
Betriebswirtschaftliche Chancen und Risiken der Fichtenwirtschaft im Klimawandel

Thomas Knoke

Schlüsselwörter: Fichte, Klimawandel, Alternativbaumarten, Baumartenportfolios

Zusammenfassung: Die Forstwirtschaft in Bayern lebt mehr denn je von der Fichte. Von keiner anderen Baumart wird so viel Holz eingeschlagen (mehr als $\frac{2}{3}$ des Holzaufkommens aus den bayerischen Wäldern). Gleichzeitig führt aber der Waldumbau zu einer merklichen Reduktion der mit Fichte bestockten Flächen. Begründet wird dieses Vorgehen unter anderem mit den klimabedingten Unsicherheiten. Der Beitrag demonstriert in diesem Zusammenhang, wie sich die Wirtschaftlichkeitsverhältnisse in Fichten- und Fichten-Buchen-Mischbeständen im Zuge des Klimawandels verändern könnten. Darüber hinaus wird beispielhaft dargestellt, wie heute existierende Fichtenflächen teilweise durch alternative, wirtschaftlich leistungskräftige Baumarten, wie Douglasie und Tanne, ersetzt werden können, ohne dabei zu sehr auf eine Baumart zu fokussieren. Die Betrachtungen auf der Bestandesebene zeigen, dass selbst unter drastischen Veränderungen die von Fichten dominierten Bestände betriebswirtschaftlich besser abschneiden als von Buchen dominierte Bestände. Für das gewählte Beispiel des bayerischen Tertiären Hügellandes, wo heute die Fichte auf großer Fläche vorherrscht, zeigt eine betriebliche Betrachtung eine wirtschaftlich optimale Baumartenmischung aus 16 % Laubholz, 42 % Fichte, 25 % Douglasie und 17 % Tanne. Hierdurch kann der wirtschaftliche Ertrag deutlich gesteigert werden, ohne das wirtschaftliche Risiko unverantwortlich zu erhöhen.

Die Fichte ist nicht nur Baum des Jahres 2017, sondern sie bildet auch das Rückgrat der Forstwirtschaft in Bayern. Laut Bundeswaldinventur hat die Fichte jedoch allein in Bayern von 2002 bis 2012 um 64.000 ha an Fläche und um 7 % an Holzvorrat abgenommen (BWI 2014). Dies ist sicher nur zum Teil bzw. nur indirekt eine Auswirkung des Klimawandels. Vielmehr wird in diesen Zahlen ein bedeutsamer aktiver Umbau der bayerischen Wälder deutlich. Es bleibt jedoch die Frage offen, ob der nachwachsende Wald aus betriebswirtschaftlicher Sicht ähnlich erfolgreich sein kann, wie der leider oft ungerechtfertigt negativ bewertete

Fichtenwald. Immerhin repräsentiert die Fichte ein jährliches Holzaufkommen in Höhe von 15,4 Millionen Efm (Efm = Erntefestmeter) und nimmt damit rund 70 % des Holzangebots aus den bayerischen Wäldern ein. Bezogen auf den finanziellen Umsatz liegt ihr Anteil (gutachtliche Schätzung der Holzpreise durch den Autor) sogar bei rund 76 %. Diese starke Fokussierung der bayerischen Forstwirtschaft auf die Fichte macht diesen Sektor allerdings auch »verwundbar«. Die Prognosen für die Verbreitung und Anbaueignung der Fichte im Klimawandel fallen sehr ungünstig aus (Kölling et al. 2009). Der durch den Klimawandel gerechtfertigte Rückgang der Fichte könnte zu bedeutsamen ökonomischen Ertragsrückgängen in Deutschland und ganz Europa führen. Allein für Baden-Württemberg wurde aufgrund des prognostizierten Rückgangs der Fichte eine Verminderung der Bodenertragswerte um 0,69 bis 3,10 Milliarden Euro abgeschätzt (Hanewinkel et al. 2010).

