zeitachse, so sehen wir, dass die physikalische Zeit für alle drei Bäume natürlich gleich verrinnt: 25 Jahre, 50 Jahre, 100 Jahre, 150 Jahre usw. (Abbildung 8a - d).



**Abb. 8:** Entkopplung von Wachstum und Zeit im Bergmischwald; schematisch dargestellt ist die Entwicklung von drei Bäumen mit unterschiedlicher Ressourcenversorgung über der Zeitachse. Im Alter von (a) 25 Jahren, (b) 50 Jahren, (c) 100 Jahren und (d) 150 Jahren erreichen die drei dargestellten Bäume Höhen, die weniger vom physikalischen Alter als vielmehr von der Ressourcenversorgung abhängen.

Die Größenentwicklung der drei Bäume vollzieht sich aber in völlig unterschiedlicher Geschwindigkeit. Baum 1, dessen Ressourcen deutlich limitiert sind (Lichtmangel, Nährstoffmangel im Unterstand), wächst viel langsamer als Baum Nr. 2 (mäßiges Lichtangebot) oder Baum 3 (immer ausreichend mit Licht und Nährstoffen versorgt). Damit wird offensichtlich: Bäume wachsen und altern nicht in Abhängigkeit von der physikalischen Zeit, sondern in der Abhängigkeit vom individuellen Ressourcenangebot. Spärliches Angebot ist gleichbedeutend mit langsamerer Größenentwicklung

und Alterung, üppiges Ressourcenangebot mit rascher Alterung (ENQUIST et al. 1998). Physikalisches Alter und Wachstum sind demnach weitgehend entkoppelt. Besser geeignet für die Bestimmung der ontogenetischen Phase, d. h. des Altersstadiums eines Baumes, ist seine aktuelle Größe. MAGIN (1959) unterscheidet zwischen dem physikalischen Alter (Alter in Jahren) und dem physiologischen Alter (Größenstadium).



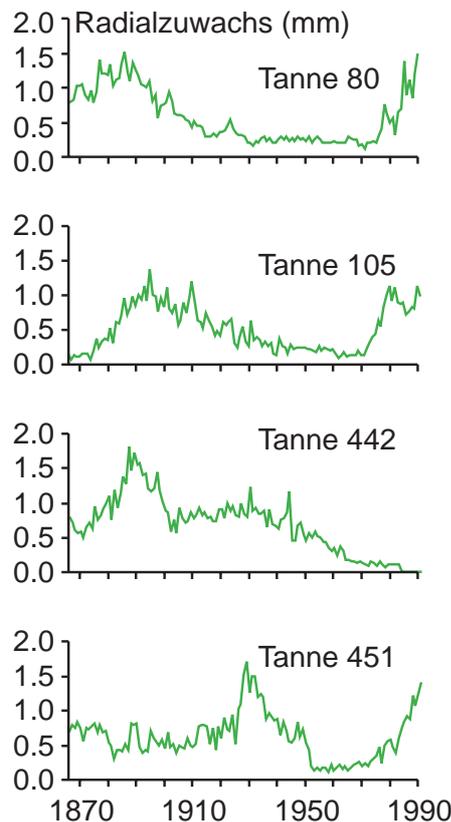
**Abb. 9:** Entkopplung von Wachstum und Zeit im Plenterwald Kreuzberger Forst; die drei im Vordergrund dargestellten Tannen haben etwa das gleiche physikalische Alter von ca. 120 Jahren, besitzen aber eine Höhe von 15 m, 32 m bzw. 8 m (von links nach rechts).

Ein 150-jähriger, unterständiger Baum in einem Bergmischwald ist zwar reich an Jahrringen und Jahren, er kann aber klein, physiologisch jung und reaktionsfähig sein. Ein 150-jähriger Baum, der in seiner Lebenszeit den Weg bis in das obere Kronendach gefunden hat, weist dieselbe Zahl von Jahrringen auf, ist aber physiologisch deutlich älter als der erstgenannte Baum. Das steckt hinter der auf Abbildung 9 festgehaltenen Alters-Größen-Relation. Im Vordergrund (von links nach rechts) dargestellt sind drei Bäume im Plenterwald Kreuzberger Forst, von denen sich einer physiologisch in der

Jugendphase befindet (dritter von links, 8 m Baumhöhe), ein zweiter in der Vollkraftphase (erster von links, 15 m Baumhöhe) und ein dritter in der Altersphase (zweiter von links, 32 m Baumhöhe). Physikalisches Alter und Wachstum sind bei diesen drei Bäumen weitgehend entkoppelt. Einen besseren Indikator für die Altersphase als das physikalische Alter oder die Anzahl von Jahrringen stellt die Baumhöhe, der Baumdurchmesser oder, noch besser, das aktuelle Baumvolumen dar.

### Leben im Unterstand: Langsam aber lange

Aus diesem Blickwinkel betrachtet weisen die Durchmesser-Zuwachsgänge von Bäumen in ungleichaltrigen Beständen Phasen mit schnellerer (Förderung durch Durchforstung oder natürlichen Ausfall von Konkurrenten) und langsamerer Alterung (Überschattung, seitliche Konkurrenzierung) auf (Abbildung 10). Bewegen wir uns in einem Plenterwald, so sind wir umgeben von Bäumen, die in völlig unterschiedlicher Geschwindigkeit altern oder in ihrer Alterung nahezu still stehen (unterschiedliche Eigenzeiten).



**Abb. 10:** Entkopplung von Wachstum und Zeit im Bergmischwald; Zuwachsgang von vier benachbarten und etwa gleich alten Tannen *Abies alba* Mill. mit bemerkenswerten Unterschieden in der zurückliegenden Individualentwicklung.

