



Multifunktionale und robuste forstliche Optimierung

Es wird immer wieder zurecht betont, dass der Wald mehr ist als nur ein Ort zur effizienten Holzproduktion. Die Ansprüche an den Wald sind vielfältig. Die multifunktionale Bewirtschaftung ist eine oft gebrauchte Lösungsformel, um die vielfältigen Ansprüche bestmöglich zu erfüllen. Wie aber kann Multifunktionalität in forstlichen Optimierungen umgesetzt werden? Wie kann man zudem erreichen, dass die Ansprüche auch bei sich ändernden Bedingungen noch möglichst gut erfüllt werden?

TEXT: THOMAS KNOKE, SEBASTIAN KIENLEIN

Traditionell wurde von einer Harmonie der verschiedenen Zielsetzungen – klassisch als Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktionen bezeichnet – ausgegangen. Harmonie der Zielsetzungen bedeutet, dass sozusagen im „Kielwasser“ einer ordnungsgemäßen Holzproduktion auch alle anderen Zielsetzungen ausreichend mit erfüllt werden. Tatsächlich lassen sich aber nicht immer alle Zielsetzungen gleichzeitig maximal erfüllen [8], es müssen also Kompromisse eingegangen werden. In diesem Einführungsartikel soll eine Methodik beschrieben werden, mit der solche Kompromisse im Rahmen einer forstlichen Optimierung erreicht werden können. Die Beiträge in dieser AFZ-DerWald-Ausgabe, sowie jene, die in Ausgabe 17 am 2. September erscheinen, beschreiben Projekte, die an der Professur für Waldinventur und nachhaltige Nutzung der Technischen Universität München durchgeführt worden sind. Die Beiträge bauen auf dieser Methodik auf.

Vielfältige Möglichkeiten

Die Möglichkeiten zur Berücksichtigung von multiplen Zielsetzungen im Rahmen von Optimierungen sind sehr vielfältig. Einen lesenswerten generellen Überblick findet man bei Wenger [9]. Wir beschränken uns hier auf die Referenzpunkt-Methodik [3], die an unserer Professur mit Methoden der robusten Optimierung [1] gekoppelt wurde. Die neuartige Methodik wurde bisher vor allem im Rahmen von Landnutzungsprojekten in Mittel- und Süd-



Quelle: Archiv/FM

Gemischte Wälder erbringen vielseitige Leistungen.

amerika in enger Kooperation mit der von Prof. Dr. Paul geleiteten Professur für Forstökonomie und nachhaltige Landnutzungsplanung der Universität Göttingen entwickelt [7, 4, 6]. Eine Anwendung für den forstlichen Bereich ist bei Knoke et al. [5] beschrieben. An der Weiterentwicklung der Optimierung bei multiplen Zielsetzungen wird im Rahmen von mehreren Projekten gearbeitet. Die Arbeiten werden unter anderem vom Bayerischen Netzwerk für Klimaforschung bayklif (siehe Beitrag Rössert), von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung im Rahmen des EU Programms FP7 ERA-NET

Sumforest (siehe Beitrag Chreptun), von der Bayerischen Forstverwaltung (siehe Beitrag Friedrich & Bödeker in AFZ-DerWald, 17/2020) und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (siehe Beiträge Gosling bzw. Jarisch ebenfalls in AFZ-DerWald, 17/2020) gefördert.

Optimaler Kompromiss

Der Grundgedanke unserer multifunktionalen Optimierung baut auf Referenzpunkten auf. Ein Referenzpunkt ist der günstigste für ein Zielkriterium erreichbare Wert, den man auch als „idealen“ Wert bezeichnen kann. Stel-