In einer Initiative des Zentrums Wald-Forst-Holz Weihenstephan wurde diese Problematik bereits vor einiger Zeit sorgfältig aufgearbeitet (Biermayer 2009). Auch über die ökonomische Zukunft der Fichte wurde in diesem Zusammenhang schon kurz berichtet (Knoke 2009). Damals wurden vor allem die Mischbestands-Option sowie der Waldbau mit ungleichaltrigen Beständen beleuchtet. Seither sind neue Erkenntnisse über die durch den Klimawandel bedingten Verschiebungen von Überlebenswahrscheinlichkeiten der Fichte im Rein- und Mischbestand hinzugekommen. Zudem haben sich die Möglichkeiten der betriebswirtschaftlichen Modellierung weiter verbessert. Daher sollen die betriebswirtschaftlichen Chancen und Risiken der bayerischen Fichtenwirtschaft bei einem geänderten Klima anhand von neuen Beispielen diskutiert werden.

Mit dem vorliegenden Artikel sollen zwei Strategien beispielhaft im Hinblick auf betriebswirtschaftliche Gesichtspunkte beleuchtet werden, beide unter Beachtung von vom Nadelholz geprägten Bestandestypen:

- Der Umbau von Fichtenreinbeständen in Mischbestände. Auf vielen Flächen in Bayern läuft die Fichte mit dichter Naturverjüngung auf. Es bietet selbstverständlich betriebswirtschaftliche Vorteile, diese

Naturverjüngung zu übernehmen. Die betriebswirtschaftlichen Chancen, die in der Übernahme von Naturverjüngung zu sehen sind, haben beispielsweise Heidingsfelder und Knoke (2004) sowie Knoke et al. (2016a) erläutert. Mithilfe eines rechtzeitigen Voranbaus (bzw. einer natürlichen Vorausverjüngung) von Schattbaumarten wie Buche oder Tanne könnten Mischbestände erzielt werden, die besser an ein geändertes Klima angepasst sind.

- Der teilweise Ersatz der Fichte durch andere Alternativen, z.B. durch ertragskräftige Baumarten wie die Douglasie. Es ist in dem Zusammenhang sehr interessant zu untersuchen, wie ein diversifiziertes Portfolio mit viel Nadelholz aussieht und was es betriebswirtschaftlich leisten könnte.

Mögliche Verschiebung der wirtschaftlichen Verhältnisse im Klimawandel

Nachdem sich in einem konzeptionell ausgerichteten Artikel die Überlebenswahrscheinlichkeit der Baumarten in Rein- und Mischbeständen als sehr wichtige Einflussgröße für betriebswirtschaftliche Kennzahlen gezeigt hat (Knoke und Seifert 2008), wurden Forschungsarbeiten zur Modellierung dieser Variablen eingeleitet. Basierend auf den Daten der Waldzustandserhebung in Rheinland-Pfalz konnten Griess et al. (2012) deutliche Stabilisierungseffekte in Mischbeständen nachweisen, von denen vor allem die Fichte profitiert. Aufgrund dieses positiven Mischbestands-effektes können bei geringfügiger Beimischung von Buche (Flächenanteil in einer Größenordnung von circa 10%) sogar etwas höhere wirtschaftliche Erfolge (gemessen am Kapitalwert) als in einem Fichtenreinbestand erzielt werden – und dies bei geringerem Risiko (Griess und Knoke 2013). Bei sehr langfristiger Betrachtung ergibt sich eine gleich hohe Wirtschaftlichkeit für den Fichten-Reinbestand und den Bestand mit geringer Buchen-Beimischung (gemessen am Bodenertragswert¹). Die Beimischung der Buche in einer Größenordnung von 50% bedeutet erheblich niedrigere Deckungsbeitragsäquivalente, aber auch ein sehr viel niedrigeres Risiko.

Die geschilderten Ergebnisse haben jedoch nur eingeschränkte Gültigkeit für die Zukunft, da keine Verschiebungen der Höhe der Überlebenswahrscheinlichkeit der Baumarten berücksichtigt wurden. Solche Ver-