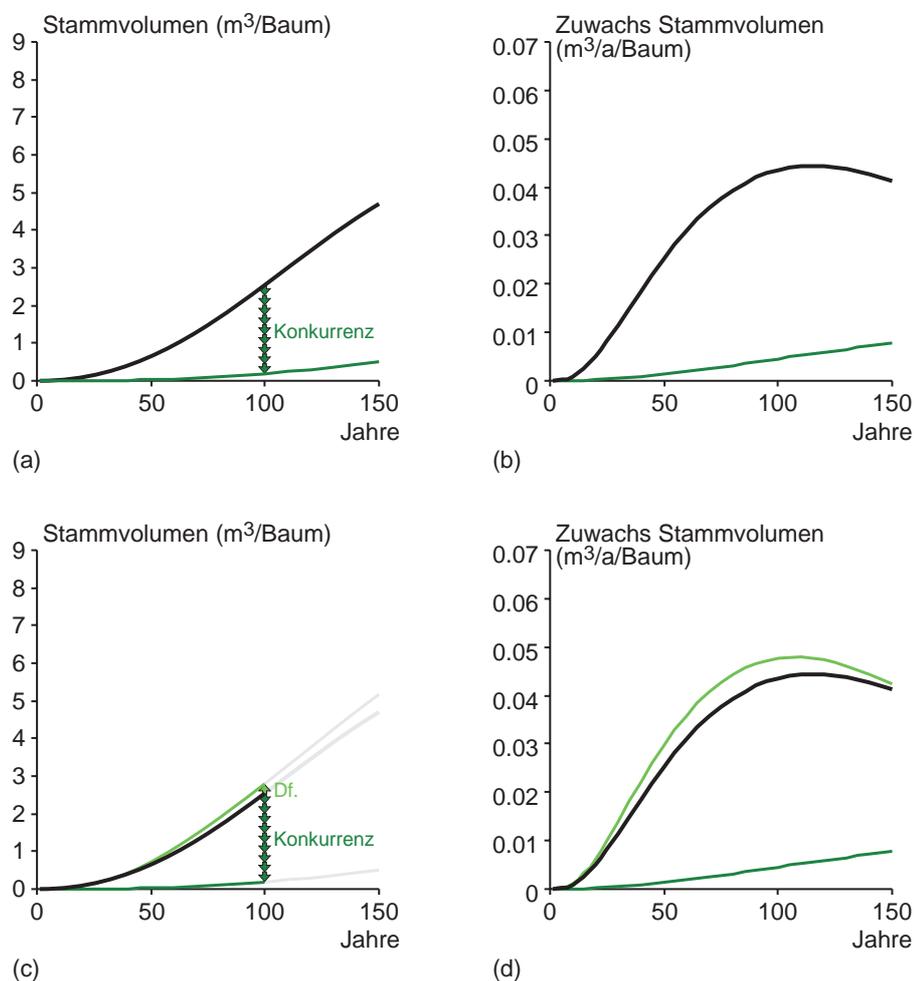
Wird ein 150-jähriger Baum im Unterstand, der zwar reich an Jahrringen und hoch im physikalischen Alter ist, aber gering in der Dimension (Durchmesser, Höhe, Volumen) mit Ressourcen besser versorgt (Entnahme von Nachbarn durch waldbaulichen Eingriff, Ausfall von Nachbarn wegen Alters-tod), so beginnt der bis dahin im Wartestand befindliche Baum abrupt zu wachsen und zu altern (PREUHLER 1979). Zu sehen ist dies hier an dem Übergang von sehr schmalen Jahrringen im Zentrum der Baumscheibe zu sehr breiten Jahrringen vom Alter 150 bis zum Alter 250 (Abbildung 11).



**Abb. 11:** Zuwachs und Alterung in Abhängigkeit von der Ressourcenversorgung, dargestellt an einer Fichten-Baumscheibe aus dem Bergmischwald. Auf eine ca. 100-jährige Phase gebremsten Wachstums (Innenzone der Baumscheibe) folgt eine Wachstumsbeschleunigung auf Grund der Verbesserung des Lichtangebotes.

Wir haben gesehen, dass eine Einschränkung des Strahlungsangebots die Wachstums- und Zuwachs-Entwicklung von Bäumen deutlich verlangsamen kann (Abbildung 12a, b). Damit wird die Biomassenzunahme und Alterung verlangsamt (ENQUIST et al. 1998). Hinter der Verlangsamung des Wachstums kann, wie PREUHLER (1987, 1990) zeigt, auch die Limitierung anderer Ressourcen stecken.

Nun blickt der Mensch zumeist nicht mit Ehrfurcht auf die große Lebensspanne von Bäumen und ihre Fähigkeit der verzögerten Alterung; vielmehr ist er an einer Beschleunigung des Wachstums, d. h. an einer Beschleunigung des Alterungsprozesses interessiert. Der Mensch möchte also nicht die Zuwachs- und Wachstumsentwicklung lebensverlängernd drosseln, sondern das Wachstum beschleunigen, schneller ernten, noch zu seinen Lebenszeiten von der Investition und den waldbaulichen Maßnahme profitieren und den Gewinn steigern (Abbildung 12 c, d).