len wir uns dazu beispielsweise als mögliche Zielkriterien die produzierte Holzmenge, Kapitalwerte bei verschiedenen Diskontierungsraten, Kohlenstoffspeicherung, Wasserspende, Totholz, Stabilität bzw. Walderhalt und die Eignung zur Erholung vor. Für jedes dieser Zielkriterien gibt es einen Bestandestypen, der den idealen Wert erreicht. Dies ist der Bestandestyp mit dem bestmöglichen Beitrag zu dem entsprechenden Zielkriterium. Aber es ist unmittelbar klar, dass dieser Idealwert nicht von einem einzigen Bestandestyp gleichzeitig für alle Zielkriterien erreicht werden kann. Wollen wir beispielsweise viel Totholz in einem Bestandestyp der eine hohe Biodiversität zum Ziel hat, lässt sich die produzierte Holzmenge nicht maximieren. Hohe Kapitalwerte und maximale Kohlenstoffspeicherung, für die wir ja große Holzvorräte und möglichst viel konstruktiv verwendbares Holz benötigen, schließen sich ebenso gegenseitig aus. Eine große Wasserspende steht im Widerspruch zu hohen Nadelholzanteilen. Diese Kette an Konflikten ließe sich noch erweitern.

Es ist ganz natürlich, dass unterschiedliche Bestandestypen in unterschiedlicher Weise zu den Zielkriterien beitragen. Ein Eichenbestand kann beispielsweise naturschutzfachlich wertvolles Totholz und relativ große Mengen an Trinkwasser liefern, wird aber aufgrund der langen Produktionszeiten einen eher niedrigen Kapitalwert erreichen. Dagegen steuern Douglasi-Bestände viel zum Kapitalwert bei, sind aber eventuell naturschutzfachlich weniger attraktiv, weil sich die einheimische Flora und Fauna noch nicht so stark an diese Baumart angepasst hat.

Wie lässt sich ein guter Kompromiss finden?

Dazu müssen die Zielkriterien, die ja alle in unterschiedlichen Einheiten gemessen werden, erst einmal vergleichbar gemacht werden. Um dies zu erreichen, setzen wir den idealen Wert gleich 100 % und den ungünstigsten (antiidealen) Wert gleich Null. Alle anderen Niveaus der Zielkriterien werden dann auf einer Prozentskala normiert, sodass standardisierte Zielkriterien entstehen, die zwischen Null (schlechtester Erfüllungsgrad) und

„Der Wald kann nicht gleichzeitig alle Anforderungen maximal erfüllen. Es kommt auf einen guten Kompromiss an.“

THOMAS KNOKE

100 % (bester Erfüllungsgrad) variieren. Den verschiedenen Waldbeständen kann nun im Rahmen einer Optimierung ein bestimmter Flächenanteil des Forstbetriebes zugeordnet werden, wobei sich alle Flächenanteile am Ende zu 100 % summieren müssen.

Die Zuweisung der Flächenanteile geschieht mit dem Ziel, ein flächengewichtetes Zielkriterium zu erreichen, welches einen möglichst kleinen Abstand zum Referenzpunkt (= 100 %) aufweist. Abb. 1 verdeutlicht dies beispielhaft. Sie zeigt im oberen Bereich die unterschiedlichen Erfüllungsgrade für beispielhafte Zielkriterien 1 bis 9 bei einer von Fichte und Kiefer dominierten Ausgangssituation. Es sind je Zielkriterium immer mehrere Niveaus der erreichten Erfüllungsgrade angegeben. Dies hängt mit den berücksichtigten Unsicherheitsszenarien zusammen, die wir später erklären. Für die Zielkriterien 6 bis 8 werden teilweise

nur sehr geringe Erfüllungsgrade erreicht. Dies könnten für einen Fichten-Kiefern-Betrieb beispielsweise die Kriterien Wasserspende, Totholz und Stabilität sein.

Zielkriterien mit sehr geringen Erfüllungsgraden sind der Ansatzpunkt der Optimierung. Diese ordnet nun die verfügbare Fläche den für die Zukunft in Erwägung gezogenen Bestandestypen so neu zu, dass gleichmäßig über alle Kriterien hinweg die möglichen Erfüllungsgrade verbessert werden (Abb. 1 unten). Die Optimierung konzentriert sich dabei auf die ungünstigsten Erfüllungsgrade, minimiert also den maximalen Abstand zwischen erreichtem Zielkriterium und Referenzpunkt. Hierdurch kann im Beispiel eine Verbesserung der unteren Erfüllungsgrade von Null bis auf mindestens 39 % erreicht werden, indem mehr Laubholz, Tanne, Douglasie und Mischbestände begründet werden. Das beschriebene Vorgehen hat somit einen vielfältigen Waldaufbau zur Folge, da nur so die zahlreichen Zielkriterien auf möglichst hohem Niveau erfüllt werden können.