schiebungen werden im Zuge des Klimawandels erwartet. Neuner et al. (2015) konnten einen umfangreichen Datensatz aus Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz verwenden, um die Überlebenszeiten der Fichte in Rein- und Mischbeständen anhand von Daten der Waldzustandserhebung zu analysieren. Im Zuge dieser Analyse wurden auch Klimavariablen berücksichtigt. Dabei zeigte sich, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit der Fichte in einem wärmeren und trockeneren Klima durch Beimischung von Laubholz auf einem deutlich höheren Niveau gehalten werden kann, als in einem Fichten-Reinbestand. Allerdings liegen die resultierenden Kurven zur Überlebenswahrscheinlichkeit generell auf einem erstaunlich hohen Niveau, unabhängig davon, welches Klima unterstellt wird. Hier müssen noch methodische Probleme gelöst werden, denen in dem derzeit laufenden Forschungsprojekt SURVIVAL-KW² nachgegangen wird. Ein Beispiel für solch ein Problem ist die Tatsache, dass beispielsweise in Bayern das Mindestalter der im Rahmen der Waldzustandserhebung untersuchten Bäume 60 Jahre beträgt. Dies führt zwangsläufig zu einem zu hohen Verlauf der Überlebenskurven, da ja durch das Ausklammern der Zeit bis zum Alter 60 fälschlicherweise ein sicheres Erreichen dieses Zeitpunktes unterstellt wird.

Aufgrund solcher Einschränkungen ist der bisher mit statistischen Methoden darstellbare Einfluss des Klimawandels auf die betriebswirtschaftlichen Kennzahlen von Fichten-Buchen-Bestandestypen verhältnismäßig unspektakulär (Abbildung 1).

Zwar zeigen die in Abbildung 1 dargestellten Untersuchungen von Neuner und Knoke (2017) einen merklichen Effekt des zukünftig als wärmer und trockener unterstellten Klimas. Die Deckungsbeitragsäquivalente sinken und die als Maß für das Risiko verwendeten Standardabweichungen steigen an. Diese Veränderungen werden in den beiden Mischbestandstypen abgepuffert. Allerdings sind die Auswirkungen des Klimawandels in diesem Beispiel insgesamt vernachlässigbar gering.

In einem weiteren hypothetischen Szenario mit stark reduziertem Zuwachs der Fichte (–40%) und leicht erhöhtem Zuwachs der Buche (+10%) zeigten sich drastische Absenkungen der Deckungsbeitragsäquivalente in allen Bestandestypen mit Fichtenbeteiligung. Die Rückgänge lagen in einer Größenordnung

¹Das ist die Summe der Barwerte aller zukünftig unterstellten Deckungsbeiträge. Bei dieser Betrachtung wird somit ein unendlicher Betrachtungshorizont unterstellt.

²Finanziert durch den Waldklimafonds, für mehr Information siehe <http://waldinventur.wzw.tum.de/index.php?id=161&L=0>

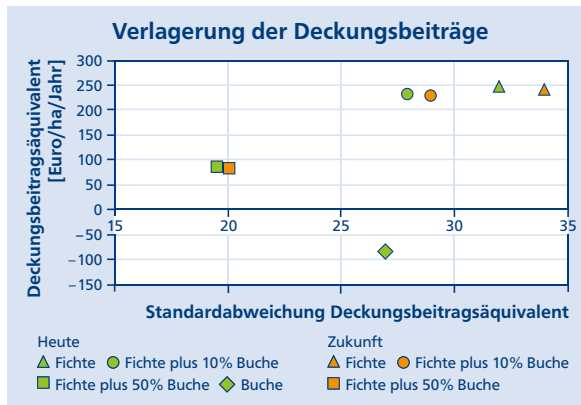


Abbildung 1: Mögliche Verlagerung der Deckungsbeiträge und ihrer Standardabweichungen in Rein- und Mischbeständen (Daten aus Neuner und Knoke 2017). Mit Deckungsbeitragsäquivalent wird die Annuität des jeweiligen Kapitalwertes (Kalkulationszinssatz 2 %) bezeichnet. Bei allen Modell-Beständen wurde künstliche Begründung unterstellt und die Prozentanteile sind Flächenanteile.

