

## Langfristige Wachstumstrends von Eichenbeständen in Deutschland

Enno Uhl und Kilian Stimm

**Zusammenfassung** Zahlreiche Studien belegen eine veränderte Wachstumsdynamik in Wäldern nicht nur in Europa, sondern auch weltweit. Vieles deutet daraufhin, dass Bäume und Bestände heutzutage schneller wachsen als noch vor hundert Jahren. Der globale Wandel scheint zunächst zu einer verbesserten Ressourcenversorgung zu führen. Auf Basis langfristiger Ertragsversuche aus Bayern und Niedersachsen kann ein beschleunigtes Wachstum auch für Eichenrein- und Mischbestände nachgewiesen werden. In diesem Beitrag wird aufgezeigt, wie sich die Wachstumsdynamik standortspezifisch verändert hat. Konsequenzen für die waldbauliche Behandlung werden diskutiert.

**Schlüsselwörter** Produktivität, Alterstrend, Konkurrenz, globaler Wandel

**Abstract** Numerous studies reveal an accelerated growth in European forests and globally. Trees and stand are growing faster than a hundred years ago. Seemingly, global change leads to improved resource supply. Based on long term growth and yield trials from Lower Saxony and Bavaria similar trend changes can be observed for monospecific and mixed oak stands. Here, we show how growth dynamic has changed site specific. We discuss consequences for the silviculture of oaks.

**Keywords** Productivity, age trend, competition, global change

## 1 Einleitung

Im letzten Jahrhundert hat sich die Zuwachsdynamik von Wäldern stark verändert. So berichten Kauppi et al. (2014) und Fang et al. (2014) für boreale Wälder in Europa und Japan über ein beschleunigtes Wachstum. Auch in Mitteleuropa weisen viele Bestände in den letzten 100 Jahren eine Zuwachsbeschleunigung auf (Spiecker et al. 1996). Für Fichte und Buche berichten Pretzsch et al. (2014a) eine Veränderung der Alters-Zuwachsbeziehung, gleiche Durchmesser werden jetzt in deutlich jüngeren Jahren erreicht als noch vor 50 Jahren. Als Ursachen für diese Veränderungen werden eine verbesserte Nährstoffversorgung durch Stoffeinträge und erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre und insbesondere eine Verlängerung der Vegetationszeit durch die allgemeine Temperaturerhöhung diskutiert.

Eine höhere Produktivität in Waldbeständen zieht ökologische und waldbauliche Konsequenzen nach sich. So führt gesteigertes Wachstum auch zu einer höheren Kohlenstofffixierung und muss bei der Kohlenstoffbilanzierung von Wäldern Eingang finden. Klassische Ertragsmodelle (z.B. Ertragstafeln) und deren zugrundeliegenden Behandlungsmodelle verlieren ihre Gültigkeit und bedürfen einer Anpassung.

Die Eiche, in Deutschland im Wesentlichen durch die zwei Arten Stiel- und Traubeneiche (*Quercus robur* L. und *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) vertreten, ist mit einem Flächenanteil von etwa 10% (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2018) die zweit häufigste Laubbaumart. Beide Arten gelten als verhältnismäßig resilient gegenüber Trockenstress (Leuschner und Ellenberg, 2017). Im Rahmen der Anstrengungen um eine Anpassung der Wälder an den Klimawandel kommt der Eiche deshalb eine bedeutende Rolle zu. Auch als Mischbaumart ist die Eiche aus ökologischen und stabilisierenden Gründen wertvoll. So weisen Müller und Gossner (2021) auf die Relevanz der Eiche für die Biodiversität hin. Ferner gibt es Hinweise, dass die Eiche bei Trockenheit ausgleichend auf die Stressreaktion von Mischbaumarten wirkt (Pretzsch et al., 2012). Da die Produktivität auch als ein Maß der Vitalität aufgefasst werden kann, ist eine Kenntnis über langfristige Wachstumstrends wichtig, um die künftige Rolle der Eiche besser einschätzen zu können

Langfristige Veränderungen des Zuwachsverhaltens können auf Basis retrospektiver Jahrringanalyse für Einzelbäume relativ einfach nachvollzogen werden. Eine Übertragung der Ergebnisse auf die Bestandsentwicklung ist aber nicht ohne weiteres möglich, weil der Flächenbezug oft nicht hergestellt werden kann und andere Faktoren (Durchforstung, natürliche Mortalität), die Einfluss auf das Einzelbaumwachstum nehmen, unbekannt sind. Auch in vielen Inventurverfahren werden die Gründe für eine veränderte Stammzahl auf dem Inventurpunkt nicht erhoben. Deshalb sind langfristige ertragskundliche Versuchsflächen so wertvoll, weil hier diese Einflussfaktoren erfasst werden und sich die Informationen über Einzelbäumen auf Bestandsebene aggregieren lassen.