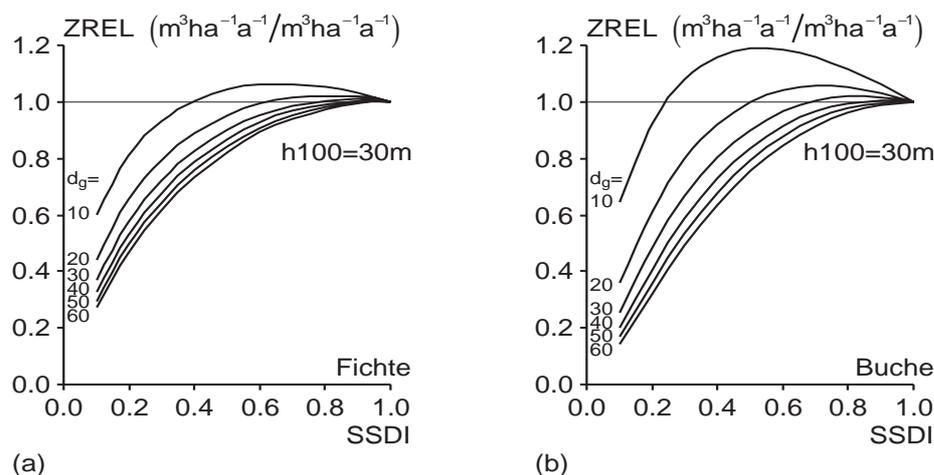
**Abb. 12:** Wachstumsmindering bei Ressourcenverknappung in schematischer Darstellung; die Verknappung von Ressourcen kann die Wachstumskurve (a) und Zuwachskurve (b) des Stammvolumens erheblich drosseln. Durchforstung hingegen führt zu einer Beschleunigung von Volumenwachstum (c) und Volumezuwachs (d) im Vergleich zum erwarteten Verlauf des Mittelstammes.

## Leben mit Durchforstung: Schnell aber kurzlebig

Wichtigste Maßnahme zur Beschleunigung der Bestandesentwicklung ist die Durchforstung. Die Durchforstung ist in der Effizienz durch andere waldbauliche Maßnahmen kaum zu übertreffen. Die Entnahmen und die gewinnbringende Lenkung des verbleibenden Bestandes können den nötigen Mitteleinsatz kompensieren oder sogar überkompensieren. Einen weiteren Vorzug gegenüber waldbaulichen Maßnahmen wie Düngung oder Unkrautbekämpfung bildet die größere Pfléglichkeit von Durchforstungen. Ganz umsonst sind diese Vorteile der Durchforstung allerdings nicht zu haben. Gewinnbringende Durchforstung setzt fundiertes Wissen über den Zusammenhang zwischen Dichte und Zuwachs voraus. Angesichts der überragenden Bedeutung der Dichte-Zuwachs-Beziehung erstaunt die bis dato kontroverse Einschätzung und fehlende theoretische Untermauerung dieser Beziehung (ZEIDE und PRETZSCH 2004; PRETZSCH 2004). Aus Sicht der Ontogenese bedeutet Durchforstung Beschleunigung der Alterung eines definierten Teilkollektivs der Population.

## Dichte, Zuwachs und Alterung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 607 „Wachstum und Parasitenabwehr“ wurde in die „Schatztruhe der zentraleuropäischen Forstwissenschaft“ gegriffen, d. h. der Zusammenhang zwischen Bestandesdichte und Volumenzuwachs mit Blick auf den charakteristischen Kurvenverlauf auf Basis langfristiger Versuchsflächen beschrieben und biometrisch parametrisiert (PRETZSCH 2003, 2004). Demnach besteht zwischen der Bestandesdichte (hier ausgedrückt durch den Stand Density Index) und dem laufenden Bestandesvolumenzuwachs pro ha eine unimodale Optimumbeziehung (Abbildung 13).



**Abb. 13:** Zusammenhang zwischen relativer Bestandesdichte (SSDI) und relativen Volumenzuwachs (ZREL) für Bestände verschiedener Mitteldurchmesser ( $d_g$ ) und Mittelhöhe im Alter 100 ( $h_{100}$ ); für Fichte (a) und Buche (b) ist der Effekt für Bestände mit  $d_g$  (10 ... 60 cm) und  $h_{100} = 30$  m dargestellt (PRETZSCH 2004).

Setzen wir bei maximaler Bestandesdichte ( $SSDI = 1.0$ ) den Volumenzuwachs  $ZREL = 1$ , so sinkt der Volumenzuwachs bei Minderung der Bestandesdichte (Durchforstung) nicht zwangsläufig ab. Vielmehr kann der Volumenzuwachs pro ha bei Fichte und Buche, insbesondere in der Jugendphase, gegenüber jenem bei maximaler Dichte um 10 bis 20 % gesteigert werden. Erst wenn die Bestandesdichte um mehr als die Hälfte abgesenkt wird ( $SSDI < 0.5$ ), sinkt der Volumenzuwachs unter das Niveau, das bei maximaler Dichte zu erwarten wäre ( $ZREL < 1.0$ ). Die Buche weist überlegene Mehrzuwächse bei mittleren Dichteabsenkungen und eine größere Fähigkeit der Abpufferung von Dichteabsenkungen auf als die Fichte. Bei beiden Baumarten nimmt die Fähigkeit, Dichteabsenkungen überzukompensieren oder abzupuffern, mit fortschreitender Bestandesentwicklung ab. Das Kurvenbündel in Abbildung 13 zeigt die unimodalen Reaktionskurven für Bestände mit unterschiedlichem Mitteldurchmesser ( $d_g = 10, 20, 30, 40, 50$  und  $60$  cm).