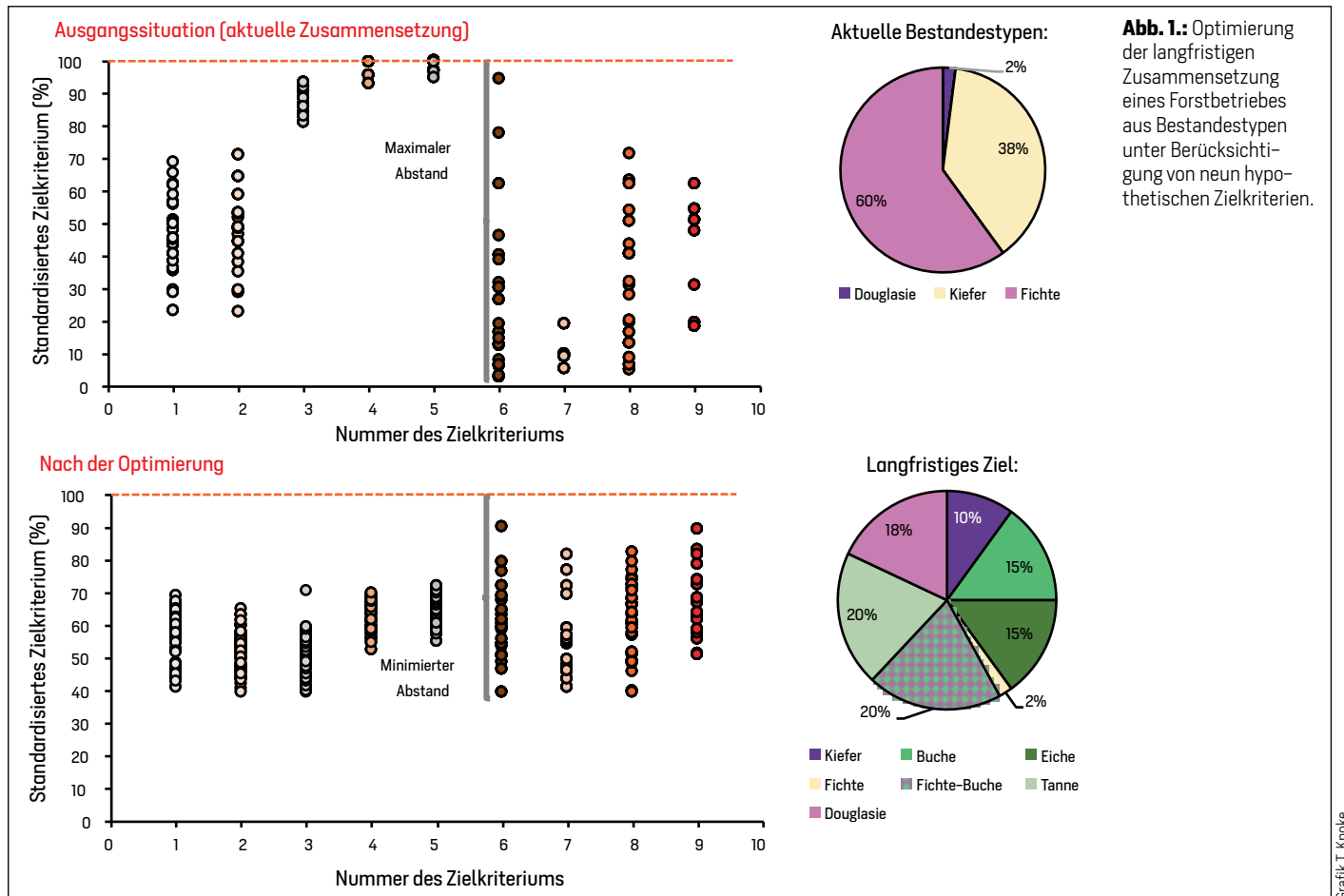
Robuste Planung

Eine robuste Planung soll zu einer Waldstruktur führen, welche die Ansprüche auch bei geänderten zukünftigen Bedingungen noch möglichst gut erfüllt, auch wenn diese Bedingungen heute noch unbekannt sind. Eine robuste Planung ist sinnvoll, denn die Bedingungen, unter denen Waldwirtschaft stattfindet, ändern sich fortwährend. Wir haben es mit sehr langen Umtriebszeiten zu tun, mit dynamisch sich ändernden Waldschutzfragen, die wir teilweise noch gar nicht kennen, und mit gesellschaftlichen Trends, die nicht abzusehen sind. Nur manche Dinge sind in gewissem Rahmen abschätzbar. Zum Beispiel verlagern sich die Überlebenswahrscheinlichkeiten der Bäume in Zeiten des Klimawandels [2]. Man sollte also im Rahmen der Forstplanung nicht unbedingt davon ausgehen, dass alle Zielbeiträge immer wie erwartet von den Bestandestypen erreicht werden. Es kann durchaus Abweichungen nach unten geben. Wir wollen mit unserer (robusten) Optimierung daher erreichen, dass die Ansprüche an den Wald auch unter wechselnden Bedingungen erfüllt werden

Schneller ÜBERBLICK

- » **Multifunktionale Waldwirtschaft** erfordert Kompromisse. Methoden fehlen bisher weitgehend, um solche Kompromisse anhand quantitativer Kriterien herbeizuführen
- » **Die Referenzpunktmethod**e kann hier Abhilfe schaffen; sie minimiert den Abstand zwischen tatsächlich erreichten Erfüllungsgraden für mehrere Zielkriterien und den jeweils besten erreichbaren Zielbeiträgen (Referenzpunkte)

Wie kann ein Forstbetrieb langfristig aufgebaut sein?



können. Das heißt, dass für einen großen Rahmen an möglicherweise eintretenden Werten für die Zielbeiträge unserer Bestandestypen immer eine möglichst gute Zielerfüllung gewährleistet ist. Eine solche Lösung unseres Optimierungsproblems sehen wir als robust an.