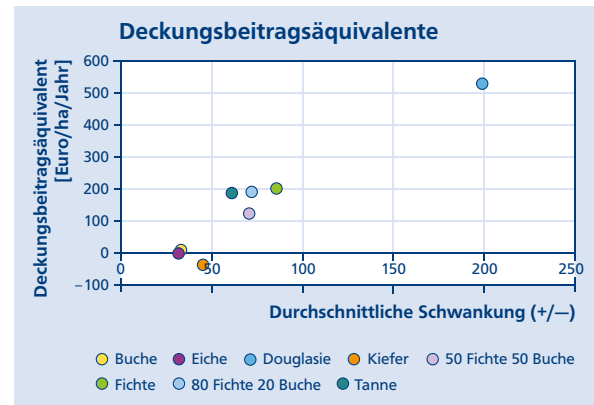


Abbildung 2: Deckungsbeitragsäquivalente (hier Annuitäten bei einem Kalkulationszinssatz in Höhe von 1,5 %) für verschiedene Bestandestypen und durchschnittliche standörtliche Verhältnisse im Tertiären Hügelland. Werte für Tanne wurden gutachtlich anhand von Erfahrungswerten aus dem Universitätsforstbetrieb der Ludwig-Maximilians-Universität München angepasst. Für Fichte wurde ein hoher Naturverjüngungsanteil einhergehend mit niedrigen Kulturkosten (1.000 Euro/ha) unterstellt.

von 100 bis 120 Euro/ha/Jahr. Dennoch rangierten die resultierenden Deckungsbeitragsäquivalente der von Fichte dominierten Bestände (mit bis zu 10 % Buche) weiterhin um mindestens ~30 Euro/ha/Jahr über denen der Bestände mit 50% und mehr Buche. Selbst wenn also die befürchteten Beeinträchtigungen der Fichte durch den Klimawandel tatsächlich eintreten, kann durch eine erhebliche Beteiligung der Buche oder gar durch Buchen-Reinbestände im Durchschnitt kein besseres Ergebnis als durch von Fichte dominierte Bestände erwartet werden. Allerdings erweist sich eine geringfügige Beteiligung der Buche in allen Szenarien als betriebswirtschaftlich vorteilhaft, weil dies zu keiner nennenswerten Senkung der Deckungsbeitragsäquivalente, wohl aber zu einer spürbaren Risikosenkung führt.

Mögliche Strategie zur Diversifizierung des Baumarten-Portfolios

Vor dem Hintergrund der begrenzten Möglichkeiten, die eventuellen negativen Auswirkungen des Klimawandels auf das Wachstum und die Überlebensraten der Fichte durch erhöhte Beteiligung von Laubholz zu kompensieren, müssen alternative Baumarten betrachtet werden. Diese Baumarten könnten Teile der heutigen Fichtenfläche übernehmen. Im Folgenden soll demonstriert werden, wie ein Baumarten-Portfolio aus Fichte und anderen Baumarten für die standörtlichen Verhältnisse im bayerischen Tertiären Hügelland aus-

sehen könnte. Im Zuge dieser Modellanalyse wird auf unveröffentlichte Daten von Härtl (2016) zurückgegriffen, welche dieser im Rahmen des BioHolz-Projektes³ mithilfe des Waldwachstumsmodells SILVA (Pretsch et al. 2002) sowie des Betriebsoptimierungsmodells YAFO (Härtl et al. 2013) generiert hat. Die jeweiligen Deckungsbeitragsäquivalente sowie ihre Standardabweichungen sind für die betrachteten Baumarten in Abbildung 2 dargestellt.

Abweichend von den bisherigen Studien zur Ableitung einer langfristigen Baumartenzusammensetzung in einem Forstbetrieb (z. B. Neuner et al. 2013) kann auch ein so genanntes »robustes Optimierungsmodell« eingesetzt werden, um eine langfristige Baumartenstruktur zu eruieren. Ziel dabei ist es, dass auch bei Eintritt ungünstiger Szenarien mit geringen Deckungsbeitragsäquivalenten (so genannte »Worst-Case-Szenarien«) noch relativ gute Ergebnisse erzielt werden. Dazu werden diskrete Szenarien möglicher Deckungsbeitragsäquivalente betrachtet. Für jeden Bestandestyp (Abbildung 2) ist dies ein pessimistisches (erwartetes Deckungsbeitragsäquivalent *minus* 2,5 Mal die simulierte Standardabweichung) und ein optimistisches Szenario (erwartetes Deckungsbeitragsäquivalent *plus* 2,5 Mal die simulierte Standardabweichung). Diese Szenarien werden in der Optimierung für alle Kombinationsmöglichkeiten berücksichtigt. Bei, wie in unserem Falle, acht Bestandestypen ergeben sich