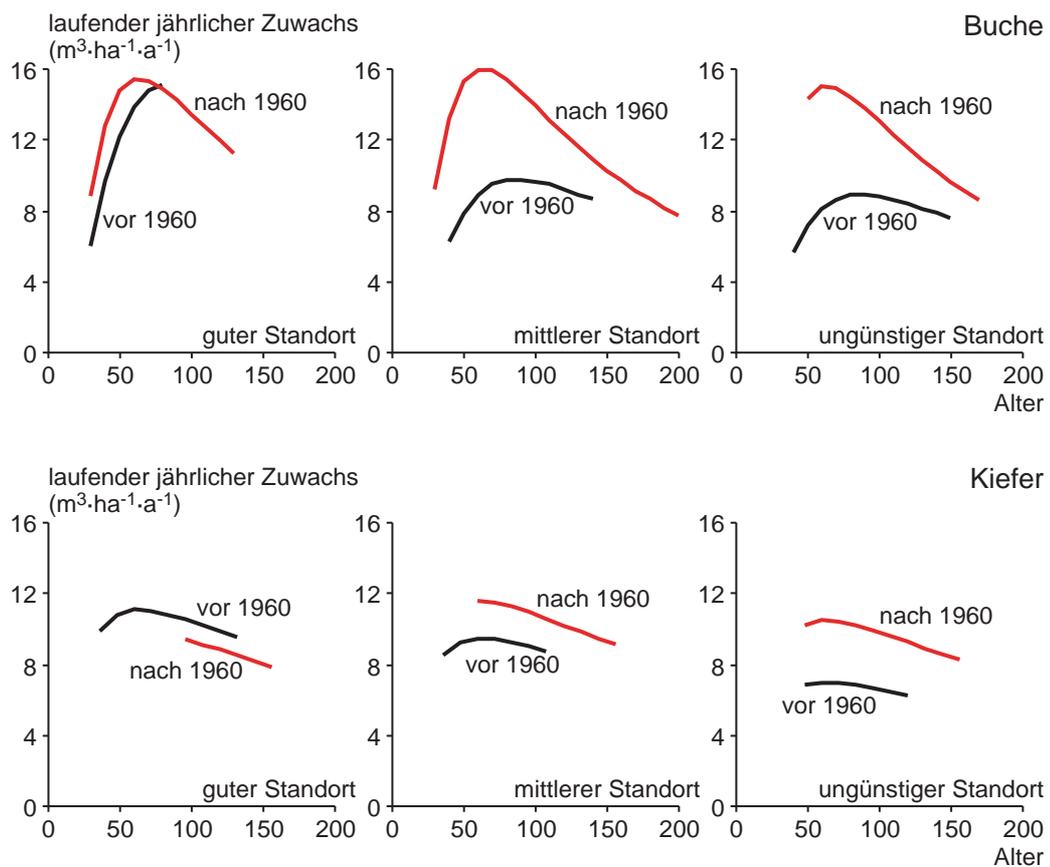
Das bedeutet, dass die von einer Dichteabsenkung ausgelöste Zuwachsbeschleunigung die behandelten Bestände schneller in größere Dimensionsbereiche bringt, sodass ihre Reaktionsfähigkeit auf weitere Durchforstungen schneller abnimmt. Diese Steigerung des Volumenzuwachses beschleunigt gleichzeitig die Zunahme von  $d_g$  und verursacht eine raschere Alterung des Bestandes. Deshalb klingt seine Reaktionsfähigkeit nach Durchforstungen rascher ab als jene unbehauelter Bestände. Umso stärker das Wachstum über Durchforstungen beschleunigt wird, desto schneller wird ein Bestand quasi durch das System der Reaktionskurven in Abbildung 13 „getrieben“. Er durchläuft schneller die Phase hoher absoluter Zuwächse, verliert aber früher die Fähigkeit, Dichteabsenkungen mittels Mehrzuwachs abzupuffern oder gar überzukompensieren. Mit anderen Worten: durchforstete Bestände altern schneller als undurchforstete Bestände.

Diese Wechselwirkung zwischen Bestandesdichte und Wachstum ließe sich nicht in Abhängigkeit vom physikalischen Alter darstellen. Denn unabhängig von der Stärke der Durchforstung sind unbehauelte, mäßig und stark durchforstete Parzellen hinsichtlich des physikalischen Alters identisch; sie unterscheiden sich lediglich im physiologischen Alter. Das heißt, dass sich die Abflachung der Reaktion allein in Abhängigkeit vom physikalischen Alter nicht abbilden ließe; der Mitteldurchmesser als Indikator für das physiologische Alter macht dies hingegen möglich.