Um einen robusten Waldaufbau zu erreichen, beziehen wir sogenannte Worst-Case-Szenarien in die Optimierung ein. Damit berücksichtigen wir mögliche Abweichungen der Zielbeiträge nach unten. Wenn wir beispielsweise von dem Bestandestyp Fichte eine durchschnittliche Speicherung von 70 t Kohlenstoff pro Hektar (in der oberirdischen Biomasse) erwarten, dann kalkulieren wir unsere optimale Lösung nicht nur für den Fall, dass tatsächlich die 70 t beigetragen werden können. Vielmehr betrachten wir auch die Möglichkeit einer Speicherung von lediglich 40 t Kohlenstoff (hier nur als ein Beispiel) als sogenannten Worst Case. Welchen Worst Case wir für die einzelnen Bestandes-

typen und Zielkriterien veranschlagen, müssen wir vor der Optimierung festlegen. Wenn Daten durch wiederholte Simulationen unter Risiko generiert wurden, kann man sich an der Standardabweichung orientieren. Bei Befragungsergebnisse kann man den Standardfehler der Antwortkategorien zur Berücksichtigung der Unsicherheit heranziehen. Der Worst Case könnte dann beispielsweise der erwartete Wert minus dreimal die Standardabweichung bzw. der Standardfehler sein. Die folgenden Beiträge untersuchen auch, wie sich die Größe der angenommenen Abweichung in Einheiten der Standardabweichung ($m \times sd$) auf die Ergebnisse auswirkt.

In der robusten Optimierung werden auf diese Weise Unsicherheitsszenarien für alle Kombinationen aus erwarteten und Worst-Case-Zielkriterien zwischen allen betrachteten Bestandestypen gebildet. Bei sieben Bestandestypen ergeben sich beispielsweise $2^7 = 128$ Unsicherheitsszenarien für jedes Zielkriterium. Wie in Abb. 1 zu erkennen, entstehen so

mehrere mögliche Erfüllungsgrade für die Zielkriterien, die bei einer bestimmten Zusammensetzung aus Waldbeständen, je nach Unsicherheitsszenario, zu erwarten wären. Wenn wir nun den größten Abstand der Zielkriterien zum Referenzpunkt minimieren, betrachten wir immer die unteren Niveaus der Zielkriterien (also deren schlechtesten Fall). Der kleinstmögliche (minimierte) maximale Abstand aus der Optimierung (Abb. 1) muss dann allerdings vom Waldbesitzer akzeptiert werden. Es handelt sich eben um einen Kompromiss. Dieser durch die optimale Lösung erreichte Abstand kann nicht weiter verkleinert werden, ohne dass der Abstand für ein anderes Zielkriterium wieder größer als das bis dahin erreichte Minimum wird.