³ <http://waldinventur.wzw.tum.de/index.php?id=159&L=0>

damit insgesamt $2^8 = 256$ diskrete Szenarien. Im Zuge der Optimierung werden den Bestandestypen nun Flächenanteile (deren Summe immer eins ergeben muss) so zugeordnet, dass für jedes der 256 Szenarien der Abstand zum maximal erreichbaren Deckungsbeitragsäquivalent (ausgedrückt als 100 %) minimiert wird. Dieses Verfahren wurde für Landnutzungs-Portfolios in Ecuador erprobt (Knöke et al. 2015), für die Planung der Rekultivierung verlassener tropischer Weideflächen eingesetzt (Knöke et al. 2016b) und von Messerer et al. (2017) auf ein forstwirtschaftliches Optimierungsproblem angewandt. Ein großer Vorteil dieser »robusten« Art von Optimierung liegt in den relativ geringen Anforderungen an die Eingangsdaten. Das Ergebnis einer solchen Optimierung ist ein relativ ausgewogenes Baumarten-Portfolio (Abbildung 3 unten).

Das »optimierte« Baumarten-Portfolio erreicht ein um 27 % höheres Deckungsbeitragsäquivalent als ein Portfolio mit reiner Fichte, bei einer Standardabweichung, die um 34 % niedriger liegt. Gegenüber einer aktuellen Baumartenstruktur eines Beispielbetriebes aus dem Tertiären Hügelland (Abbildung 3 oben) verspricht das optimierte Portfolio sogar um 128 % gesteigerte Deckungsbeitragsäquivalente, bei einem nur wenig erhöhten Risiko. Trotz des extrem hohen mittleren Deckungsbeitragsäquivalents der Douglasie (über 500 Euro/ha/Jahr) wird das Portfolio nicht von dieser Baumart dominiert. Die Douglasie weist ja auch eine enorme Standardabweichung der Deckungsbeitragsäquivalente auf, da zum einen recht hohe Werte des stehenden Holzvorrates »im Risiko« stehen und zum anderen weil die Ausgaben für die Kulturbegründung stark schwanken können.

Selbst wenn nun die Douglasie sich in Zukunft als unerwartet anfällig erweisen sollte, würde aufgrund der anderen Baumarten, auf den verbleibenden 75 % der Betriebsfläche, der wirtschaftliche Erfolg nicht gänzlich in Frage stehen. Der mit 17 % hohe Tannenanteil lässt sich natürlich nur mit Hilfe eines angepassten Wildmanagements erreichen. Rechnet man die Buchenanteile des Portfolios zusammen, so ergibt sich ein Laubholzanteil von lediglich 16 %. Kiefer und Eiche sind in diesem Beispiel nicht vertreten. Alles in allem verspricht dieses »Nadelholz-Portfolio« gute betriebswirtschaftliche Chancen, ohne alles auf eine Karte setzen zu müssen.

Das optimierte Baumarten-Portfolio (Abbildung 3 unten) darf nun nicht so verstanden werden, dass der Douglasien-Anteil, sowie der Tannen-Anteil, in Form

von Reinbeständen realisiert werden sollte. Vielmehr wäre die Tanne einzeln bis truppweise beizumischen (z. B. zur Fichte) und die Douglasie sollte eine Beimischung entweder von Tanne, Buche oder auch Fichte haben. Die betriebswirtschaftliche Darstellung dieser Mischbestands-Typen ist jedoch im Moment aufgrund methodischer Einschränkungen noch nicht möglich. Betriebswirtschaftliche Mischbestandseffekte wurden bisher nur für Fichten-Buchen-Typen erforscht.