### **Verwechslungsgefahr: Wuchsbeschleunigung durch Durchforstung oder Umweltveränderung**

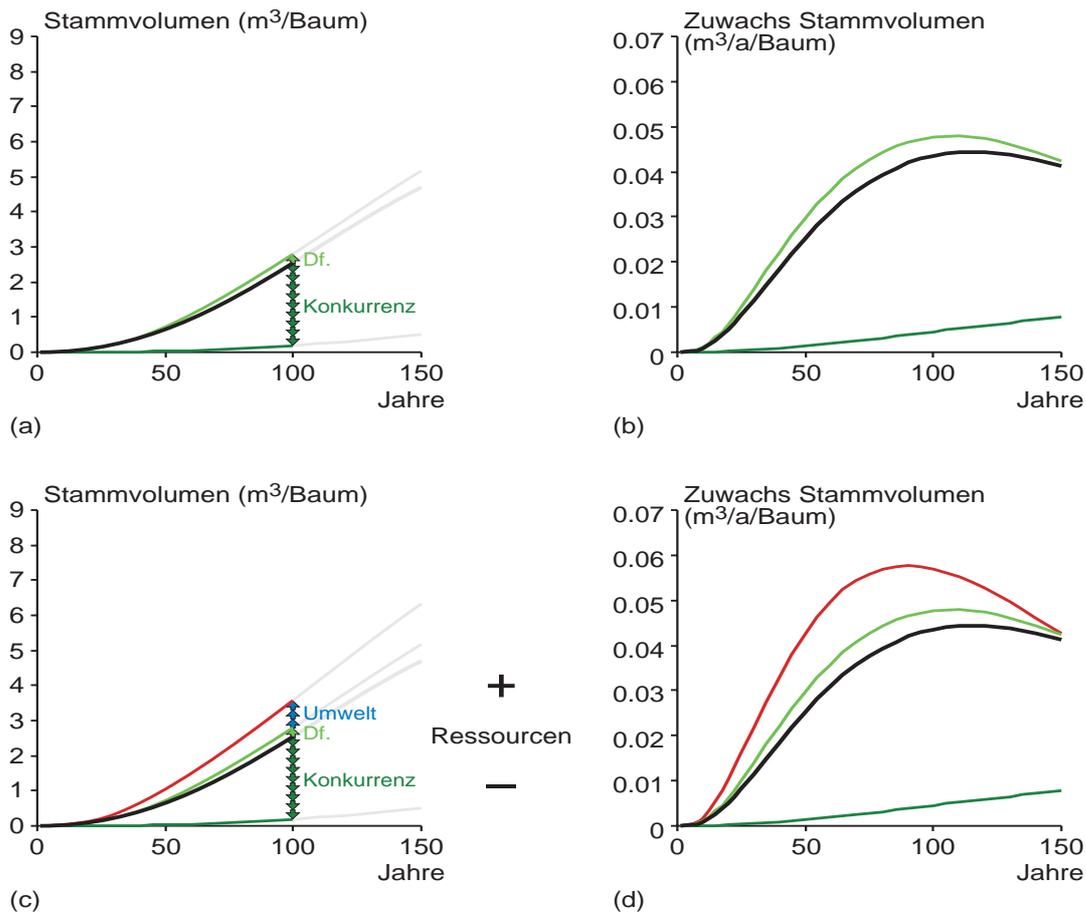
Die gegenwärtig beobachtbaren Zuwächse in „modern“ durchforsteten Beständen gehen in der Regel nicht allein auf Durchforstungen zurück. Vielmehr lassen die Wachstumsgänge unserer langfristigen Versuchsflächen in Südbayern überwiegend deutliche Zuwachsanstiege erkennen, die auf großräumige Veränderungen der Wuchsbedingungen zurückgehen (Stickstoffeinträge, Verlängerung der Vegetationszeit,  $CO_2$ -Konzentrationsanstieg in der Atmosphäre, Temperaturanstieg). Seit den 80er Jahren mehren sich die Indizien für positiv gerichtete Abweichungen vom „normalen“ Zuwachsgang, der unter Steadystate-Bedingungen zu erwarten wäre. In neueren Arbeiten zum Wachstumstrend bayerischer Buchen- und Kiefernbestände zeigt sich folgendes Bild: Auf mittleren und ungünstigen

Standorten beobachten wir seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts einen Niveauanstieg des laufenden jährlichen Volumenzuwachses und eine Vorverlagerung des Kulminationszeitpunktes der Zuwachsgipfelung. Offensichtlich lösen Veränderungen der Umweltbedingungen im absoluten Niveau höhere Volumenzuwächse und im Kurvenverlauf früher kulminierende Volumenzuwächse auf (Abbildung 14). Mit anderen Worten: Die Veränderungen der Umweltbedingungen löst eine frühere Alterung unserer Buchen- und Kiefernbestände aus. Für andere Baumarten wie Eiche und Fichte sind ähnliche Tendenzen nachgewiesen (FRANZ et al. 1993; KÜSTERS et al. 2004; PRETZSCH 1999; PRETZSCH und UTSCHIG 2000; UTSCHIG und PRETZSCH 2001).



**Abb. 14:** Volumenzuwachs von Buchenbeständen (oben) und Kiefernbeständen (unten) in Bayern vor 1960 (schwarz ausgezogene Linie) und nach 1960 (grau ausgezogene Linie) für gute, mittlere und ungünstige Standorte (von links nach rechts); auf der Mehrzahl der zugrunde liegenden Versuchsflächen zeichnet sich eine Zuwachsbeschleunigung ab, die gleichbedeutend mit einer schnelleren Alterung der Bestände ist.

Gehen wir vom Volumenwachstum eines Mittelstammes in einem undurchforsteten Bestand aus, so lässt sich diese Volumenentwicklung also zum einen durch Durchforstungseingriffe beschleunigen, zum anderen können Umwelteffekte diese Beschleunigung weiter verstärken (Abbildung 15). Im Gegensatz zur Dämpfung der Wuchsgeschwindigkeit, gleichbedeutend mit verzögerter Alterung, können Durchforstungs- und Umwelteffekte eine Beschleunigung des Wachstums und der Alterung auslösen. Diese macht sich bemerkbar in den Volumen- und Zuwachskurven. Sie steigen in der Jugend früher an, zeigen frühere Wende- und Kulminationspunkte und flachen früher ab.



**Abb. 15:** Wachstumssteigerung durch Durchforstung (a und b) und durch Umweltveränderungen (c und d) in schematischer Darstellung; im oberen Teil der Graphik (a und b) ist die Verlangsamung und Beschleunigung der Volumenentwicklung in Abhängigkeit von Konkurrenzierung bzw. Durchforstung dargestellt. In den Teilen (c) und (d) der Graphik ist der Beschleunigungseffekt durch zuwachssteigernde Umweltveränderungen dargestellt.

