



# 1 Einführung

## 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Der Klimawandel und die Verknappung fossiler Ressourcen stellen für die industrielle Wirtschaft große Herausforderungen dar. Zur Sicherung des Rohstoff- und Energiebedarfes haben nachwachsende Rohstoffe in den letzten Jahren stetig an Bedeutung gewonnen. Dabei lag der bisherige Fokus in Deutschland bedingt durch staatliche Fördermaßnahmen überwiegend auf der Ausweitung der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Aber auch für die stoffliche Nutzung von Biomasse wird ein erhebliches Marktwachstum erwartet (Arnold u. a. 2009). Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit land- und forstwirtschaftlicher Nutzflächen ist die Menge nachhaltig angebauter und geernteter Biomasse ebenfalls limitiert. Daraus ergeben sich Konkurrenzen zwischen der Nahrungs- und Futtermittelproduktion sowie zwischen der energetischen und stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Unter den nachwachsenden Rohstoffen nimmt Holz durch seine natürliche Festigkeit und Langlebigkeit eine Sonderrolle ein. Es kann in heimischer Forstwirtschaft in großen Mengen nachhaltig produziert werden und ist ein vielseitig einsetzbarer Rohstoff. Aber auch bei der Nutzung von Holz konkurrieren die stofflichen Einsatzmöglichkeiten als Roh- und Baustoff mit der energetischen Nutzung als Brennstoff. So rückt eine möglichst effiziente Ausnutzung des Rohstoffes in den Fokus des wissenschaftlichen Interesses.

Als möglicher Lösungsansatz zur Steigerung der Rohstoffeffizienz gilt die sogenannte *Kaskadennutzung*. Grundidee des Kaskadennutzungskonzeptes ist die (mehrfache) Hintereinanderschaltung stofflicher Nutzungen und der abschließenden energetischen Verwertung von Biomasse. Eine direkte energetische Verwertung, die mit einer unwiederbringlichen Zerstörung des Rohstoffes einhergeht, soll auf diese Weise zugunsten eines vorangehenden stofflichen Einsatzes verhindert werden. Bringezu u. a. (2008) fassen in ihrer Studie zu Nutzungskonkurrenzen bei Biomasse zusammen, dass derzeit die Konkurrenzsituation im Bereich Holz nicht genau eingeschätzt werden kann. Diese Aussage begründen sie damit, dass durch eine mehrfache stoffliche Nutzung von Holz die Rohstoffkonkurrenz entschärft werden könnte, allerdings



können sie den Umfang und die Relevanz solcher Maßnahmen nicht klar einschätzen. Arnold u. a. (2009) befassen sich in einer Studie umfassend mit dem Prinzip der Kaskadennutzung als Grundlage zur Optimierung der Biomassenutzung. Sie sehen die Kaskadennutzung als grundsätzlich geeignet an, die Rohstoffeffizienz zu erhöhen und weisen weitergehende Anforderungen an eine nachhaltige Gestaltung von Biomasse-Kaskaden aus. Die Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme werden von Gärtner u. a. (2013) vergleichend untersucht. Sie stellen fest, dass in Deutschland zunächst kein prinzipieller Konflikt zwischen stofflicher und energetischer Holznutzung vorliegt, da sämtliches Holz früher oder später energetisch verwertet wird. Allerdings ergibt sich aus der Erhöhung der stofflichen Holznutzung ein Übergangseffekt, der die Menge des energetisch nutzbaren Holzes vorübergehend verringert. Um die Wirkung der Anwendung des Kaskadennutzungskonzeptes quantitativ abschätzen zu können, ist eine detaillierte und langfristige Darstellung und Modellierung der Rohstoffdynamik sowie der für diese Übergangsphase erwähnten Verzögerungseffekte notwendig. Die in diesem Zusammenhang für eine Einschätzung der zukünftigen Rohstoffverfügbarkeit bedeutsame Frage lautet, wie lange eine bestimmte Inputmenge Holz in einem komplexen System aus mehrfachen Nutzungen und unterschiedlichen Produktlebensdauern in der stofflichen Verwendung verbleibt, bevor es einer thermischen Verwertung zugeführt werden kann.