Bayern und Niedersachsen verfügen in ihren Versuchsnetzen über langfristige Ertragsversuche mit der Baumart Eiche, sowohl im Rein- als auch im Mischbestand. Die Beobachtung und kontinuierliche, systematische Erfassung des Wachstums begann auf einigen dieser Flächen bereits Ende des 19. Jahrhunderts. Damit stehen langfristige Messreihen zur Verfügung, die geeignet sind, mögliche Änderungen der Wachstumsdynamik aufzudecken, die im Zusammenhang mit veränderten Wuchsbedingungen stehen.

Wir konzentrieren uns im vorliegenden Beitrag auf die langfristige Entwicklung der Produktivität von Eichenbeständen und gehen nicht auf einzelbaumbezogene Wachstumsdynamiken ein. Auch wenn gerade bei der Verwertung von Eiche Qualitätsmerkmale (z.B. Jahrringbreite) am Einzelbaum relevant sind, ist der Bestand zunächst die Ebene die über die Leistungsfähigkeit entscheidet und als forstliche Planungsgrundlage dient. In diesem Zusammenhang gehen wir den Fragen nach, i) ob sich in Eichen-

beständen der allgemeine Zuwachstrend über die vergangenen Jahrzehnte verändert hat, ii) ob gegebenenfalls die Standortbedingungen einen Einfluss auf mögliche Trendveränderungen haben und iii) ob mögliche Änderungen gleichermaßen für Eichenrein- und Mischbestände gelten.

## 2 Material und Methode

### 2.1 Langfristige Versuchsflächen

Die Untersuchung basiert auf Daten von langfristigen ertragskundlichen Versuchsflächen mit Eichenrein- und –mischbeständen aus Bayern und Niedersachsen. Insgesamt wurden die Daten von 43 Versuchen, die sich auf 117 einzelne Bestände verteilen, analysiert. Erste ertragskundliche Aufnahmen Ende des 19. Jahrhunderts und bis zu 23 Wiederholungsaufnahmen machten es möglich langfristige Wachstumstrends bis ins Jahr 2020 zu untersuchen. Die Größe der einzelnen Versuchsflächen variierte zwischen 0,02 und 1,0 ha. Die Versuchsflächen umfassen die beiden häufigsten heimischen Eichenarten, Traubeneiche (*Quercus petraea* (MATTUSCHKA) LIEBL.) und Stieleiche (*Quercus robur* L.).

Tabelle 1: Überblick über die in die Studie einbezogenen Versuchsflächen; N, Anzahl der Versuche; NS, Jahresniederschlagssumme in mm; TEMP, Jahresmitteltemperatur in °C; Bonität, Mittelhöhenbonität der Eiche in m; dargestellt sind die Mittelwerte, Minima und Maxima (kursiv in Klammer)

Table 1: Overview of experimental plots included in the study; N, number of trials; NS, annual precipitation sum in mm; TEMP, annual mean temperature in °C; site index, mean height at the age 100 of oak in m; shown are mean values, minima and maxima (italics in parentheses)

	N	Aufnahmezeit- raum	NS [mm] <i>(min-max)</i>	TEMP [°C] <i>(min-max)</i>	Höhe [m] ü. NN <i>(min-max)</i>	Bonität [m] <i>(min-max)</i>
Langfristige Versuchsflächen	43	1898-2020	772 <i>(570-1019)</i>	8,2 <i>(7,4-9,5)</i>	364 <i>(37-534)</i>	26,1 <i>(16,9-34,5)</i>

### 2.2 Produktivität

Für die Analyse wurden mit Hilfe der lehrstuhlinterne Auswertungssoftware die ertragskundlichen Kennwerte für die jeweiligen Versuchsflächen für jeden Aufnahmezeitpunkt berechnet. Die Bestandsproduktivität beschreibt den mittleren jährlichen periodischen Zuwachs (PAIV), der sich wie folgt errechnet.

$$PAIV = (V_2 - V_1 + V_a) / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

Dabei ist  $V_2$  der verbleibende Vorrat zum Zeitpunkt  $t_2$  und  $V_1$  der Ausgangsvorrat zum Zeitpunkt  $t_1$  am Beginn der Wachstumsperiode.  $V_a$  ist der im Messzeitraum ausgeschiedene/entnommene Vorrat.

### 2.3 Standort und Strukturvariablen

Im Zuge der Bestandsauswertungen wurden die Mittelhöhenbonitäten für die Baumart Eiche nach Jüttner (1955) ermittelt. Diese wurden in den Auswertungen stellvertretend zur Beschreibung der Standortbedingungen verwendet. Ebenso wie die ertragskundlichen Kennwerte wurden alle Strukturvariablen für jeden Aufnahmezeitpunkt berechnet. Als Bestandsdichtekennwert wurde der Stand Density Index (SDI) nach Reineke (1933) verwendet. Für die Mischbestände wurden die baumartenspezifischen SDI-Werte aufsummiert. Über Korrekturfaktoren wurden unterschiedliche baumartenspezifische Maximaldichten berücksichtigt (Pretzsch und Biber 2016).

$$SDI_i = \sum_1^j N_{ij} \times \left( \frac{25}{d_{gij}} \right)^{-1,605} \times E_j \quad (2)$$

Dabei charakterisiert  $SDI$  die Bestandsdichte,  $N$  die Stammzahl je Hektar,  $dg$  den Durchmesser des Grundflächenmittelstammes sowie  $E$  den Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der baumartenspezifischen Maximaldichten. Die Indizes  $i$  und  $j$  beziehen sich auf die Versuchsfläche ( $i$ ) bzw. die jeweilige Baumart ( $j$ ).