Im Folgenden separiere ich Durchforstungs- und Umwelteffekte voneinander. Zu diesem Zweck setze ich das Volumen des Grundflächen-Mittelstammes der 100 stärksten Bäume eines mäßig durchforsteten Bestandes im Alter von 100 Jahren = 100 %. Anhand stark durchforsteter, aufgelichteter und solitärartig behandelter Bestände schätze ich dann ab, um wieviel Prozent Durchforstungsmaßnahmen das Volumen dieses Mittelstammes im Alter 100 zu steigern vermögen (Tabelle 1, Zeile Durchforstungseffekt). Die Ausführung der Berechnung auf der Grundlage des Grundflächen-

Mittelstammes der 100 stärksten Bäume eliminiert den Effekt der rechnerischen Verschiebung des Mitteldurchmessers weitgehend. Die resultierenden Prozentwerte spiegeln den reinen Zuwachsbeschleunigungseffekt der Durchforstung wider (ASSMANN 1961).

Der Umwelteffekt lässt sich quantifizieren, indem das Volumen des Mittelstammes 100-jähriger Bestände mit jenem Volumen verglichen wird, das die Ertragstafeln für solche Bestände ausweisen (jeweils mäßig durchforstete Bestände). Für den zweiten Vergleich wird also davon ausgegangen, dass die Ertragstafeln Steadystate-Bedingungen abbilden und das gegenwärtig beobachtete Wachstum ertragstafelgemäß behandelte Bestände daran gemessen werden kann.

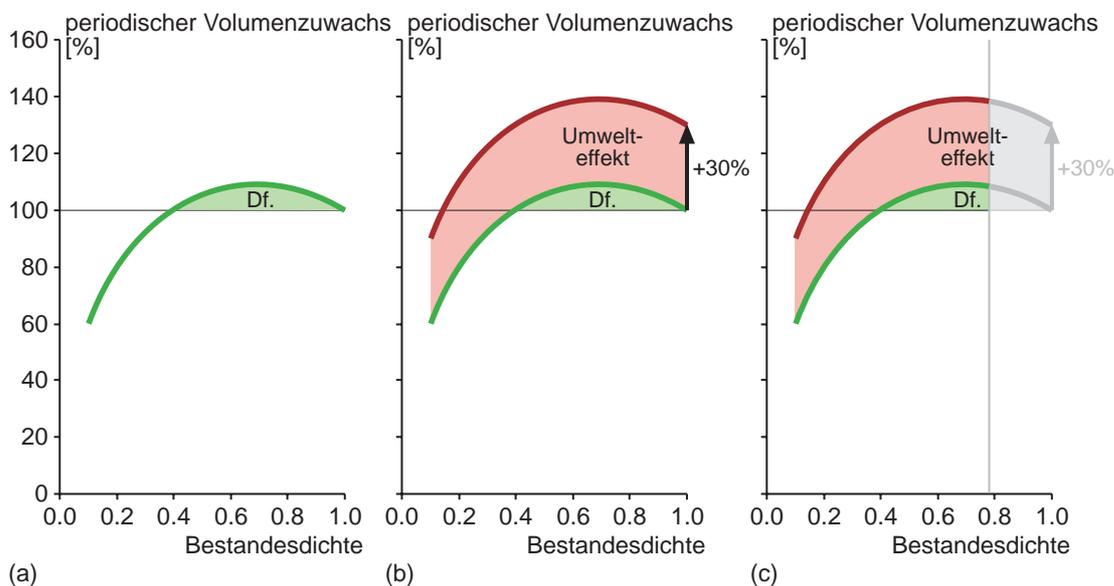
Eine solche Auswertung wurde auf folgender Datenbasis aufgebaut: 15 Fichten-, 16 Buchen-, 8 Kiefern- und 15 Eichen-Durchforstungsversuche. Die Auswertung erbringt, dass der Durchforstungseffekt bei Fichte, Buche, Kiefer und Eiche 9 %, 18 %, 20 % bzw. 11 % beträgt. In Klammern sind die Standardfehler der Durchforstungseffekte angegeben. Bei starker bis solitärartiger Durchforstung kann das Volumen des Mittelstammes gegenüber dem schwach durchforsteten Bestand um 9 bis 20 % gesteigert werden (Tabelle 1). Demgegenüber beträgt der Umwelteffekt bei Fichte, Buche, Kiefer und Eiche 27 %, 12 %, 33 % bzw. 13 %. In Klammern sind wiederum die Standardfehler angegeben. Demnach ist insbesondere bei Fichte und Kiefer der Umwelteffekt auf den Zuwachs wesentlich stärker ausgeprägt als der Durchforstungseffekt. Der Gesamteffekt beträgt bei Fichte, Buche, Kiefer und Eiche 38 %, 32 %, 60 % bzw. 25 %. Für Fichte, Buche, Kiefer und Eiche stützt sich die Auswertung auf die Ertragstafeln von WIEDEMANN (1936/42), SCHOBER (1967), WIEDEMANN (1943/48) bzw. JÜTTNER (1955).