## 1.2 Zielsetzung und Lösungsweg

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methode, die die langfristigen Effekte einer verstärkten Holznutzung in Form einer Kaskadennutzung quantifizierbar macht. Die hierfür notwendige dynamische Methode zur Quantifizierung von Rohstoff-Fluss- und Speichersystemen berücksichtigt im Rahmen einer kaskadierenden Holznutzung die Hintereinanderschaltung von Nutzungsphasen. Erstmalig sollen die für Produktlebensdauern typischen nichtlinearen Lebensdauerverteilungen in einem Modell berücksichtigt werden, womit die vorgestellte Methode von den in der Kohlenstoffbilanzierung verwendeten Modellen mit konstanten Zuflüssen (vgl. Pingoud und Wagner 2006) abweicht. Mithilfe der vorgestellten Methode kann das Systemverhalten bei Änderung von Schlüsselfaktoren wie Nachfrage oder Produktlebensdauern untersucht werden. Verschiedene Szenarien werden so miteinander vergleichbar gemacht. Aus den Ergebnissen der Szenarienanalysen wiederum können durch eine Anwendung der vorgestellten Methode auf konkrete Marktparameter Rückschlüsse auf die Rohstoffversorgung in Supply Chains von Holz- und Holzprodukten getroffen werden.



Die vorliegende Arbeit orientiert sich im Aufbau an den vorangehend beschriebenen inhaltlichen Schwerpunkten. Hierzu stellt Kapitel 2 den Rohstoff Holz und seine möglichen Verwendungsarten in Grundzügen vor. Dabei werden die wesentlichen Produkt- und Sortimentarten von Holz- und Holzwerkstoffen klassifiziert und vorgestellt. Weiterhin wird in diesem Kapitel die zentrale Rolle der Wälder als wichtigste Produktionsstätten für Holz vorgestellt. Da die Zustände und Entwicklungen innerhalb der Wälder die Grundlage für die Beurteilung der Versorgungssicherheit mit Holz bilden, wird überblicksartig auf die aktuell vorhandenen Datensammlungen zu Holzaufkommen und Holzverwendung in Deutschland eingegangen. Des Weiteren sind Wälder im weltweiten Kohlenstoffkreislauf von großer Bedeutung. In diesem Kapitel wird die Rolle von Holz im globalen Kohlenstoffkreislauf eingeordnet. Dabei wird auch näher auf die unterschiedlichen Wirkebenen eingegangen, die im Zusammenhang mit der Kohlenstoffspeicherung in Waldökosystemen und Holzprodukten von Bedeutung sind.

In Kapitel 3 wird das Konzept der Kaskadennutzung näher vorgestellt. Zunächst werden die verschiedenen Nutzungsarten von nachwachsenden Rohstoffen allgemein dargestellt und die vorhandenen Konfliktpotenziale aufgezeigt. Die Grundidee der Kaskadennutzung wird beschrieben und die damit zusammenhängenden Begriffe werden definiert. Darauf aufbauend wird das vorgestellte Konzept in der Anwendung auf den Rohstoff Holz konkretisiert. Abschließend wird in diesem Kapitel die wirtschaftliche Bedeutung der Kaskadennutzung von Holz verdeutlicht.

Kapitel 4 befasst sich mit der Auswahl einer geeigneten Methode zur dynamischen Modellierung von Stoffströmen und -speichern. Hierzu werden nach der Systematik von Koch u. a. (2003) sowie Möst und Fichtner (2009) ausgewählte Ansätze vorgestellt und auf ihre Eignung zur Realisierung der beschriebenen Zielsetzung geprüft. Der ausgewählte Ansatz wird anschließend in Kapitel 5 ausführlich dargestellt.