Die Beschreibung des Mischungsanteils der Eiche ( $Ei\_Ant$ ) der jeweiligen Bestände erfolgte mittels der baumartenspezifischen  $SDI$ -Werte je Hauptschicht und Versuchsfläche. Hierbei wurden jeweils alle Bäume mit einer Baumhöhe größer  $2/3$  der Bestandesoberhöhe berücksichtigt.

$$Ei\_Ant = \frac{SDI_{Eiche}}{SDI_{Gesamt}} \quad (3)$$

Für die Analysen wurden Bestände mit einem Eichenanteil von mind. 90% in der Hauptschicht als Reinbestände und Bestände mit entsprechend geringeren Anteilen als Mischbestände betrachtet. Die Mischbaumarten in den Mischbeständen umfassten Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Hainbuche (*Carpinus betulus* L.).

Tabelle 2: Ertragskundliche Bestandsdaten der untersuchten Versuchsflächen; PAIV, periodischer Bestandszuwachs in  $m^3/ha/Jahr$ ; SDI, Bestandsdichte; Bonität, Mittelhöhenbonität der Eiche in  $m$ ;  $n$ , Anzahl; Mittel, Mittelwert; Min, Minimalwert; Max, Maximalwert; SD, Standardabweichung

Table 2: growth and yield stand data of the investigated experimental plots; PAIV, periodic annual increment in  $m^3/ha/year$ ; SDI, stand density index; site index, mean height at the age 100 of oak in  $m$ ;  $n$ , number of observations; Mittel, mean value; Min, minimum; Max, maximum; SD, standard deviation

		PAIV	Vorrat	Alter	SDI	Ei-Anteil	Bonität
		[ $m^3/ha/Jahr$ ]	[ $m^3/ha$ ]	[Jahre]	[n Bäume/ha]	[%]	[m]
Reinbestand (n=394)	Mittel	8.83	267.86	100	191	99.0	24.50
	Min	2.92	42.03	26	75	90.0	16.91
	Max	20.91	729.62	234	399	100.0	32.17
	SD	3.66	130.43	46	69	2.0	3.67
Mischbestand (n=334)	Mittel	11.05	410.44	122	243	69.1	27.09
	Min	2.90	73.66	37	31	7.1	20.26
	Max	26.90	1139.87	371	549	89.9	34.53
	SD	3.35	170.57	54	79	17.6	2.88

## 2.4 Modellansatz

Für die statistischen Analysen wurde ein lineares gemischtes Modell angepasst, um die durch Wiederholungsaufnahmen bedingte, zeitliche Autokorrelation aufeinanderfolgender Erhebungen berücksichtigen zu können. Weiterhin erlaubte diese Vorgehensweise die Separation räumlicher Abhängigkeiten aufgrund einer geklumpten Verteilung von einzelnen Parzellen eines Versuchs (vgl. Zuur et al. 2009). Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden folgende Modelle entwickelt.

Als Basismodell zur grundsätzlichen Beschreibung eines langfristigen zeitlichen Trends (Forschungsfrage 1, Modell 1) diente die Gleichung:

$$\log(PAIV_{ijk}) = a_0 + a_1 * \log(Vol_{ijk}) + a_2 * Alter_{ijk} + a_3 * \log(Dichte_{ijk}) + a_4 * Kalenderjahr_{ijk} + b_i + b_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (4)$$

Für die Beurteilung der Standortsabhängigkeit des langfristigen Trends wurde das Basismodell um die Variable Bonität erweitert (Forschungsfrage 2, Modell 2):

$$\log(PAIV_{ijk}) = a_0 + a_1 * \log(Vol_{ijk}) + a_2 * Alter_{ijk} + a_3 * \log(Dichte_{ijk}) + a_4 * Bonität_{ij} + a_5 * Kalenderjahr_{ijk} + a_6 * Bonität_{ij} * Kalenderjahr_{ijk} + b_i + b_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (5)$$

Letztlich wurde das Basismodell für die Aufdeckung möglicher Unterschiede in der Trendveränderung zwischen Rein- und Mischbeständen um den Faktor Mischung (rein/misch) ergänzt (Forschungsfrage 3, Modell 3).

$$\log(PAIV_{ijk}) = a_0 + a_1 * \log(Vol_{ijk}) + a_2 * Alter_{ijk} + a_3 * \log(Dichte_{ijk}) + a_4 * Mischung_{ijk} + a_5 * Kalenderjahr_{ijk} + a_6 * Mischung_{ijk} * Kalenderjahr_{ijk} + b_i + b_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (6)$$