Baumarten-Portfolios

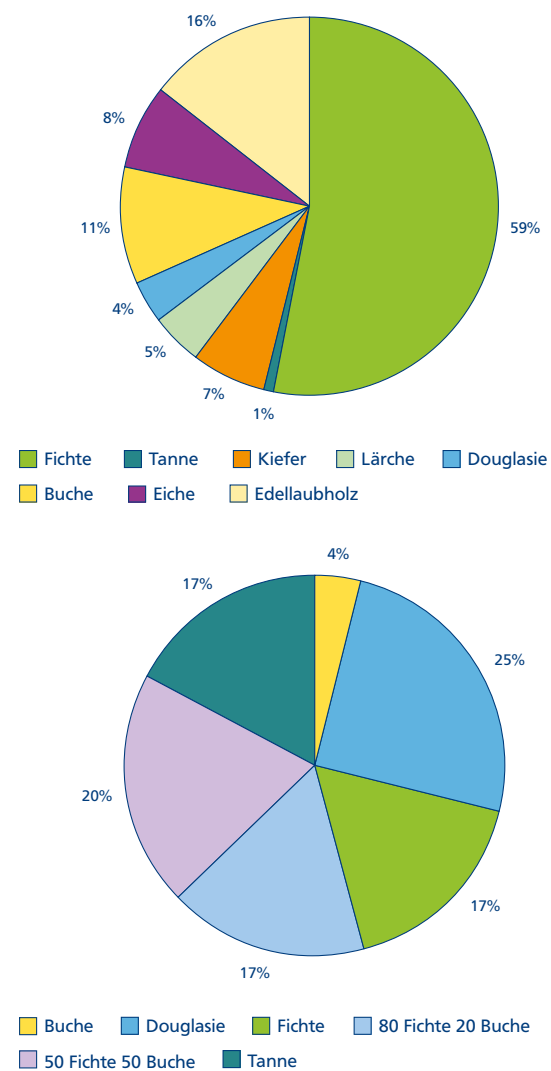


Abbildung 3: Oben: Beispiel einer aktuellen Baumartenstruktur eines Beispielbetriebes aus dem Bayerischen Tertiären Hügelland (Universitätsforstbetrieb der Ludwig-Maximilians-Universität München, Friedrich 2017). Unten: Beispiel einer betriebswirtschaftlich optimierten Baumartenstruktur für einen ehemals von Fichten dominierten Betrieb unter stärkerer Beteiligung wirtschaftlich vorteilhafter Alternativbaumarten, wie Tanne und Douglasie, aber auch von verschiedenen Fichten-Buchen-Mischbestandstypen (Zahlen der Mischbestandstypen entsprechen flächenbezogenen Prozentanteilen)

Fazit

Mit großer Wahrscheinlichkeit werden betriebswirtschaftliche Zielsetzungen privater und staatlicher Waldbesitzer allein durch Umwandlung von Fichten-Reinbeständen in Mischbestände mit Fichte oder Laubholz-Reinbestände nicht erreicht werden können. Alternativbaumarten wie beispielsweise Douglasie oder Tanne sollten größere Flächenanteile einnehmen, um die betriebswirtschaftlichen Chancen der Nadelholzwirtschaft zu nutzen und trotzdem eine stärkere Durchmischung und damit Abkehr von der Fichtenreinbestandswirtschaft zu erreichen. Auch sollte man weitere Nadelholzarten, beispielsweise die Lärche, verstärkt beteiligen und Gastbaumarten testen. Dies könnte unter anderem die Libanon-Zeder sein. Ein Waldbau mit verschiedensten Nadelholzarten unter maßgeblicher Beteiligung von Tanne lässt sich jedoch nur bei angepassten Wildbeständen erreichen.

Die angestellten Überlegungen gelten für einen betriebswirtschaftlich orientierten Waldbau, welcher insbesondere für den privaten Waldbesitz interessant sein könnte. Damit wird natürlich nicht behauptet, dass ein solcher Waldbau im Privatwald zwingend ist. Die Möglichkeit dazu muss allerdings gesichert werden. Dieser eher wirtschaftlich orientierte Waldbau kann auch einige Anforderungen einer multifunktionalen Waldwirtschaft gut mit erfüllen, beispielsweise die Kohlenstoffspeicherung. Andere Aspekte, wie Totholzbereitstellung oder Habitatschutz, laufen in diesem Waldbau jedoch nicht automatisch mit. Die Berücksichtigung solcher Aspekte erfordert eine abweichende Waldstruktur, sicherlich mit deutlich mehr Laubholz, welche aber betriebswirtschaftlich nicht als besonders vorteilhaft gelten kann. So verspricht das in Abbildung 3 dargestellte laubholzreiche Baumarten-Portfolio des Beispielbetriebes langfristig um rund 140 Euro/ha/Jahr geringere Deckungsbeitragsäquivalente als das »optimierte« nadelholzreichere Baumarten-Portfolio. Durch die Berücksichtigung von Naturschutz-Aspekten entstehen folglich mitunter erhebliche Opportunitätskosten.