In Kapitel 6 wird ein allgemeines Modell zur Quantifizierung des Kaskadennutzungseffektes formal beschrieben. Hierzu werden eingangs konkrete Anforderungen an das Modell formuliert und kausale Hypothesen in Form von Referenz-Zeitverlauf-Diagrammen aufgestellt. Daraufhin werden die Wirkungszusammenhänge innerhalb einer einfachen Kaskadennutzung von Holz als qualitatives Modell beschrieben. Anschließend wird das quantitative Modell schrittweise aufgebaut und erläutert. Ein besonderer Schwerpunkt liegt hierbei auf der Einbindung nichtlinearer Lebensdauer-Verteilungen und der damit verbundenen Herleitung einer diskontinuierlichen Stoffflussmenge, die pro Zeiteinheit die Kaskadenstufe wechselt. Außerdem werden in diesem Kapitel Kennzahlen entwickelt, die geeignet sind, Kaskadennutzungseffekte zu quantifizieren und anhand derer die Szenarioberechnungen ausgewertet werden können.

Ein weiterer Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt in der exemplarischen Anwendung des in Kapitel 6 aufgestellten mathematischen Modells. In Kapitel 7 werden die Systemgrenzen sowie die verwendeten Einheiten und Parameter festgelegt. Drei Szenarien mit zunehmender Kaskadierungstiefe werden zunächst beschrieben. Daran anschließend werden die Ergebnisse aus den Szenariorechnungen präsentiert und ausgewertet. Eine Validierung des formalen Modells schließt dieses Kapitel ab.

Mit dem Kapitel 8 werden aus den Erkenntnissen aus der Entwicklung und Anwendung des vorgestellten Modelles Schlussfolgerungen gezogen und in einem Ausblick mögliche methodische Erweiterungen und weitere Anwendungsfelder diskutiert. Kapitel 9 fasst die Arbeit und ihre Ergebnisse zusammen.



## 2 Holz, Wald und Klimaschutz

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des Anbaus und der Verwendung von Holz dargestellt. Für ein besseres Verständnis der Ursachen sinkender Ressourcenqualitäten im Verlauf einer kaskadierenden Holznutzung sind die wichtigsten chemischen und physikalischen Eigenschaften von Holz kurz erläutert. Auf die natürliche Dauerhaftigkeit von Holz wird inhaltlich vertiefend eingegangen, indem die besondere Rolle von Holz im Kohlenstoffkreislauf und die damit verbundenen Wirkungszusammenhänge auf das Klima näher vorgestellt werden. Ein entsprechend der Zielstellung dieser vorliegenden Arbeit formuliertes mathematisches Modell benötigt für seine Anwendung als Eingangsgrößen konkrete Marktzahlen. Die in Deutschland verfügbaren Datenquellen von Holzaufkommen und Verwendung werden in diesem Kapitel kategorisiert und näher beschrieben, wobei auch auf ihre Interdependenzen eingegangen wird.

### 2.1 Arten und Eigenschaften von Holz

#### 2.1.1 Holzarten

Produziert wird Holz von Bäumen, das heißt von langjährigen, sich verholzenden Pflanzen, die im Verlauf ihres Lebens hohe, feste Stämme bilden. Für die Einschätzung der Holzeigenschaften ist die genaue Kenntnis über die *Holzart* nötig. Die Holzart entspricht der *Baumart* und kann national und regional verschieden benannt sein. Am genauesten ist die botanische Bezeichnung (bspw. *Fagus sylvatica*), auf dem Holzmarkt sind dagegen die Handelsnamen von größerer Bedeutung (bspw. Rotbuche). Erschwert wird die genaue Einordnung von Holzarten durch regional unterschiedliche Trivialbezeichnungen sowie durch Fantasienamen, die oftmals bei der Einfuhr exotischer Holzarten auf dem Markt auftauchen (Wagenführ u. a. 2008). So wird Rauli, eine Scheinbuche, unter anderem als „Feuerland-Kirschbaum“ oder als „Chilenischer Mahagoni“ gehandelt. Aber auch in Deutschland bereits angebaute und etablierte Baumarten wie die Douglasie besitzen eine Vielzahl an Namen.



Selbst bei heimischen Baumarten wie der Fichte gibt es regionale Unterschiede in der Benennung (vgl. Tabelle 2.1). Zur Vermeidung von Verwechslungen enthält die DIN EN 13556 Standardnamen von Holzarten in Deutsch, Englisch und Französisch sowie eine spezifische Code-Bezeichnung für jede Holzart (DIN 2003).