Dabei sind  $a_0$  bis  $a_6$  die geschätzten Koeffizienten des Modells. Die abhängige Variable  $PAIV$  ist der mittlere periodische jährliche Bestandszuwachs ( $m^3/ha$  Jahr). Als Erklärungsvariablen wurden der Bestandsvorrat  $Vol$  ( $m^3/ha$ ), das Bestandsalter  $Alter$  (Jahre), die Bestandesdichte ( $SDI$ ,  $n/ha$ ), die faktorielle Variable  $Mischung$  (rein/misch) und die Mittelhöhenbonität der Eiche  $Bonität$  ( $m$ ) im Modell verwendet. Zur Erklärung des langfristigen Trends wurde das Kalenderjahr der jeweiligen Aufnahme einzeln sowie in Wechselwirkung mit der Mischung und Bonität betrachtet. Die Indizes  $i$ ,  $j$  und  $k$  stehen dabei für den Versuch, die Parzelle und den Aufnahmezeitpunkt. Die Zufallseffekte  $b_i$  und  $b_{ij}$  wurden genestet auf Versuchsfläche und Parzelle innerhalb des Versuchs gelegt, um räumliche Autokorrelation aufgrund geklumpfter Daten zu berücksichtigen.  $\varepsilon_{ijk}$  quantifiziert die Reststreuung der Residuen.

### 3 Ergebnisse

#### Trendverschiebung

Die untersuchten Eichenbestände zeigten eine Produktivitätszunahme in den letzten 100 Jahren. Leistete ein 100-jähriger Bestand im Jahr 1920 bei einem Bestandesvorrat von  $400 m^3$  pro ha noch  $7,5 m^3/ha$  und Jahr, so liegt der Bestandeszuwachs im Jahr 2020 bei  $11,5 m^3/ha$  und Jahr. Dies entspricht einer Produktivitätssteigerung von 50% gegenüber dem Jahr 1920 (Abb. 1, links). Werden die Zuwächse über das Bestandesalter aufgetragen, zeigt sich, dass sich die grundsätzliche Beziehung zwischen Produktivität und Alter nicht geändert hat (Abb. 1, rechts). Nach Kulmination (nicht abgebildet) lässt die Produktivität mit zunehmenden Alter kontinuierlich ab. Jedoch liegt die Beziehung heute auf höherem Niveau als in der Vergangenheit.

Die Schätzparameter und das zugehörige Signifikanzniveau können Tabelle 3 (Modell 1) entnommen werden.

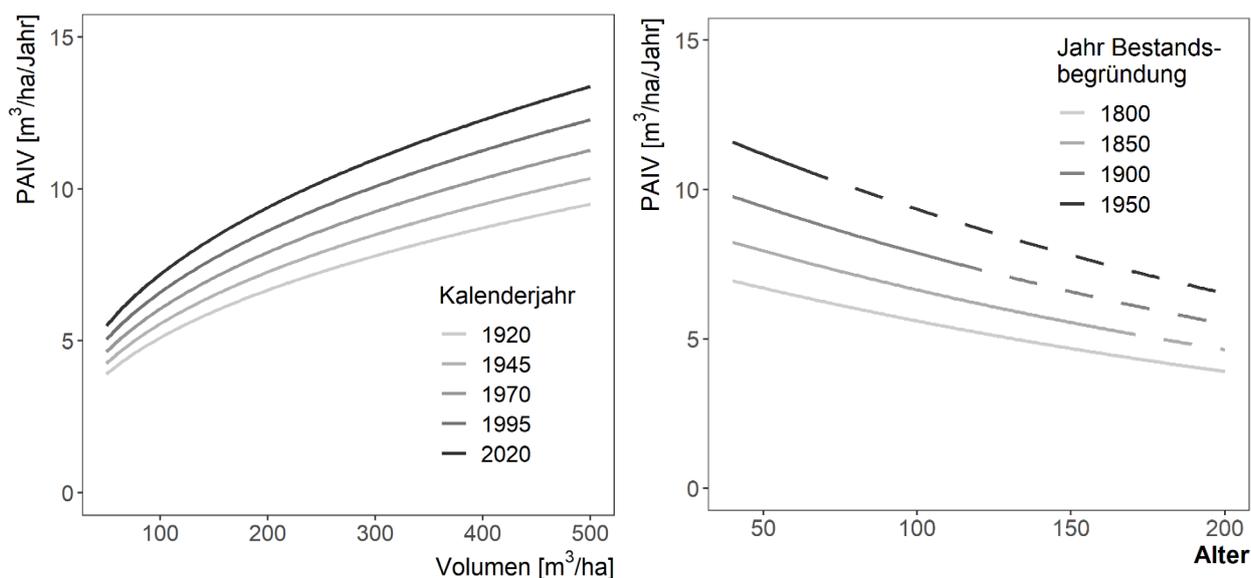


Abbildung 1: Verlagerung der Bestandsdichte-Produktivitäts-Beziehung im Alter 100 von 1920 bis 2020 (links) bzw. der Alters-Produktivitäts-Beziehung von 1800 bis 1950 (rechts)

Figure 1: Modification of the density-growth relationship from 1920 to 2020 at the age of 100 (left) and of the age-growth relationship from 1800 to 1950 (right).