**Tab. 1:** Prozentische Steigerung des Stammvolumens im Alter von 100 Jahren über Durchforstung bzw. Umweltveränderungen; der Auswertung liegen die im unteren Teil der Tabelle aufgelisteten 15 Fichten-, 16 Buchen-, 8 Kiefern- und 15 Eichenversuche zugrunde. (a) Prozentische Steigerung des Stammvolumens im Alter 100 beim Übergang von schwacher zu starker Durchforstung oder Lichtung (Durchforstungseffekt in %); (b) Beobachtetes Stammvolumen mäßig durchforsteter Parzellen im Vergleich zu den Erwartungswerten der Ertragstafel (Umwelteffekt in %); der Gesamteffekt fasst zuwachssteigernde Umwelt- und Durchforstungseffekte zusammen.

	Fichte n = 15	Buche n = 16	Kiefer n = 8	Eiche n = 15
Durchforstungseffekt in %	+ 9 (±4)	+18 (±9)	+20 (±19)	+11 (±6)
Umwelteffekt in %	+27 (±5)	+12 (±10)	+33 (±7)	+13 (±4)
Gesamteffekt in %	+38	+32	+60	+25
Versuchsflächen	SAC 2, SAC 3, DEN 5, SAC 67, SAC 68, EGL 72, EGL 73, DEN84, WES 87, ADE 96, WOL 97, EGL 98, MIT 101, ZWI 111, WBU 613	WAB 14, FAB 15, ELM 20, LOH 24, HAI 25, ROT 26, HAI 27, WAB 41, STA 91, MIT 101, WAB 105, WAB 106, ZWI 111, HEG 232, BIS 312	SLU 49, SLU 50, BAY 52, KUL 53, SNA 56, SNA 57, SNA 58, FLA 79	ILL 38, ILL 39, LOH 60, ELM 62, ELM 63, WAL 88, ROH 90, RIM 102, WAB 105, WAB 106, BIS 311, ROH 620

## Waldbauliche Konsequenzen

Lassen Sie mich aus dem Gesagten zwei Konsequenzen ableiten. Bei waldbaulichen Maßnahmen unterstellen wir allgemein eine unimodale Dosis-Wirkungs-Funktion zwischen Bestandesdichte und Volumenzuwachs (Abbildung 16a). Gegenwärtig leisten aber offensichtlich viele Bestände unerwartet hohe Zuwächse. Beispielsweise liegt der Volumen-Mehrzuwachs von Fichten- und Kiefernbeständen im Vergleich zu den Erwartungswerten unter Steadystate-Bedingungen bei circa +30 % (Abbildung 16b). Das birgt die Gefahr, dass Umwelteffekte für Durchforstungseffekte gehalten werden. Das heißt, die nach Durchforstungsmaßnahmen beobachteten Volumenzuwächse werden häufig für starke Durchforstungseffekte gehalten, sind dagegen eine Mischung aus Umwelteffekten (ca. 30 %) und Durchforstungseffekten (ca. 10 %) (Abbildung 16c). Dieser Zusammenhang wäre ohne das Informationspotential langfristiger Versuchsflächen, die neben unterschiedlich stark behandelten auch A-Grad Flächen umfassen, nicht bekannt.



**Abb. 16:** Wachstumssteigerung der Fichte durch Durchforstung und zuwachs-förderliche Umweltveränderung in schematischer Darstellung; (a) der Zusammenhang zwischen Bestandesdichte und periodischem Volumenzuwachs folgt einer unimodalen Optimumkurve; (b) auf Grund der veränderten Umweltbedingungen zeichnet sich eine ca. 30-prozentige Steigerung des periodischen Volumenzuwachses ab; (c) Zuwachssteigerungen nach Durchforstungen, etwa durch Absenkung der Bestandesdichte auf 0,8 (vertikale Linie) resultieren in periodischen Volumenzuwächsen von 130 bis 140 % der Erwartungswerte, wovon allerdings nur ca. 10 % auf durchforstungsbedingte Anstiege und ca. 30 % auf Umwelteffekte zurückgehen.

## Biologische Konsequenzen

Ein zweite Konsequenz ist biologischer oder gar philosophischer Natur. Durchforstung und Umwelteffekte lassen Waldbestände, wie wir gesehen haben, gegenwärtig je nach Baumart um 25 % bis 60 % schneller altern. Damit verändert sich die Relation der Alterungsgeschwindigkeiten von Bäumen und Menschen. In Relation zum Wald altert der Mensch gegenwärtig um 20 % bis 37 % langsamer, lieber Teja. Die a priori sehr unterschiedlichen Zeitskalen von Mensch und Baum nähern sich also etwas aneinander an.

## Danksagung

Der Autor dankt dem Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten für die Förderung der Projektgruppe W 07 „Langfristiges Ertragskundliches Versuchswesen“. Dr. Heinz Utschig sei für die Unterstützung der Auswertungsarbeiten gedankt. Dank gilt ferner Hans Herling und Stefan Seifert für die gewissenhafte Anfertigung der Grafiken sowie Prof. Dr. Klaus von Gadow für seine konstruktive Kritik.

## Zusammenfassung

Bäume können um zwei bis drei Zehnerpotenzen länger leben als Menschen. Sie sind auch aus einem weiteren Grund zu beneiden. Anders als der Mensch altern Bäume nicht in strenger Abhängigkeit von der physikalischen Zeit; vielmehr bestimmen die Umweltfaktoren (Lichtangebot, Nährstoffversorgung etc.) ihren Alterungsprozess. Bei starker Konkurrenz im Unterstand kann der Alterungsprozess deutlich verlangsamt werden. Andererseits beschleunigen Durchforstung und zuwachsförderliche Stoffeinträge den Alterungsprozess von Bäumen. Langfristige Versuchsflächen, von denen die ältesten in Bayern seit 1870 unter regelmäßiger Beobachtung stehen, bilden eine ultimative Datenbasis für die Aufdeckung von Umwelt- und Wachstumsveränderungen. Sie erlauben es, sofern unbehandelte Kontrollfelder eingeschlossen sind, Behandlungs- und Umwelteffekt voneinander zu trennen. Langfristige Versuchsflächen in Süddeutschland enthüllen, dass Bäume je nach Baumart auf Grund von Durchforstung und Umwelteinflüssen um durchschnittlich 25 bis 60 % schneller altern als noch Mitte des 20. Jahrhunderts. In Relation zu den Wäldern altert der Mensch gegenwärtig um 20 bis 37 % langsamer; d. h. die Zeitskalen von Mensch und Baum nähern sich an.