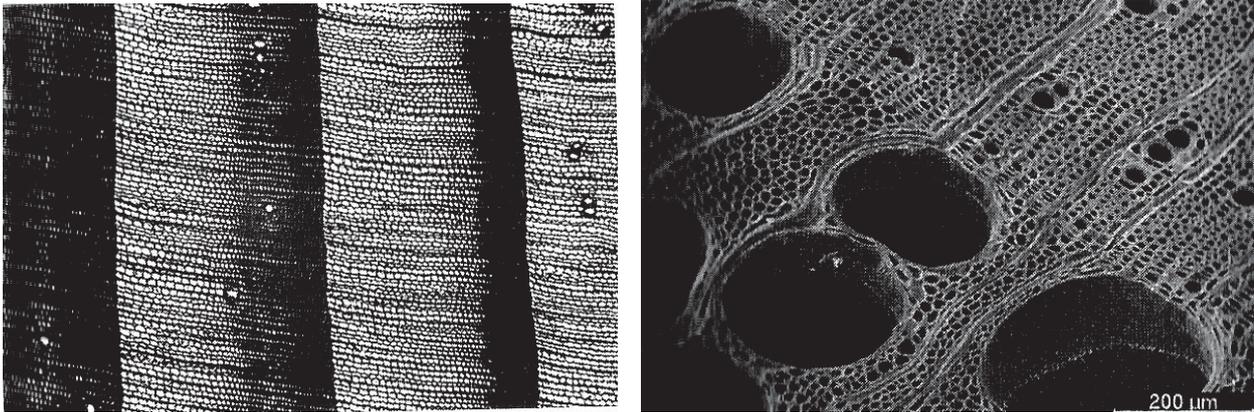
Tabelle 2.1: Übersicht über die Bezeichnungen ausgewählter in Deutschland gehandelter Holzarten

Handelsname(n)	Botanische Benennung	Kurzzeichen nach DIN EN 13556
<b>Nadelhölzer</b>		
Fichte, Rotfichte, Rottanne	<i>Picea abies</i>	PCAB
Kiefer	<i>Pinus sylvestris</i>	PNSY
Tanne, Weißtanne	<i>Abies alba</i>	ABAL
Europäische Lärche	<i>Larix decidua</i>	LADC
Douglasie, Douglastanne, Douglasfichte, Douglaskiefer	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	PSMN
<b>Laubhölzer</b>		
Buche, Rotbuche	<i>Fagus sylvatica</i>	FASY
Deutsche Eiche, Stieleiche, Sommerliche	<i>Quercus robur</i>	QCXE
Gemeine Esche, Hohe Esche	<i>Fraxinus excelsior</i>	FXEX

Die Eigenschaften von Holzarten können sich bedingt durch ihre Anatomie so stark voneinander unterscheiden, dass die handwerkliche und industrielle Verarbeitung in der Regel baumartenspezifisch angepasst sein muss.

## 2.1.2 Holzstrukturmerkmale

Aus makroskopischer Sicht ist Holz ein aus verschiedenen Zellen zusammengesetztes Dauergewebe. Bei genauerer Betrachtung unterscheiden sich Laub- und Nadelholz zellen deutlich u. a. in der Anordnung, der Zusammensetzung sowie in Form und Größe. Nadelholz ist im Gegensatz zu Laubholz entwicklungsgeschichtlich älter und ist mit nur zwei Zelltypen verhältnismäßig einfach und gleichmäßig aufgebaut. Laubholz weist als Hauptunterschied zum Nadelholz Gefäßzellen auf, die sich in Verteilung und Größe innerhalb der Laubholzarten wiederum erheblich voneinander unterscheiden (Wagenführ u. a. 2008).