Tabelle 3: Schätzparameter (Est) mit Standardfehler (SE) und Signifikanzniveau (p) für die Modelle 1-3, sowie die Zufallseffekte (V, Versuch; P, Parzelle). N p = Anzahl Parzellen, N V = Anzahl Versuche, AIC = Informationskriterium nach Akaike

Table 3: Estimates (Est) and standard error (SE) and significance level (p) for the models 1-3, random effects (Zufallseffekte) (V, trial; P, plot). N p = number of plots, N V = number of trials, AIC = Akaike information criterion)

Feste Effekte	Modell 1 (Formel 4)			Modell 2 (Formel 5)			Modell 3 (Formel 6)		
	Est	SE	p	Est	SE	p	Est	SE	p
(Konstante)	-7.966	1.06	<0.001	-16.526	5.17	0.001	-7.403	1.56	<0.001
Alter	-0.004	0.00	<0.001	-0.003	0.00	<0.001	-0.004	0.00	<0.001
Jahr	0.003	0.00	<0.001	0.007	0.00	0.005	0.003	0.00	<0.001
log(SDI)	0.309	0.04	<0.001	0.346	0.04	<0.001	0.285	0.04	<0.001
log(Vorrat)	0.386	0.03	<0.001	0.339	0.03	<0.001	0.382	0.03	<0.001
Bonität	--	--	--	0.429	0.20	0.033	--	--	--
Bonität x Jahr	--	--	--	0.000	0.00	0.047	--	--	--
Reinbestand	--	--	--	--	--	--	-0.217	1.696	0.898
Reinbestand x Jahr	--	--	--	--	--	--	0.000	0.001	0.933
<b>Zufallseffekte</b>									
$\sigma^2$		0.07			0.06			0.07	
$\tau_{00 P:V}$		0.00			0.00			0.00	
$\tau_{00 V}$		0.02			0.02			0.02	
N P:V					89				
N V					43				
Messungen					728				
AIC		212.5			212.7			228.7	

### Standortsabhängigkeit der Trendverschiebung

Die gefundene Intensität der Produktivitätsveränderung zeigte eine Abhängigkeit von der Standortsgüte. Auf schwächer versorgten Standorten, hier indiziert an der Mittelhöhe von 18 m im Alter 100 (Abb. 2, links) war die Produktivitätssteigerung über die letzten 100 Jahre wesentlich stärker ausgeprägt, als auf gut versorgten Standorten (Abb. 2, rechts). Während sie auf ersteren bei einer Bestandsdichte von  $400 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  etwa 45% ausmacht sind es im Falle gut versorgter Standorte lediglich 9,5%. Auch wenn Modell 2, gemessen am AIC keine Verbesserung der Modellgüte erbringt, so war der Effekt des Standortes auf die Produktivitätsveränderung signifikant (siehe Tab. 3, Modell 2).

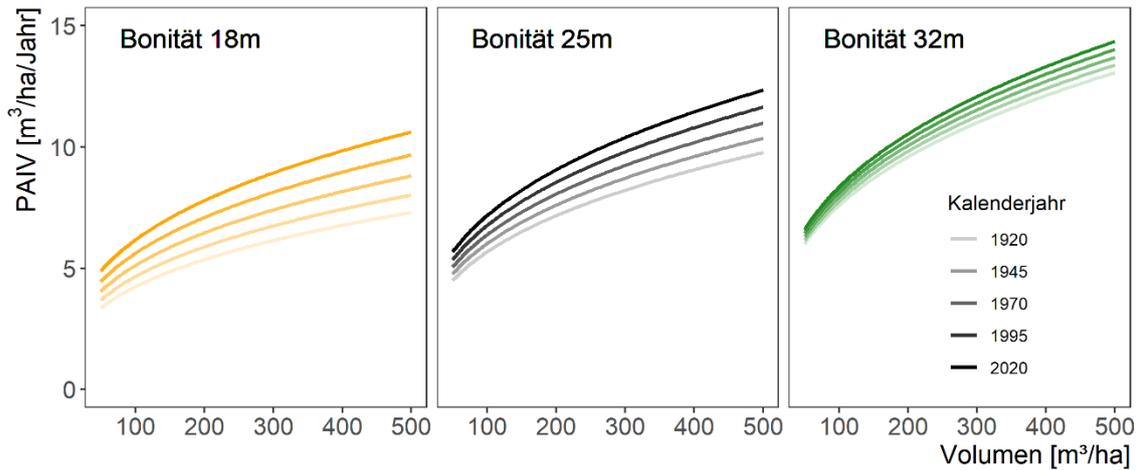


Abbildung 2: Verlagerung der Volumen-Produktivitäts-Beziehung für schwache (links), mittlere (Mitte) und gute (rechts) Standorte  
 Figure 2: Modification of the volume-growth-relationship for poor (left), medium (centre) and good (right) sites.