Diese Opportunitätskosten müssen in Zukunft mit hoher Priorität beziffert und ausgewiesen werden, denn diese Kosten dürfen nicht einseitig auf den Waldbesitz abgewälzt werden. Eine Gesellschaft die verstärkt Naturschutzaspekte einfordert, muss auch bereit sein sich an deren Kosten zu beteiligen. Dieselbe Gesellschaft fördert ja durch ihr Konsumverhalten und ihren generellen Lebensstil durchaus gerade diejenigen Wirtschaftssektoren mit enormem ökologischen Fuß-

abdruck und hohem Naturverbrauch. Beispielsweise wird durch zunehmenden Erwerb von High-Tech-Produkten der Abbau seltener Erden massiv gefördert, der Dienstleistungssektor (Tourismusindustrie) führt zu stetig zunehmenden Flugreisen und unser Lebensmittelkonsum fördert den Raubbau an der Natur durch Umwandlung natürlicher Ökosystem in landwirtschaftliche Produktionsflächen. Zahlreiche weitere Beispiele wären leicht zu nennen. Vor diesem Hintergrund kann man tatsächlich den Eindruck gewinnen, dass die vor allem von der städtischen Bevölkerung unterstützten Naturschutzaspekte, die in vielen Fällen mit signifikanten Nutzungsverzichten und hohen Kosten für die Waldbesitzer einhergehen, eine gewisse Stellvertreterfunktion haben, um das im Unterbewusstsein schlummernde, eigentlich schlechte ökologische Gewissen zu beruhigen. Wie in allen anderen Bereichen unserer Volkswirtschaft auch, müssen aber kostspielige Forderungen auch bezahlt werden. Daher sollte fairerweise der dem US-Ökonomen und Wirtschaftsnobelpreisträger Milton Friedmann zugeschrieben Satz: »*There is no free lunch*«, endlich auch für die Waldwirtschaft gelten. Mit Blick auf die Ausweisung der Kosten des Naturschutzes stehen dabei insbesondere die großen Landesforstbetriebe in der Pflicht, beispielsweise die Bayerischen Staatsforsten, welche auch finanziell sehr anspruchsvolle Naturschutzkonzepte praktizieren.

Danksagung

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft und dem Kuratorium für Forstliche Forschung gebühren Dank für die großzügige Förderung der Forschungsarbeiten, über die berichtet wurde (Förderkennzeichen KN 586/7-1,2 und KN 586/11-1). Darüber hinaus bin ich Frau Dr. Carola Paul für hilfreiche Kommentare sehr dankbar.

Literatur

Biermayer, G. (2009): Fichtenwälder im Klimawandel – Konsequenzen für Forstwirtschaft und Forstwissenschaft. LWF Wissen 63: S. 7–10

BWI (2014): Bundeswaldinventur Ergebnisdatenbank. <https://bwi.info/>. Zugriff 29.04.2017

Friedrich, S. (2017): Abschlussdokumentation der Inventur 2016 im Wald der Ludwig-Maximilians-Universität München. Unveröffentlicht

Griess, V.C.; Knoke, T. (2013): Bioeconomic modelling of mixed Norway spruce - European beech stands: Economic consequences of considering ecological effects. *European Journal of Forest Research* 132: S. 511–522

Griess, V.C., Acevedo, R.; Härtl, F.; Staupendahl, K.; Knoke, T. (2012): Does mixing tree species enhance stand resistance against natural hazards? A case study for spruce. *Forest Ecology and Management* 267: S. 284–296

Hanewinkel, M.; Hummel, S.; Cullmann, D. A. (2010): Modelling and economic evaluation of forest biome shifts under climate change in Southwest Germany. *Forest Ecology and Management* 259: S. 710–719

Härtl, F.; Hahn, A.; Knoke, T. (2013): Risksensitive planning support for forest enterprises: The YAFO model. *Computers and Electronics in Agriculture* 94: S. 58–70

Heidingsfelder, A.; Knoke, T. (2004): Douglasie versus Fichte: Ein betriebswirtschaftlicher Leistungsvergleich auf Grundlage des Provenienzversuches Kaiserslautern. *Schriften zur Forstökonomie* Band 26, Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M.