## Literatur

- ASSMANN, E. (1961): Waldertragskunde. BLV Verlagsgesellschaft, München, Bonn Wien, 490 S.  
BUSCH, W. (1924): Knopp-Trilogie. In: Humoristischer Hausschatz. Verlag Bassermann München, 355 S.  
ENQUIST, B.J.; BROWN, J.H.; WEST, G.B. (1998): Allometric scaling of plant energetics and population density. *Nature* 395, S. 163-165  
FRANZ, F. (1972): Gedanken zur Weiterführung der langfristigen ertragskundlichen Versuchsarbeit. *Forstarchiv*, 43. Jg., Heft 11, S. 230-233

- FRANZ, F.; RÖHLE, H.; MEYER, F. (1993): Wachstumsgang und Ertragsleistung der Buche. Allgemeine Forstzeitschrift 48, S. 262-267
- JÜTTNER, O. (1955): Eichenertragstafeln. In: SCHOBER, R. (Hrsg.) (1971): Ertragstafeln der wichtigsten Baumarten. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, S. 12-25 und S. 134-138
- KÜSTERS, E.; BACHMANN, M.; SCHÜTZE, G.; UTSCHIG, H.; PRETZSCH, H. (2004): Die Kiefer im Rein- und Mischbestand, Produktivität, Variabilität, Wachstumstrend. Mitteilungen aus der Bayerischen Staatsforstverwaltung, Heft 52, im Druck
- MAGIN, R. (1959): Struktur und Leistung mehrschichtiger Mischwälder in den bayerischen Alpen. Mitteilungen aus der Staatsforstverwaltung Bayerns, Heft 30, 161 S.
- PRETZSCH, H. (1999): Waldwachstum im Wandel, Konsequenzen für Forstwissenschaft und Forstwirtschaft. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 118. Jg., S. 228-250
- PRETZSCH, H. (2001): Modellierung des Waldwachstums. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, Wien, 341 S.
- PRETZSCH, H. (2002): Grundlagen der Waldwachstumsforschung. Blackwell, Wissenschafts-Verlag, Berlin, Wien, Oxford, 414 S.
- PRETZSCH, H. (2003): The elasticity of growth in pure and mixed stands of Norway spruce and common beech. Journal of Forest Science, 49(11), S. 491-501
- PRETZSCH, H. (2004): Gesetzmäßigkeit zwischen Bestandesdichte und Zuwachs. Lösungsansatz am Beispiel von Reinbeständen aus Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.), Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung 174, im Druck
- PRETZSCH, H.; KAHN, M.; GROTE, R. (1998): Die Fichten-Buchen-Mischbestände des Sonderforschungsbereiches „Wachstum und Parasitenabwehr“ im Kranzberger Forst. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 117. Jg., S. 241-257
- PRETZSCH, H.; UTSCHIG, H. (2000): Wachstumstrends der Fichte in Bayern. Mitteilungen aus der Staatsforstverwaltung Bayerns, Heft 49, 170 S.
- PREUHSLER, T. (1979): Ertragskundliche Merkmale oberbayerischer Bergmischwald-Verjüngungsbestände auf kalkalpinen Standorten im Forstamt Kreuth. Forstliche Forschungsberichte Nr. 45, München, S. 372
- PREUHSLER, T. (1987): Wachstumsreaktionen nach Trassenauftrieb in Kiefernbeständen. Forstliche Forschungsberichte Nr. 81, München, 210 S.
- PREUHSLER, T. (1990): Einfluß von Grundwasserentnahmen auf die Entwicklung der Waldbestände im Raum Genderkingen bei Donauwörth. Forstliche Forschungsberichte Nr. 101, München, 95 S.
- SCHOBER, R. (1967): Buchen-Ertragstafel für mäßige und starke Durchforstung. In: Die Rotbuche (1971). J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main; Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt (1972), Nr. 43/44, 333 S.
- UTSCHIG, H.; PRETZSCH, H. (2001): Der Eichen-Durchforstungsversuch Waldleiningen 88, Auswirkungen unterschiedlicher Eingriffsstärken nach 65 Jahren Beobachtung. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 120. Jg., S. 90-113
- WIEDEMANN, E. (1943/48): Kiefern-Ertragstafel für mäßige Durchforstung, starke Durchforstung und Lichtung. In: WIEDEMANN, E. (1948): Die Kiefer. Verlag M. & H. Schaper, Hannover, 337 S.
- WIEDEMANN, E. (1936/42): Die Fichte. Verlag M. & H. Schaper, Hannover, 248 S.; Untersuchungen der Preußischen Versuchsanstalt über Ertragstafelfragen. Sonderdruck aus Mitteilungen aus Forstwirtschaft und Forstwissenschaft, 10. Jg., 40 S.
- ZEIDE, B.; PRETZSCH, H. (2004): The optimum of current stand density: Evidence from the Bavarian permanent plots. Forest Science, sub.