### Trendverschiebung in Rein- und Mischbeständen

Grundsätzlich zeigten die hier untersuchten Mischbestände eine höhere Produktivität als die Eichenreinbestände, was vermutlich, auch wenn hier nicht explizit untersucht, auf die im Wesentlichen beigemischten Schattlaubholzarten Buche und Hainbuche zurückzuführen ist. Dieser Unterschied war jedoch nicht signifikant (siehe Tabelle 3, Modell 3 und Abb. 3). Allerdings betrifft die positive Produktivitätsveränderung Rein- und Mischbestände gleichermaßen. In Abbildung 3 ist die Veränderung von 1960 bis 2020 dargestellt.

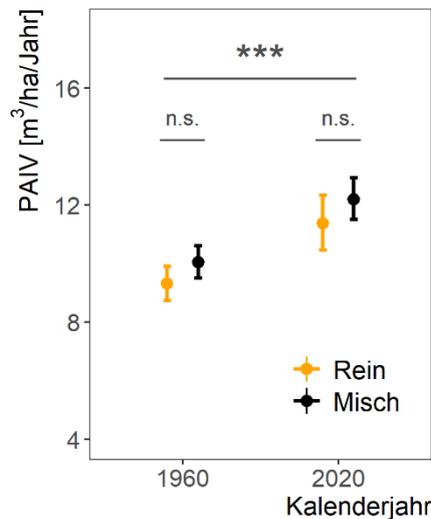


Abbildung 3: Vergleich der Produktivitätsveränderung zwischen Eichenrein- (orange) und -mischbeständen (schwarz) für den Zeitraum von 1960 bis 2020. n.s = nicht signifikant, \*\*\* = höchst signifikant  
 Figure 3: Comparison between the change of productivity between mono-specific oak stands (orange) and mixed oak stands (black) for the period from 1960 to 2020, n.s = non significant, \*\*\* = most significant

## 4 Diskussion und Schlussfolgerung

Auf Basis der bei hiesiger Untersuchung eingeflossenen Daten von langfristigen Versuchsflächen konnte für Eichen(misch)bestände eine veränderte Wuchsdynamik gegenüber früheren Jahrzehnten festgestellt werden. Die Richtung und Größenordnung der Trendänderung ähneln denen, die auch schon Pretzsch et al. (2014a; 2014b; 2019) für die Eiche und weitere Baumarten empirisch nachweisen konnte. Während das Produktivitätsniveau vor 1960 in etwa dem der Ertragstafel (I. Bonität, mäßige

Durchforstung) von Schober (1975) entsprach, liegt es jetzt um 18% höher. Pretzsch et al. (2014b) wiesen zudem auf eine erhöhte Standortkapazität hin, so dass heutzutage auf gleichem Standort unbehandelte Beständen eine höhere maximale Dichte erreichen können als früher. Dass sich der grundsätzliche Alterstrend der Produktivität trotz Produktivitätsveränderung nicht verändert hat hoben ebenfalls Pretzsch et al. (2014a) bereits hervor.

Die Intensität der Wachstumsveränderung hängt dabei von der grundsätzlichen Ressourcenausstattung des Standorts ab. Je ungünstiger die Standortverhältnisse sind, desto stärker hat sich die Dichte-Zuwachsbeziehung positiv verändert. Dies scheint plausibel, denn je besser die Versorgung mit bodengebundenen Ressourcen ist, desto stärker verschiebt sich das Konkurrenzgeschehen zwischen den Bäumen zu einem Wettbewerb um Licht. Eine zusätzliche Verbesserung der Ressourcenversorgung auf ohnehin schon gut versorgten Standorten kann aufgrund der Lichtlimitierung kaum in verstärktes Wachstum umgesetzt werden (Mitscherlich-Gesetz).

Die hier untersuchten Eichenrein- und -mischbestände zeigen eine vergleichbare, positive Trendverschiebung. Jedoch wurde nicht analysiert, ob sich unterschiedliche Baumartenmischungen in ihrer Trendänderung unterscheiden. Nach Pretzsch et al (2014a) scheinen Baumarten unterschiedlich stark auf die Veränderung der Wuchsbedingungen zu reagieren. Ob diese Relationen in Mischbeständen gleich bleiben oder ob die Eiche bzw. die jeweilige Mischbaumart in Mischbeständen stärker oder schwächer profitiert hat, muss weiter analysiert werden. Dies ist insofern relevant, weil die Eiche aufgrund ihrer Lichtbedürftigkeit (Leuschner und Ellenberg, 2017) vielen schattentoleranteren Baumarten konkurrenzbedingt unterlegen ist. Dies gilt insbesondere bei der Verjüngung der Eiche (s. Stimm et al. 2021c) aber auch im Höhenzuwachsverhalten (Stimm et al., 2021a). Eine Verschiebung der Trendrelation zu Ungunsten der Eiche würde eine künftige waldbauliche Beteiligung der Eiche erschweren. Umgekehrt stärkt eine Trendverschiebung zu Gunsten der Eiche ihre Konkurrenzfähigkeit. Gerade für trockene Standorte oder in Regionen mit zunehmender Frequenz episodischer Dürreereignisse, wo aufgrund ihrer relativ hohen Trockenheitstoleranz verstärkt auf die Eiche gesetzt wird, wäre dies von Vorteil.