(a) Deutliche Jahrringgrenzen mit hellem Frühholz und dunklerem Spätholz an einem Lärchenholzquerschnitt in einer Durchlichtaufnahme

(b) Weite Gefäße im Frühholz eines Eschenquerschnittes unter dem Rasterelektronenmikroskop

Abbildung 2.1: Jahrringe im Querschnitt von Laub- und Nadelholz [Quelle: Wagenführ u. a. (2008)]

**Jahrringe** Das Holzwachstum erfolgt im Wechsel der Jahreszeiten ungleichmäßig, wodurch im Querschnitt der meisten Holzarten mit bloßem Auge *Jahrringe* erkennbar sind. Bei Nadelhölzern sind die im Frühjahr gebildeten Zellen (das *Frühholz*) größer und besitzen dünnere Zellwände, die im Gesamtquerschnitt heller und weicher in Erscheinung treten. Die gegen Ende der Vegetationsperiode gebildeten Zellen (das *Spätholz*) dienen dagegen der Festigung und sind als dunkle, feste Abgrenzung der Jahrringe erkennbar. Bei Laubbäumen werden die Jahrringe eher durch unterschiedlich große Gefäßzellen markiert. Die größten Gefäße besitzen ringporige Laubbäume wie Eiche oder Esche, deren Gefäßzellen im Querschnitt sogar mit bloßem Auge erkennbar sind (Wagenführ u. a. 2008). Abbildung 2.1 stellt den Jahrringaufbau von Nadel- und Laubholz gegenüber.

**Verkernung** Den größten Flächenanteil im Querschnitt eines Stammes macht das *Kernholz* aus. Hier befinden sich keine lebenden Zellen mehr. Durch Stoffeinlagerungen und physiologische Veränderungen ist das Kernholz widerstandsfähig gegenüber Krankheiten. Ein deutlich herab- oder heraufgesetzter Feuchtigkeitsgehalt wirkt einem Pilzbefall entgegen. Bei einigen Baumarten werden im Kernholz Farbstoffe eingelagert, so dass sich das Kernholz farblich vom außenliegenden *Splintholz* abhebt. Beispiele für Baumarten mit Farbkernen sind Kiefer, Eiche oder Robinie. Das *Splintholz* umgibt als einen äußeren Ring das Kernholz und enthält lebende Zellen. Im Splintholz wird Wasser von den Wurzeln in Richtung Baumkrone geleitet, Reservestoffe werden geleitet und eingelagert. Splintholz ist weniger dauerhaft und damit anfälliger für holzerstörende Pilze und Insekten als Kernholz. Oftmals wird



das Splintholz vor einer weiteren Holzbearbeitung entfernt und nur das Kernholz verwendet (Wagenführ u. a. 2008).

**Sondergewebe** Wenn Bäume einer einseitigen Belastung wie beispielsweise einer Schiefstellung ausgesetzt sind, können sie dies bis zu einem gewissen Grad durch anatomische Reaktionen wieder ausgleichen. Hierbei werden auf einer Stammseite vermehrt Holzzellen gebildet, die sich anatomisch, chemisch und physikalisch-mechanisch von Normalholz unterscheiden. Die betroffenen Stammregionen werden als *Reaktionsholz* bezeichnet. Nadelbäume bilden typischerweise *Druckholz* mit einem hohen Ligninanteil, Laubbäume bilden *Zugholz* mit einem höheren Cellulosegehalt. Holz mit einem hohen Reaktionsholzanteil lässt sich schwerer bearbeiten, schwindet und verformt sich stärker als normales Holz. Eine weitere Sonderholzform ist das *Wundholz*, das an Verletzungen des Baumes oder um Fremdkörper gebildet wird. Es besitzt einen unregelmäßigen Faserverlauf, verzieht sich schneller und ist schwerer bearbeitbar als Normalholz (Wagenführ u. a. 2008).

### 2.1.3 Chemische Holzeigenschaften

Im Holz sind ungleichartige Elemente auf eine solche Weise räumlich verteilt und miteinander vernetzt, dass seine Eigenschaften gegenüber den Einzelkomponenten vorteilhafter sind. Holz ist somit auf makroskopischer Ebene ein Faserverbundwerkstoff. Auch auf mikroskopischer und submikroskopischer Ebene setzt sich der Verbundcharakter von Holz in den Zellwänden fort, Holz ist also auch ein Nanoverbundwerkstoff. Die Gerüstsubstanzen der Holzzellwände sind Cellulose, Hemicellulosen und Lignine, die in einem filigranen Gefüge zusammengesetzt sind. Innerhalb und in Hohlräumen außerhalb der Zellen befinden sich weitere, kleinere Moleküle, die Inhalts-, Begleit- oder Extraktstoffe genannt werden. Allgegenwärtig im Holz ist Wasser, das integraler Bestandteil der extrazellulären Matrix ist und auch innerhalb der Zellwände bis in die kleinsten Nanostrukturen des lignocellulosischen Verbundpolymers einzudringen vermag und dort mit den Gerüstsubstanzen und Inhaltsstoffen in Wechselwirkung tritt (Faix 2008).