Die beschriebene Art der Optimierung führt zu einer robusten Lösung. Eine solche Lösung garantiert, dass der gefundene und schließlich akzeptierte Abstand zum Referenzpunkt für keine zukünftige Kombination aus möglichen Werten der

Zielkriterien überschritten wird. Mathematisch wird dies durch eine Reihe von Bedingungen erreicht, die für jede denkbare Kombination von Zielkriterien fordern, dass der Abstand zum Referenzpunkt kleiner oder gleich dem maximal tolerierten Abstand ist. Diese Bedingungen werden niemals verletzt, auch nicht für zukünftig abweichende Werte der Zielkriterien. Diese zukünftigen Werte der Zielkriterien müssen allerdings im Intervall zwischen den berücksichtigten erwarteten und den Worst-Case-Werten liegen. Abb. 2 verdeutlicht dieses Prinzip anhand von 500 zufällig gewählten Kombinationen von möglichen Zielbeiträgen der Bestandestypen, wobei die kombinierten Zielbeiträge jeweils aus dem Intervall zwischen erwartetem und Worst-Case-Wert gezogen wurden. Zur Illustration wird hier ein Beispiel aus Knoke et al. [6] dargestellt.

Literaturhinweise:

[1] BEN-TAL, A.; EL GHAOU, L.; NEMIROVSKIĬ, A. S. (2009): *Robust optimization*. Princeton, NJ: Princeton University Press. [2] BRANDL, S.; PAUL, C.; KNOKE, T.; FALK, W. (2020): *The influence of climate and management on survival probability for Germany's most important tree species*. In: *Forest Ecology and Management*, 458, S. 117652. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117652. [3] ESTRELLA, R.; CATTRYSSE, D.; VAN ORSHOVEN, J. (2014): *Comparison of Three Ideal Point-Based Multi-Criteria Decision Methods for Afforestation Planning*. In: *Forests*, 5 (12), S. 3222-3240. DOI: 10.3390/f5123222. [4] GOSLING, E.; REITH, E.; KNOKE, T.; PAUL, C. (2020): *A goal programming approach to evaluate agroforestry systems in Eastern Panama*. In: *Journal of Environmental Management*, 261, S. 110248. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110248. [5] KNOKE, T.; MESSERER, K.; PAUL, C. (2017): *The Role of Economic Diversification in Forest Ecosystem Management*. In: *Current Forestry Reports* 3, (2), S. 93-106. DOI: 10.1007/s40725-017-0054-3. [6] KNOKE, T.; PAUL, C.; RAMMIG, A.; GOSLING, E.; HILDEBRANDT, P.; HÄRTL, F. et al. (2020): *Accounting for multiple ecosystem services in a simulation of land-use decisions. Does it reduce tropical deforestation?* In: *Global Change Biology*. DOI: 10.1111/gcb.15003. [7] PAUL, C.; REITH, E.; SALECKER, J.; KNOKE, T. (2019): *How Integrated Ecological-Economic Modelling Can Inform Landscape Pattern in Forest Agroecosystems*. In: *Current Landscape Ecology Reports* 4, (4), S. 125-138. DOI: 10.1007/s40823-019-00046-4. [8] REHBINDER, E. (2018): *Naturschutz im Staatswald - zur Rollenverteilung zwischen Naturschutzrecht und Waldrecht*. In: *NuR*, 40 (1), S. 2-10. DOI: 10.1007/s10357-017-3278-x. [9] WENGER, W. (2010): *Multikriterielle Tourenplanung*. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler (Produktion und Logistik / Wolf Wenger).