Die hier berichtete Wuchsverbesserung der Eiche beruht auf Ergebnissen langfristiger Versuchsflächen, die weitgehend unbeeinträchtigt von Störfaktoren (z.B. Insektenfraß) waren. Sie zeigen damit eine allgemeine Tendenz auf. Regional können, eben solche Schadereignisse (s. Hahn et al. 2021) Zuwachsreduktionen hervorrufen und ggf. auch zu Absterbeprozessen führen. Zudem hat in den letzten Jahren die Frequenz und Intensität von Dürreereignissen zugenommen, deren Effekt sich im langfristigen Trend gegebenenfalls noch nicht abzeichnet. Auch wenn die Eiche im Vergleich zu anderen Baumarten als Trockenheitstolerant eingestuft wird, sind Produktivitätseinbußen aufgrund wiederholter Trockenheit in diesem Zusammenhang nicht auszuschließen.

Dennoch ist die festgestellte höhere Produktivität ökologisch und waldbaulich relevant. So ist eine höhere Produktivität bei gleichem Bestandsalter gleichbedeutend mit einer höheren Kohlenstoffbindung. Auch wenn aufgrund breiterer Jahrringe die Holzdichte insgesamt geringer sein kann (Pretzsch et al. 2018), so bleibt ein positiver Nettoeffekt der Produktivitätssteigerung auf die Festlegung der Kohlenstoffmenge im Holz und dem damit verbundenen Mitigationseffekts von Eichenwäldern.

Dort wo die Eiche in traditionellen Bewirtschaftungskonzepten mit langen Umtriebszeiten bewirtschaftet wird (Fleder 1983; Mosandl und Abt 2016) ist die Zuwachsbeschleunigung von besonderer Bedeutung. Durch das aktuell schnellere Wachstum ist zu erwarten, dass auch die einzelnen Eichen ihre Zielstärke 50 bis 70 Jahre früher erreichen, was eine deutliche Reduktion der langen Umtriebszeiten möglich macht. Hinzu kommt, dass durch frühe und konsequente Förderung der Eiche ebenfalls eine frühere Erreichung der gewünschten Zielstärken weiter beschleunigt (Stimm et al. 2021b). Gerade vor

dem Hintergrund zunehmender Unsicherheiten im Klimawandel kann durch angepasste Bewirtschaftungskonzepte mit kürzeren Produktionszeiten auch das Ausfallrisiko effektiv gesenkt werden (Friedrich und Knoke 2020).

Die Anwendung klassischer Durchforstungsregime in Eichenbeständen, die sich an Stammzahlreduktionsvorgaben der herkömmlichen Ertragstafeln orientieren, bergen die Gefahr von flächenbezogenen Zuwachsverlusten. Da aufgrund der Erhöhung der Standortskapazität eine höhere Stammzahl- bzw. Volumenhaltung bei gleichem Mitteldurchmesser möglich ist, kann die Orientierung an Ertragstafeln zu überstarken Dichteabsenkungen führen.

Auch sind die in den Ertragstafeln hinterlegten, altersbezogenen Bestandeszuwachswerte nicht mehr der Realität entsprechend. Für die forstliche Planung schlägt Pretzsch (2016) artspezifische Korrekturfaktoren für die Ertragstafelwerte vor, im Falle der Eiche einen Faktor von 1,1.

Des Weiteren stellt sich die Frage inwieweit das Wertholzziel mit schmalen Jahrringen bis 2 mm unter den aktuellen Voraussetzungen, zumindest auf mittleren bis guten Standorten noch möglich ist oder ob man verstärkt standortsdifferenzierte Produktionsziele andenken sollte.

### Förderung und Dank

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen des vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) geförderten Forschungsprojekts „W045 – Entwicklungspotenzial der Eiche in bewirtschafteten und unbewirtschafteten Beständen“ durchgeführt. Dank gilt der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), die für die Auswertung Daten ihrer Eichenversuchsfelder zur Verfügung gestellt hat.