**Cellulose** Cellulose ist zu einem Anteil von 40 – 50 % im Holz enthalten und setzt sich aus linearen Ketten von Anhydro- $\beta$ -D-Glucose (AHG) zusammen. Diese *Glucanketten* bündeln sich zu Elementarfibrillen und Mikrofibrillen. Die Glucanketten befinden sich überwiegend in strengen geometrischen Formen angeordnet und bildet kristalline Strukturen aus, die relativ unreaktiv und thermisch stabil sind. An



den Enden der Fibrillen gibt es jedoch Bereiche, in denen die Glucanketten zwar noch parallel, aber nicht mehr streng geometrisch angeordnet sind. Dies sind die parakristallinen Bereiche der Cellulose, an denen die meisten chemischen Reaktionen stattfinden. Zusammengesetzt ergeben die Fibrillen die Lamellenstruktur der Holzzellwand mit einer sich von Schicht zu Schicht verändernden Textur und bilden so ein poröses, mehrschichtiges Gitter (siehe Abbildung 2.2 auf Seite 11). Die durchschnittliche Anzahl von AHG-Einheiten, die die Ketten aufbauen, wird als *Polymerisationsgrad (DP)* bezeichnet. Der Polymerisationsgrad ist eine wichtige Kenngröße für die Einschätzung der Zugfestigkeit eines cellulosehaltigen Produktes wie beispielsweise Papier. Je höher der DP-Wert ist, desto höher ist die Zugfestigkeit. Holz besitzt DP-Werte um 7000, Baumwollcellulose beispielsweise um 14000 (Faix 2008; Hill 2006).

**Hemicellulosen** Die aus diversen Anhydrohexosen und -pentosen sowie Anhydrouronsäuren zusammengesetzten Hemicellulosen besitzen eine klebende Wirkung in Holz und Papier. Sie bilden generell weniger geordnete Strukturen aus als Cellulose. Einige Formen können dennoch kristalline Bereiche aufbauen (Hill 2006). Unter dem Einfluss der Hemicellulosen kann Holz in heißem Dampf plastisch verformt werden. Auch bei der thermischen Vergütung, die Holz witterungsbeständiger macht, spielen die Hemicellulosen eine wichtige Rolle (Faix 2008). Hemicellulosen stellen einen Großteil der freien OH-Gruppen, deren Anzahl in der Zellwand auf molekularer Ebene zu den wichtigsten Einflussfaktoren auf die Holzeigenschaften zählt (Hill 2006).

**Lignine** Nachdem der Aufbau der Zellwände durch Cellulosen und Hemicellulosen abgeschlossen ist, „verholzen“ sie durch Einlagerung von Ligninen. Diese Lignifizierung der Zellwände bedingt eine Druckfestigkeit von Sprossachse und Wurzel, die charakteristisch für Gehölze wie Bäume und Sträucher ist. Laubhölzer enthalten weniger Lignin als Nadelhölzer. In den gemäßigten Klimazonen liegt der Lignin-Anteil von Nadelhölzern bei ca. 21 %, der von Laubhölzern um die 27 %. Für die Papierherstellung wird das Lignin aus der Lignocellulose gelöst und abgetrennt, da ligninhaltiges Papier aufgrund von photochemischen Reaktionen zum Vergilben neigt (Faix 2008).

**Extraktstoffe** Die organischen und anorganischen Verbindungen, die innerhalb der Hohlräume zwischen den Zellen sowie im Zellinneren eingelagert sind, werden auch *Inhalts- und Begleitstoffe* oder *akzessorische Bestandteile* genannt. Sie können gleichmäßig im gesamten Gewebe vorkommen oder auf spezielle Leitungsgänge begrenzt