Knoke, T.; Clasen, C.; Paul, C.; Friedrich, S. (2016a): Ökonomische Kalkulationen sprechen oft für Naturverjüngung. *Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge* 71: S. 42–45

Knoke, T.; Paul, C.; Hildebrandt, P.; Calvas, B.; Castro, L.M.; Härtl, F.; Döllner, M.; Hamer, U.; Windhorst, D.; Wiersma, Y.F.; Curatola Fernandez, G.F.; Obermeier, W.A.; Adams, J.; Breuer, L.; Mosandl, R.; Beck, E.; Weber, M.; Stimm, B.; Haber, W.; Fürst, C.; Bendix, J. (2016): Compositional diversity of rehabilitated tropical lands supports multiple ecosystem services and buffers uncertainties. *Nature Communications* 7: Artikel Nummer: 11877

Knoke, T.; Paul, C.; Härtl, F.; Castro, L.M.; Calvas, B.; Hildebrandt, P. (2015): Optimizing agricultural land-use portfolios with scarce data – A non-stochastic model. *Ecological Economics* 120: S. 250–259

Knoke, T. (2009): Die ökonomische Zukunft der Fichte. LWF Wissen 63: S. 16–21

Knoke, T.; Seifert, T. (2008): Integrating selected ecological effects of mixed European beech – Norway spruce stands in bioeconomic modelling. *Ecological Modelling* 210: S. 487–498

Kölling, C.; Knoke, T.; Schall, P.; Ammer, C. (2009): Überlegungen zum Risiko des Fichtenanbaus in Deutschland vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Forstarchiv* 80: S. 42–54

Messerer, K.; Pretzsch, H.; Knoke, T. (2017): A non-stochastic portfolio model for optimizing the transformation of an even-aged forest stand to continuous cover forestry when information about return fluctuation is incomplete. *Annals of Forest Science: Accepted pending minor revisions*.

Neuner, S.; Knoke, T. (2017): Economic consequences of altered survival of mixed or pure Norway spruce under a dryer and warmer climate. *Climatic Change* 140: S. 519–531

Neuner, S.; Albrecht, A.; Cullmann, D.; Engels, F.; Griess, V. C.; Hahn, W. A.; Hanewinkel, M.; Härtl, F.; Kölling, C.; Staupendahl, K.; Knoke, T. (2015): Survival of Norway spruce remains higher in mixed stands under a dryer and warmer climate. *Global Change Biology* 21: S. 935–946

Neuner, S.; Beinhofer, B.; Knoke, T. (2013): The optimal tree species composition for a private forest enterprise – applying the theory of portfolio selection. *Scandinavian Journal of Forest Research* 28: S. 38–48

Pretzsch, H.; Biber, P.; Dursky, J. (2002): The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management* 162: S. 3–21

Keywords: Spruce, Climate Change, Alternative tree species, Tree species portfolios

Summary: Today more than ever, Bavarian forestry lives from spruce. There is no tree species from which more timber is harvested than spruce (representing $\frac{2}{3}$ of the Bavarian timber supply). Forest conversion has led at the same time to a significant reduction of forest area with spruce. Forest conversion is partly justified by means of the uncertainties associated with climate change. The present contribution outlines how the economic aspects of spruce may change at stand level, under a changing climate. In addition, I show how actual spruce area may partly be replaced by (and admixed with) profitable alternative conifers, for example Douglas fir or White fir, without concentrating too much on only one tree species. The stand level considerations show that even if survival and growth of spruce worsened significantly due to climate change, the profitability of spruce dominated stands would still be higher than that of European beech dominated stands. For the enterprise level example chosen from the growing region "Bayerisches Tertiäres Hügelland", an economic optimization leads to a desirable forest composition of 16 % deciduous trees, 42 % spruce, 25 % Douglas fir and 17 % White fir. This portfolio achieves higher economic return than pure spruce portfolios or an example of a current forest composition, without enhancing the economic risk much.