### Literatur

- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2018): Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. 3. Korrigierte Auflage, Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG, Frankfurt am Main, 54 S.
- Fang, J., Kato, T., Guo, Z., Yang, Y., Hu, H., Shen, H., Zhao, X., Kishimoto-Mo, A., Tang, Y., und Houghton, R. (2014): Evidence for environmentally enhanced forest growth. *PNAS* 111/26: 9527-9532
- Fleder, W. (1983): Vom unterfränkischen Verjüngungsbetrieb. In: *Allgemeine Forstzeitschrift* 38, S. 1013–1014.
- Friedrich, S.; Knoke, T. (2020): Risiken mindern durch Mischung. Welche Baumartenmischung erfüllt die Bedürfnisse zukünftiger Generationen? In: *LWF Aktuell* (2), S. 18–21.
- Hahn, A.; Bischof, J.; Lobinger, G.; Müller-Kroehling, S.; Straßer, L.; Huber, S. et al. (2021): Die Pflanzenschutzmitteleinsätze gegen den Schwammspinner in Franken in den Jahren 2018 bis 2020 - Monitoring, Befallsprognose, Entscheidungsfindung und Diskussion. In: Kilian Stimm (Hg.): *Die Eiche. Facetten zu Ökologie, Naturschutz, Wachstum und waldbauliche Perspektiven*. Forstliche Forschungsberichte München, Bd. 221. Freising (221), S. 260–289.
- Jüttner, O. (1955): Eichenertragstafeln. In: Schober (ed) (1975): *Ertragstafeln wichtiger Baumarten*. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, S. 12-19.
- Kauppi, PE., Posch, M., Pirinen, P. (2014): Large Impacts of Climatic Warming on Growth of Boreal Forests since 1960. *PLoS ONE* 9(11): e111340.
- Leuschner, C.; Ellenberg (2017): *H. Ecology of Central European Forests: Vegetation Ecology of Central Europe*; Springer: New York, NY, USA; Volume 1.
- Mosandl, R.; Abt, A. (2016): Waldbauverfahren in Eichenwäldern gestern und heute. In: *AFZ - Der Wald* (20), S. 28–32, zuletzt geprüft am 05.12.2017.
- Müller, J.; Gossner, M. M. (2021): Der Artenreichtum an Eichen in Mitteleuropa – ein Mini-Review. In: Kilian Stimm (Hg.): *Die Eiche. Facetten zu Ökologie, Naturschutz, Wachstum und waldbauliche Perspektiven*. Forstliche Forschungsberichte München, Bd. 221. Freising (221), S. 202–216.
- Pretzsch, H. (2016): Ertragstafel-Korrekturfaktoren für Umwelt- und Mischungseffekte. *AFZ-Der Wald* 187(14):47-50.

- Pretzsch, H., Schütze, G., Uhl, E. (2012): Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biology* 15(3):483-495.
- Pretzsch, H., Biber, P. (2016): Tree species mixing can increase maximum stand density. *Can. Journal of Forest Research* 46:1179-1193.
- Pretzsch, H., Biber, P., Schütze, G., Kemmerer, J., Uhl, E. (2018): Wood density reduced while wood volume growth accelerated in Central European forests since 1870. *Forest Ecology and Management* 429:589-616. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.045> [PDF]
- Pretzsch, H.; Biber, P.; Schütze, G.; Bielak, K. (2014a): Changes of forest stand dynamics in Europe. Facts from long-term observational plots and their relevance for forest ecology and management. In: *Forest Ecology and Management* 316, S. 65–77. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.07.050.
- Pretzsch, H.; Biber, P.; Schütze, G.; Uhl, E.; Rötzer, T. (2014b): Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. In: *Nature communications* 5, S. 4967. DOI: 10.1038/ncomms5967.
- Pretzsch, H.; del Río, M.; Biber, P.; Arcangeli, C.; Bielak, K.; Brang, P. et al. (2019): Maintenance of long-term experiments for unique insights into forest growth dynamics and trends: review and perspectives. In: *Eur J Forest Res* 138 (1), S. 165–185. DOI: 10.1007/s10342-018-1151-y.
- Reineke, L.H. (1933): Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research* 46:627-638
- Schober, R. (1975): Ertragstabellen wichtiger Baumarten. J.D. Sauerländer's Verlage, Frankfurt am Main, 154 S.
- Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M., Skovsgaard, J.P., 1996. Growth trends in European forests. Springer-Verlag, Heidelberg, p. 372
- Stimm, K., Heym, M., Uhl, E., Tretter, S., Pretzsch, H. (2021a): Height growth-related competitiveness of oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.) under climate change in Central Europe. Is silvicultural assistance still required in mixed-species stands? *Forest Ecology and Management*, Vol. 482, 118780, ISSN 0378-1127.
- Stimm, K.; Heym, M.; Uhl, E.; Nagel, R.-V.; Pretzsch, H. (2021b): Zur Produktivität von Eichen in Rein- und Mischbeständen in Abhängigkeit von Bestandsstruktur und Standort – vom Bestand zum Einzelbaum. In: Kilian Stimm (Hg.): Die Eiche. Facetten zu Ökologie, Naturschutz, Wachstum und waldbauliche Perspektiven. Forstliche Forschungsberichte München, Bd. 221. Freising (221), S. 126–142.
- Stimm, K.; Uhl, E.; Pretzsch, H. (2021c): Zur langfristigen Verjüngungsdynamik der Eichen (*Quercus petraea* MATT. Liebl und *Quercus robur* L.) in Kieferrein- und Eichenmischbeständen – Struktur, Wachstum, waldbauliche Behandlung. In: Kilian Stimm (Hg.): Die Eiche. Facetten zu Ökologie, Naturschutz, Wachstum und waldbauliche Perspektiven. Forstliche Forschungsberichte München, Bd. 221. Freising (221), S. 162–182.
- Zuur, A. F.; Ieno, E. N.; Walker, N.; Saveliev, A. A.; Smith, G. M. (Hg.) (2009): Mixed effects models and extensions in ecology with R. New York: Springer (Statistics for Biology and Health).