Ergebnisse eines Zufallsexperiments

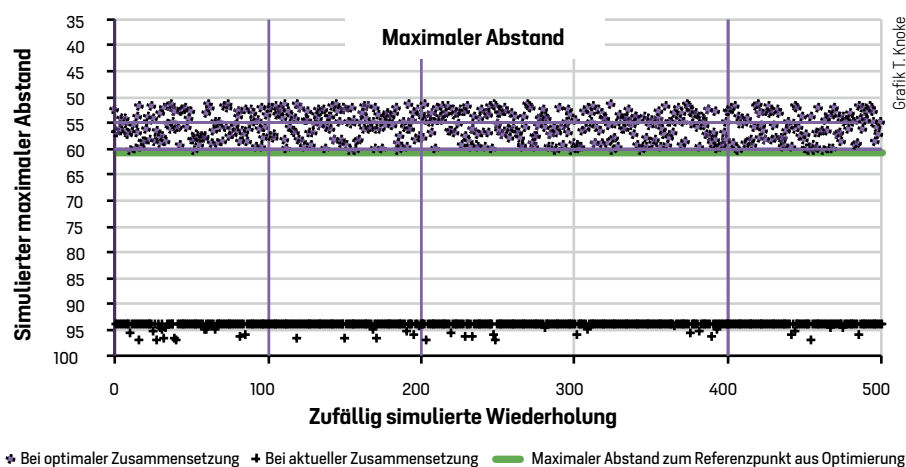


Abb. 2: Test auf Stabilität der Zielerreichung der optimierten Zusammensetzung mithilfe eines Zufallsexperiments. In 500 computergestützten Experimenten wurden verschiedene Kombinationen möglicher Zielbeiträge nach dem Zufallsprinzip gezogen und auf die gefundene optimale Flächenzuordnung (optimale Lösung) angewendet. Keiner der 500 sich ergebenden maximalen Abstände (lila Punkte) zum Referenzpunkt ist größer als der akzeptierte maximale Abstand (grüne Linie) (y-Achse verläuft von oben nach unten). Ohne Optimierung ist dieses Ergebnis sehr viel ungünstiger (kleine schwarze Kreuze). Beispiel aus Knoke et al. (2020), mit Veränderungen.

In unserem Beispiel (Abb. 2) hat sich ein maximaler Abstand zum Referenzpunkt von 61 % ergeben (y-Achse läuft von oben nach unten). Wenn der Waldbesitzer diesen Wert akzeptiert, ist gesichert, dass dieser maximale Abstand auch bei sich neu ergebenden Zielbeiträgen der Bestandestypen nicht überschritten wird. Bedingung ist jedoch – wie gesagt – dass die neuen Zielbeiträge immer aus dem Intervall zwischen erwartetem und Worst-Case-Wert stammen. Dies bedeutet, dass bei ungünstigster Kombination der möglichen Beiträge der Bestände zu den einzelnen Zielkriterien auch für das am schlechtesten erfüllte Ziel (dies könnte z. B. der ökonomische Kapitalwert oder die Annuität sein) noch mindestens 39 % Erfüllungsgrad garantiert ist. Wie Abb. 2 zeigt, ergibt sich bei Simulation neuer Werte für die erreichten Zielbeiträge kein größerer Abstand als der akzeptierte Maximalabstand zum Referenzpunkt. Die geforderten Mindestwerte hinsichtlich der Zielkriterien werden also immer erreicht, auch bei geänderten Bedingungen. Solche Optimierungen scheinen für die Zukunft sehr wünschenswert. Bisher fehlen jedoch weitgehend Studien, die im forstlichen Bereich Lösungen aufzeigen können, welche über einen großen Bereich möglicher Zielbeiträge unserer Bestandestypen robuste Ergebnisse erbringen.

Fazit

Vor dem Hintergrund der immer wieder beschworenen Multifunktionalität werden dringend Planungsmethoden benötigt, mit denen man die Integration vielfältiger Zielkriterien transparent darstellen kann. Wir haben hier eine solche Möglichkeit zur Planung einer zukünftigen Betriebsstruktur dargestellt. Solche Planungsmodelle können beispielsweise auch in Workshops und Diskussionen mit Waldbesitzern und forstlichen Praktikern helfen, die Zielfindung zu unterstützen.



Prof. Dr. Thomas Knoke
knoke@forst.wzw.tum.de,

leitet seit 2005 die Professur für Waldinventur und nachhaltige Nutzung an der Technischen Universität München. **Sebastian Kienlein** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur.