

D I P L O M A R B E I T  
M A S T E R ' S T H E S I S

**Steifigkeiten von Laubholz - Experimentelle  
Untersuchungen und mikromechanische  
Modellierung**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen  
Grades eines Diplom-Ingenieurs

unter der Anleitung von

Dipl.-Ing. Dr. techn. **Thomas Bader**  
Universitätsassistent

Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen  
Fakultät für Bauingenieurwesen  
Technische Universität Wien

und

Associate Prof. Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Karin de Borst**  
Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen  
Fakultät für Bauingenieurwesen  
Technische Universität Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Christoph Wikete**

Matr.Nr.: 05 25 888  
Langenloiserstraße 230  
A - 3491 Straß im Straßertale

Wien, im Jänner 2012

## Danksagung

Am Ende meines Studiums möchte ich mich nun bei Denjenigen bedanken die das überhaupt ermöglicht haben. Dabei möchte ich mich zuerst bei meinen Arbeitskollegen von der Technischen Universität Wien bedanken, wobei hier mein besonderer Dank Thomas Bader und Karin de Borst gilt. Diese haben mich während meiner Arbeitstätigkeit und bei der Erstellung dieser Arbeit tatkräftig unterstützt. Ebenso gilt mein Dank den beiden Institutsvorständen Prof. Josef Eberhardsteiner und Prof. Hans Georg Jodl, die mich den größten Teil meiner Studienzeit begleitet haben. Des Weiteren wäre die Erstellung dieser Arbeit ohne die tatkräftige Unterstützung von Wolfgang Dörner, Thomas Ters und Enrico Dall'Ara nicht möglich gewesen. Mein Dank gilt auch meinen Eltern und Verwandten, die mir bei Problemen immer zur Seite standen und mich bei der Umsetzung meiner Pläne gefördert haben. Ein großer Dank gehört meinen Studienkollegen, mit denen ich mich nicht nur gemeinsam dem Studium gewidmet habe, sondern auch die meiste Zeit außerhalb der Universität verbracht habe. Diese haben mir vor allem über schwierige Zeiten und bei der Lösung komplexer Probleme geholfen. Abschließend möchte ich mich auch, bei meinen Freunden von Zuhause bedanken, die mich ebenfalls in meinen Entscheidungen unterstützt und mir den notwendigen Rückhalt geboten haben.

## Kurzfassung

Da der heimische Wald zunehmend eine Wandlung vom Nadelholz zu Laubholz erlebt, soll diesem, im Hinblick auf die bautechnische Anwendung, mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden. Dazu soll untersucht werden, ob der komplexe Strukturaufbau von Laubhölzern im Vergleich zu Nadelhölzern mittels eines mathematischen Modells beschrieben werden kann. Dazu werden Laubhölzer mit möglichst unterschiedlichen Struktureigenschaften ausgewählt und in einer umfangreichen Serie an Experimenten untersucht. Begonnen wird dabei auf der Makroebene bis hin zur Mikroebene. Es werden dazu mechanische, strukturelle und chemische Untersuchungsmethoden verwendet.

Die Steifigkeiten werden dabei auf der Makroebene durch Quasistatische- und Ultraschall-Versuche und auf der Zellwandebene mittels Nanoindentations-Versuche bestimmt. Die Mikrofibrillenwinkeln der S2-Schicht der Zellwand wird anhand von Mikroskopaufnahmen gemessen, ebenso wie die Volumenanteile an Gefäßen, Holzstrahlen, Zellwandmaterial der Holzstrahlen und Früh- und Spätholz. Die chemischen Zusammensetzung der Holzarten werden zufolge thermogravimetrischen Analysen und Extraktstoffbestimmungen ermittelt.

Anschließend wird ein mathematisches Modell aufgestellt um die mechanischen Eigenschaften der Laubhölzer unter Zuhilfenahme der strukturellen und chemischen Versuchsergebnisse zu berechnen. Dazu wird ein bestehendes Modell für die Beschreibung von Nadelhölzern auf die Strukturmerkmale der Laubhölzer adaptiert. Für die Abbildung der komplexen Eigenschaften wird von Homogenisierungsverfahren Gebrauch gemacht. Nach einer Validierung des Modells, durch Vergleich von experimentellen Ergebnissen mit den zugehörigen Modellvorhersagen, wird der Einfluss einiger struktureller, physikalischer und chemischer Eigenschaften untersucht.

## Abstract

Since the Austrian forest is increasingly changing from softwood to hardwood, hardwood shall receive more attention, particularly in view of its constructive application. The hierarchical structure of hardwood is more complex than that of softwood. So we are interested to analyze if it is possible to mathematically describe the heterogeneous structure of hardwood. First we select different species of hardwoods with specific characteristics. After that we perform some mechanical, structural and chemical tests on the samples at different length scales. Stiffnesses are investigated by means of quasistatic tests and ultrasonic tests on the macroscopic scale and by means of nanoindentation tests on the cell scale. Microfibril angles of the S2 cell layer are measured in microscopy images. In addition, microscopy images are used to evaluate volume fractions of vessels, ray cells, the cell wall content of ray cell bundles and earlywood and latewood. The chemical composition is derived from thermogravimetric analysis data and from the determination of extractive contents. For the mathematical description we use an existing program based on homogenization strategies which was written to calculate the stiffness of softwood. In this program we implement the specific characteristics of hardwood. After that we validate the program by comparing model predications with corresponding mechanical testing results. At last we analyze different structural, physical and chemical parameters and their effects on the model results.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Konzept</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Zielsetzung . . . . .	2
1.3	Struktur der Arbeit . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>3</b>
2.1	“Holz” . . . . .	3
2.2	Getestete Laubhölzer . . . . .	4
2.2.1	Heimische Laubhölzer . . . . .	5
2.2.1.1	Buche ( <i>Fagus sylvatica</i> ) . . . . .	5
2.2.1.2	Eiche ( <i>Quercus robur</i> ) . . . . .	6
2.2.1.3	Esche ( <i>Fraxinus excelsior</i> ) . . . . .	7
2.2.1.4	Linde ( <i>Tillia cordata Mill</i> ) . . . . .	8
2.2.1.5	Platane ( <i>Platanus</i> ) . . . . .	9
2.2.2	Tropische Hölzer . . . . .	10
2.2.2.1	Ipé ( <i>Tabebuia serratifolia</i> ) . . . . .	10
2.2.2.2	Manil ( <i>Symphonia globulifera</i> ) . . . . .	11
2.2.2.3	Satiné ( <i>Brosimum rubescens</i> ) . . . . .	11
2.2.2.4	Teak ( <i>Tectona grandis</i> ) . . . . .	12
2.2.2.5	Virola ( <i>Virola michelii</i> ) . . . . .	13
2.3	Experimente . . . . .	14
2.3.1	Quasistatischer Versuch . . . . .	15
2.3.2	Ultraschall-Versuch . . . . .	16
2.3.3	Nanoindentation . . . . .	17
2.3.4	Mikrofibrillenwinkelbestimmung . . . . .	17
2.3.5	Thermogravimetrische Analyse . . . . .	18
2.3.6	Extraktstoffbestimmung . . . . .	21
2.3.7	Bestimmung des Anteils an Gefäßen und Holzstrahlen . . . . .	23
2.3.8	Bestimmung des Zellwandanteils der Holzstrahlen . . . . .	24
2.3.9	Bestimmung der Verhältnisse des Früh- und Spätholzes . . . . .	24
2.3.10	Bestimmung der Faserabweichung . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Mikromechanische Modellierung</b>	<b>27</b>
3.1	Grundlagen der Homogenisierung . . . . .	27
3.1.1	Kontinuums-Mikromechanik . . . . .	28
3.1.2	Einheitszellenmethode . . . . .	30
3.1.3	Laminattheorie . . . . .	30
3.2	Ausgangsmodell für Nadelhölzer [3] . . . . .	30
3.2.1	<b>Schritt Ia:</b> Steifigkeit des Polymer-Netzwerkes . . . . .	31

3.2.2	<b>Schritt Ib:</b> Steifigkeit der Zellulosefasern . . . . .	32
3.2.3	<b>Schritt II:</b> Steifigkeit des Zellwandmaterials . . . . .	32
3.2.4	<b>Schritt III:</b> Steifigkeit der Zellstruktur . . . . .	32
3.3	Laubholzmodell . . . . .	33
3.3.1	Schritte III bis V des ringporigen Laubholzmodells . . . . .	33
3.3.1.1	<b>Schritt III:</b> Steifigkeit der Zellstruktur (alternativ) . . . . .	33
3.3.1.2	<b>Schritt IVa und IVb:</b> Steifigkeit des Früh- und Spätholzes . . . . .	35
3.3.1.3	<b>Schritt V:</b> Laubholz . . . . .	35
3.3.2	Schritte IV bis V des zerstreutporigen Laubholzmodells . . . . .	35
3.3.2.1	<b>Schritt IV:</b> Steifigkeit des Früh- und Spätholzes . . . . .	35
3.3.2.2	<b>Schritt V:</b> Laubholz . . . . .	35
3.4	Parameterstudie . . . . .	36
3.4.1	Variation der Eingangsgrößen . . . . .	38
3.4.1.1	Ergebnisse der Variation der Dichte . . . . .	39
3.4.1.2	Ergebnisse der Variation des Seitenverhältnisses sowie des Lambdas . . . . .	40
3.4.1.3	Ergebnisse der Variation des Feuchtegehaltes . . . . .	41
3.4.1.4	Ergebnisse der Variation des Mikrofibrillenwinkels . . . . .	42
3.4.2	Variation mehrerer Variablen . . . . .	43
3.4.2.1	Ergebnisse der Variationen der Dichte der Probe und des Feuchtegehaltes . . . . .	43
3.4.2.2	Ergebnisse der Variation der Dichte der Probe und der Form der Lumen . . . . .	44
3.4.3	Schlussfolgerung . . . . .	44
3.5	Validierung . . . . .	47
3.6	Sensibilitätsanalyse . . . . .	51
3.6.1	Variation einzelner Eingangsgrößen . . . . .	53
3.6.1.1	Ergebnisse der Variation des Zellulosegehaltes . . . . .	53
3.6.1.2	Ergebnisse der Variation der Form der Gefäße . . . . .	53
3.6.1.3	Ergebnisse der Variation der Form der Holzstrahlen . . . . .	54
3.6.2	Variation mehrerer Eingangsgrößen . . . . .	55
3.6.2.1	Ergebnisse der Variation der Dichte und der Form der Lumen . . . . .	55
3.6.2.2	Ergebnisse der Variation des Mikrofibrillenwinkels und der Dichte der Holzstrahlen . . . . .	57
3.6.2.3	Ergebnisse der Variation der Volumenanteile und der Form der Holzstrahlen . . . . .	57
3.6.2.4	Ergebnisse der Variation der Volumenanteile und der Form der Gefäße . . . . .	59

# Kapitel 1

## Konzept

### 1.1 Motivation

Die Motivation dieser Arbeit begründet sich darin, dass es auf Grund einer klimabedingten Umstrukturierung des heimischen Baumbestandes von Nadelholz zu Laubholz ein immer größeres Interesse an der Nutzbarmachung dieser gibt [9]. Da in Österreich die Wald- und Forstwirtschaft einen hohen Stellenwert genießt und dadurch einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor darstellt, gibt es ein großes Bestreben Untersuchungen diesbezüglich durchzuführen. Weitere ausschlaggebende Gründe sind zum Beispiel, dass die heimische Waldfläche zirka 4 Millionen Hektar ausmacht, in denen mehr als 1 Milliarde Kubikmeter des Rohstoffes "Holz" heranwächst [1] und dass der  $CO_2$ -Haushalt stärker Beachtung findet, in welchem der Rohstoff "Holz" als neutral gilt. Die Tabelle 1.1 veranschaulicht dabei die momentane Zusammensetzung des heimischen Waldes [1]. Der Wald

Nadelhölzer (Fichte, Tanne, Lärche, Kiefer und Sonstige)	66,8 %
Laubhölzer (Buche, Eiche und Sonstige)	23,9 %
Rest (Blößen, Lücken und Sträucher)	9,3 %

Tabelle 1.1: Tabelle der Zusammensetzung des heimischen Baumbestandes laut [1]

dient des Weiteren seit Anbeginn der Zeit dem Menschen als Rohstoffquelle für Holz als Baumaterial, als Lebensraum, Nahrungsquelle und Energiespender. Auf Grund des hohen Stellenwertes von Holz als Baumaterial wurde bereits relativ früh eine Charakterisierung der unterschiedlichen Eigenschaften von Holzarten durchgeführt. Die folgende Auflistung soll einen groben Überblick geben:

Festigkeit	Dichte	Feuerwiderstand
Bearbeitbarkeit	Härte	Witterungsbeständigkeit

Auf Grund des äußerst komplexen Aufbaues, gibt es eine vielfache Variation in den einzelnen Holzarten. Diese große Vielfältigkeit macht die Verwendung als Baumaterial jedoch sehr schwierig, da es nicht möglich ist eine gleichbleibende Qualität zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden bis heute vorwiegend Nadelhölzer als Baumaterial verwendet, da

diese einen einfacheren Aufbau aufweisen und die Unterschiede nicht derartig ausgeprägt sind. Laubhölzer werden hingegen eher einer thermischen Verwertung zugeführt.

Aber auch das Vorkommen spielt bei der Verwendung eine große Rolle. Wie anhand der Tabelle 1.1 zu erkennen ist, besteht der heimische Wald zu 66,8 % aus Nadelholz, wodurch momentan noch ausreichend Reserven vorhanden sind.

## 1.2 Zielsetzung

In dieser Arbeit soll nun untersucht werden, wie strukturelle Unterschiede auf der Mikroebene, beginnend bei der chemischen Zusammensetzung, die Eigenschaften auf der Makroebene beeinflussen. Im Speziellen beinhaltet diese Diplomarbeit eine Erweiterung eines bereits bestehenden mikromechanischen Modells laut [3], in welchem für Nadelhölzer Material- und Struktureigenschaften auf Mikroebene analysiert werden um deren Effekt auf Makroebene zu beschreiben. Das Hauptinteresse dieser Arbeit liegt in der Vorhersage der Steifigkeitseigenschaften auf Grund des strukturellen Aufbaues des Laubholzes. Dafür wird das bestehende mathematische Modell um Eigenschaften der Laubhölzer erweitert. Die berechnete Steifigkeit repräsentiert dabei im Wesentlichen einen Mittelwert über die Gesamtheit aller betrachteter Ebenen und somit den Einfluss der berücksichtigten Struktur- und Materialeigenschaften. Als Leitgröße wird die Dichte der Probe verwendet. Diese kann einfach ermittelt werden. Weitere Struktureigenschaften von Laubhölzer sollen im Rahmen dieser Arbeit analysiert werden.

## 1.3 Struktur der Arbeit

Auf Grund der in Abschnitt 1.2 formulierten Ziele ergibt sich nun eine Strukturierung dieser Arbeit wie folgt:

- Experimentelle Untersuchungen
- Mikromechanische Modellierung
- Schlussfolgerungen

Dabei werden im Kapitell *Experimentelle Untersuchungen* die mechanischen, chemischen und strukturellen Versuche beschrieben und die Ergebnisse dargestellt. Im anschließenden Kapitel *Mikromechanische Modellierung* werden dann das Ausgangsmodell und die entsprechenden Erweiterungen beschrieben. Ein Interpretation der Ergebnisse erfolgt später im Kapitel *Schlussfolgerungen*.

## Experimentelle Untersuchungen

### 2.1 “Holz”

Holz ist ein Material aus einer schichtenweise aufgebauten Struktur, welche am Querschnitt “Baum” beginnt und sich bis auf die chemische Ebene erstreckt. Der Querschnitt des Baumes gliedert sich grob von innen nach außen in Mark, Kernholz, Splintholz, Kambium, Bast und die Rinde. Jede dieser Schichten erfüllt eine andere Aufgabe im Baum und weist daher unterschiedliche Eigenschaften auf. Die Rinde schützt zum Beispiel den Baum vor äußeren Einflüssen, während der Bast für den Nährstofftransport verantwortlich ist. Das Kambium bildet die Zellen des Bastes und die Zellen der Holzstruktur. Das Splintholz ist vorwiegend für den Wassertransport im Baum verantwortlich, bis es zur Verkernung kommt, dann spricht man von Kernholz. Das Mark stellt das Zentrum des Querschnitts dar und besteht hauptsächlich aus abgestorbenen Zellen. Das Splint- und Kernholz gliedern sich des Weiteren in Jahrringe, welche sich aus dem klimabezogenen Jahreszeitwechsel ergeben. Dadurch bildet der Baum ein Frühholz, welches sich im Frühjahr bildet und für den Wassertransport verantwortlich ist, und ein Spätholz, welches hauptsächlich der Tragfunktion dient. Der Wassertransport im Baum wird in radialer Richtung durch sogenannte Holzstrahlen ermöglicht, welche mit dem längs ausgerichteten Leitungsgewebe mittels Tüpfel verbunden sind. Dieses kann unterschiedlich aufgebaut sein und ermöglicht die Einteilung der Hölzer in zwei Gruppen, und zwar in **Nadelholz** und **Laubholz**. Die Struktur von Nadelholz wird durch ein Leitungs-Festgewebe (Tracheiden) gebildet. Dieses erfüllt sowohl eine Tragfunktion als auch die Funktion der Wasserführung im Stamm. Der Aufbau der Laubhölzer gliedert sich in Leitungs- (Tracheenen), Fest- und Speichergewebe, wobei jedes Gewebe seine eigene Funktion besitzt. Dadurch weist der Aufbau der Laubhölzer eine weitaus komplexere Struktur auf als der der Nadelhölzer. Während die Nadelhölzer nur einen Strukturunterschied zwischen Früh- und Spätholz zeigen, aber ansonsten einen konstanten Aufbau besitzen, sind die Laubhölzer sehr diffus strukturiert. Zum Beispiel kann die Anordnung der Gefäße im Jahrring auf verschiedene Arten erfolgen, und zwar:

1. **ringporige Hölzer:** Gefäße nur im Frühholz vorhanden
2. **halbringporig Hölzer:** Gefäße im Früh- und Spätholz, jedoch mit deutlichem Unterschied in der Größe
3. **zerstreutporige Hölzer:** Gefäße über den Jahrring gleichmäßig verteilt

Der Aufbau der Zellwände ist für Nadel- und Laubholz ident. Sie bestehen aus einem umschlossenen Holhraum, dem Lumen, dem eine dünne Trennwand, die Tertiärwand folgt. Daraufhin folgt die Tragstruktur, die Sekundärwände, und als Abschluss die Primärwand. Die Verbindung zwischen den einzelnen Zellen ergibt die Mittellamelle. Die Sekundärwände lassen sich des Weiteren noch in die S1-, S2- und S3-Schichten unterteilen. Der größte Anteil an der Zellwanddicke hat die S2-Schichte. Diese übernimmt die Haupttragfunktion im Querschnitt und ist somit von besonderem Interesse für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften. Sie besteht hauptsächlich aus Zellulose-Fibrillen, welche in einer Spirale angeordnet sind. In Bezug zur Längsachse schließt diese einen Winkel ein, den man als Mikrofibrillenwinkel bezeichnet. Da die Ausrichtung der Zellulosefasern maßgeblich für die Verteilung der Festigkeiten ist, kommt dem Mikrofibrillenwinkel große Bedeutung zu. Da sich die meiste Masse der Zellwand in der S2-Schichte konzentriert, wird im weiteren Verlauf keine Trennung zwischen den chemischen Bestandteilen der einzelnen Schichten durchgeführt. Tatsächlich variiert der Anteil jedoch sehr stark in den unterschiedlichen Schichten. Die Einteilung der chemischen Bestandteile erfolgt in die Zellulose, die Hemizellulosen, das Lignin und die Extraktstoffe. Die Tragfunktion wird von den ausgerichteten Fasern bestehend aus Zellulose übernommen, während die Hemi-zellulosen, die weitreichend verästelt ist, als Kittsubstanz dienen. Des Weiteren wird als Füll- und Kittsubstanz in der Matrix Lignin verwendet. Die Extraktstoffe stellen eine gewisse Schutzfunktion gegen Schädlinge dar und können Geruch und Farbe des Holzes beeinflussen [15]. Die Frage ist nun, wie sich der beschriebene Strukturaufbau auf die mechanischen Eigenschaften der Hölzer, und hier im Speziellen jene der Laubhölzer, auswirkt.

## 2.2 Getestete Laubhölzer

Für die experimentellen Untersuchungen wurden zehn strukturell sehr unterschiedliche Laubholzarten ausgewählt. Die beiden wichtigsten Auswahlkriterien im Vorfeld waren die Anordnung der Gefäße sowie die Größe und Form der Holzstrahlen. Auf Grund dessen wurden folgende heimische Hölzer gewählt:

### Heimische Hölzer:

1. Buche (*Fagus sylvatica*)
2. Eiche (*Quercus robur*)
3. Esche (*Fraxinus excelsior*)
4. Linde (*Tilia cordata Mill*)
5. Platane (*Platanus*)

Aus früheren Versuchen standen des Weiteren noch Probestücke einiger tropischer Holzarten zur Verfügung. Diese wurden ebenfalls für die experimentellen Untersuchungen

herangezogen, um einerseits den bereits vorhandene Datensatz für diese Holzarten zu erweitern und andererseits das Spektrum an mikrostrukturellen Merkmalen in den experimentellen Untersuchungen zu ergänzen. Die dabei verwendeten Arten sind in der nachfolgenden Auflistung zusammengefasst:

### Tropische Hölzer:

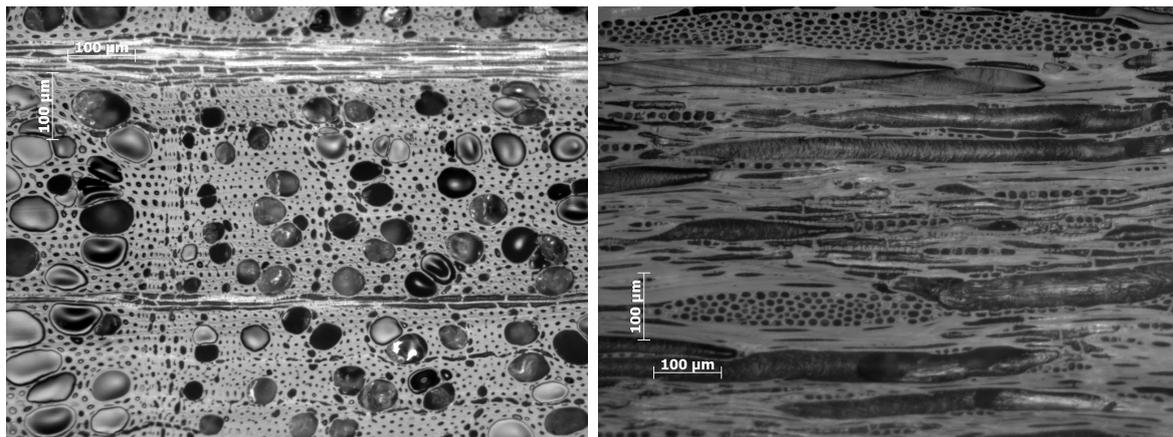
1. Ipé (*Tabebuia serratifolia*)
2. Manil (*Symphonia globulifera*)
3. Satiné (*Brosimum rubescens*)
4. Teak (*Tectona grandis*)
5. Virola (*Virola michelii*)

Im Folgenden werden Anatomie und Herkunft der einzelnen Holzarten genauer erläutert.

## 2.2.1 Heimische Laubhölzer

### 2.2.1.1 Buche (*Fagus sylvatica*)

Die Buche kommt in West-, Mittel- und Südeuropa vor und stellt zirka 10 % des dort vorkommenden Baumbestandes dar. Auf Grund der Färbung kann man sie des Weiteren noch in die sogenannte Rotbuche und die Weißbuche unterteilen. Die Jahrringgrenze (siehe Abbildung 2.1(a)) ist durch das Fehlen von Gefäßen in diesem Bereich deutlich zu erkennen. Die zahlreich vorhandenen Holzstrahlen sind mit dem bloßen Auge zu sehen. Die Gefäße sind im Querschnitt zerstreutporig, einzeln oder in Gruppen angeordnet. In Richtung des Spätholzes nimmt die Anzahl und Größe der Gefäße leicht ab, wie anhand der Abbildung 2.1(a) zu erkennen ist. Der Durchmesser der Gefäße beträgt zwischen 8 und 85  $\mu\text{m}$  [14]. Die Holzstrahlen (siehe Abbildung 2.1(b)) kommen einzellig bis zweizellig



(a) Querschnitt

(b) Tangentialschnitt

Abbildung 2.1: Mikroskop-Aufnahmen der Buche

oder mehrzellig im Querschnitt vor. Die Anordnung der mehrzelligen Holzstrahlen erfolgt in regelmäßigen Abständen homogen über den Querschnitt verteilt. Eine Besonderheit der Buche besteht darin, dass sich die Holzstrahlen im Bereich der Jahrringgrenze verbreitern. Die Breite der Holzstrahlen beträgt zwischen 20 und 60  $\mu\text{m}$  bei einzelligen und

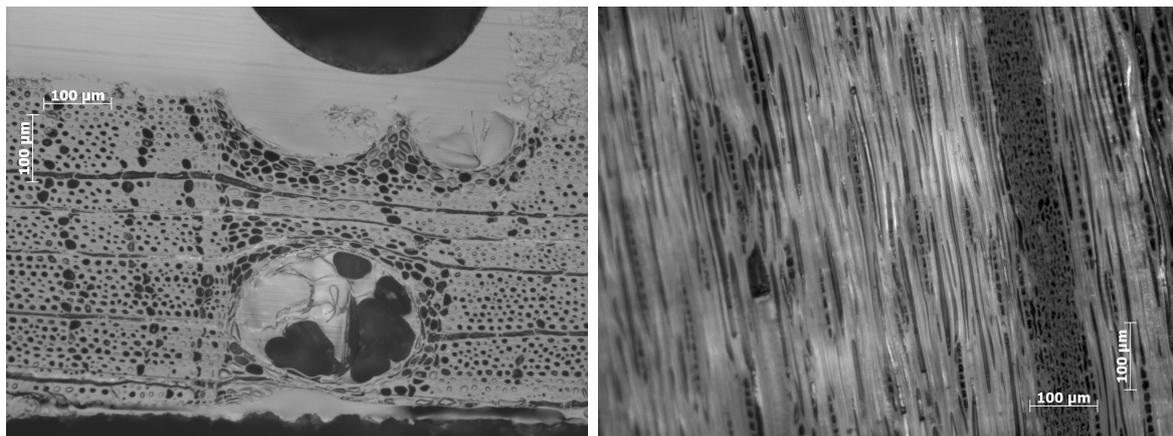
zwischen 30 und 200  $\mu\text{m}$  bei mehrzelligen Holzstrahlen [14]. Die mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften der Buche aus der Literatur [14] sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Zugfestigkeit	57 bis 180 $\text{N}/\text{mm}^2$
E-Modul	10.000 bis 18.000 $\text{N}/\text{mm}^2$
Rohdichte	540 bis 910 $\text{kg}/\text{m}^3$
Porenanteil	etwa 55 %
Holzstrahlenanteil	11,2 bis 21,2 %
Gefäßanteil	24,6 bis 52,5 %
Zellulosegehalt	33,7 bis 46,4 %

Tabelle 2.1: Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Buche [14]

### 2.2.1.2 Eiche (*Quercus robur*)

Die Eiche kommt in den östlichen und nordöstlichen Gebieten der USA, im südöstlichen Kanada und in Mittel- und Südeuropa als Amerikanische Rot- oder Weißeiche und in Europa bis Kleinasien als Stiel- oder Traubeneiche vor. Abbildung 2.2(a) zeigt den Querschnitt der Eiche, in dem die großen Gefäße bereits mit bloßem Auge zu erkennen und nur im Frühholz angeordnet sind. Im Spätholzbereich befinden sich hauptsächlich kleinere Gefäße, die einzeln und in radialen geschlängelten Reihen situiert sind. Die Größe der Gefäße beträgt im Frühholz zwischen 150 und 350  $\mu\text{m}$ , im Spätholz nur 30 bis 140  $\mu\text{m}$  [14]. Auf Grund der Anordnung der Gefäße gehört die Eiche zu den ringporigen Hölzern. Abbildung 2.2(b) zeigt den Tangentialschnitt der Eiche, in dem die Holzstrahlen sowie



(a) Querschnitt

(b) Tangentialschnitt

Abbildung 2.2: Mikroskop-Aufnahmen der Eiche

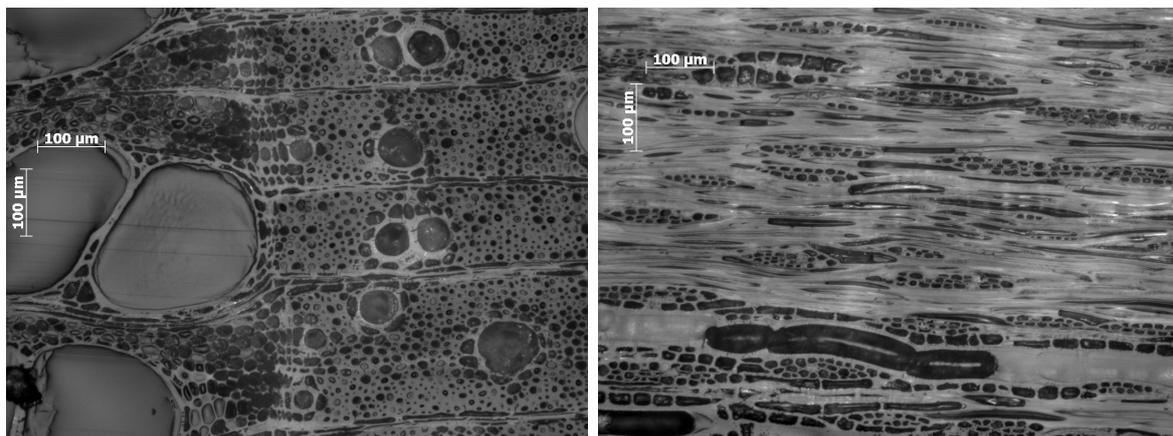
die Gefäße mit bloßem Auge zu erkennen sind. Die Eiche besitzt dabei zwei unterschiedliche Arten von Holzstrahlen, und zwar einzellige und mehrzellige, die in unregelmäßigen Abständen angeordnet sind. Die einzelligen Holzstrahlen weisen dabei eine Breite von 8 bis 25  $\mu\text{m}$  auf, während die mehrzelligen Holzstrahlen, die bis zu 25 Zellen in der Breite aufweisen können, 500 bis 1000  $\mu\text{m}$  breit sind [14]. Die mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften der Eiche aus der Literatur [14] sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Zugfestigkeit:	50 bis 180 $N/mm^2$
E-Modul:	9.200 bis 13.500 $N/mm^2$
Rohdichte:	430 bis 960 $kg/m^3$
Porenanteil:	57 %
Holzstrahlenanteil:	engringig 14,4 bis 17,9 % weitringig 18,1 bis 33,0 %
Gefäßanteil:	engringig 23,5 bis 43,7 % weitringig 3,9 bis 13,0 %
Zellulosegehalt:	37,6 bis 42,8 %

Tabelle 2.2: Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Eiche [14]

### 2.2.1.3 Esche (*Fraxinus excelsior*)

Die Esche ist in Europa bis Mittlerrussland und Vorderasien beheimatet. Sie besitzt ein weißliches breites Splintholz, welches das gelblich bis rötlich weiße Kernholz umgibt. Die Jahrringgrenze sowie die Gefäße im Frühholz sind mit dem bloßen Auge zu erkennen. Die in Abbildung 2.2(a) dargestellte Holzanatomie der Esche veranschaulicht die Verteilung der Gefäße über den Querschnitt. Holzstrahlen und Späthholzgefäße sind generell nur mittels einer Lupe oder eines Mikroskops zu erkennen. Die Esche zählt so wie die Eiche zu den ringporigen Hölzern. Im Frühholzbereich kommen die Gefäße einzeln und paarweise sowie mehrreihig vor, während sie im Späthholzbereich ebenfalls paarig in radialen kurzen Gruppen angeordnet sind. Sie erreichen dabei eine Größe zwischen 60 und 350  $\mu m$  im Frühholz und zwischen 15 und 130  $\mu m$  im Späthholz [14]. Die Holzstrahlen, die im Tan-



(a) Querschnitt

(b) Tangentialschnitt

Abbildung 2.3: Mikroskop-Aufnahmen der Esche

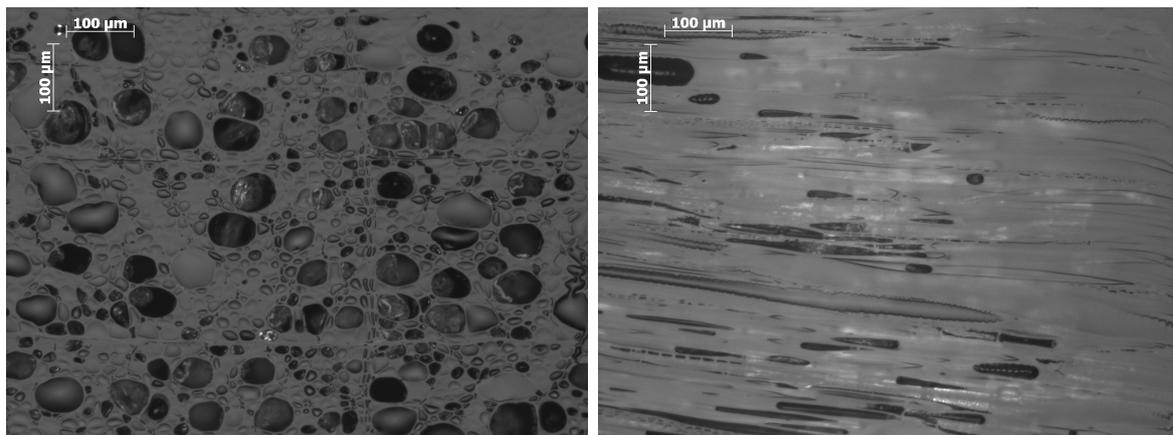
gentialschnitt in Abbildung 2.3(b) zu erkennen sind, sind unregelmäßig und stellenweise stockwerkartig angeordnet. Sie bestehen aus ein bis fünf Zellen mit einer Breite von 23 bis 60  $\mu m$  [14]. Die mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften der Esche aus der Literatur [14] sind in Tabelle 2.3 zusammengefasst.

Zugfestigkeit:	70 bis 293 $N/mm^2$
E-Modul:	4.400 bis 18.100 $N/mm^2$
Rohdichte:	450 bis 860 $kg/m^3$
Porenanteil:	57 %
Holzstrahlenanteil:	13,9 bis 16,0 %
Gefäßanteil:	4,7 bis 21,3 %
Zellulosegehalt:	40,9 bis 46,8 %

Tabelle 2.3: Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Esche [14]

#### 2.2.1.4 Linde (*Tilia cordata Mill*)

Das Vorkommen der Linde ist vorwiegend in Europa. Die Linde gehört zu den zerstreutporigen Laubhölzern. Die Jahrringgrenze ist undeutlich, und die Gefäße und Holzstrahlen sind erst unter einer Lupe zu erkennen. Die Gefäße sind zerstreut über den gesamten Querschnitt, entweder einzeln oder paarig, in kurzen radialen Gruppen und in unregelmäßigen Nestern angeordnet (siehe Abbildung 2.4(a)). Die Jahrringgrenze ist dabei deutlich zu erkennen. Der Durchmesser der Gefäße beträgt zwischen 20 und 90  $\mu m$  [14].



(a) Querschnitt

(b) Tangentialschnitt

Abbildung 2.4: Mikroskop-Aufnahmen der Linde

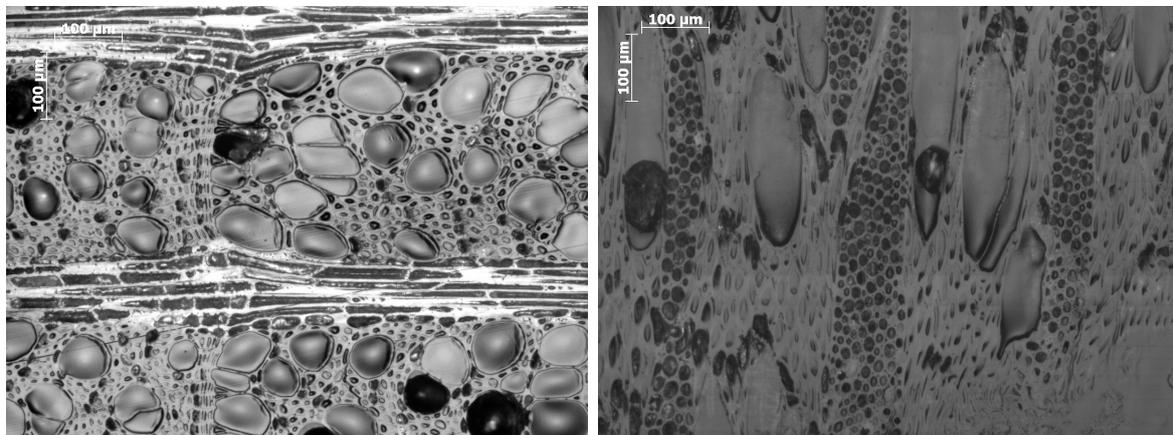
Die Holzstrahlen sind unregelmäßig angeordnet und verbreitern sich an der Jahrringgrenze. Sie bestehen aus 1 bis 6 Zellen und haben eine Breite zwischen 10 und 30  $\mu m$  [14] (siehe Abbildung 2.4(b)). Die mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften der Linde aus der Literatur [14] sind in Tabelle 2.4 zusammengefasst.

Zugfestigkeit:	23 bis 145 $N/mm^2$
E-Modul:	5.800 bis 17.200 $N/mm^2$
Rohdichte:	350 bis 630 $kg/m^3$
Porenanteil:	etwa 68 %
Holzstrahlenanteil:	8 bis 10 %
Gefäßanteil:	17 %
Zellulosegehalt:	35,2 bis 48,2 %

Tabelle 2.4: Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Linde [14]

### 2.2.1.5 Platane (*Platanus*)

Das Vorkommen der Platane liegt in Europa mit Ausnahme von Nord- und Nordosteuropa. Das Kernholz der Platane ist rötlichgrau über rotbraun bis hin zu braun. Das Splintholz ist eher weißlich bis gelblich, manchmal auch leicht rötlich. Die Jahrringgrenze sowie die Holzstrahlen kann man mit dem bloßen Auge erkennen. Die Holzstrahlen bestimmen das Strukturbild sehr stark. Gefäße können erst mit Hilfe einer Lupe erkannt werden (siehe Abbildung 2.5(a)). Die Platane gehört zu den zerstreutporigen Laubhölzern, da die Gefäße diffus über den gesamten Jahrring verteilt sind. Sie sind meistens einzeln angeordnet, selten paarweise oder in Gruppen. Die Gefäße sind relativ klein mit einem Durchmesser von 30 bis 105  $\mu m$  [14]. Die in Abbildung 2.5(b) dargestellten Holzstrahlen



(a) Querschnitt

(b) Tangentialschnitt

Abbildung 2.5: Mikroskop-Aufnahmen der Platane

sind unregelmäßig verteilt und besitzen im Bereich der Jahrringgrenze eine Verbreiterung. Sie bestehen aus 2 bis 14 Zellen mit einer Breite von 30 bis 200  $\mu m$  [14]. Die mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften der Platane aus der Literatur [14] sind in Tabelle 2.5 zusammengefasst.

Zugfestigkeit:	etwa 98 $N/mm^2$
E-Modul:	8.600 bis 12.700 $N/mm^2$
Rohdichte:	420 bis 680 $kg/m^3$
Porenanteil:	etwa 61 %
Holzstrahlenanteil:	etwa 31 %
Gefäßanteil:	etwa 29 %
Zellulosegehalt:	41,1 bis 50,7 %

Tabelle 2.5: Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Platane [14]

## 2.2.2 Tropische Hölzer

### 2.2.2.1 Ipé (*Tabebuia serratifolia*)

*Tabebuia serratifolia* ist in Mittel- und Südamerika heimisch. Die Jahrringe sowie die Gefäße sind mit dem freien Auge zu erkennen. Die Jahrringgrenze ist jedoch relativ unscharf. Das Kernholz ist braun, grün bis gelb mit Farbstreifen, das Splintholz ist dagegen farblich deutlich abgesetzt. Die Ipé gehört zu den zerstreutporigen Laubhölzern. Die in Abbildung 2.6(a) dargestellten Gefäße sind meist in kurzen radialen 2- bis 3-reihigen Bahnen, einzeln oder paarweise angeordnet. Die Größe der Gefäße beträgt zwischen 60 bis 175  $\mu m$  [14]. Die in Abbildung 2.6(b) dargestellten Holzstrahlen sind stockwerkartig

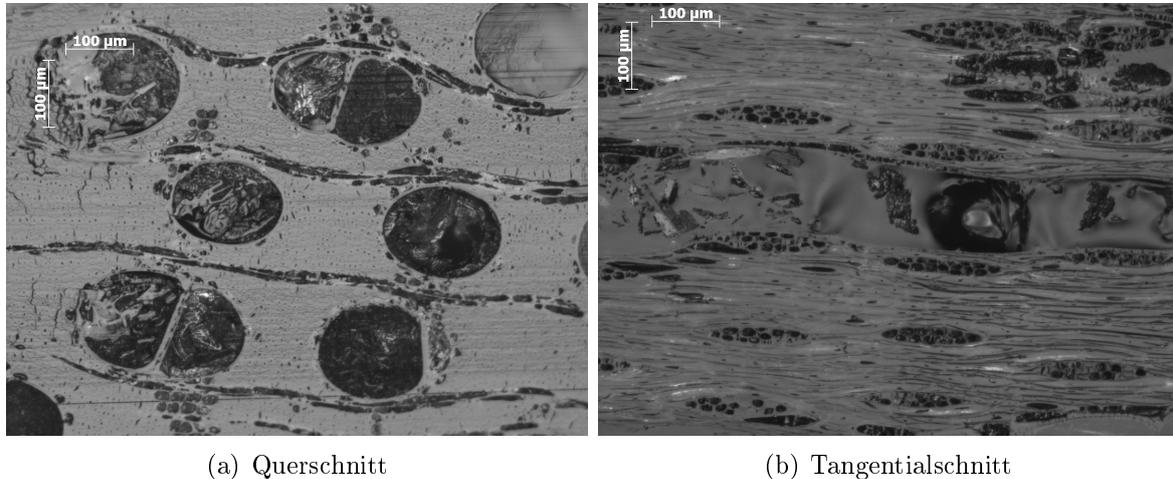


Abbildung 2.6: Mikroskop-Aufnahmen der Ipé

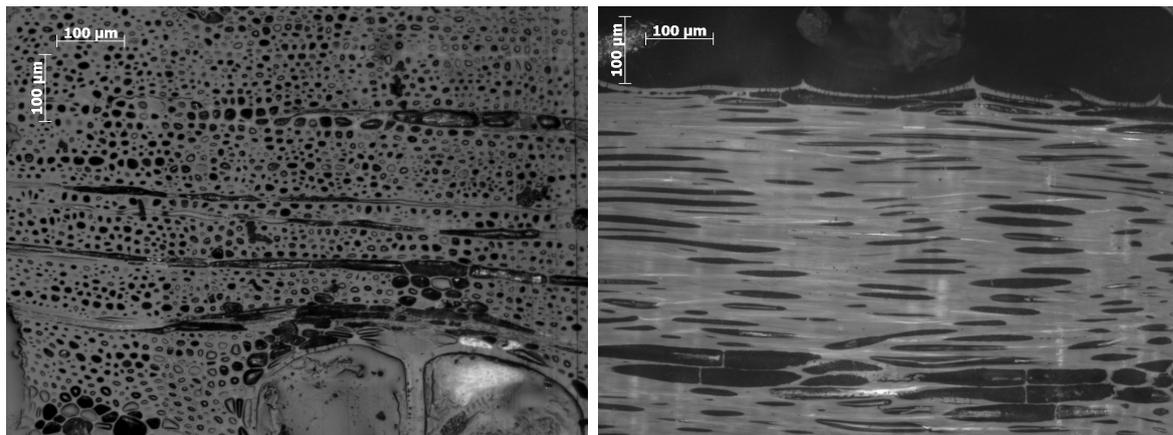
mit einer Breite von 2 bis 3 Zellen angeordnet und weisen daher eine Breite von 10 und 50  $\mu m$  [14]. Die mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften der Ipé, aus der Literatur [14] sind in Tabelle 2.6 zusammengefasst. Auf Grund der Herkunft standen jedoch nicht viel Literaturdaten zur Verfügung.

E-Modul:	18.800 $N/mm^2$
Rohdichte:	960 bis 1.100 $kg/m^3$

Tabelle 2.6: Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Ipé [14]

### 2.2.2.2 Manil (*Symphonia globulifera*)

*Symphonia globulifera* ist in Mexiko und Mittelamerika bis in das tropische Südamerika sowie im tropischen Afrika heimisch. Die Jahrringe können in manchen Fällen mit dem bloßen Auge erkannt werden oder auch nicht. Manil verfügt aber über relativ auffallend große Gefäße die ohne Lupe zu erkennen sind (siehe Abbildung 2.7(a)). Das Kernholz ist braun bis gelb. Das Splintholz setzt sich farblich deutlich vom Kernholz ab, da es hellgelblich bis weiß ist. Sie gehört zu den zerstreutporigen Laubhölzern. Die Gefäße sind einzeln oder paarweise in kurzen radialen Reihen angeordnet. Der Gefäßdurchmesser beträgt zwischen 150 bis 250  $\mu\text{m}$  [11]. Die in Abbildung 2.7(b) dargestellten Holzstrahlen



(a) Querschnitt

(b) Tangentialschnitt

Abbildung 2.7: Mikroskop-Aufnahmen der Manil

sind in 2 bis 4 zelligen Reihen angeordnet mit einer Breite zwischen 20 bis 50  $\mu\text{m}$  [11]. Die mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften der Manil aus der Literatur [11] sind in Tabelle 2.7 zusammengefasst. Auf Grund der Herkunft standen jedoch nicht viele Literaturdaten zur Verfügung.

Rohdichte: 650 bis 750  $\text{kg}/\text{m}^3$

Tabelle 2.7: Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Manil [11]

### 2.2.2.3 Satiné (*Brosimum rubescens*)

*Brosimum Rubescens* ist im tropischen Teil Südamerika beheimatet. Die Jahrringgrenzen sind undeutlich bis nicht zu erkennen. Das Kernholz ist rötlichbraun, und das Splintholz setzt sich farblich deutlich ab. *Brosimum rubescens* gehört zu den zerstreutporigen Laubhölzern. Die Gefäße sind diffus über den gesamten Jahrring verteilt (siehe Abbildung 2.8(a)). Der Gefäßdurchmesser beträgt zwischen 110 und 210  $\mu\text{m}$  [11].

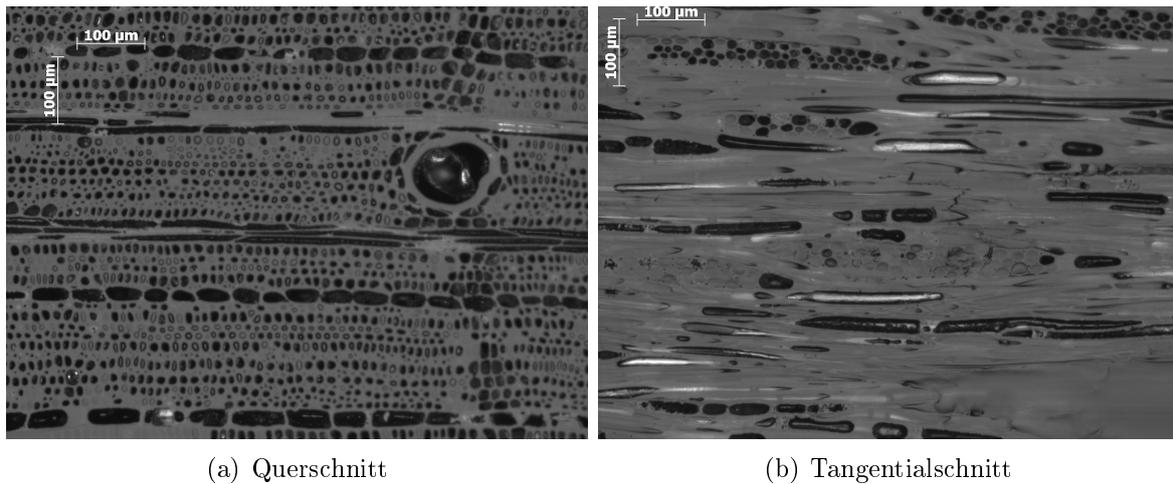


Abbildung 2.8: Mikroskop-Aufnahmen der Satiné

Die in Abbildung 2.8(b) dargestellten Holzstrahlen bestehen aus 3 bis 5 Zellen mit einer Gesamtbreite zwischen 50 bis 80  $\mu m$  [11]. Die mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften der Satiné aus der Literatur [11] sind in Tabelle 2.8 zusammengefasst. Wiederrum standen auf Grund der Herkunft jedoch nicht mehr Literaturdaten zur Verfügung.

Rohdichte: 750 bis 1050  $kg/m^3$

Tabelle 2.8: Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Satiné [11]

#### 2.2.2.4 Teak (*Tectona grandis*)

Teak ist in Süd- und Südostasien beheimatet. Die Jahrringgrenz ist sehr scharfkantig und deutlich zu erkennen. Sie besitzt ein gelbbraunes Kernholz, das von einem weißlich bis grauen Splintholz umgeben ist. Das Splintholz weist eine Breite von 1 bis 3  $cm$  auf. Das Kernholz dunkelt im Laufe der Zeit nach, beginnend von goldgelb, über hell- und dunkelbraun bis hin zu dunkelviolettblau. Teak ist meist schwarz geadert mit auffallenden Farbstreifen. Jährliche Zuwachszonen haben eine Breite von 1, 2 bis 16  $mm$  abhängig vom jeweiligen Standort. Frühholzporen sind im Jahrring mit freiem Auge zu erkennen. Teak gehört zu den ringporigen bis hin zu den halbringporigen Laubhölzern, da es relativ große, meist einreihige Gefäße im Frühholz besitzt, während im Spätholz relativ kleine Gefäße zerstreut, einzeln und paarweise über den restlichen Querschnitt verteilt sind (siehe Abbildung 2.9(a)). Die Frühholzporen weisen eine Breite von 200 bis 370  $\mu m$  auf, während sie im Spätholz nur eine Größe von 70 bis 100  $\mu m$  besitzen [14].

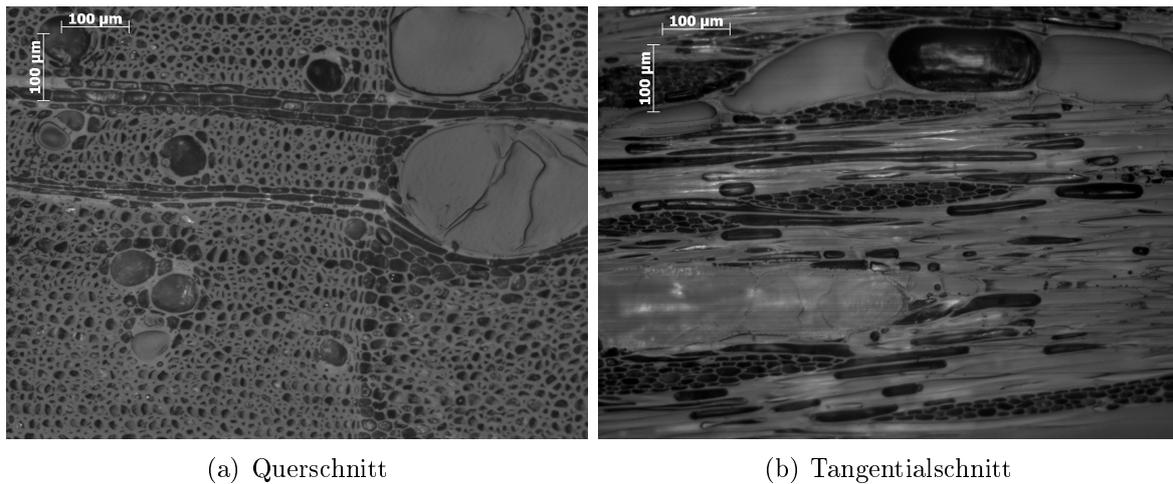


Abbildung 2.9: Mikroskop-Aufnahmen von Teak

Die in Abbildung 2.9(b) dargestellten Holzstrahlen sind unregelmäßig verteilt und bestehen aus 3 bis 5 Zellen mit einer Breite von 25 bis 90  $\mu\text{m}$  [14]. Die mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften der Teak aus der Literatur [14] sind in Tabelle 2.9 zusammengefasst.

Zugfestigkeit:	95 bis 155 $N/mm^2$
E-Modul:	9.500 bis 13.200 $N/mm^2$
Rohdichte:	520 bis 700 $kg/m^3$
Porenanteil:	etwa 58 %
Holzstrahlenanteil:	14,2 bis 19,2 %
Gefäßanteil:	8,7 bis 15,7 %
Zellulosegehalt:	36,3 bis 43,1 %

Tabelle 2.9: Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Teak [14]

### 2.2.2.5 Virola (*Virola michelii*)

Das Vorkommen der *Virola michelii* liegt im Raum nordöstliches Südamerika. Es gibt kaum einen Farbunterschied zwischen dem Kern- und Splintholz. Das Kernholz ist grau- bis hellrosa, während das Splintholz blassrosa und schmal ist. Zuwachszonen sind nicht wahrnehmbar, ebenfalls die Gefäße und Holzstrahlen, die erst unter einer Lupe sichtbar werden. Die *Virola* gehört zu den zerstreutporigen Laubhölzern, da die Gefäße über den Querschnitt diffus verteilt sind. Sie besitzt relativ große Gefäße mit einer Breite von 90 bis 170  $\mu\text{m}$ , die einzeln oder paarig, selten auch in Gruppen, angeordnet sind [14] (siehe Abbildung 2.10(a)).

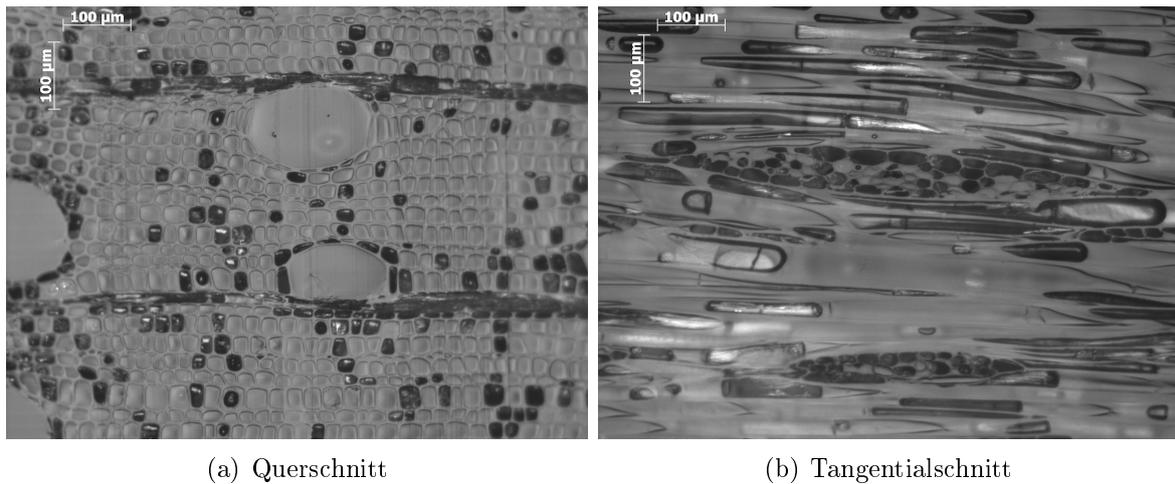


Abbildung 2.10: Mikroskop-Aufnahmen der Virola

Die in Abbildung 2.10(b) dargestellten Holzstrahlen sind unregelmäßig verteilt und heterogen angeordnet. Sie haben eine Stärke von 1 bis 4 Zellen und eine Breite von 23 bis 33  $\mu m$  [14]. Die mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften der Virola aus der Literatur [14] sind in Tabelle 2.10 zusammengefasst.

Zugfestigkeit:	56 bis 105 $N/mm^2$
E-Modul:	7.200 bis 9.400 $N/mm^2$
Rohdichte:	420 bis 550 $kg/m^3$
Porenanteil:	etwa 76 %
Holzstrahlenanteil:	etwa 15 %
Gefäßanteil:	etwa 18 %
Zellulosegehalt:	46,1 bis 49,6 %

Tabelle 2.10: Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Virola [14]

## 2.3 Experimente

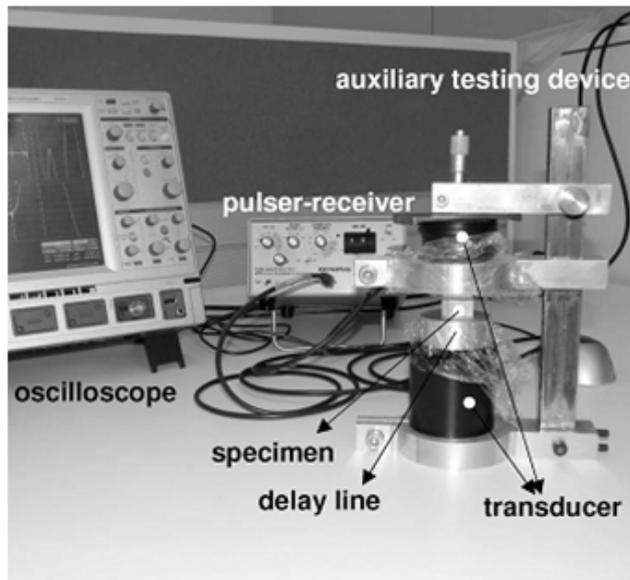
Die unter Abschnitt 2.2 angeführten Holzarten wurden nun einer umfangreichen Versuchsreihe unterzogen. Dazu wurden aus dem Rohmaterial die Probestücke für die Versuche auf der obersten Längenskala, des Laubholzes, präpariert. Aus diesen wurden anschließend die Probestücke für die nächst kleinere Längenskala gefertigt. Dieses Vorgehen liefert Resultate für mechanische und strukturelle Eigenschaften auf den unterschiedlichen Skalen und ermöglicht so einen Vergleich mit den einzelnen Betrachtungsebenen des mathematischen Modells. Dadurch ist es möglich dieses zu validieren und, falls notwendig, Parameter anzupassen. Einen Überblick über die durchgeführten Experimente gibt Tabelle 2.11.

Experiment	Längenskala	Physikalische Bedeutung	Resultat
Quasistatische Versuche	Laubholz	Mechanische Größe	Elastizitätsmodul $E_L$
Ultraschallversuche	Laubholz	Mechanische Größe	Steifigkeitskomponenten $C_{LLLL}$ , $C_{RRRR}$ und $C_{TTTT}$
Nanoindentationsversuche	Zellwandmaterial	Mechanische Größe	Indentationsmodul $N_{ind}$
Mikrofibrillenwinkel-messung	Zellwandmaterial	Strukturelle Größe	Mikrofibrillenwinkel $\theta$
Mikroskopie - Gefäß- und Holzstrahlenanteils	Laubholz	Strukturelle Größe	Volumenanteile $f_{VE}$ und $f_{WR}$
Mikroskopie - Gefäß- und Holzstrahlenform	Laubholz	Strukturelle Größe	Seitenverhältnis $ar_{WR}$ und $ar_{VE}$ sowie Schlankheit $slend_{WR}$ und $slend_{VE}$
Mikroskopie - Anteil Zellwandmaterial und Lumen der Holzstrahlen	Zellstruktur	Strukturelle Größe	Volumenanteile $f_{CW}$ und $f_{lum}$
Mikroskopie - Lumenform der Längsfasern	Zellstruktur	Strukturelle Größe	Seitenverhältnis $ar_{lum}$ und Schlankheit $slend_{lum}$
Extraktstoffbestimmung	Polymer-Netzwerk	Chemische Zusammensetzung	Gewichtsanteil $w_{Ext}$
Thermo-gravimetrische Analyse	Polymer-Netzwerk	Chemische Zusammensetzung	Gewichtsanteile $w_{H_2O}$ , $w_{Lig}$ , $w_{Ext}$ , $w_{HC}$ und $w_C$
Faserrichtung	Laubholz	Strukturelle Größe	Winkel $\alpha$

Tabelle 2.11: Auflistung der durchgeführten Experimente und Angabe der Betrachtungsebene und der Art der Resultate

### 2.3.1 Quasistatischer Versuch

Aus dem Rohmaterial wurden für jede Holzart fünf Proben mit den Abmessungen  $200 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$  (L x R x T) entnommen. Dabei wurde darauf geachtet, Probestücke aus kernnahem Material zu entnehmen und mindestens zwei Probestücke aus demselben Jahrringbereich. Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass die Probestücke eine zu den Schnitttrichtungen parallele Jahrringschichtung aufweisen, die über den gesamten Querschnitt möglichst konstant verläuft und wenige Einflüsse aus Astbereichen beinhaltet. Vor der



(a) Darstellung des Versuchsaufbaues

1. Transducer
2. Honig
3. Folie
4. Probekstück (specimen)
5. Folie
6. Honig
7. Verzögerungsstück aus Aluminium (delay line)
8. Transducer

(b) Gliederung des Versuchsaufbaues

Abbildung 2.11: Darstellung und Gliederung des Versuchsaufbaues der Ultraschallmessungen

Versuchsdurchführung wurden alle Stücke in einem Klimaraum bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte gelagert. Die Temperaturschwankungen bewegten sich dabei im Bereich von  $20$  bis  $22^{\circ}\text{C}$  und die Luftfeuchteschwankungen im Bereich von  $39$  bis  $46\%$ . Das entspricht einer Holzfeuchte von rund  $7$  bis  $8\%$ . Anschließend wurden die Probekörper mit einer Zugkraftmaschine mit der Bezeichnung MTS 858 MiniBionix der Firma MTS Systems Corporation, Eden Prairie, USA getestet. Die Versuche wurden statisch und weggesteuert mit einer Verschiebung von  $0,30\text{ mm}$  in  $60\text{ s}$  Belastung und  $0,15\text{ mm}$  in  $5\text{ s}$  Entlastung durchgeführt. Die Längenänderungen wurden mittels Extensometer in einem Messbereich von  $25\text{ mm}$  an der Probe bestimmt. Das Experiment wurde mindestens zweimal pro Probe durchgeführt, oder öfters falls die Ergebnisse stark variierten. Für die Auswertung des Elastizitätsmoduls  $E_L$  wurde der Bereich zwischen  $10\text{ s}$  und  $30\text{ s}$  verwendet, da ab  $35\text{ s}$  die Kraft in der Probe nicht mehr gesteigert werden konnte. Die gemessenen und gemittelten Elastizitätsmoduli der einzelnen Holzarten sind in Tabelle 2.12 zusammengestellt.

### 2.3.2 Ultraschall-Versuch

Aus den fünf Probekörpern je Holzart der quasistatischen Versuche wurden anschließend jeweils drei Würfel mit den Abmessungen  $25 \times 20 \times 20\text{ mm}^3$  (L x R x T) geschnitten und anschließend mittels Ultraschallmessgerät getestet. Wie bei den quasistatischen Versuchen wurden die Messungen mindestens zweimal für jede Probe durchgeführt. Für die Versuchsdurchführung wurde ein Ultraschallequipment, bestehend aus Pulser/Receiver (Sender/Empfänger) PR 5077 der Firma Panametrics Inc. (Waltham, MA, USA), einem digitalem Oszilloskop WaveRunner 62Xi der Firma Lecroy Corporation (Chestnut Ridge, NY, USA) und den Transducern, Modelle X1020 und V1011 der Firma Olympus Panametrics Inc., verwendet. Die Transducer besitzen dabei eine Frequenz von  $100\text{ kHz}$ . Abbildung 2.11 zeigt den Versuchsaufbau.

Da Holz als stark dämpfendes Material gilt, wurden Transducer mit einer niedrigen

Frequenz verwendet. Der Honig im Versuchsaufbau dient zur Verbesserung des Überganges der Welle von den Transducern in die Probe, und die Folie schützt die Probe vor dem Honig. Das Verzögerungsstück aus Aluminium bewirkt eine Verschiebung der Signalwelle um  $3,68 \mu s$ , um aus dem Eigenstörbereich, welcher sich aus den verwendeten Geräten ergibt, zu gelangen. Gemessen wird bei diesem Versuch die Zeit in  $\mu s$ , die die Welle benötigt um vom Sender zum Empfänger zu gelangen. Mit Hilfe der Dichte können anschließend die Komponenten des Steifigkeitstensor  $C_{LLLL}$ ,  $C_{RRRR}$  und  $C_{TTTT}$  berechnet werden. Die für jede Holzart gemittelten Ergebnisse der Ultraschallmessung sind in Tabelle 2.12 zusammengefasst.

### 2.3.3 Nanoindentation

Für die Durchführung der Nanoindentationstests wurden aus den Proben der Ultraschallversuche, quer zu allen Jahrringen, dünne Scheiben mit einer Breite von zirka  $0,5 \text{ mm}$  mittels Laubsäge geschnitten. Aus diesen wurde anschließend der interessierende Jahrring mittels Rasierklinge heraus präpariert. Durch das Schneiden mit Säge und Klinge werden die Fasern zum Teil zerstört beziehungsweise zusammengedrückt. Deshalb werden die Probestücke vor der weiteren Präparation in Kunstharz eingebettet. Hierbei wird das Kunstharz AGAR LOW VISKOSITY RESIN KIT der Firma AGAR Scientific Ltd., mit den in der Gebrauchsanleitung angeführten Richtlinien verwendet. Nach dem Aushärten des Kunstharzes wird mittels Mikroskop die Ausrichtung der Probe kontrolliert und der Winkel zwischen Längsachse und Faserrichtung bestimmt. Aus den eingebetteten Proben wird anschließend mittels Säge eine dünne Scheibe, welche orthogonal zu der Faserrichtung verläuft, geschnitten. Diese dünnen Plättchen werden dann auf eine runde Metallscheibe aufgeklebt. Da die Probe noch eine zu hohe Rauigkeit für den Nanoindentationsversuch aufweist, wird die Oberfläche nochmals mittels eines Ultramikrotoms der Firma Ultracut in Verbindung mit einer Diamantklinge geschnitten. Anschließend wird der Versuch in einem Nanoindenter der Serie TI900 der Firma Hysitron durchgeführt. Getestet wird dabei mit einer Berkovich-Spitze welche eine fünfstufige Belastungskurve auf die Zellwand (S2-Schichte) aufbringt, mit einer Höchstlast von  $300 \mu N$ . Die in Tabelle 2.12 angeführten Mittelwerte entsprechen dabei Ergebnissen über mindestens eine Frühholz- und eine Spätholzzelle sowie mindestens vier Indents in jeder Zellwand.

### 2.3.4 Mikrofibrillenwinkelbestimmung

Für die Mikrofibrillenwinkelbestimmung wurde je Holzart eine Probe der Ultraschallmessung verwendet. Diese wurde mit Wasser im Vakuum gesättigt und im Ofen bei  $100^\circ C$  getrocknet. Der Vorgang wurde mehrere Male wiederholt und soll Risse der Zellulosefasern in der S2-Schichte der Zellwand verursachen. Um diese sichtbar zu machen, werden anschließend aus den getrockneten Proben mittels eines Mikrotoms, Dünnschnitte mit einer Stärke von  $25$  bis  $50 \mu m$  geschnitten. Für die Bestimmung der Mikrofibrillenwinkel, werden die Proben mikroskopiert und die Ausrichtung der Risse gemessen. Da einige der Holzarten sehr dünne Zellen und Mikrofibrillenwinkel im Bereich von  $0$  bis  $10^\circ$  besitzen, war die Bestimmung des Mikrofibrillenwinkels aus Rissen sehr schwierig. Aus diesem Grund wurde die Ausrichtung der Tüpfel mitberücksichtigt und teilweise für die Bestimmung herangezogen. Tabelle 2.13 zeigt die Ergebnisse der Messungen.

Probe	Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	E-Modul $E_L$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Steifigkeitskomponenten			NI-Modul $N_{ind}$ [GPa]
			$C_{LLLL}$ [GPa]	$C_{RRRR}$ [GPa]	$C_{TTTT}$ [GPa]	
Buche	0,699	14.651	19,44	3,62	2,11	18,86
Eiche	0,799	19.408	25,98	3,58	2,41	17,95
Esche	0,691	13.283	21.46	3,58	2,10	16,23
Linde	0,475	11.993	21.46	1,72	0,88	16,75
Platane	0,616	8.363	21.46	3,10	2,17	15,13
Ipé	0,990	21.237	24,37	5,25	4,62	18,88
Manil	0,759	13.917	23,39	4,16	1,97	19,17
Satiné	0,977	17.451	31,10	4,89	4,51	20,19
Teak	0,521	13.729	21.46	2,27	1,18	14,15
Virola	0,434	12.843	13,22	1,63	0,59	15,52

Tabelle 2.12: Mittelwerte des Elastizitätsmoduls, der Steifigkeitkomponenten und des Indentationsmoduls

Probe	Mikrofibrillenwinkel				Bemerkung
	Mittelwert [°]	Streuung [°]	Minimum [°]	Maximum [°]	
Buche	6,8	5,7	21,0	0,3	Tüpfel
Eiche	2,6	2,5	0,1	9,4	Zelle/keine Tüpfel
Esche	13,8	3,4	4,5	18,9	Zelle/keine Tüpfel
Linde	20,5	4,5	5,7	22,2	Tüpfel
Platane	24,0	5,9	14,1	35,8	Tüpfel
Ipé	9,1	5,8	0,3	15,6	Zelle/keine Tüpfel
Manil	4,0	4,6	0,1	22,1	Zelle/keine Tüpfel
Satiné	5,3	3,6	1,0	12,5	Zelle/keine Tüpfel
Teak	6,9	4,0	0,4	16,1	Tüpfel
Virola	10,3	3,8	4,0	16,0	Tüpfel

Tabelle 2.13: Mittelwert, Standardabweichung, Minimum und Maximum der Mikrofibrillenwinkel

### 2.3.5 Thermogravimetrische Analyse

Die chemische Zusammensetzung der Proben stellt eine wichtige Komponente in der Modellierung dar. Da jedoch eine chemische Analyse sehr aufwendig ist und teilweise für Modellierungszwecke zu detaillierte Ergebnisse liefert, wurde nach einer einfacheren Alternative gesucht um die notwendigen Anteile der Komponenten zu bestimmen. Als Lösung des Problems bot sich dabei die sogenannte Thermogravimetrische Analyse (TGA) [7] an. Dabei werden die Anteile von Hemizellulose, Zellulose, Lignin und Extraktstoffe mittels deren unterschiedlicher Aktivierungsenergien beziehungsweise mit deren unterschiedli-

chen Zersetzungstemperaturen, wie sie in der Tabelle 2.14 aufgelistet sind, bestimmt. Die Bestimmung der Bestandteile erfolgt dabei unter kontinuierlicher Messung des Ge-

Hemizellulose	Zellulose	Lignin
105-111 $\text{kJ/mol}$	195-213 $\text{kJ/mol}$	35-65 $\text{kJ/mol}$

Tabelle 2.14: Tabelle der Aktivierungsenergien der Komponenten Hemizellulose, Zellulose und Lignin laut [7].

wichtsverlustes der Probe unter der beaufschlagten Brandkurve. Die erhaltene Masse-Temperaturkurve wird über die Zeit abgeleitet, und anschließend wird der Masseverlust über die spezifischen Punkte aufintegriert. Das Aufsummieren des Massenverlusts von Beginn bis zum ersten Wendepunkt der Kurve ergibt den Extraktstoff-Feuchtegehalt. Der Bereich zwischen Wendepunkt und Schulter beschreibt die Massefraktion an Hemizellulose, während der weitere Bereich über das Maximum bis zum nächsten Wendepunkt den Gehalt an Zellulose kennzeichnet. Der Rest entspricht der Summe des Lignins und Asche. Da der Übergang zwischen Hemizellulose- und Zelluloseabbau fließend ist, gibt es in diesem Bereich Schwierigkeiten bei der Bestimmung des Anteils dieser Komponenten. Das gilt ebenso für den Übergang zwischen dem Abbau der Extraktstoffe und der Hemizellulose. Lediglich der Punkte für den Zelluloseabbau ist durch den raschen Zerfall eindeutig gekennzeichnet. Abbildung 2.12 zeigt die Verläufe der ersten und zweiten Ableitung des Masseverlustes über die Temperatur. Bisher wurde die thermogravimetrische Analyse

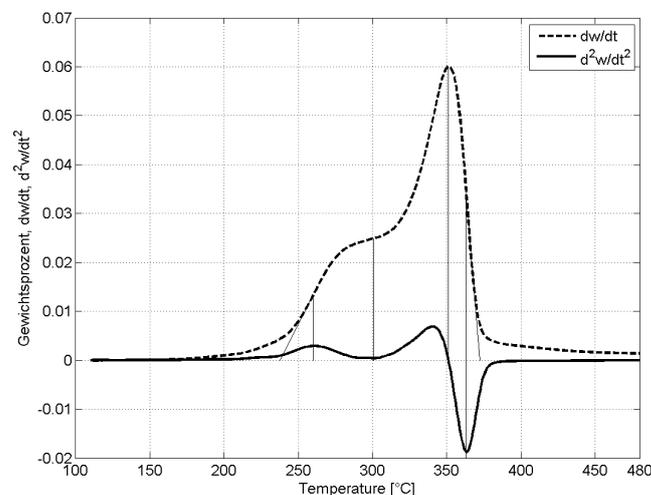


Abbildung 2.12: Verläufe der ersten und zweiten Ableitung des Masseverlustes über die Temperatur der thermogravimetrischen Analyse der Buche

hauptsächlich für die quantitative Bestimmung der Anteile von Lignin, Extraktstoffen und Holozellulose eingesetzt [7]. Um die Reaktionsfähigkeit des Materials bei der Durchführung der thermogravimetrischen Analyse zu erhöhen, werden dafür mehrere Gramm in einer Zentrifuge mit einem Siebeinsatz von  $25 \mu\text{m}$  zerkleinert. Anschließend werden zirka 10 bis 15  $\text{mg}$  des Materials in eine Keramikform gefüllt und mit der zuvor erwähnten Temperaturkurve beaufschlagt. Diese gliedert sich dabei in eine Trocknungsphase mit einer Dauer von 20  $\text{min}$ , unter einer kontinuierlichen Durchflussmenge von 90  $\text{ml/min}$  Stickstoff. Diese wird über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten. Anschließend erfolgt eine rasche Aufheizphase mit einer Rampe 30  $\text{K/min}$  bis zu einer Temperatur von

110°C. Darauf folgt eine Haltephase von 30 min, mit einer anschließenden Aufheizphase mit einer Rampe von 5 K/min auf die Höchsttemperatur von 500°C. Tabelle 2.15 zeigt die Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse. Die in Tabelle 2.15 dargestellten

Holzart	Zellulose [m%]	Hemizellulose [m%]	Lignin [m%]	Extraktstoffe [m%]
Buche	53,1	20,7	24,2	1,9
Eiche	58,8	16,2	22,9	2,0
Esche	52,7	18,4	26,9	2,0
Linde	61,2	16,8	19,2	2,8
Platane	51,5	20,3	25,4	2,9
Ipé	59,6	11,4	27,3	1,8
Manil	57,0	19,0	22,7	1,4
Satiné	55,7	9,9	32,3	2,1
Teak	72,7	8,6	17,1	1,6
Virola	57,0	19,0	22,7	1,4

Tabelle 2.15: Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse (inklusive Extraktstoffe)

Holzart	Holozellulose [m%]	Zellulose [m%]	Hemizellulose [m%]	Lignin [m%]	Extraktstoffe [m%]
Buche [6]	85,8	44,5	-	22,2	-
Eiche [2]	-	40,8	32,2	21,0	6,0
Esche [6]	-	37,9	-	25,6	-
Linde	-	-	-	-	-
Platane [6]	-	50,7	-	29,1	-
Ipé [12]	-	14	46	29	8,6
Manil [12]	78	-	-	24	22
Satiné	-	-	-	-	-
Teak [6]	-	39,1	-	29,3	13,0
Virola [12]	80	-	-	24	22

Tabelle 2.16: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Holzarten aus Literaturwerten und chemischen Analysen

Ergebnisse weisen bei einem Vergleich mit Literaturdaten für die chemische Zusammensetzung verschiedener Holzarten (siehe Tabelle 2.16) teilweise erhebliche Abweichungen auf. Dass der Extraktstoffgehalt aller Proben in einer sehr schmalen Bandbreite von 1,4 bis 2,9 m% liegt, könnte insbesondere auf unbrauchbare Ergebnisse hindeuten. Der Holozellulosegehalt stimmt teilweise mit den Literaturwerten überein, die Aufteilung in Zellulose und Hemizellulose dagegen nicht. Die Resultate für den Ligningehalt beschreiben die Summe Masse aus Lignin und Restasche und repräsentieren keinen exakten Wert.

Auf Grund der Unsicherheit der Ergebnisse, speziell Bezug auf den Extraktstoffgehalt, wurde die thermogravimetrische Analyse an extrahierten Proben nochmal durchgeführt. Die Extraktion wird in Abschnitt 2.3.6 erläutert. Die Resultate des zweiten Durchgangs der thermogravimetrischen Analyse sind in Tabelle 2.17 aufgelistet. Die in Tabelle 2.17

Holzart	Zellulose [m%]	Hemizellulose [m%]	Lignin [m%]	Extraktstoffe (Restgehalt) [m%]
Buche	62,3	16,3	20,1	1,2
Eiche	65,8	15,1	17,6	1,5
Esche	64,5	14,9	19,5	1,1
Linde	65,8	15,9	16,7	1,6
Platane	61,6	17,3	19,6	1,5
Ipé	63,0	10,5	25,8	0,8
Manil	64,8	11,6	22,5	1,0
Satiné	64,7	10,3	24,1	0,9
Teak	67,8	10,0	21,4	0,7
Virola	69,1	12,2	17,8	0,9

Tabelle 2.17: Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse (extrahierte Proben)

angeführten Ergebnisse des zweiten Durchlaufes der Thermogravimetrie, weisen wieder keine Übereinstimmung mit den in Tabelle 2.16 angeführten Literaturwerten auf. Durch das Fehlen der Extraktstoffe sollten die Massenanteile der übrigen Fraktionen ansteigen, was sich jedoch nicht zeigt. Der Gehalt an Holozellulose entspricht ungefähr den Ergebnissen des ersten Versuches, welcher jedoch höher sein sollte, während sich das Verhältnis von Zellulose zu Hemizellulose hauptsächlich in Richtung Zellulose verschoben hat. Der Ligningehalt ist ebenfalls gesunken anstatt zu steigen, was auch darauf hindeuten kann, dass bei der Extraktion Teile des Lignins entfernt wurden. Um nun eine chemische Zusammensetzung der Proben für die Modellierung zu erhalten, werden einerseits die exakten Ergebnisse der Extraktstoffbestimmung aller Proben sowie eine detaillierte chemische Analyse der untersuchten Eiche, welche laut [2] durchgeführt wurde, verwendet. Andererseits werden für den Ligningehalt die Ergebnisse der ersten durchgeführten thermogravimetrischen Analyse verwendet, da diese mit den Literaturwerten gut übereinstimmen. Das Verhältnis des Zellulose- und Hemizellulosegehalt wurde aus den Literaturwerten übernommen und an die Restmasse angepasst. Tabelle 2.18 zeigt die sich ergebende chemische Zusammensetzung der untersuchten Holzarten.

### 2.3.6 Extraktstoffbestimmung

Das Entfernen der Extraktstoffe wurde nach dem Verfahren laut [13] durchgeführt. Dabei werden zuerst die Proben mittels einer Mühle gemahlen, wiederum um die Reaktionsfähigkeit zu erhöhen. Hierfür wurde die in Abschnitt 2.3.5 beschriebene Mühle verwendet. Das restliche Verfahren gliedert sich in zwei Phasen. Zuerst werden zwischen 150 und 170 g der Proben in einen Büchi Speed-Extraktor E-916 gegeben und mit einem unpolaren Lösungsmittel **Cyclohexan**, für vier mal fünfzehn Minuten bei 90°C mit einem Druck

Holzart	Zellulose [m%]	Hemizellulose [m%]	Lignin [m%]	Extraktstoffe [m%]
Buche	49,1	25,0	23,2	2,7
Eiche	40,8	32,2	21,0	6,0
Esche	37,9	30,2	25,9	6,1
Linde	42,0	36,0	18,2	3,8
Platane	50,7	19,6	24,4	5,3
Ipé	55,0	6,1	26,3	12,7
Manil	55,8	14,7	24,3	5,2
Satiné	52,0	1,5	31,3	15,2
Teak	39,1	39,8	16,1	5,0
Virola	60,0	15,6	21,7	2,7

Tabelle 2.18: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Holzarten aus Literaturwerten und chemischen Analysen

von 110 *bar* extrahiert. Anschließend wird das Proben-Lösungsmittelgemisch in einem Vakuum-Verdampfer eingedampft und in einem Vakuum-Exsikkator getrocknet. Die Einwaage zwischen vorher und nachher ergibt den Massenanteil der Extraktstoffe. Die gesamte Prozedur wird anschließend mit einem **Methanol/Wasser**-Gemisch (50:50) für eine Dauer von vier mal fünfzehn Minuten mit einem Druck von 110 *bar* wiederholt. Diese Methode gewährleistet eine möglichst vollständige Extraktion. Die Resultate der einzelnen Phasen und die Summen der Anteile der Komponenten sind in Tabelle 2.19 für die heimischen und in Tabelle 2.20 für die tropischen Holzarten zusammengefasst.

Methode	Buche [m%]	Eiche [m%]	Esche [m%]	Linde [m%]	Platane [m%]
Cyclohexan	0,13	0,21	0,22	0,55	0,33
Methanol	2,54	6,87	5,84	3,27	4,95
Summe	2,67	7,08	6,07	3,82	5,28

Tabelle 2.19: Ergebnisse der Extraktstoffbestimmung zufolge Cyclohexan und Ethanol für die heimischen Holzarten

Methode	Ipé [%]	Manil [%]	Satiné [%]	Teak [%]	Virola [%]
Cyclohexan	2,93	0,37	1,10	1,48	0,12
Methanol	9,75	4,81	14,07	3,50	2,61
Summe	12,67	5,18	15,17	4,98	2,73

Tabelle 2.20: Ergebnisse der Extraktstoffbestimmung zufolge Cyclohexan und Ethanol für die tropischen Holzarten

### 2.3.7 Bestimmung des Anteils an Gefäßen und Holzstrahlen

In Abschnitt 2.2 sind für die einzelnen Holzarten die Anteile der Holzstrahlen und der Gefäße angegeben. Diese Werte stellen Referenzwerte für die gesamte Gattung dar und können dadurch sehr stark variieren. Aus diesem Grund wurden speziell für die verwendeten Probestücke die genauen Anteile bestimmt. Dabei wurden mehrere unterschiedliche Vorgehensweisen getestet, um einerseits repräsentative Ergebnisse zu erhalten und andererseits den Aufwand für die Auswertung gering zu halten. Als Erstes wurde versucht, Dünnschnitte mit einer Dicke von 25 bis 50  $\mu\text{m}$  mit einem Schlittenmikrotom des Typs SN2500 der Firma Leica herzustellen. Anschließend wurden diese mit einem Mikroskop mit aufgesetzter Kamera fotografiert. Da die Dünnschnitte jedoch zufolge des Schnittes deformiert wurden, war es nicht möglich genaue Aussagen über die Flächenanteile der Gefäße vorzunehmen. Daraufhin wurden die plangeschnittenen Probekörper verwendet, da diese keine Verformungen aufwiesen und noch ausreichend Kontrast boten um sie auszuwerten. Die Bestimmung der Anteile erfolgte bei den ringporigen Holzarten per Hand, da hier vor allem nur die Gefäße im Bereich des Frühholzes von Interesse waren. Die Auswertung der zerstreutporigen Holzarten wurde teilweise per Hand, jedoch größtenteils mittels Bildanalyse durchgeführt. Abbildung 2.13 veranschaulicht die Bestimmung der Gefäßanteile, während Abbildung 2.14 die Bestimmung der Holzstrahlenanteils für die Platane zeigt. Um repräsentative Ergebnisse zu erhalten, wurden für die Bestimmung

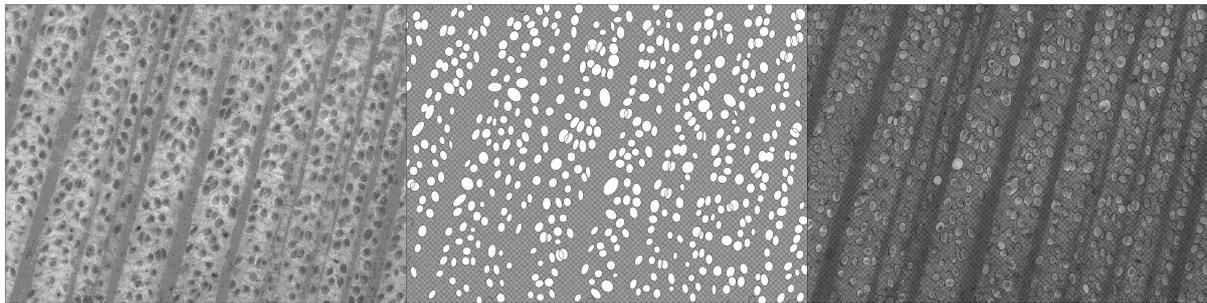


Abbildung 2.13: Auswertung des Flächenanteils der Gefäße der Platane

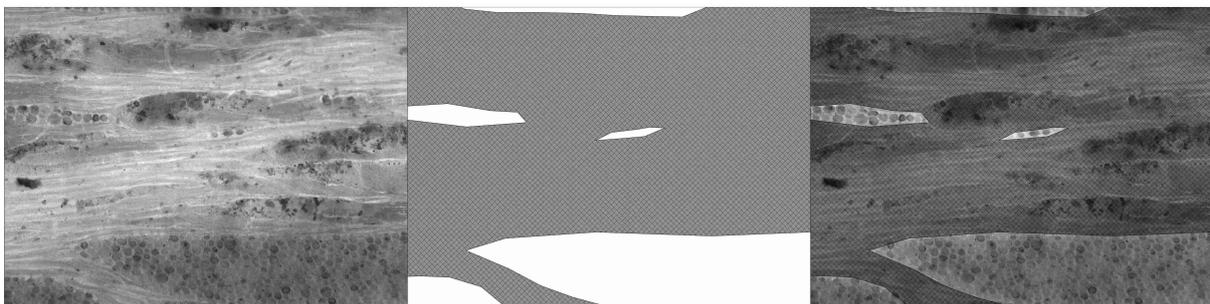


Abbildung 2.14: Auswertung des Anteils der Holzstrahlen der Platane

der Anteile der Gefäß und der Holzstrahlen über den Querschnitt mehrere Aufnahme hergestellt. Es wurden im Schnitt fünf bis sieben Aufnahmen bei den Gefäßen und zehn bis neunzehn Aufnahmen bei den Holzstrahlen ausgewertet und gemittelt. Tabellen 2.21 und 2.22 zeigen die Ergebnisse der Ermittlung für die heimischen und tropischen Holzarten.

### 2.3.8 Bestimmung des Zellwandanteils der Holzstrahlen

Für die Bestimmung der Anteile der Holzstrahlen sind auf Grund der kleineren Längenskalar weniger Aufnahmen zur Verfügung gestanden. Die Auswertung wurde anhand eigens hergestellter Tangentialschnitte durchgeführt, wobei mindestens zwei bis sechs Aufnahmen pro Holzart untersucht wurden. Das Flächenverhältnis wurde mittels Zeichenprogramm per Hand bestimmt, Abbildung 2.15 zeigt die Auswertung am Beispiel der Platane. Tabellen 2.21 und 2.22 zeigen die Ergebnisse der Anteilsbestimmung für die heimischen und tropischen Holzarten.

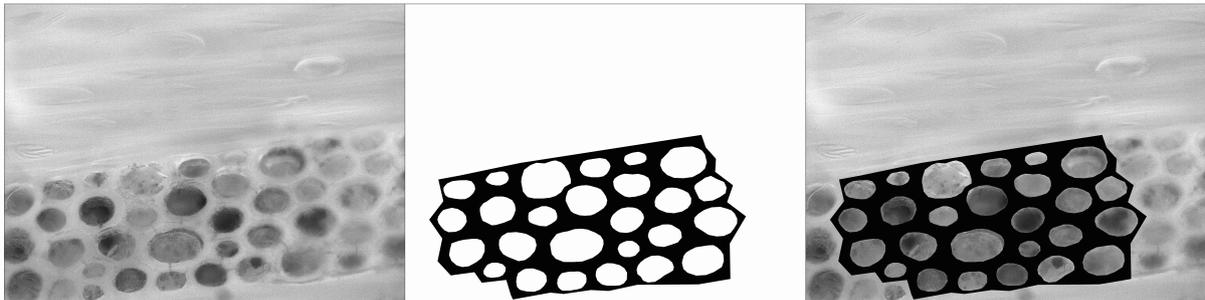


Abbildung 2.15: Auswertung des Zellwandanteils der Holzstrahlen der Platane

### 2.3.9 Bestimmung der Verhältnisse des Früh- und Spätholzes

Die Bestimmung der Anteile des Früh- und Spätholzes erfolgt anhand von Fotos der Probenquerschnitte. Wie in Abschnitt 2.2 bei den einzelnen Holzarten erklärt, kann die Grenze nicht immer mit bloßem Auge erkannt werden. Des Weiteren ist der Anteil hauptsächlich für die ringporigen Holzarten von Interesse. Tabellen 2.21 und 2.22 zeigen die Ergebnisse der Anteilsbestimmung für die heimischen und tropischen Holzarten.

### 2.3.10 Bestimmung der Faserabweichung

Die Faserabweichung wird anhand der Proben der quasistatischen Versuche durchgeführt. Die Abweichung wird über Fotos der Probekörper durch die Messung des Winkels  $\alpha$  zwischen Faser und Längsachse bestimmt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 2.21 und 2.22 für die heimischen und tropischen Holzarten zusammengefasst.

Probe		Buche	Eiche	Esche	Linde	Platane
$\theta$	[°]	10,0	2,6	13,8	20,5	24,0
$\lambda$	[—]	0,866	0,779	0,779	0,779	0,866
$\varphi$	[°]	30	30	30	20	20
$f_{WR}$	[—]	16,88	13,66	12,37	4,51	27,62
$f_{VE}$	[—]	19,58	10,31	23,74	20,26	21,90
$f_{LW}$	[—]	0,20	0,32	0,53	0,50	0,20
$\theta_{WR}$	[°]	30	50	20	30	40
$\lambda_{WR,lum}$	[—]	0,866	0,866	0,433	0,260	0,866
$\varphi_{WR,lum}$	[°]	30	30	30	10	30
$ar_{WR}$	[—]	1000	1000	1000	1000	1000
$slend_{WR}$	[—]	80,60	76,18	136,09	29,46	153,24
$ar_{VE}$	[—]	1,266	1,243	1,385	1,665	1,158
$slend_{VE}$	[—]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$f_{WR,cwm}$	[%]	66,71	83,44	58,38	70,43	51,67
$ar_{WR,lum}$	[—]	1	1	2	3,333	1
$slend_{WR,lum}$	[—]	0,1	0,1	0,1	0,001	0,1
$ar_{lum}$	[—]	1	1,111	1,111	1,111	1
$slend_{lum}$	[—]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$\alpha$	[°]	$\pm 0$				

Tabelle 2.21: Struktureigenschaften aller getesteten heimischen Holzarten für das mikro-mechanische Modell

Probe		Ipé	Manil	Satiné	Teak	Virola
$\theta$	[°]	3,0	2,5	5,0	6,9	10,3
$\lambda$	[–]	0,866	0,866	1,299	0,866	0,866
$\varphi$	[°]	30	30	30	25	5
$f_{WR}$	[–]	7,47	13,94	14,42	12,51	7,59
$f_{VE}$	[–]	21,00	19,77	8,38	9,92	7,25
$f_{LW}$	[–]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$\theta_{WR}$	[°]	5	10	10	30	30
$\lambda_{WR,lum}$	[–]	0,693	0,866	0,866	0,346	0,433
$\varphi_{WR,lum}$	[°]	30	30	30	10	10
$ar_{WR}$	[–]	1000	1000	1000	1000	1000
$slend_{WR}$	[–]	166,75	112,83	92,74	97,86	114,67
$ar_{VE}$	[–]	1,188	2,034	1,174	1,289	1,382
$slend_{VE}$	[–]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$f_{WR,cwm}$	[%]	44,94	27,90	33,87	36,96	27,26
$ar_{WR,lum}$	[–]	1,25	1	1	2,5	2
$slend_{WR,lum}$	[–]	0,1	0,001	0,001	0,2	0,001
$ar_{lum}$	[–]	1	1	0,667	1	1
$slend_{lum}$	[–]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$\alpha$	[°]	$\pm 9$	$\pm 23$	$\pm 15$	$\pm 0$	$\pm 0$

Tabelle 2.22: Struktureigenschaften aller getesteten tropischen Holzarten für das mikro-mechanische Modell

## Mikromechanische Modellierung

Wie bereits in Kapitel 1 und 2 erklärt, ist Holz ein hierarchisch aufgebautes Material. Dieser Aufbau ist einerseits Motivation für die Durchführung von Experimenten auf den unterschiedlichen Längenskalen und andererseits für die Formulierung eines mikromechanischen Modells. Als Grundlage dient dabei ein bereits bestehendes Modell laut [3], welches für die Beschreibung von Nadelholz verwendet wird und nun um die spezifischen Laubholzeigenschaften erweitert wird. Der Aufbau des Modells entspricht dabei im Wesentlichen dem umgekehrten Vorgehen der Durchführung der experimentellen Untersuchungen. Das Material “Holz” wird, beginnend bei der chemischen Zusammensetzung und der Anordnung dieser Komponenten, über die Zellstruktur bis hin zur Anordnung der Zellen im “Laubholz” nachgebildet. Dabei wird vom Homogenisierungsverfahren Gebrauch gemacht. Es handelt sich dabei um eine Mittelung über die mechanischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten der Struktur unter Berücksichtigung derer Anteile und deren Anordnung im Material. Nach einer Beschreibung der Grundlagen der Homogenisierung in Abschnitt 3.1 erfolgt eine Beschreibung des Ausgangsmodells in Abschnitt 3.2.

### 3.1 Grundlagen der Homogenisierung

Wie in der Einleitung erwähnt, handelt es sich bei der Homogenisierung um eine Mittelwertbildung über die mechanischen Eigenschaften der im Material vorhandenen Komponenten. Die dabei ermittelten effektiven Eigenschaften des Materials werden so gewählt, dass sich ein fiktives homogenes Material mit diesen Eigenschaften mechanisch gleich verhält wie das eigentlich betrachtete, mikrostrukturierte Material. Entscheidend dabei ist, von welcher Ebene ausgehend diese Komponenten betrachtet werden. Ein Material kann zum Beispiel auf makroskopischer Ebene als homogen angesehen werden, aber auf mikroskopischer Ebene als heterogen. In den meisten Fällen ist es gar nicht möglich heterogene Materialien mathematisch exakt zu beschreiben. Des Weiteren kann die Homogenisierung auf mehreren Ebenen ausgeführt werden, und das sogar mehrmals. Sie bietet somit die Möglichkeit, effektive Eigenschaften komplexer Strukturen -im Zuge dieser Arbeit des hierarchischen Aufbaues der Holzstruktur- mit wenig Aufwand zu berechnen. Eine Methode zur Homogenisierung stellt die Kontinuums-Mikromechanik dar, welche in Abschnitt 3.1.1 beschrieben wird. Diese ist für Materialien mit unregelmäßig angeordneten

Komponenten geeignet. Ist die Mikrostruktur hingegen regelmäßig und näherungsweise periodisch, ist die Einheitszellenmethode (siehe Abschnitt 3.1.2) ein geeignetes Verfahren zur Homogenisierung. Für streng schichtenförmig angeordnete Materialien bietet sich schließlich die Laminattheorie (siehe Abschnitt 3.1.3) zur Bestimmung effektiver Eigenschaften an.

### 3.1.1 Kontinuums-Mikromechanik

Die bereits in Abschnitt 3.1 angeführte Beschreibung der makroskopischen und mikroskopischen Größenordnungen der Inhomogenitäten und Betrachtungsebenen wird nun konkretisiert. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Kontinuums-Mikromechanik ist, dass typische Größen der Inklusionen  $d_i$  wesentlich kleiner sein müssen als die Abmessungen der Grundmatrix  $l_i$  ( $l_i \gg d_i$ ). Des Weiteren gilt für mehrere Betrachtungsebenen, dass die charakteristische Länge des effektiven Materials der nächst höheren Ebene  $l_2$  größer gleich sein muss der Länge der Inklusionen der vorherigen Ebene  $d_1$  ( $l_2 \geq d_1$ ). Aus diesen Bedingungen lässt sich eine Größe für das auf einer Ebene betrachtete Materialvolumen, für das effektive Eigenschaften bestimmt werden sollen, ableiten. Dieses wird in der Homogenisierung als repräsentatives Volumenelement (RVE) bezeichnet. Abbildung 3.1 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen den einzelnen Betrachtungsebenen. Eine weitere Bedingung im Zusammenhang mit der Größe des RVE ist, dass ein typischer Längemaßstab der Belastung  $\mathcal{L}$ , wesentlich größer sein muss als die charakteristische Länge des RVEs auf der höchsten Betrachtungsebene ( $\mathcal{L} \gg l$ ). Wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt,

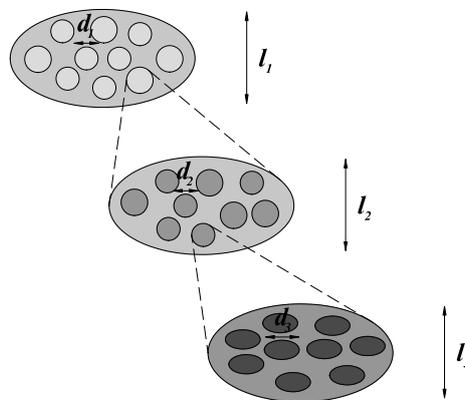


Abbildung 3.1: Charakteristische Abmessungen von RVEs und Inklusionen auf unterschiedlichen Längenskalen bei einem hierarchisch strukturierten Material

ist die Idee der Mikromechanik laut [4, 16], dass ein realer komplexer Körper durch einen fiktiven homogenisierten ersetzt werden soll. Zur Ermittlung der Steifigkeit des homogenisierten Materials, wird das RVE am Rand homogenen Verzerrungen ausgesetzt. Diese dienen als Näherung für die makroskopischen Verzerrungen, die im realen Körper wirken. Der Zusammenhang zwischen den Verzerrungen und Spannungen im RVE und den am Rand aufgebrachten Verzerrungen kann mit Hilfe von Matrix-Inklusions-Problemen beschrieben werden (Eshelby-Lösung [5]). Für den Fall einer in eine unendlich ausgedehnte Matrix eingebetteten ellipsoidalen Inklusion ergeben sich bei einer homogenen Belastung im Unendlichen, unter der Voraussetzung elastischen Materialverhaltens und eines perfekten Verbundes zwischen Matrix und Inklusion, konstante Verzerrungen in der Inklusion. Unter Zuhilfenahme der Homogenisierung des RVEs, also der Mittelung der Spannungen

beziehungsweise der Verzerrungen im RVE über dessen Volumen, kann ein Zusammenhang zwischen homogenisierten Größen, nämlich den effektiven Spannungen und den Verzerrungen, hergestellt werden. Letztere entsprechen den am Rand aufgebrachtten homogenen Verzerrungen. Aus dem Verhältnis der effektiven Spannungen und Verzerrungen läßt sich schließlich eine effektive Steifigkeit des mikro-heterogenen Materials ableiten. Die Verzerrungen am Rand des RVEs entsprechen streng genommen nur dann den makroskopischen Verzerrungen, wenn  $d/l$  gegen Null geht. Dies würde dann erreicht, wenn entweder die Größe der Inklusionen gegen Null geht oder das repräsentative Volumenelement eine unendliche Größe annimmt. In der Realität wird dies nur näherungsweise erfüllt, indem die bereits zuvor beschriebene Forderung gilt, dass die Größe der Einschlüsse wesentlich kleiner sein muss als die Abmessungen des RVEs. Für den Fall eines linear elastischen Materialverhaltens ist der Zusammenhang zwischen Spannungen und Verzerrungen linear. Die Homogenisierung auf Basis des Matrix-Inklusions-Problems kann für unterschiedliche Anordnungsmuster der Komponenten im RVE erfolgen. Wird zum Beispiel in eine Grundmatrix eine gewisse Anzahl an Inklusionen eingebettet ( $f_{IH} < 1$ ), welche in hinreichender Entfernung wieder homogene Spannungen und Verzerrungen verursachen, so kann man das Mori-Tanaka Verfahren anwenden. Existiert jedoch keine durchgängige Grundmatrix, sondern hat man eine Durchmischung der Inklusionen aller Komponenten ist die Selbstkonsistenz-Methode am besten geeignet [4, 16]. Diese beiden kontinuums-mikromechanischen Verfahren werden im vorgestellten Laubholzmodell verwendet.

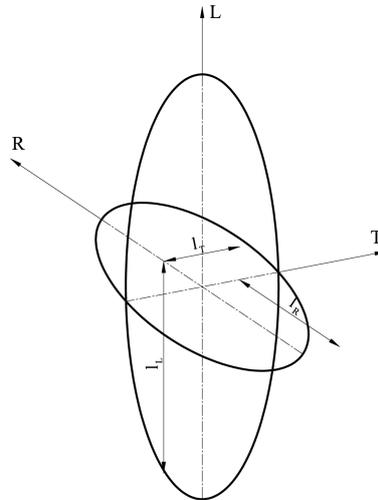


Abbildung 3.2: Beschreibung der ellipsoidalen Form der Inklusion

$$ar = \frac{l_R}{l_T} \quad (3.1)$$

$$slend = \frac{l_R}{l_L} \quad (3.2)$$

Die Inklusionen werden in allgemeiner Form als Ellipsoid definiert. Abbildung 3.2 zeigt die Definition der Formparameter eines Ellipsoids, hier in Bezug zu den Materialhauptachsen einer Holzprobe. Für die Modellierung kugeligter Inklusionen nehmen beide Verhältnisse den Wert Eins an. Lumen im Holz werden im Modell als Zylinder angenähert. Dies wird durch ein Seitenverhältnis  $ar$  von Eins und eine Schlankheit  $slend$ , die je nach Ausrichtung der Inklusion, entweder unendlich klein oder unendlich groß ist, erreicht. Im Modell wird dafür ein Wert von 0,001 oder 1000 berücksichtigt.

### 3.1.2 Einheitszellenmethode

Die Einheitszellenmethode ist in der Lage, das mechanisch-physikalische Verhalten einer wiederkehrenden aufgebauten Struktur in einem Kontinuum zu beschreiben. Dazu wird unter Ausnutzung von Periodizität und Symmetrie das wiederkehrende Element aus der Struktur betrachtet, eine sogenannte Einheitszelle. Neben geometrischen Eigenschaften müssen auch mechanische Eigenschaften der Bestandteile der Einheitszelle definiert werden. Um die homogenisierten Spannungen oder Verzerrungen zu erhalten, wird das repräsentative Element bestimmten Verschiebungen (Einheitsverschiebungszustand) unterworfen. Die Einheitsverschiebungszustände sind dadurch charakterisiert, dass die dadurch hervorgerufenen Verzerrungen nur eine Komponente ungleich Null aufweisen. An den Rändern der Einheitszelle werden zusätzlich zu den Verschiebungen periodische Randbedingungen vorgegeben. Die Bestimmung der Spannungen und Verzerrungen in der Einheitszelle kann durch analytische oder numerische Lösungen erfolgen. Aus den Mittelwerten der Spannungen und Verzerrungen über das Volumen der Einheitszelle lässt sich anschließend wieder ein effektive Steifigkeits- oder Nachgiebigkeitstensoren ermitteln [8].

### 3.1.3 Laminattheorie

Die Laminattheorie beschreibt das Verhalten eines schichtenförmig aufgebauten Materials, zufolge äußeren Belastungen oder Verschiebungen. Grundlage für die Ermittlung der effektiven Eigenschaften ist dabei, dass parallel zu den Schichten die Verzerrungen in allen Schichten konstant sind und normal zu den Schichten die Spannungen. Daraus ergeben sich mittels der schichtenweise formulierten Materialgesetze die restlichen Spannungen und die Verzerrungen in den Schichten. Mittelung von Spannungen und Verzerrungen über die Querschnittshöhe ergibt wiederum die effektiven, homogenisierten Materialeigenschaften [10].

## 3.2 Ausgangsmodell für Nadelhölzer [3]

Wie in der Einführung bereits erwähnt, wird ein bestehendes Modell für Nadelholz um spezifische Laubholzeigenschaften ergänzt. Zuvor soll jedoch das ursprüngliche Modell beschrieben werden. Als mathematische Grundlage dienen dabei die beschriebenen Homogenisierungsverfahren. Um diese anwenden zu können, müssen die Komponenten die sich in derselben Größenordnung befinden, zusammengefasst und so RVEs definiert werden. Das bestehende Modell umfasst die folgenden Schritte und Betrachtungsebenen:

**Schritt Ia:** Steifigkeit des Polymer-Netzwerkes

**Schritt Ib:** Steifigkeit der Zellulosefasern

**Schritt II:** Steifigkeit des Zellwandmaterials

**Schritt III:** Steifigkeit der Zellstruktur - Nadelholz

Um eine bessere Vorstellung über die einzelnen Schritte der Homogenisierung zu erhalten sind die zuvor aufgelisteten Punkte in Abbildung 3.3 noch einmal dargestellt. Welche Komponenten auf den einzelnen Ebenen zusammengefasst werden und welche Methode jeweils verwendet wird, beschreiben die folgenden Abschnitte.

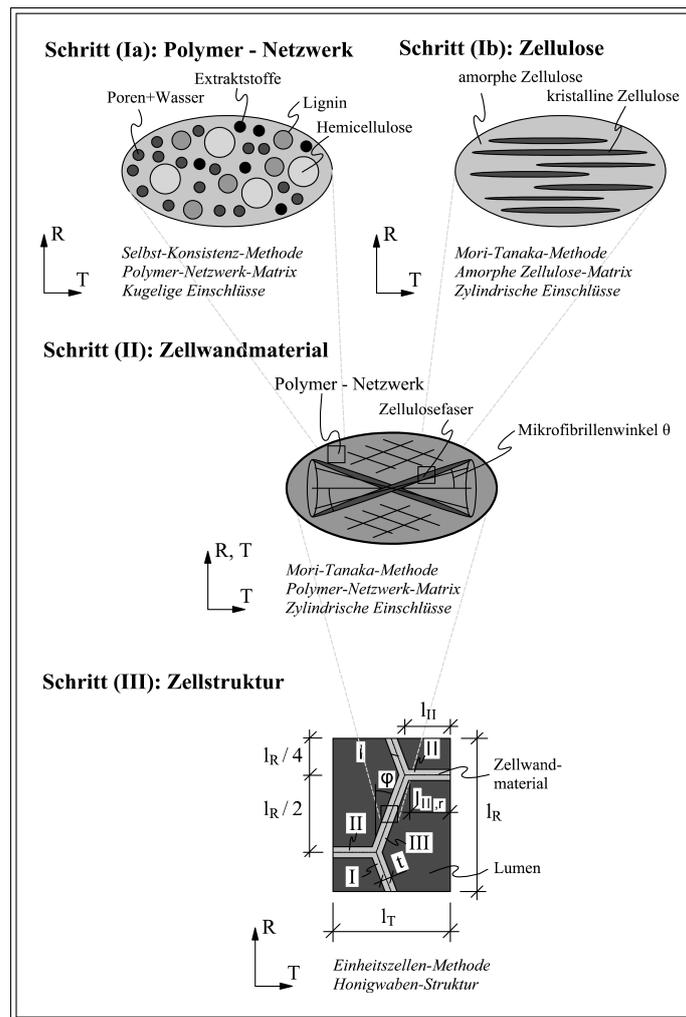


Abbildung 3.3: Modell laut [3] für die Berechnung von Nadelhölzern

### 3.2.1 Schritt Ia: Steifigkeit des Polymer-Netzwerkes

Auf dieser Betrachtungsebene erfolgt eine Homogenisierung des Polymer-Netzwerkes, welches sich aus den chemischen Bestandteilen Hemicellulose ( $HC$ ), Zellulose ( $C$ ), Lignin ( $Lig$ ), Extraktstoffe ( $Ext$ ) und Wasser ( $H_2O$ ) zusammensetzt. Die entsprechenden Anteile der Komponenten haben einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Bestimmt werden können die Volumenfraktionen zum Beispiel mittels thermogravimetrischen Analyse, die in Abschnitt 2.3.5 genauer beschrieben wird. Bei der Umrechnung von Massen- auf Volumenanteile werden die Dichten der einzelnen Bestandteile berücksichtigt (siehe Tabelle 3.1). Die Komponenten sind eng ohne regelmäßige Struktur miteinander verbunden, sodass sich die Anwendung der Selbstkonsistenz-Methode für die Homogenisierung anbietet. Wasser wird in einem Porenraum wirkend berücksichtigt. Bei Belastung ergeben sich dadurch Eigenspannungszustände im Material. Die Steifigkeit im Falle eines gefüllten, aber nicht nach außen abgeschlossenen Porenraum wird als drainierte Steifigkeit  $C_d$  bezeichnet. Bei Abschluss des Porenraums nach außen, sodass sich bei mechanischer Belastung ein Druck im Wasser aufbauen kann, wird die Steifigkeit als undrainierte Steifigkeit  $C_{ud}$  bezeichnet. In Holz wird nur der zweite Zustand verwendet. Das Ergebnis dieses Homogenisierungsschrittes ist der Steifigkeitstensor  $C_{Ia,ud} = C_{PN}$  der Polymer-Netzwerkmatrix.

Hemizellulose	1,50 g/cm <sup>3</sup>
Zellulose	siehe Tabelle 3.2
Lignin	1,37 g/cm <sup>3</sup>
Extraktstoffe	0,90 g/cm <sup>3</sup>

Tabelle 3.1: Literaturwerte für die Dichte der chemischen Bestandteile des Polymer-Netzwerkes

### 3.2.2 Schritt Ib: Steifigkeit der Zellulosefasern

Schritt Ib betrifft die Homogenisierung der amorphen und kristallinen Zellulose, welche in der Grundmatrix (Polymer-Netzwerk) als zylindrische Einschlüsse vorliegen. Da eine Bestimmung der Kristallinität (Anteil der kristallinen Zellulose) nur über eine detaillierte chemische Untersuchung möglich ist, wird hier auf Literaturwerte zurückgegriffen. Im ursprünglichen Modell werden die Werte für die Dichte und Volumenfraktionen laut Tabelle 3.2 berücksichtigt. Auf Grund der Kontinuität der amorphen Zellulose, in welche kristallinen Bereiche eingebettet sind, wird bei der Homogenisierung vom Mori-Tanaka-Verfahren Gebrauch gemacht. Resultat dieses Homogenisierungsschrittes ist der Steifigkeitstensor  $\mathbb{C}_{Ib,ud} = \mathbb{C}_{ZF}$ .

Amorphe Zellulose	0,66 %	1,50 g/cm <sup>3</sup>
Kristalline Zellulose	0,44 %	1,59 g/cm <sup>3</sup>

Tabelle 3.2: Literaturwerte für die Volumenfraktionen und die Dichte der amorphen und kristallinen Zellulose

### 3.2.3 Schritt II: Steifigkeit des Zellwandmaterials

Die Ergebnisse aus den Schritten Ia und Ib werden für die Bestimmung der Zellwandsteifigkeit  $\mathbb{C}_{II,ud} = \mathbb{C}_{ZM}$  verwendet. Der strukturelle Aufbau der Zellwand sieht dabei so aus, dass die Zellulosefasern aus Schritt Ib in einer longitudinal verlaufenden Spirale angeordnet sind, und dass die Fasern mit der in Schritt Ia beschriebenen Polymer-Netzwerk-Matrix verbunden sind. Die Zellulosefasern nehmen dabei in Bezug zur longitudinalen Richtung einen bestimmten Winkel ein. Der Mittelwert dieses Winkels wird als Mikrofibrillenwinkel  $\theta$  bezeichnet und ist in Abschnitt 2.3.4, bei der Durchführung der Mikrofibrillenwinkelbestimmung definiert. Für die Berechnung der Zellwandsteifigkeit wird auf Grund der Kontinuität der Polymer-Netzwerk-Matrix wie im Abschnitt 3.2.2, für die Homogenisierung wieder das Mori-Tanaka-Verfahren verwendet.

### 3.2.4 Schritt III: Steifigkeit der Zellstruktur

Nadelholz weist eine über den gesamten Jahrring beinahe konstante hexagonale Struktur auf. Lediglich im Bereich des Spätholzes kommt es zu einer Verdichtung der Zellstruktur. Diese Bereiche, sind jedoch im Bezug zur Jahrringbreite relativ klein. Aus diesem Grund wird für die Homogenisierung, eine repräsentative Zellstruktur definiert, welche auch als Einheitszelle bezeichnet wird. Diese setzt sich aus dem Zellwandmaterial, mit der Steifigkeit  $\mathbb{C}_{II,ud}$  und dem Volumenanteil  $f_{cwm}$ , und den Lumenporen mit dem Anteil  $f_{lum}$  zusammen. Für die Homogenisierung wird die Einheitszellenmethode verwendet,

deren Grundlage in Abschnitt 3.1.2 beschrieben ist. Das Seitenverhältnis  $\lambda$  beschreibt das Verhältnis zwischen den Längen in radialer und tangentialer Richtung. Es gilt somit der Zusammenhang  $\lambda = l_T/l_R$ . Die Bestimmungen der Spannungen und Verzerrungen in der Zellwand innerhalb der Einheitszelle basiert auf plattentheoretischen Überlegungen, wodurch die Plattentragwirkung der Zellwand und entsprechende Biege- und Schubeffekte abgebildet werden können. Die gemittelten Resultate ergeben einen homogenisierten Steifigkeitstensor der Zellstruktur  $\mathbb{C}_{III,ud} = \mathbb{C}_{ZS}$ .

### 3.3 Laubholzmodell

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, wird das ursprüngliche Modell laut Abschnitt 3.2 in Hinblick auf die Unterschiede zwischen Laub- und Nadelhölzer, welche in Abschnitt 2.2 definiert sind, erweitert. Im Speziellen werden dabei nun Gefäße und Holzstrahlen, in die Modellierung implementiert. Des Weiteren wird noch der schichtenförmige Aufbau der ringporigen Holzarten sowie die Faserabweichung berücksichtigt. Das geänderte Modell gliedert sich, je nachdem ob es sich um ringporige oder zerstreutporige Hölzer handelt, laut Tabelle 3.3. Eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Schritte erfolgt für die ringporigen Holzarten in Abschnitt 3.3.1 und für die zerstreutporigen Holzarten in Abschnitt 3.3.2. Die Homogenisierungsschritte I bis II werden dabei unverändert vom Nadelholzmodell übernommen.

	Modell für ringporige Hölzer	Modell für zerstreutporige Hölzer
<b>Schritt Ia:</b>	Steifigkeit des Polymer-Netzwerkes	Steifigkeit des Polymer-Netzwerkes
<b>Schritt Ib:</b>	Steifigkeit der Zellulosefasern	Steifigkeit der Zellulosefasern
<b>Schritt II:</b>	Steifigkeit des Zellmaterials	Steifigkeit des Zellmaterials
<b>Schritt III:</b>	Steifigkeit der Zellstruktur	Steifigkeit der Zellstruktur
<b>Schritt IV:</b>	Steifigkeit des Früh- und Spätholzes	entfällt
<b>Schritt V:</b>	Steifigkeit des Laubholzes	Steifigkeit des Laubholzes

Tabelle 3.3: Gegenüberstellung der Homogenisierungsschritte I bis V für ringporige und zerstreutporige Hölzer

#### 3.3.1 Schritte III bis V des ringporigen Laubholzmodells

Die zuvor angeführten Schritte werden nun detailliert beschrieben und anhand der Abbildung 3.4 veranschaulicht.

##### 3.3.1.1 Schritt III: Steifigkeit der Zellstruktur (alternativ)

Als Alternative zu dem unter Abschnitt 3.2.4 beschriebenen Verfahren, in dem die Homogenisierung mittels Einheitszellenverfahren durchgeführt wird, erfolgt hier eine Berechnung über eine kontinuums-mikromechanische Betrachtung. Im Speziellen wird für die Homogenisierung das Mori-Tanaka-Schema verwendet, welches Platten- und Schubeffekte bei der Tragwirkung der Zellwand vernachlässigt, aber auf Grund der eher unregelmäßigeren Anordnung und vor allem der geringen Volumenfraktion der Inklusionen (Lumen) besser für die Beschreibung des Verhaltens der Zellstruktur geeignet ist. Die Grundmatrix

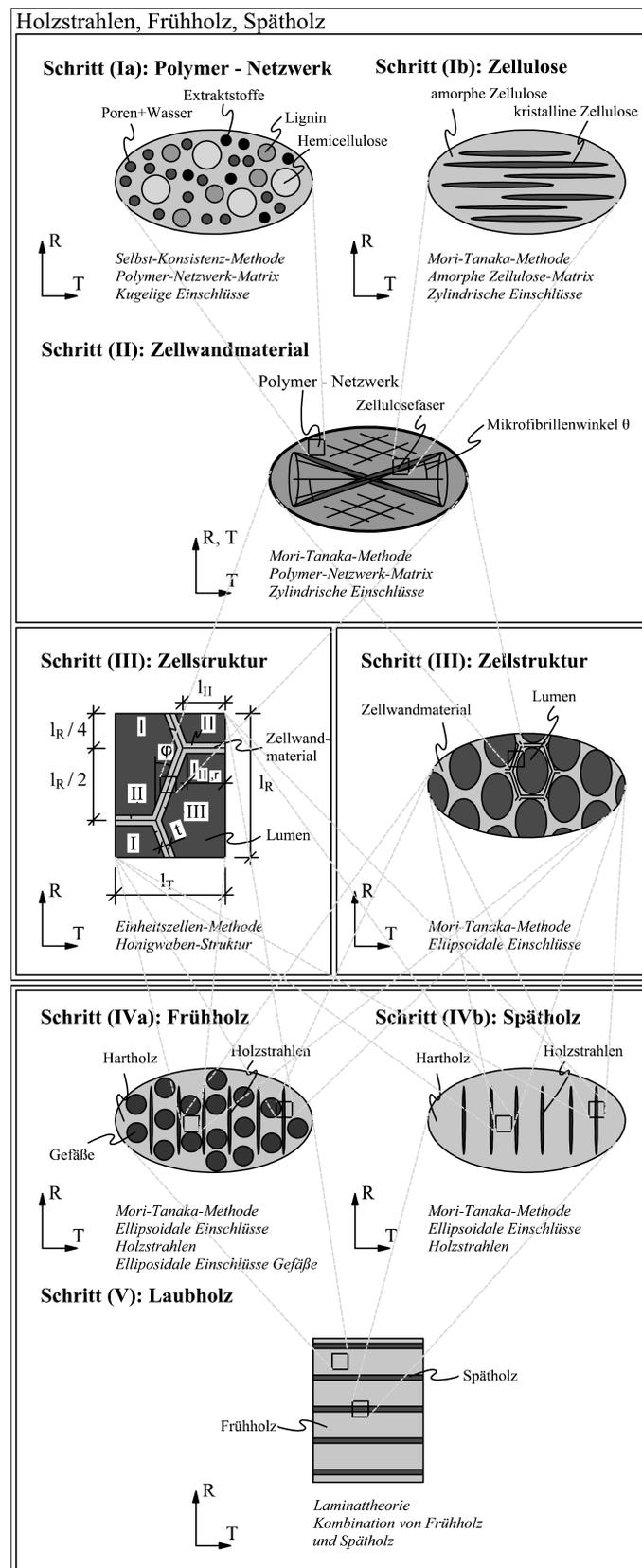


Abbildung 3.4: Modell für die Berechnung ringporiger Holzarten

wird durch das Zellmaterial, mit der Steifigkeit  $C_{II,ud}$  definiert. Die Inklusionen werden über die Formparameter  $ar_{lum}$  und  $slend_{lum}$  so definiert, dass sie die annähernd zylind-

drische Form der Lumen in der Probe beschreiben. Das Ergebnis der Homogenisierung ist die Steifigkeit  $\mathbb{C}_{III,ud} = \mathbb{C}_{ZS}$  der Zellstruktur. Einige der untersuchten Holzarten weisen keinen konstanten Faserverlauf in longitudinaler Richtung auf, welcher hauptsächlich Abweichungen in der longitudinal-tangentialen Ebene aufweist. Der Effekt der Faserabweichung auf den Steifigkeitstensor wird durch die Mittelung von Steifigkeitstensenoren für die unterschiedlichen gemessenen Faserrichtungen über die gemessenen Winkel berücksichtigt [17].

### 3.3.1.2 Schritt IVa und IVb: Steifigkeit des Früh- und Spätholzes

Vor der Homogenisierung des Laubholzes muss für die ringporigen Holzarten, ein Zwischenschritt definiert werden. Dabei wird eine Trennung des Jahrringes in Frühholz, welches sich aus der Steifigkeit der Zellstruktur, Holzstrahlen und Gefäßen zusammensetzt, und in Spätholz, welches keine Gefäße beinhaltet und eine höhere Dichte der Zellstruktur aufweist, berücksichtigt. Die Modellierung erfolgt wieder über eine kontinuums-mikromechanische Betrachtung mittels des Mori-Tanaka-Schemas für beide Bereiche, wobei für die Modellierung des Spätholzes der Anteil der Gefäße zu Null gesetzt wird ( $f_{VE} = 0$ ). Die Gefäße und Holzstrahlen werden dabei als ellipsoide Inklusionen im Querschnitt berücksichtigt. Deren Form wird mit den Parametern  $ar_{VE}$ ,  $slend_{VE}$  und  $ar_{WR}$ ,  $slend_{WR}$  beschrieben. Das Ergebnis der Homogenisierung sind die beiden Steifigkeitstensenoren  $\mathbb{C}_{IVa,ud} = \mathbb{C}_{FH}$  und  $\mathbb{C}_{IVb,ud} = \mathbb{C}_{SH}$  des Früh- und Spätholzes.

### 3.3.1.3 Schritt V: Laubholz

Schritt V beschreibt schließlich die Homogenisierung des Laubholzes. Im Falle der ringporigen Holzarten erfolgt diese mittels Laminattheorie. Dabei werden die Steifigkeitstensenoren des Früh- und Spätholzes ( $\mathbb{C}_{IVa,ud}$  und  $\mathbb{C}_{IVb,ud}$ ) unter Berücksichtigung der Volumenanteile  $f_{EW}$  und  $f_{LW}$  zu einer Laubholzsteifigkeit  $\mathbb{C}_{V,ud} = \mathbb{C}_{LH}$  zusammengesetzt.

## 3.3.2 Schritte IV bis V des zerstreutporigen Laubholzmodells

Wie die Tabelle 3.3 veranschaulicht, ist Schritt IV für die Modellierung zerstreutporiger Hölzer nicht ident zu den ringporigen Hölzern. Da der Schritt V auf den vorangegangenen Schritt aufbaut, ist dieser ebenfalls nicht ident. In diesem Abschnitt werden deshalb diese Schritte erneut definiert. Abbildung 3.5 veranschaulicht die Homogenisierungsschritte für zerstreutporige Hölzer.

### 3.3.2.1 Schritt IV: Steifigkeit des Früh- und Spätholzes

Da zerstreutporige Hölzer keine deutlich unterschiedlichen Früh- und Spätholzbereiche aufweisen, entfällt dieser Schritt der Homogenisierung.

### 3.3.2.2 Schritt V: Laubholz

Schritt V beschreibt die Homogenisierung des Laubholzes für zerstreutporige Holzarten. Da hier keine Trennung in Früh- und Spätholz erfolgt, wird nicht wie in Abschnitt 3.3.1.3 von der Laminattheorie Gebrauch gemacht. Stattdessen erfolgt die Modellierung mittels einem kontinuums-mikromechanischen Modell auf Basis der Mori-Tanaka-Methode. Wie unter Schritt IV für ringporige Holzarten, setzt sich das gesamte Laubholz aus den Steifigkeiten der Zellstruktur  $\mathbb{C}_{III,ud}$ , der Holzstrahlen  $\mathbb{C}_{WR,III,ud}$  und der Gefäße zusammen.

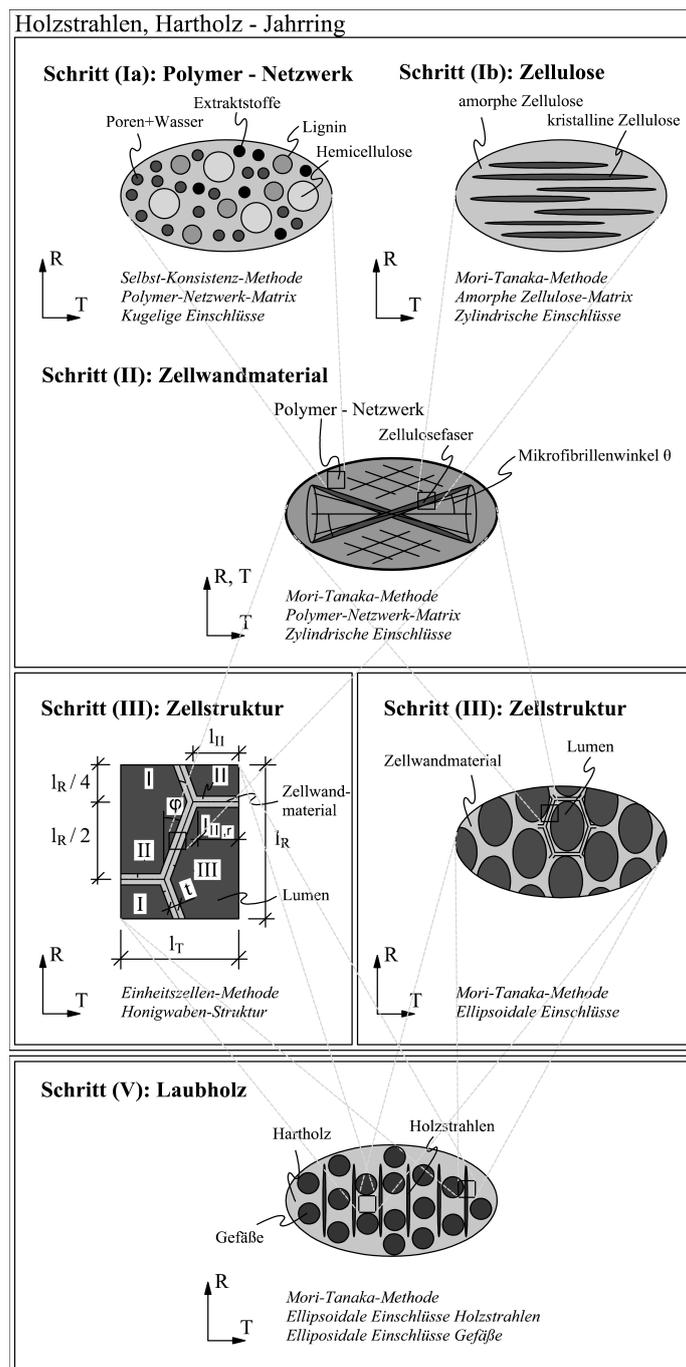


Abbildung 3.5: Modell für die Berechnung zerstreuporiger Holzarten

### 3.4 Parameterstudie

Wie in den Abschnitten 3.2.4 und 3.3.1.1 beschrieben, und wie in den Abbildungen 3.4 und 3.5 zu erkennen, erfolgt die Modellierung der Zellstruktur auf zwei unterschiedliche Arten. Im Folgenden wird die Modellierung des Schrittes III mittels Einheitszellenmethode dem alternativen Schritt III mittels kontinuums-mikromechanischer Betrachtung gegenübergestellt (siehe Abschnitte 3.2.4 und 3.3.1.1). Die Grundlagen der Theorien sind in den Abschnitten 3.1.1 und 3.1.2 beschrieben. Begründen lässt sich die Gegenüberstellung dadurch, dass es auf Grund der verwendeten Formulierung der Einheitszellenmethode, bei höheren Zellstrukturdichten zu numerischen Problemen kommen kann. Da die meisten

Laubhölzer generell eine höhere Holzdicke als Nadelhölzer aufweisen, und sich gemäß ihres Aufbaues (mit Gefäßen und Holzstrahlen) die Zellstrukturdicke noch weiter erhöht, müssen die Einflüsse der Einheitszellenmethode auf das Ergebnis untersucht werden. Des Weiteren ist eine Definition eines repräsentativen Elementes bei Laubhölzern in den meisten Fällen nur schwer durchzuführen, was in Abbildung 3.6 veranschaulicht werden soll. Aus diesem Grund wurde der alternative Schritt III, wie in Abschnitten 3.4 beschrieben, mittels kontinuums-mikromechanischer Beschreibung eingeführt. Da die verwendete Definition der Einheitszelle in der Lage ist, Platten- und Schubtrageeffekte der Zellwand zu berücksichtigen, sollten die Ergebnisse der Elastizitätsmoduli bei niedrigen Dichten höhere Ergebnisse liefern als zufolge des kontinuums-mikromechanischen Modells, welches diese nicht beachtet und somit unterschätzt. Anhand der Gegenüberstellung soll definiert werden, wann die Verwendung der Einheitszellenmethode und wann das kontinuums-mikromechanische Modell sinnvoller ist. Im Allgemeinen erfolgt der Übergang zwischen den beiden Modellen fließend. Der Vergleich der Modelle soll dadurch vereinfacht werden, dass die Steifigkeit der Zellstruktur betrachtet wird und nicht die Steifigkeit des Laubholzes. Somit werden Einflüsse aus den Holzstrahlen und Gefäßen von vornherein ausgeschlossen. Folgende Eigenschaften werden nun in den Abschnitten 3.4.1 und 3.4.2 variiert.

**Variation einer Variable:**

1. Dichte
2. Form der Lumen
3. Feuchtegehalt
4. Mikrofibrillenwinkel

**Variation mehrerer Variablen:**

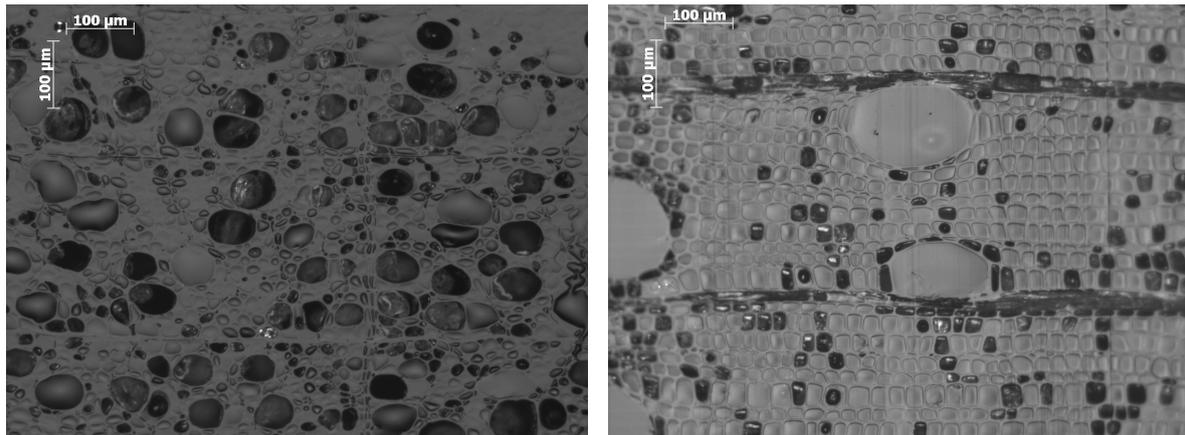
1. Dichte und Feuchtegehaltes
2. Dichte und Form der Lumen

Die angeführten Eigenschaften werden in der Modellierung nicht immer direkt berücksichtigt, sondern können auch durch andere Materialeigenschaften und Strukturgrößen beschrieben werden. Die erste Variation bei nur einer Variable beschreibt zum Beispiel den Einfluss der Dichte des Laubholzes, mit einem Holzstrahlen- und Gefäßanteil von null. Das Volumen der Zellstruktur setzt sich dabei aus dem Lumen und der Zellwand zusammen, wobei sich die gesamte Masse in der Zellwand konzentrieren muss. Wie in Abschnitt 3.2.3 definiert, besteht diese wiederum aus dem Polymer-Netzwerk und den Zellulosefasern. Die Dichten beider Materialien werden dabei aus der chemischen Zusammensetzung und den spezifischen Dichten berechnet und sind somit von der Variation der Materialeigenschaft der Dichte unabhängig. Eine Variation der Dichte beschreibt somit eine Änderung des Verhältnisses des Volumenanteils der Zellwand und des Lumens.

Die Form der Lumen wird im Modell zufolge Einheitszellenmethode über das Verhältnis der tangentialen zur radialen Länge  $\lambda$  und der Winkelabweichung der radial verlaufenden Zellwand  $\varphi$  berücksichtigt, während zufolge Kontinuums-Mikromechanik das Lumen über die Definition der Inklusion mittels dem Seitenverhältnis  $1/ar$  und der Schlankheit *slend* beschrieben wird. Um isotrope Eigenschaften in der radial-tangential Ebene zu schaffen, müsste der Winkel  $\varphi$  einen Wert von  $30^\circ$  annehmen. Da dies, zufolge der verwendeten Beschreibung der Einheitszelle bereits den Grenzfall darstellt, wurde mit einem Winkel

von  $20^\circ$  gerechnet. Die Strukturparameter sind unabhängige Größen und beschreiben in beiden Modellen direkt die Wirkungsrichtungen der Lumen und somit den Einfluss auf die radialen und tangentialen Komponenten. Einflüsse in longitudinaler Richtung ergeben sich auf Grund der Definition der Lumen als längliche Zylinder, nur in geringem Ausmaß. Der Feuchtegehalt der Proben wird bereits im ersten Homogenisierungsschritt Ia, und zwar bei der Rückrechnung der Volumenanteile aus den gemessenen Massenprozent der chemischen Zusammensetzung, beachtet. Er beschreibt dabei den Anteil an Wasser im Polymer-Netzwerk. Da sich in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes auch die Dichte der Probe ändern würde, müsste diese für jeden Variationswert ermittelt werden. Da der genaue Zusammenhang des Feuchte-Dichte-Verhältnisses noch von mehreren anderen Einflüssen abhängt, wurde in der Parameterstudie in Abschnitt 3.4.1.3 nur der Feuchtegehalt und dessen Auswirkungen variiert und dafür in Abschnitt 3.4.2.1 der kombinierte Einfluss der Dichte und der Feuchte dargestellt.

Der Mikrofibrillenwinkel wird in Schritt II berücksichtigt, und beschreibt den Strukturaufbau der Zellwand. Genauer gesagt, beschreibt er die Ausrichtung der Zellulosefasern im Zellwandmaterial. Eine Änderung wirkt sich somit unmittelbar auf die berechneten Ergebnisse aus. Feuchte und Mikrofibrillenwinkel ändern die Zellwandsteifigkeit, die eine direkte Eingangsgröße des Modells in Schritt II ist.



(a) Querschnitt der Linde

(b) Querschnitt der Virola

Abbildung 3.6: Vergleich der Zellstruktur, (a) unregelmäßige Zellstruktur der Linde, (b) regelmäßige Struktur der Virola

Da die Variation nicht für alle Holzarten durchgeführt werden kann, wird sie nur für eine speziell ausgewählte durchgeführt. Die Wahl ist dabei auf die Buche gefallen, da diese die geringste Streuung in den Messergebnissen aufweist und des Weiteren noch im Mittelbereich der Dichte liegt. Sie wurde dabei mit den Tabelle 3.4 und Tabelle 3.5 angeführten Werten im Modell berücksichtigt. Diese weichen etwas von den in Tabelle 2.18 ab, da zum Zeitpunkt der Durchführung der Parameterstudie noch nicht alle Ergebnisse der chemischen Analyse vorlagen.

### 3.4.1 Variation der Eingangsgrößen

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Parameterstudie dargestellt. Die Abbildungen zeigen dabei die Verläufe der radialen, tangentialen und longitudinalen Elastizitätsmoduli ( $E_{ZS,L}$ ,  $E_{ZS,R}$  und  $E_{ZS,T}$ ) und der Komponenten des Biot-Tensor ( $b_{ZS,LL}$ ,  $b_{ZS,RR}$  und  $b_{ZS,TT}$ ) sowie den Verlauf des Biot-Moduls ( $N$ ) der Zellstruktur ( $ZS$ ).

Holzart	Zellulose [m%]	Hemizellulose [m%]	Lignin [m%]	Extraktstoffe [m%]
Buche	39,4	33,3	24,8	2,6

Tabelle 3.4: Massenprozent der chemischen Bestandteile der Buche für die Parameterstudie und später für die Sensibilitätsanalyse

Probe	Buche
$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,699
$u$ [m%]	10
$\theta$ [°]	10
$\lambda$ [–]	0,866
$\varphi$ [°]	20
$ar_{lum}$ [–]	1
$slend_{lum}$ [–]	0,001
$f_{WR}$ [–]	0
$f_{VE}$ [–]	0

Tabelle 3.5: Struktureigenschaften der Buche für das mikromechanische Modell

### 3.4.1.1 Ergebnisse der Variation der Dichte

Abbildung 3.7 zeigt die Verläufe der Ergebnisse zufolge der Variation der Dichte der Laubholzprobe, was bei einem Holzstrahlen- und Gefäßanteil von null der Dichte der Zellstruktur entspricht. Der Messwert der Buche liegt dabei bei  $0,699 \text{ g/cm}^3$ . Mit zunehmender Dichte steigt der Anteil der Zellwand, was zu einer Erhöhung der Elastizitätsmoduli führt. Wie bereits in Abschnitt 3.4 beschrieben, eignet sich die Einheitszellenmethode nicht für die Modellierung bei höheren Dichten. Wie man in Abbildung 3.7(a) erkennt, steigen mit zunehmender Dichte der radiale und tangentiale Elastizitätsmodul nichtlinear an. Aber auch die kontinuums-mikromechanische Modellierung überschätzt die Elastizitätsmoduli, und zwar bei niedrigen Dichten. Die Ergebnisse für den tangentialen und radialen Modul sind geringfügig zu hoch. Die Abbildung zeigt auch, dass die Verläufe der radialen und tangentialen Elastizitätsmoduli zufolge der Einheitszellenmethode nicht ident sind, im Gegensatz zur kontinuums-mikromechanischen Berechnung. Dies resultiert aus der Wahl des Winkels  $\varphi$  mit  $20^\circ$ . Des Weiteren decken sich die Verläufe des longitudinalen Elastizitätsmoduls, da für diesen die Anordnung des Zellwandmaterials im Querschnitt nur eine unbedeutende Rolle spielt. Bei niedrigen und mittleren Dichten entsprechen einander des Weiteren die Verläufe der Biot-Tensor-Komponenten und des Biot-Moduls beider Varianten. Lediglich bei höheren Dichten, erfolgt eine Abweichung beider Varianten. Die Resultate lassen die Schlussfolgerung zu, dass bis zu einer Dichte von zirka  $0,700 \text{ g/cm}^3$  die Einheitszellenmethode brauchbare Ergebnisse liefert und für höhere Dichten eine kontinuums-mikromechanische Modellierung verwendet werden sollte.

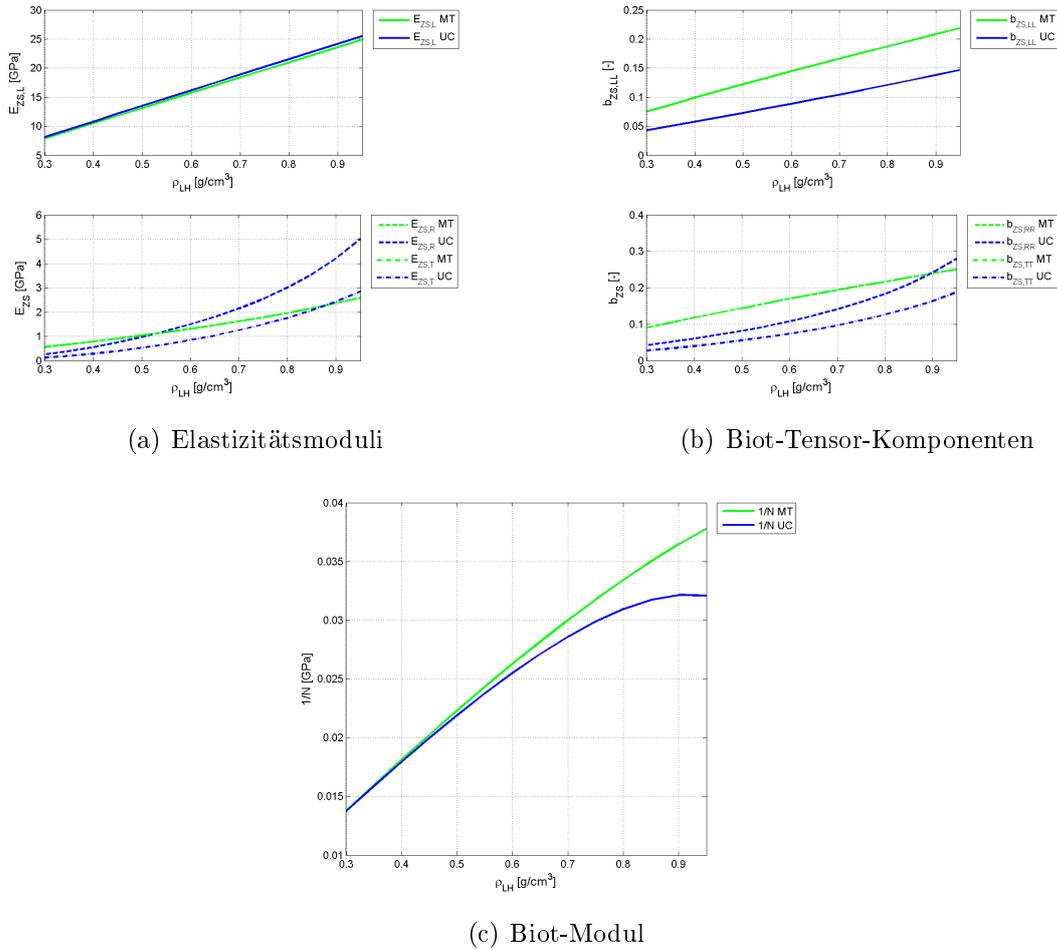


Abbildung 3.7: Ergebnisse zufolge der Variation der Dichte

### 3.4.1.2 Ergebnisse der Variation des Seitenverhältnisses sowie des Lambdas

Abbildung 3.8 beschreibt die Auswirkung einer Berücksichtigung verschiedener Lumenformen, welche durch die Variation des Seitenverhältnisses und des Lambdawertes erfolgt, während die Längsausdehnung der Lumen für beide Modelle unverändert bleibt. Die Werte für das Seitenverhältnis und den Lambdawert werden dazu im Bereich von 0,5 bis 2,0 variiert, wodurch die Form der Inklusion in der radial-tangentialen Ebene zwischen einer in radialer Richtung ausgerichteten Ellipse ( $\lambda = 0,866 \cdot 0,5$  und  $1/ar_{lum} = 0,5$ ), über einen Kreis ( $\lambda = 0,866 \cdot 1,0$  und  $1/ar_{lum} = 1,0$ ), hin zu einer in tangentialer Richtung ausgedehnten Ellipse ( $\lambda = 0,866 \cdot 2,0$  und  $1/ar_{lum} = 2,0$ ) übergeht. Die Form in longitudinaler Richtung muss nur für die kontinuums-mikromechanische Modellierung definiert werden und entspricht einem Schlankheitswert von  $slend_{lum} = 1000$  laut Tabelle 3.5. Der Wert 0,866, mit dem der variierte Wert multipliziert wird, ergibt sich aus dem Seitenverhältnis der Einheitszelle ( $\lambda = l_T/l_R = 1,500/1,732$ ). Des Weiteren ist die Definition des Seitenverhältnisses der Inklusion zufolge kontinuums-mikromechanischer Modellierung entgegengesetzt der Definition zufolge Einheitszellenmethode. Somit ergibt sich ein allgemeiner Zusammenhang zwischen den Formparametern für die Einheitszellenmethode und die kontinuums-mikromechanische Modellierung mit  $0,866 \cdot \lambda = 1/ar$ . Die Abbildung zeigt, dass die Lumenform großen Einfluss auf die Resultate hat, insbesondere auf die tangentiale und radiale Steifigkeit. Auf Grund der Ausrichtung der Einschlüsse ist der Effekt in longitudinaler Richtung vernachlässigbar. Im Falle der Modellierung mit

dem Mori-Tanaka-Schema ergibt sich im gesamten Bereich eine Abnahme des radialen beziehungsweise eine Zunahme des tangentialen Elastizitätsmoduls von zirka  $0,70 \text{ GPa}$ . Im Bezug zum Höchstwert entspricht das einer Abweichung von zirka  $30 \%$ . Die Modellierung der Einheitszellenmethode weist noch deutlich größere Abweichungen auf. Zuzufolge der nicht exakt definierten symmetrischen Form, beträgt die Abweichung in tangentialer Richtung zirka  $2,0 \text{ GPa}$ . In radialer Richtung dagegen sind die Auswirkungen vernachlässigbar. Hier wäre jedoch zu erwarten gewesen, dass sich der Effekt umkehren würde, wie es bei den radialen und tangentialen Komponenten des Biot-Tensors zufolge Einheitszelle der Fall ist. Der Trend bei  $E_{ZS,R}$  und  $E_{ZS,T}$  im Bereich von  $1,00$  bis  $2,00$  ist ähnlich. Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Komponenten des Biot-Moduls zufolge beider Modelle, scheinen erhebliche Unterschiede aufzutreten. Dies ist jedoch auf die Skalierung der Abszisse zurückzuführen.

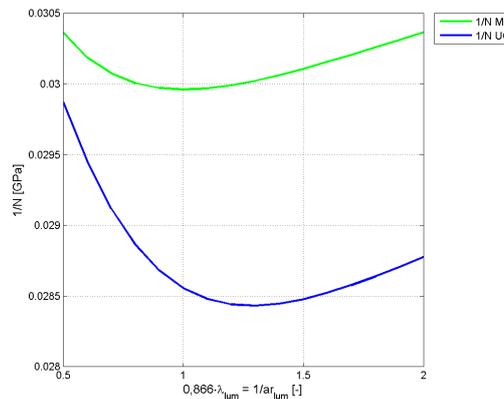
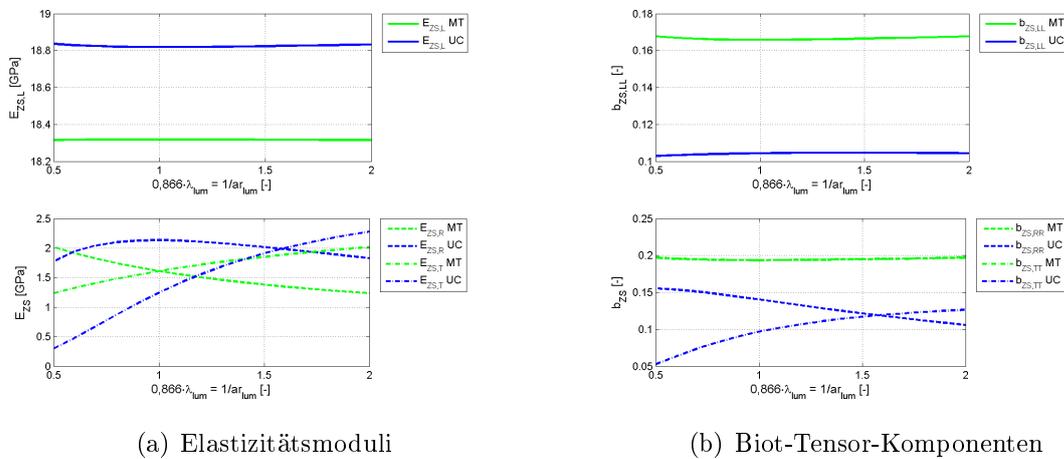


Abbildung 3.8: Ergebnisse zufolge der Variation der Lumenform

### 3.4.1.3 Ergebnisse der Variation des Feuchtegehaltes

Abbildung 3.9 zeigt die Variation des Feuchtegehaltes anhand des mikromechanischen Modelles der Buche. Der gemessene Feuchtegehalt der Proben beträgt  $10,0 \%$  (siehe Tabelle 3.5). Wie man anhand der Verläufe der Elastizitätsmoduli zufolge beider Modelle erkennt, nehmen diese mit zunehmendem Feuchtegehalt ab. Die Erhöhung des Feuchtegehaltes bewirkt eine Steigerung des mit Wasser gefüllten Porenraumes in der Zellwand,

was zu einem Sinken der Zellwandsteifigkeit führt. Dadurch nehmen die Elastizitätsmoduli ab, während die Komponenten des Biot-Tensors und der Biot-Modul zunehmen. Des Weiteren decken sich die Verläufe des radialen und tangentialen Elastizitätsmoduls und Biot-Tensor, zufolge der kontinuums-mikromechanischen Modellierung, während die Verläufe zufolge Einheitszellenmethode unterschiedlich sind. Dies ist wieder auf die Wahl des Winkels  $\varphi$  mit  $20^\circ$  zurückzuführen.

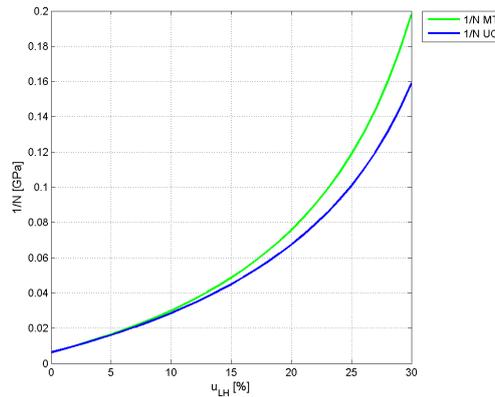
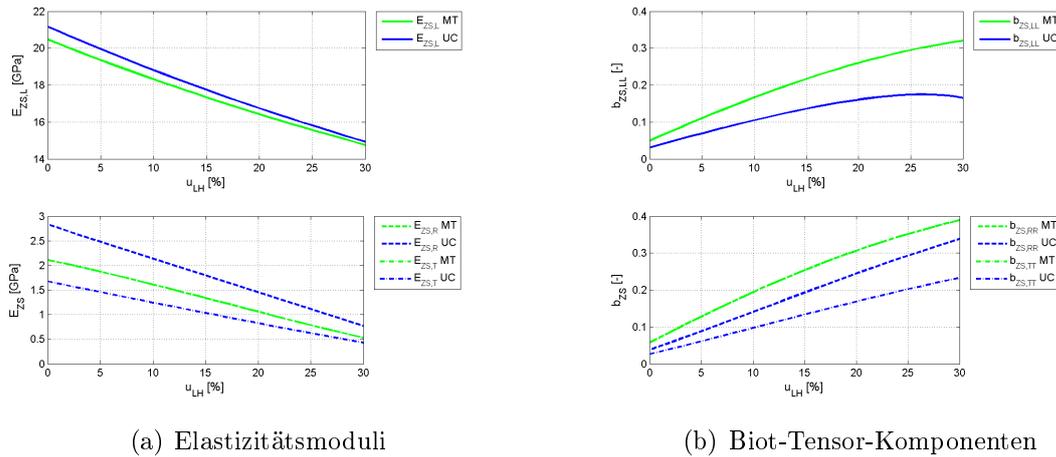
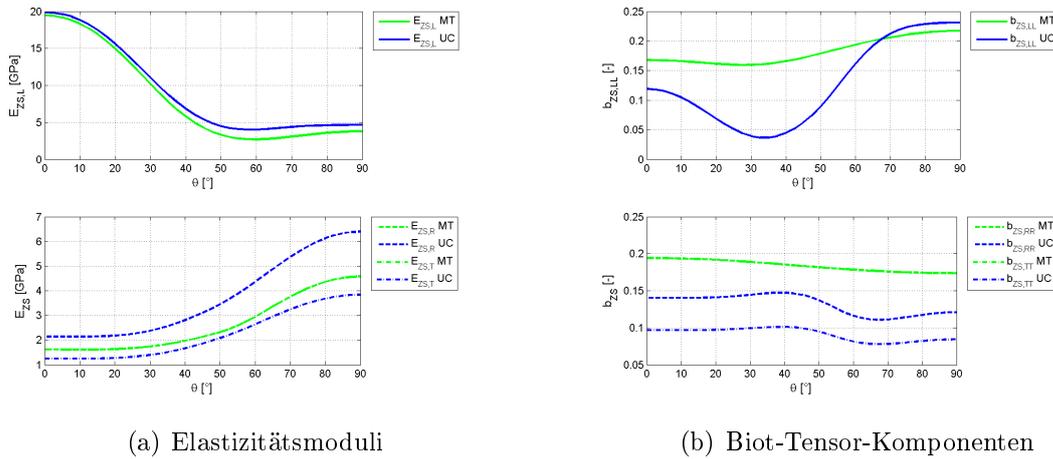


Abbildung 3.9: Ergebnisse zufolge der Variation des Feuchtegehaltes

### 3.4.1.4 Ergebnisse der Variation des Mikrofibrillenwinkels

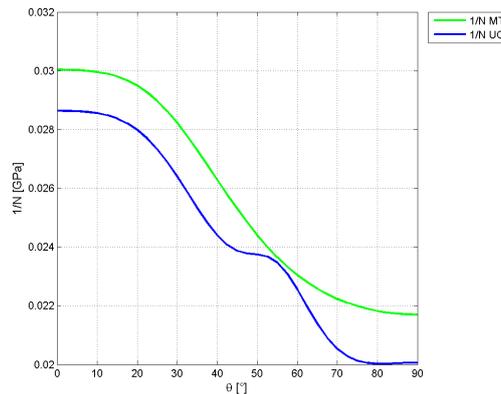
Abbildung 3.10 zeigt die Resultate der Variation des Mikrofibrillenwinkels. Dieser hat erhebliche Auswirkungen auf die Verläufe der Elastizitätsmoduli in beiden Modellen, wobei die Abweichung der Ergebnisse aus den beiden Modellierungsansätzen vernachlässigbar klein ist. Während  $E_{ZS,L}$  mit zunehmendem Mikrofibrillenwinkel abnimmt, nehmen  $E_{ZS,T}$  und  $E_{ZS,R}$  zu. Einflüsse des Mikrofibrillenwinkels sind auch in den Komponenten des Biot-Tensors und beim Biot-Modul zu erkennen. Die Werte zwischen den Modellen weichen zwar ab, die Form der Verläufe entsprechen jedoch einander, bis auf zwei Bereiche. Der Verlauf der Biot-Tensor-Komponenten in longitudinaler Richtung zufolge der Einheitszellenmethode deckt sich bei sehr kleinen und sehr großen Mikrofibrillenwinkeln, mit dem Verlauf des Ergebnisses der kontinuums-mikromechanischen Betrachtung, jedoch weist er bei mittleren Winkeln eine erhebliche Abweichung auf. Ebenso wie die

Biot-Tensor-Komponenten, besitzt der Biot-Modul im Bereich von 40 bis 70° eine ausgeprägte Abweichung. Da die Verläufe des Elastizitätsmoduls keine Unstetigkeiten bei Berechnung zufolge Einheitszellenmethode zeigen, kann es sich hierbei um ein Problem in der Rückrechnung der Komponenten des Biot-Tensor und des Biot-Moduls aus dem resultierenden Steifigkeitstensor bei Anwendung der kontinuums-mikromechanischen Methode handeln.



(a) Elastizitätsmoduli

(b) Biot-Tensor-Komponenten



(c) Biot-Modul

Abbildung 3.10: Ergebnisse zufolge der Variation des Mikrofibrillenwinkels

## 3.4.2 Variation mehrerer Variablen

### 3.4.2.1 Ergebnisse der Variationen der Dichte der Probe und des Feuchtegehaltes

Abbildung 3.11 zeigt den Zusammenhang zwischen den Modellergebnissen bei Variation der Dichte und Feuchte. Wie in der Einleitung der Parameterstudie (siehe Abschnitt 3.4) bereits erwähnt, würde sich bei einer Änderung des Feuchtegehaltes auch die Dichte der Probe ändern. Da in den vorhergehenden Abschnitten jedoch nur die Auswirkung der Variation einer Materialeigenschaft von Interesse war, wird die Variation beider Eigenschaften nun untersucht. Die Verläufe der Ergebnisse aus beiden Modellen zeigen gleiche Tendenzen. Im Falle der Elastizitätsmoduli nehmen diese von einer hohen Dichte und einem niedrigen Feuchtegehalt hin zu einer niedrigen Dichte und einem hohen Feuchtegehalt ab. Zu erkennen ist auch, dass die kontinuums-mikromechanische Berechnung

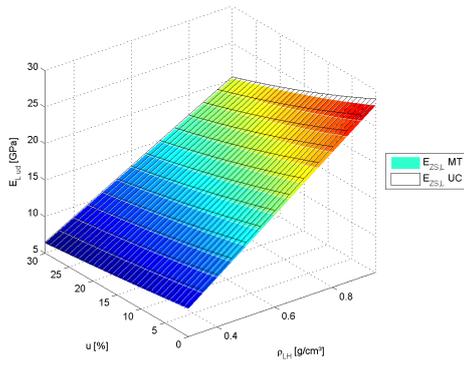
annähernd Ebenen als Resultat ergibt, während die Verläufe zufolge Einheitszellenmethode mit zunehmender Dichte nichtlinear verlaufen. Die Ergebnisse der Biot-Tensor-Komponenten und des Biot-Moduls zufolge kontinuums-mikromechanischer Betrachtung liegen alle deutlich niedriger als die Resultate zufolge Einheitszellenmethode. Nur in Bereichen niedrigen Feuchtegehaltes wird eine gute Übereinstimmung erreicht.

### 3.4.2.2 Ergebnisse der Variation der Dichte der Probe und der Form der Lumen

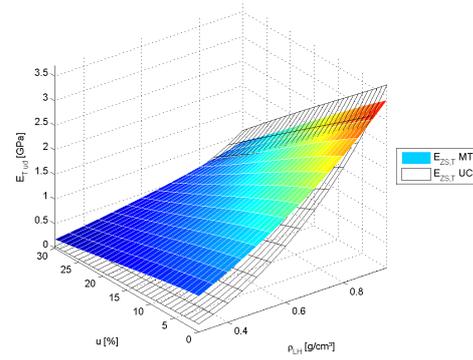
Als Letztes werden noch die Ergebnisse zufolge der Variation der Lumenform und der Dichte der Probe gegenübergestellt. Wie bereits in Abschnitt 3.4.1.2 diskutiert, ergibt sich durch die Lumenform hauptsächlich ein Einfluss in die Querrichtungen. Das wird ebenfalls durch Abbildung 3.12 bestätigt. Die Ergebnisse der kontinuums-mikromechanischen Berechnungen und jenen mittels Einheitszellenmethode entsprechen denen zufolge Abbildung 3.8. Der Einfluss der Dichte besteht nur darin, dass bei festgehaltenem Wert die Resultate zufolge der Lumenform nach oben oder unten linear verschoben werden.

### 3.4.3 Schlussfolgerung

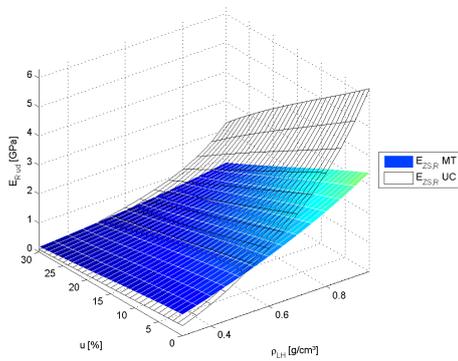
Wie anhand der Parameterstudie festgestellt wurde, kann mit der Einheitszellenmethode in manchen Fällen eine gute Übereinstimmungen mit der kontinuums-mikromechanischen Modellierung erreicht werden. Die Einflüsse der Eingangsgrößen werden von beiden Modellen ähnlich abgebildet. Besonders bei niedrigeren und großen Dichten ist die Abweichung sehr groß. Im Bereich zwischen  $0,600 \text{ g/cm}^3$  und  $0,800 \text{ g/cm}^3$ , werden die Unterschiede zwischen beiden Modellen kleiner. Resultierend aus dem Vergleich der Ergebnisse, wird somit ein Wert von  $0,700 \text{ g/cm}^3$  gewählt, ab dem im Laubholzmodell zwischen Einheitszellenmethode und kontinuums-mikromechanischer Betrachtung gewechselt wird.



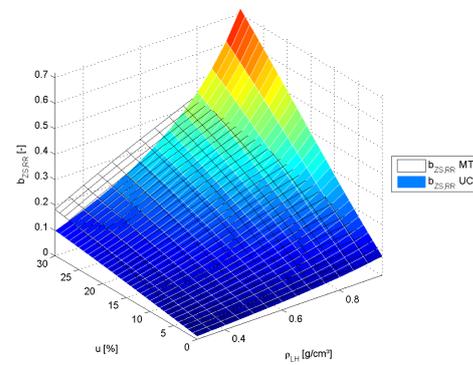
(a) Elastizitätsmodul  $E_{ZS,L}$



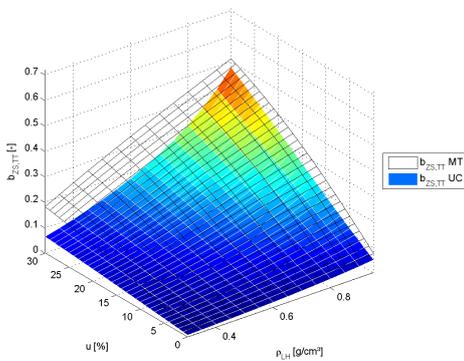
(b) Elastizitätsmodul  $E_{ZS,T}$



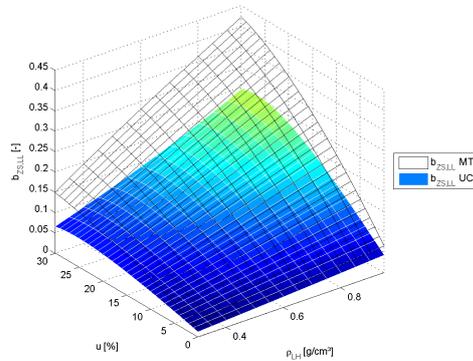
(c) Elastizitätsmodul  $E_{ZS,R}$



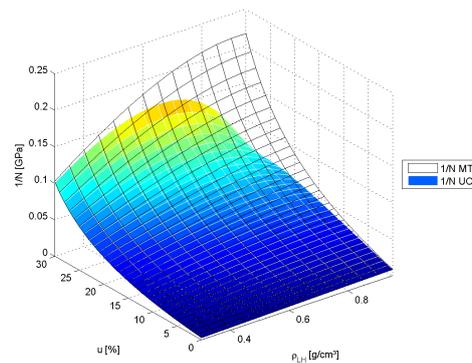
(d)  $b_{ZS,LL}$



(e)  $b_{ZS,TT}$

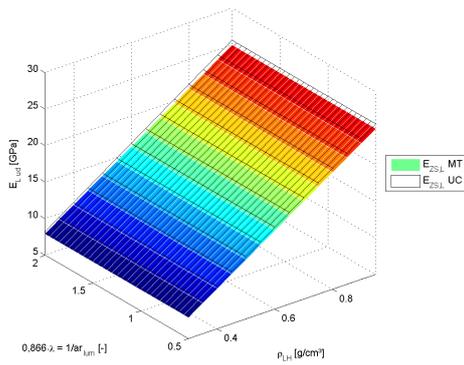


(f)  $b_{ZS,RR}$

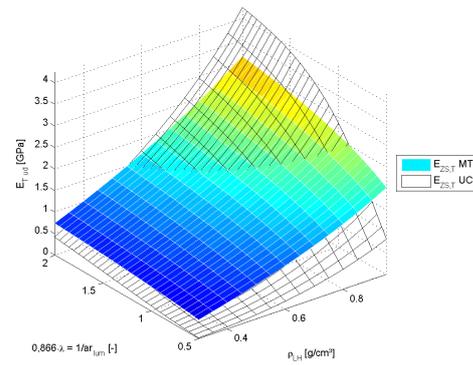


(g) Biot-Modul

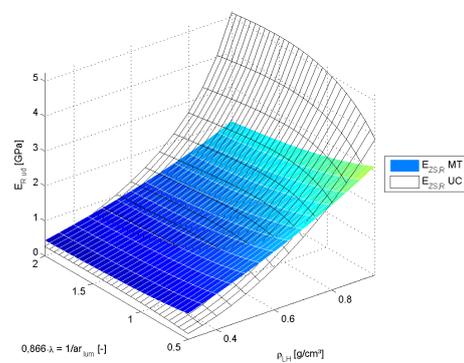
Abbildung 3.11: Variation von Dichte und Feuchtegehalt



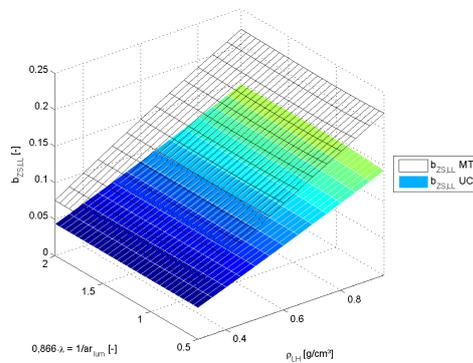
(a) Elastizitätsmodul  $E_{ZS,L}$



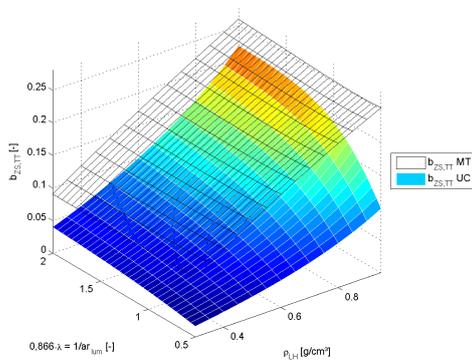
(b) Elastizitätsmodul  $E_{ZS,T}$



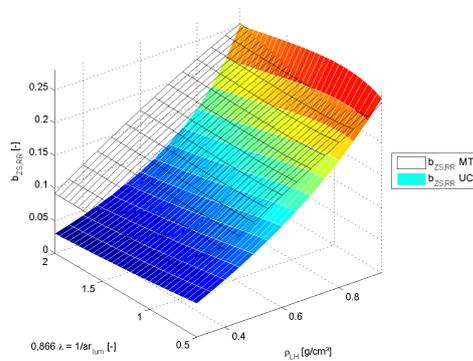
(c) Elastizitätsmodul  $E_{ZS,R}$



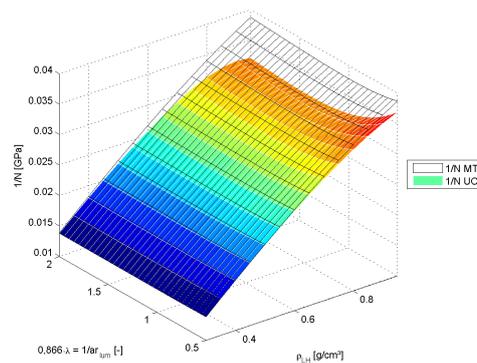
(d)  $b_{ZS,LL}$



(e)  $b_{ZS,TT}$



(f)  $b_{ZS,RR}$



(g) Biot-Modul

Abbildung 3.12: Variation von Dichte und der Formbeiwerte  $1/ar$  und  $\lambda$

## 3.5 Validierung

In diesem Abschnitt erfolgt nun die Berechnung der effektiven Materialeigenschaften unter Zuhilfenahme des in Abschnitt 3.3 beschriebene Laubholzmodells für ringporige und zerstreutporige Laubhölzer und ein Vergleich der Ergebnissen mit den Resultaten der mechanischen Tests. Dazu wird das Modell mit den ermittelten Strukturparametern für die unterschiedlichen Holzarten sowie mit für deren chemischen Zusammensetzungen ausgewertet. In Tabelle 3.6 sind die Eingabeparameter für die heimischen Holzarten und in Tabelle 3.7 die Parameter für die tropischen Holzarten zusammengefasst. Die in Abschnitt 3.4.3 definierte Grenzdichte für die Berechnung der Steifigkeit der Zellstruktur wird ebenfalls in der Modellierung berücksichtigt. Wenn die Dichte der Zellstruktur über  $0,700 \text{ g/cm}^3$  liegt, wird die Steifigkeit mittels kontinuums-mikromechanischer Modellierung berechnet, anderenfalls mit der Einheitszellenmethode. Im Modell werden die Holzarten Teak, Esche und Eiche, die laut Definition in Abschnitt 2.2 ringporige Holzarten sind, ebenfalls im Modell als ringporige Holzarten (siehe Abschnitt 3.3.1.1) behandelt. Alle anderen werden mittels zerstreutporiger Modellierung (siehe Abschnitt 3.3.2) berechnet. Des Weiteren wurde das Modell auf zwei Arten ausgewertet: einmal unter Berücksichtigung von Extraktstoffen als Bestandteil des Polymer-Netzwerkes, und einmal ohne Extraktstoffe. Grund dafür ist, dass manche Holzarten große Anteile an Extraktstoffen aufweisen, deren Anordnung in der Zellstruktur und damit deren Auswirkung auf die Steifigkeit der Holzproben nicht eindeutig bekannt ist. Bei Vernachlässigung der Extraktstoffe wurde die Dichte der Proben entsprechend reduziert. In Abbildung 3.13 ist der Vergleich der Modellvorhersagen und der experimentellen Daten (siehe Tabelle 2.12) dargestellt, wobei die Ergebnisse mit Extraktstoffen mittels Kreuzen und die Ergebnisse ohne mit Ringen markiert sind. Es werden dabei die experimentell mittels Ultraschall ermittelten radialen, tangentialen und longitudinalen Steifigkeiten, den Steifigkeitstensor-komponenten aus der Modellierung gegenübergestellt. Des Weiteren wird der Elastizitätsmodul aus den quasistatischen Versuchen mit dem aus dem Nachgiebigkeitstensor bestimmten Elastizitätsmodul in longitudinaler Richtung verglichen. Der Einfluss der Extraktstoffe ist in den Ergebnissen in den Querrichtungen deutlich durch eine Abnahme der Steifigkeit zu erkennen. In Längsrichtung dagegen ist kaum eine Auswirkung auf die Modellvorhersagen festzustellen. Dies gilt auch für die Elastizitätsmoduli. Besonders die tropischen Holzarten, welche auch die meisten Extraktstoffe aufweisen (siehe Tabelle 2.18), sind davon betroffen. Bei Satiné ändern sich die Ergebnisse bei Vernachlässigung beziehungsweise Berücksichtigung der Extraktstoffe in der Modellierung in radialer Richtung von  $4,3 \text{ GPa}$  auf  $3,2 \text{ GPa}$  und in tangentialer Richtung von  $2,1 \text{ GPa}$  auf  $1,1 \text{ GPa}$ . Die Extraktstoffe bewirken somit eine Minderung der Steifigkeitskomponenten in radialer und tangentialer Richtung.

Generell zeigt sich für die longitudinalen Steifigkeiten eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Experiment. Lediglich für Ipé ergibt das Modell eine deutlich zu hohe Steifigkeit  $C_{LLLL}$ . Das kann auf die besonders einzigartige strukturelle und chemische Zusammensetzung sowie auf die hohe Dichte der Holzart zurückzuführen sein. Für die in Abbildung 3.13(d) dargestellten Elastizitätsmoduli stimmen ebenfalls Modell und Experiment zumeist gut überein, nur für die tropischen Holzarten Manil, Satiné und Ipé ergeben sich zufolge der Modellierung zu hohe Elastizitätsmoduli. Der Vergleich der radialen und tangentialen Steifigkeiten (siehe Abbildung 3.13(a) und (b)) zeigt durchgängig eine deutliche Unterschätzung der Steifigkeit zufolge der Modellierung. Die Darstellung der radialen Steifigkeiten zeigt, dass sich alle Ergebnisse zirka auf einer parallelen Geraden zu der dargestellten perfekten Korrelationsgeraden befinden. Dies würde auf einen konsequenten

Probe		Buche	Eiche	Esche	Linde	Platane
$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,699	0,799	0,691	0,475	0,616
$u$	[m%]	10,0	9,1	10,3	8,8	11,4
$\theta$	[°]	10,0	2,6	13,8	20,5	24,0
$\lambda$	[—]	0,866	0,779	0,779	0,779	0,866
$\varphi$	[°]	30	30	30	20	20
$f_{WR}$	[—]	16,88	13,66	12,37	4,51	27,62
$f_{VE}$	[—]	19,58	10,31	23,74	20,26	21,90
$f_{LW}$	[—]	0,20	0,32	0,53	0,50	0,20
$\theta_{WR}$	[°]	30	50	20	30	40
$\lambda_{WR,lum}$	[—]	0,866	0,866	0,433	0,260	0,866
$\varphi_{WR,lum}$	[°]	30	30	30	10	30
$ar_{WR}$	[—]	1000	1000	1000	1000	1000
$slend_{WR}$	[—]	80,60	76,18	136,09	29,46	153,24
$ar_{VE}$	[—]	11,266	1,243	1,385	1,665	1,158
$slend_{VE}$	[—]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$f_{WR,cum}$	[%]	66,71	83,44	58,38	70,43	51,67
$ar_{WR,lum}$	[—]	1	1	2	3,333	1
$slend_{WR,lum}$	[—]	0,1	0,1	0,1	0,001	0,1
$ar_{lum}$	[—]	1	1,111	1,111	1,111	1
$slend_{lum}$	[—]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$\alpha$	[°]	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0

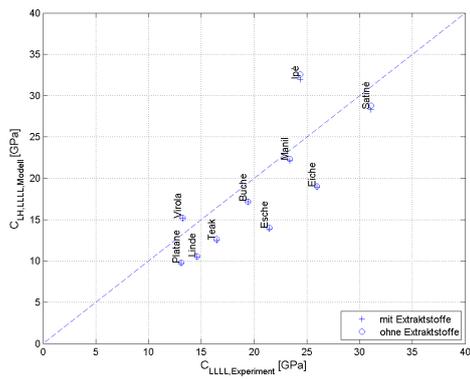
Tabelle 3.6: Materialeigenschaften aller getesteten heimischen Holzarten für das mikro-mechanische Modell

Berechnungsfehler oder Messfehler hindeuten. Für die tangentialen Steifigkeiten der heimischen Holzarten trifft das ebenfalls zu. Diese gruppieren sich ebenso auf einer Geraden parallel zur Korrelationsgeraden. Hier ist in zukünftigen Untersuchungen noch zu klären, ob das Modell noch Defizite aufweist oder tatsächlich systematische Fehler bei den Experimenten für die Abweichungen verantwortlich sind. Dass die Ergebnisse der Modellierung und der Experimente qualitativ gut zusammenpassen, wird in den Abbildungen 3.13(e) bis (g) ersichtlich. Es sind hier Verhältnisse der resultierenden Steifigkeiten untereinander, zufolge der Experimente beziehungsweise der Modellierung, verglichen. Die beste Übereinstimmung wird beim Verhältnis von radialer zu longitudinaler Steifigkeit erreicht, wo sich fast alle Resultate nahe der Bezugslinie befinden. Die tangential-longitudinalen und radial-tangentialen Steifigkeitsverhältnisse zeigen ebenfalls gute Übereinstimmungen, wobei sich hier wiederum die Ergebnisse entlang paralleler Linien zur perfekten Korrelationsgeraden befinden. Die größten Probleme bei der Modellierung zeigen sich bei den tropischen Holzarten, insbesondere bei Ipé und Satiné, deren Steifigkeit teilweise stark über- oder unterschätzt werden. Mögliche Gründe dafür könnten die nur vereinfachte Berücksichtigung der Extraktstoffe und des wellenförmigen Faserverlaufs im Modell sein. Es könnte jedoch auch auf eine Über- oder Unterschätzung der Steifigkeit der Holzstrahlen

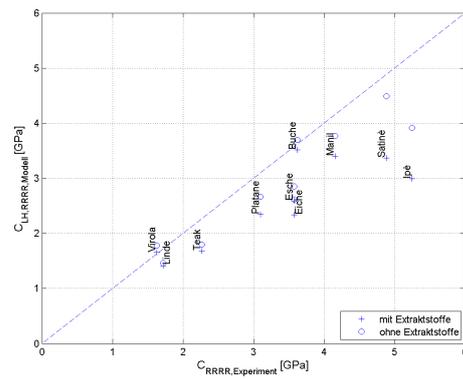
Probe		Ipé	Manil	Satiné	Teak	Virola
$\rho$	$[g/cm^3]$	0,990	0,759	0,977	0,521	0,434
$u$	$[\%]$	9,5	10,2	9,0	8,8	9,9
$\theta$	$[^\circ]$	3,0	2,5	5,0	6,9	10,3
$\lambda$	$[-]$	0,866	0,866	1,299	0,866	0,866
$\varphi$	$[^\circ]$	30	30	30	25	5
$f_{WR}$	$[-]$	7,47	13,94	14,42	12,51	7,59
$f_{VE}$	$[-]$	21,00	19,77	8,38	9,92	7,25
$f_{LW}$	$[-]$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$\theta_{WR}$	$[^\circ]$	5	10	10	30	30
$\lambda_{WR,lum}$	$[-]$	0,693	0,866	0,866	0,346	0,433
$\varphi_{WR,lum}$	$[^\circ]$	30	30	30	10	10
$ar_{WR}$	$[-]$	1000	1000	1000	1000	1000
$slend_{WR}$	$[-]$	166,75	112,83	92,74	97,86	114,67
$ar_{VE}$	$[-]$	1,188	2,034	1,174	1,289	1,382
$slend_{VE}$	$[-]$	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$f_{WR,cum}$	$[\%]$	44,94	27,9	33,87	36,96	27,26
$ar_{WR,lum}$	$[-]$	1,25	1	1	2,5	2
$slend_{WR,lum}$	$[-]$	0,1	0,001	0,001	0,2	0,001
$ar_{lum}$	$[-]$	1	1	0,667	1	1
$slend_{lum}$	$[-]$	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$\alpha$	$[^\circ]$	$\pm 9$	$\pm 23$	$\pm 15$	$\pm 0$	$\pm 0$

Tabelle 3.7: Materialeigenschaften aller getesteten tropischen Holzarten für das mikromechanische Modell

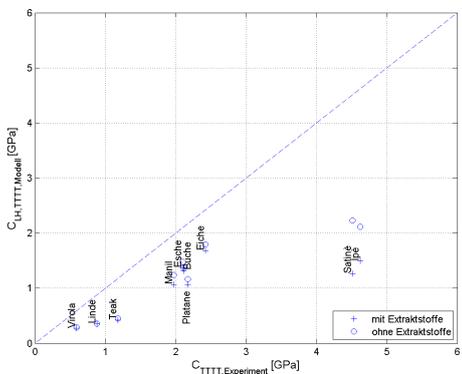
zurückzuführen sein. Hierbei könnten besonders die Einflüsse aus dem Mikrofibrillenwinkel und der Dichte der Holzstrahlen entscheidend sein. Das würde zumindest aus Abbildung 3.13(g) folgen. Jedoch würde das auch zu einer Verschiebung der Verhältnisse  $C_{RRRR}/C_{LLLL}$  und  $C_{TTTT}/C_{LLLL}$  bedeuten, bei denen derzeit eine gute Übereinstimmung erzielt wird.



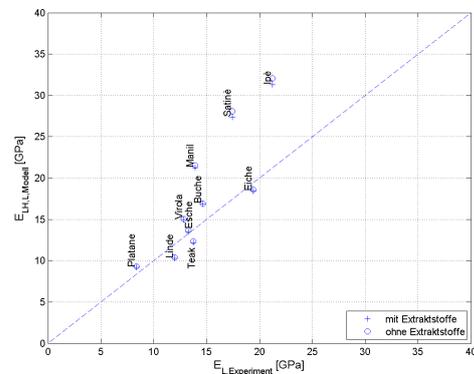
(a)  $C_{LLLL}$



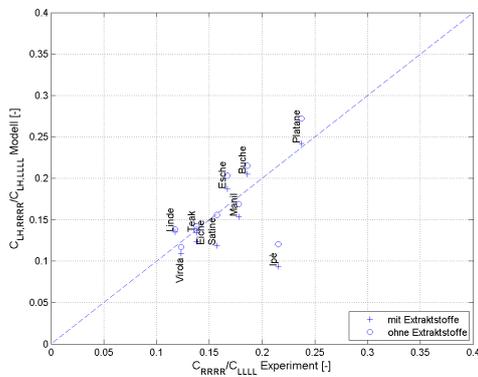
(b)  $C_{RRRR}$



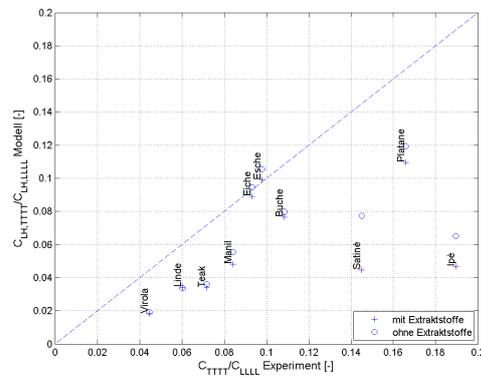
(c)  $C_{TTTT}$



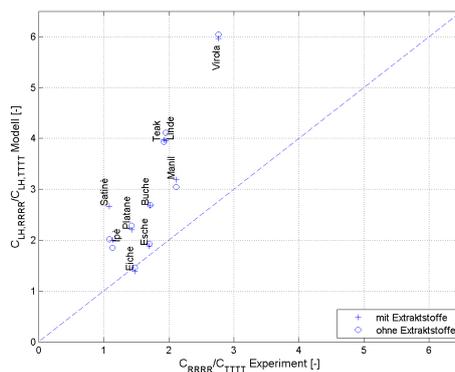
(d)  $E_L$



(e)  $C_{RRRR}/C_{LLLL}$



(f)  $C_{TTTT}/C_{LLLL}$



(g)  $C_{RRRR}/C_{TTTT}$

Abbildung 3.13: Validierung des Modells

## 3.6 Sensibilitätsanalyse

Nach der Validierung des Modells in Abschnitt 3.5 und der Parameterstudie in Abschnitt 3.4 erfolgt nun eine Sensibilitätsanalyse des gesamten Modells. Es werden dazu ebenfalls wie in Abschnitt 3.4 einzelne oder mehrere Materialparameter variiert und deren Einflüsse auf die Vorhersagen des Modells untersucht. Da im Zuge der Parameterstudie bereits die Auswirkungen der Eingangsgrößen von Homogenisierungsschritt III auf die Modellresultate analysiert wurde, werden nun vorwiegend Struktur- und Materialeigenschaften im Rahmen der Homogenisierungsschritte IV und V untersucht. Es werden somit vorwiegend Einflüsse der Holzstrahlen und der Gefäße betrachtet. Die dabei variierten Materialparameter sind:

### Variation einzelner Eingangsgrößen:

1. Zellulosegehalt
2. Form der Gefäße
3. Form der Holzstrahlen

### Variation mehrerer Eingangsgrößen:

1. Dichte und Form der Lumen
2. Dichte und Mikrofibrillenwinkel der Holzstrahlen
3. Volumenanteile und Form der Holzstrahlen
4. Volumenanteile und Form der Gefäße

Wie bereits in Abschnitt 3.4 beschrieben, werden die untersuchten Materialparameter und Strukturgrößen nicht immer direkt im Modell berücksichtigt, sondern teilweise auch durch die Anpassung anderer, von diesen Größen abhängiger Parameter. Die Variation des Zellulosegehaltes wird unter gleichzeitiger Änderung des Hemizellulosegehalts durchgeführt, sodass die Summe aus Zellulose- und Hemizelluloseanteil konstant bleibt. Dies beeinflusst die entsprechenden Volumenanteile der Hemizellulose in Homogenisierungsschritt Ia und des Polymer-Netzwerks und der Zellulosefasern in Homogenisierungsschritt II Die Strukturparameter der Form der Gefäße und der Holzstrahlen haben im Modell direkten Einfluss auf das Ergebnis. Sie werden im Schritt V des Laubholzmodelles berücksichtigt. Im Falle der Gefäße wird dazu das Seitenverhältnis  $1/ar_{VE}$  verwendet, während die Form der Holzstrahlen, auf Grund der Ausrichtung, über die Schlankheit  $slend_{WR}$  berücksichtigt wird. Zusätzlich werden die Strukturparameter des Volumenanteils der Gefäße und der Holzstrahlen im Laubholz variiert, was Einfluss auf den Volumenanteil der Zellstruktur für die ringporigen Hölzer in Homogenisierungsschritt IVa und für die zerstreutporigen Hölzer in Homogenisierungsschritt V hat. Des Weiteren wird noch der Mikrofibrillenwinkel der Holzstrahlen variiert. Ebenso wird die Auswirkung einer Variation der Dichte des Laubholzes betrachtet, welche durch die Anpassung des Volumenanteils der Zellwand in Schritt III berücksichtigt wird, sowie einer Variation der Holzstrahlendichte, welche ebenfalls über eine Änderung in Homogenisierungsschritt III, und zwar des Volumenanteils der Zellwand in der Zellstruktur der Holzstrahlen, erreicht wird. Zusätzlich ändert die Holzstrahlendichte die Volumenanteile der Zellstruktur bei den ringporigen Hölzern in Homogenisierungsschritt IVa und IVb und bei den zerstreutporigen Hölzern in Schritt V. Das liegt daran, dass die Dichte der Probe die gesamte Dichte inklusive der Holzstrahlen

Probe		Buche	Probe		Buche
$\rho$	$[g/cm^3]$	0,699	$ar_{WR}$	[-]	1000
$u$	$[m\%]$	10,0	$slend_{WR}$	[-]	0,2
$\theta$	$[^\circ]$	10	$ar_{VE}$	[-]	1
$\lambda$	[-]	0,866	$slend_{VE}$	[-]	0,001
$\varphi$	$[^\circ]$	30	$f_{WR,cwm}$	$[\%]$	66,71
$f_{WR}$	[-]	16,88	$ar_{WR,lum}$	[-]	1
$f_{VE}$	[-]	19,58	$slend_{WR,lum}$	[-]	0,001
$f_{LW}$	[-]	0,20	$ar_{lum}$	[-]	1
$\theta_{WR}$	$[^\circ]$	30	$slend_{lum}$	[-]	0,001
$\lambda_{WR,lum}$	[-]	0,866	$\alpha$	$[^\circ]$	$\pm 0,0$
$\varphi_{WR,lum}$	$[^\circ]$	10			

Abbildung 3.14: Materialeigenschaften der Buche für die Sensibilitätsanalyse

definiert. Kommt es nun zu einer Erhöhung der Holzstrahlendichte, muss die Dichte der restlichen Zellstruktur und somit deren Volumenanteil abnehmen.

Da laut Validierung das Modell für die Buche genaue Ergebnisse liefert, und die Parameterstudie ebenfalls mit dieser erfolgte, wurde diese Holzart auch für die Sensibilitätsanalyse ausgewählt. Dabei werden in der Modellierung die in Tabelle 3.4 angeführte chemische Zusammensetzung und die in Tabelle 3.14 dargestellten Materialparameter verwendet.

Die Variationen einzelner oder Kombinationen von Eingangsgrößen im Zuge der Sensibilitätsanalyse sollen zeigen, in welchem Ausmaß die einzelnen Parameter die Modellvorhersagen und damit das mechanische Verhalten von Laubholz beeinflussen. Um zu ermitteln in welchen Bereichen die Variation der Holzstrahlen- und Gefäßanteile anatomisch sinnvoll ist und nicht zu zu hohen Dichten der verbleibenden längsorientierten Zellstruktur führt, wurde Abbildung 3.15 erstellt. Diese zeigt den Verlauf der Zellstruk-

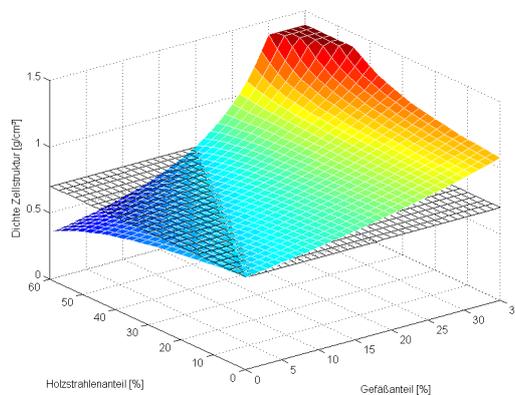


Abbildung 3.15: 3D Plot des Dichte-Verlaufes in Abhängigkeit der Anteile an Holzstrahlen und Gefäßen für die Buche mit einer Laubholzdichte von  $0,700 g/cm^3$  und einer Holzstrahlendichte von  $0,931 g/cm^3$

turdichte  $\rho_{ZS}$ , laut Formel 3.4, in Abhängigkeit von der Laubholzdichte  $\rho_{LH}$ , dem Anteil

$f_{WR}$  und der Dichte  $\rho_{WR}$  der Holzstrahlen, sowie dem Anteil der Zellstruktur  $f_{ZS}$ :

$$f_{ZS} = 1 - f_{WR} - f_{VE} \quad (3.3)$$

$$\rho_{ZS} = \frac{\rho_{LH} - \rho_{WR} \cdot f_{WR}}{f_{ZS}} \quad (3.4)$$

Als Ausgangsgröße für die Laubholzdichte dient der gemessene Werte der Buche, welcher  $0,699 \text{ g/cm}^3$  beträgt (siehe Tabelle 3.5). Die Dichte der Holzstrahlen wurde aus dem Verhältnis des Zellwandanteils ( $f_{WR,cwm}$ ) zum Lumen ( $f_{WR,lum}$ ) und einer angenommenen Zellwanddichte der gesamten Probe von  $1,410 \text{ g/cm}^3$  zurückgerechnet. Daraus ergibt sich die Dichte der Holzstrahlen zu  $0,931 \text{ g/cm}^3$ . Wie in der Abbildung zu erkennen ist, werden die Volumenanteile der Holzstrahlen im Bereich von 0 bis 60 % und der Volumenanteil der Gefäße von 0 bis 35 % variiert. Des Weiteren ist in Abbildung 3.15 der Bereich mit einer Zellstrukturdichte von über  $1,410 \text{ g/cm}^3$  abgeschnitten, da die Zellstrukturdichte nicht größer als die Zellwanddichte sein kann. Dieser Bereich liegt für die Buche über einem Holzstrahlen- und Gefäßanteil von 30 %. Die Berücksichtigung geringerer Anteile an Holzstrahlen und Gefäßen stellt keine Probleme dar, da sich dadurch nur die Steifigkeit der Zellstruktur ändert.

### 3.6.1 Variation einzelner Eingangsgrößen

In den Abschnitten 3.6.1.1 bis 3.6.1.3 wird jeweils nur einer der zuvor angeführten Materialeigenschaften oder Strukturparameter variiert.

#### 3.6.1.1 Ergebnisse der Variation des Zellulosegehaltes

Abbildung 3.16 zeigt die Variation des Zellulosegehaltes im Bereich von 35 bis 65 m%. Durch die Steigerung des Zellulosegehaltes und die Ausrichtung der Zellulosefasern in der Zellwand entsprechend des Mikrofibrillenwinkels nehmen der longitudinale Elastizitätsmodul und die longitudinale Komponente des Biot-Tensors zu. Ebenfalls nimmt die Steifigkeit des Polymer-Netzwerks zu, wodurch die Elastizitätsmoduli in radialer und tangentialer Richtung und die entsprechenden Biot-Tensor-Komponenten steigen. Zufolge der definierten Strukturparameter der Holzzellen, die mit regelmäßigem hexagonalem Querschnitt ( $\varphi = 30^\circ$ ) modelliert sind, müssten die Verläufe des radialen und tangentialen Elastizitätsmoduls und der Komponenten des Biot-Tensors übereinstimmen. Der Unterschied in den Verläufen resultiert aus der Einwirkung der Holzstrahlen.

#### 3.6.1.2 Ergebnisse der Variation der Form der Gefäße

Abbildung 3.17 stellt den Einfluss der Gefäßform auf die Ergebnisse dar. Das Seitenverhältnis  $1/ar_{VE}$  der Gefäße im Laubholz wird zwischen 0,2 und 1,8 variiert, was im Falle eines Verhältnisses von  $1/ar_{VE} = 0,2$  einer Ellipse mit Hauptausdehnung in radialer Richtung, bei einem Verhältnis von  $1/ar_{VE} = 1$  einem Kreis und bei einem Verhältnis von  $1/ar_{VE} = 1,8$  einer Ellipse mit Haupttrichtung in tangentialer Richtung im Querschnitt entspricht. Die Schlankheit der Gefäße bleibt unverändert und entspricht einer in Längsrichtung verlaufenden Röhre. Da eine Änderung der Gefäßform nur in der radial-tangentialen Ebene erfolgt, bleiben der longitudinale Elastizitätsmodul und die Komponente des Biot-Tensors in longitudinaler Richtung unverändert. Je nach Ausrichtung der Gefäße ergibt sich eine Ab- oder Zunahme der radialen und tangentialen Steifigkeiten und Biot-Komponenten. Durch die Variation wird die Fläche des Restquerschnittes in radialer

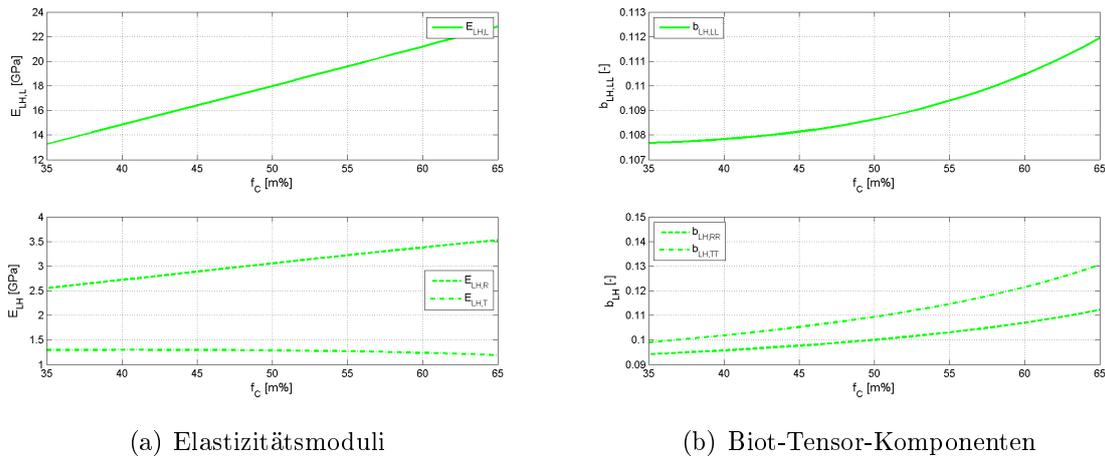


Abbildung 3.16: Variation des Zellulosegehaltes

und tangentialer Ebene verändert. Im Falle einer zunehmenden Schlankheit der in Radialrichtung ausgerichteten Ellipse steigt der Flächenanteil in der longitudinal-transversalen Ebene, während er in der longitudinal-radialen Ebene abnimmt. Dadurch kommt es zu einer Steigerung des Elastizitätsmoduls bei abnehmendem Verhältnis  $1/ar_{VE}$  und zu einer zunehmend starken Auswirkung auf die longitudinale Biot-Tensor-Komponente, und zwar mit fallender Tendenz.

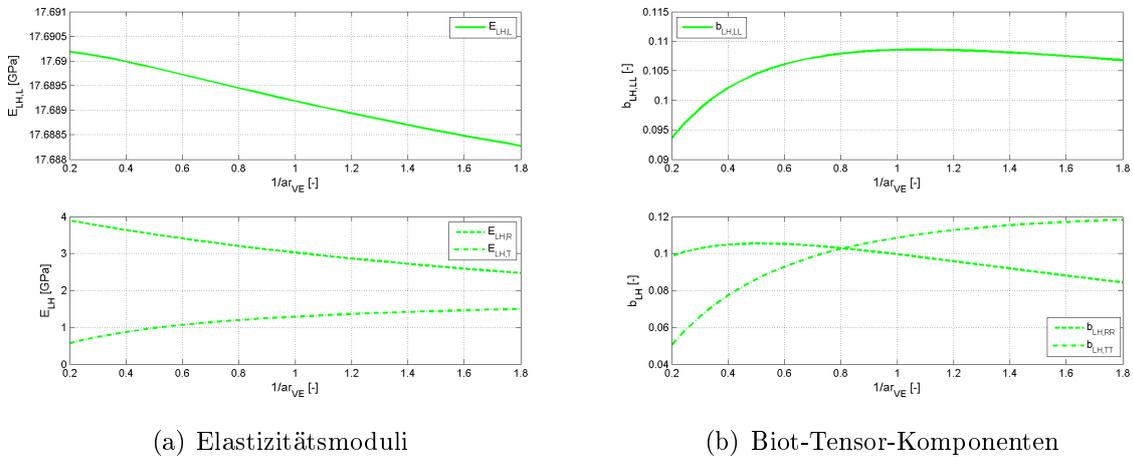
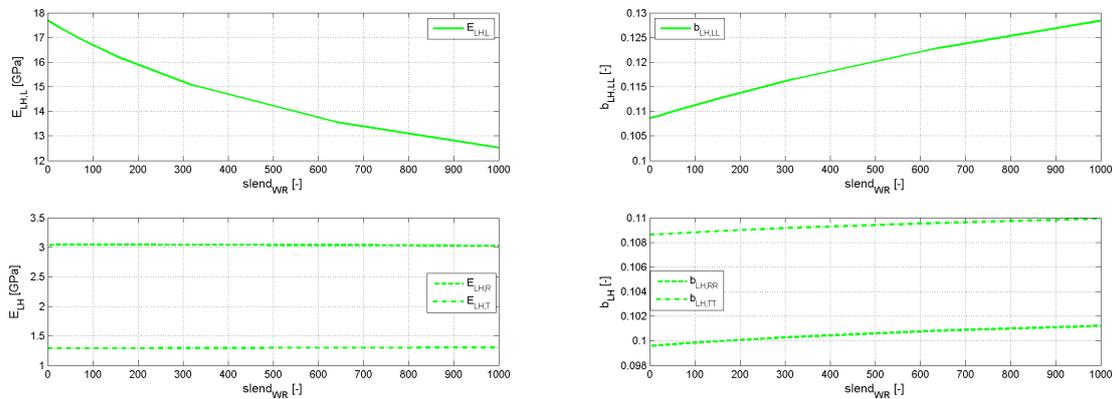


Abbildung 3.17: Variation der Form der Gefäße

### 3.6.1.3 Ergebnisse der Variation der Form der Holzstrahlen

Abbildung 3.18 beschreibt die Auswirkungen der Ausrichtung der Holzstrahlen im Laubholzquerschnitt auf die Ergebnisse. Es wird dazu die Schlankheit  $slend_{WR}$  in einem Bereich von 1 bis 1000 variiert. Dabei entspricht eine Schlankheit  $slend_{WR} = 1000$  runden Holzstrahlen, während eine Schlankheit  $slend_{WR} = 1$  einer in radial-longitudinaler Ebene verlaufenden Scheibe entspricht. Das Seitenverhältnis  $ar_{WR}$  bleibt unverändert ( $ar_{WR} = 1$ ) und entspricht einer in Radialrichtung verlaufenden Röhre. Wie bei der Diskussionen des Einflusses der Lumenform und Gefäßform erwähnt, müsste sich die Variation der Holzstrahlenform nur in der tangential-longitudinalen Ebene auswirken. Tatsächlich zeigt der Verlauf des longitudinalen Elastizitätsmoduls eine Abnahme mit zunehmen-

dem Schlankheitsfaktor. Das resultiert wieder aus den sich ändernden Restflächen in der radial-tangentialen Ebene, die im Falle einer runden Holzstrahlenform ( $slend_{WR} = 1000$ ) geringer sind. In Abbildung 3.18 müsste sich ebenso eine Auswirkung auf den Elastizitätsmodul in tangentialer Richtung zeigen, da sich hier ebenso wie bei dem Elastizitätsmodul in longitudinaler Richtung die Restquerschnittsfläche mit der Holzstrahlenform ändert. Im Falle einer Beschreibung der Inklusion einer in der longitudinal-radialen Richtung verlaufenden Scheibe der Holzstrahlen müsste sich der größte Einfluss ergeben. Da dies nicht der Fall ist, kann dies auf einen eventuell sehr geringen Unterschied zwischen den Steifigkeiten der Holzstrahlen und des Zellstrukturmaterials in tangentialer Richtung zurückzuführen sein.



(a) Elastizitätsmoduli

(b) Biot-Tensor-Komponenten

Abbildung 3.18: Variation der Form der Holzstrahlen in der Probe

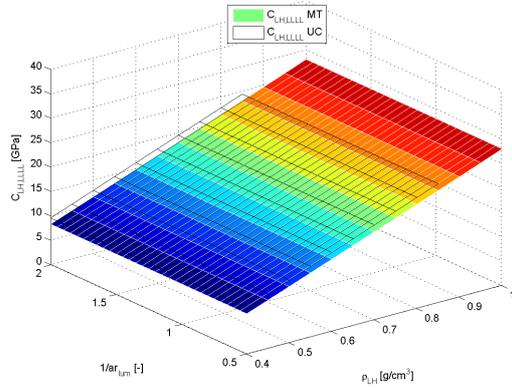
### 3.6.2 Variation mehrerer Eingangsgrößen

In den Abbildungen 3.19 bis 3.22 werden nun die Ergebnisse der Variation mehrerer Materialeigenschaften und Strukturparameter des Laubholzmodelles untersucht. Dabei werden zusätzlich in den Abbildungen 3.19, 3.21 und 3.22 die Ergebnisse aus Berechnungen der Zellstruktur des Laubholzes und der Steifigkeit der Holzstrahlen mittels der Einheitszellenmethode (UC), welche als Gitternetz dargestellt sind, und zufolge kontinuumsmechanischer Berechnung (MT), welche als farbige Fläche zu erkennen sind, verglichen.

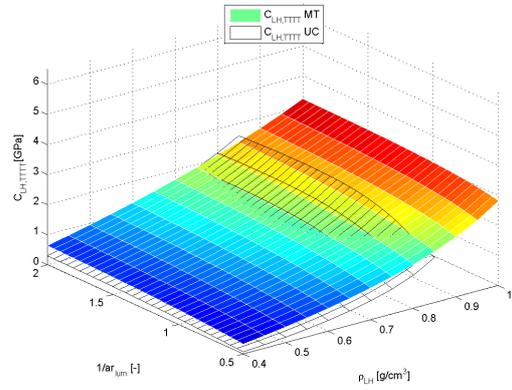
#### 3.6.2.1 Ergebnisse der Variation der Dichte und der Form der Lumen

Abbildung 3.19 beschreibt den Zusammenhang zwischen den Modellergebnissen und der Dichte und der Form der Lumen im Laubholz. Die Form der Gefäße und der Holzstrahlen bleiben dabei unverändert. Die Schlankheit der Lumen  $1/ar_{lum}$  wird dazu im Bereich von 0,5 bis 2 variiert, wobei eine Schlankheit von  $1/ar_{lum} = 0,5$  eine Ellipse mit Haupttrichtung in radialer Richtung und eine Schlankheit von  $1/ar_{lum} = 2$  eine Ellipse mit Haupttrichtung in tangentialer Richtung beschreibt. Wie in Abschnitt 3.4.1.2 bei der Parameterstudie bereits beschrieben, sind Einflüsse zufolge der Lumenform vorhanden, jedoch sind diese in Bezug zu einer Variation der Dichte der Laubholzprobe eher unbedeutend. Die Steigerung der Dichte hat den größten Einfluss auf alle Komponenten.

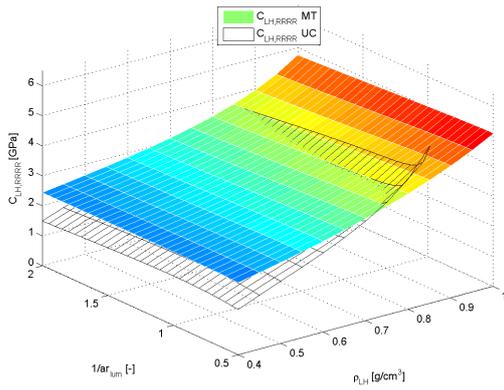
Sie bewirkt eine Zunahme des Zellwandanteils in der Zellstruktur, wodurch alle Steifigkeiten und Biot-Tensor-Komponenten steigen. In Abbildung 3.19 ist des Weiteren eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse zufolge Einheitszellenmethode und kontinuums-mikromechanischer Berechnung zu erkennen.



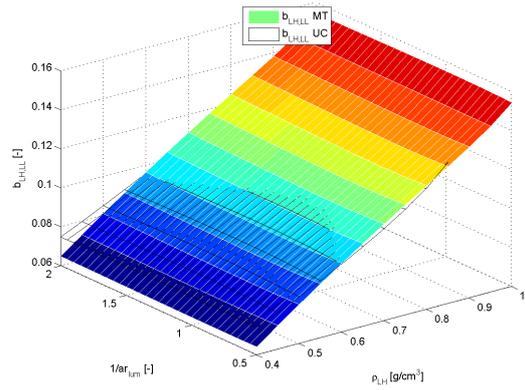
(a)  $C_{LH,LLL}$



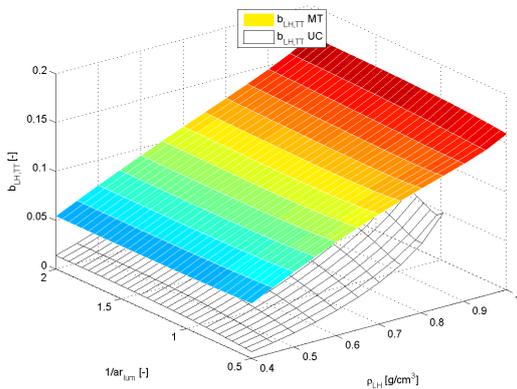
(b)  $C_{LH,TTT}$



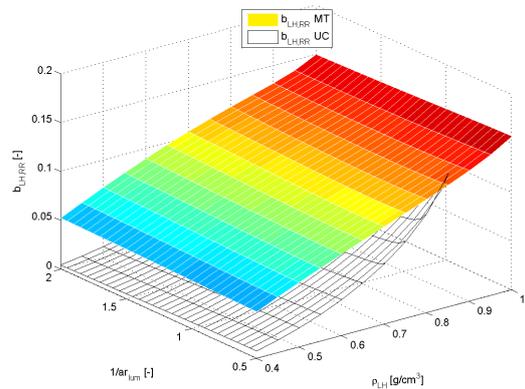
(c)  $C_{LH,RRR}$



(d)  $b_{LH,LL}$



(e)  $b_{LH,TT}$



(f)  $b_{LH,RR}$

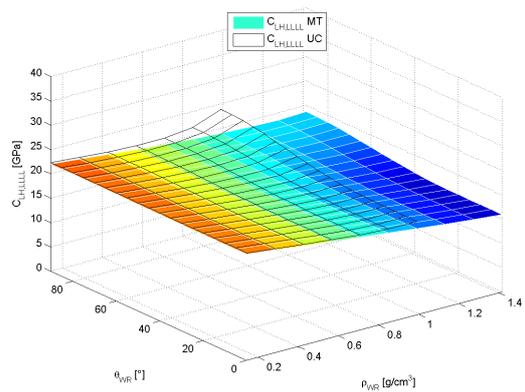
Abbildung 3.19: Variation der Dichte der Probe und des Formbeiwertes der Lumen

### 3.6.2.2 Ergebnisse der Variation des Mikrofibrillenwinkels und der Dichte der Holzstrahlen

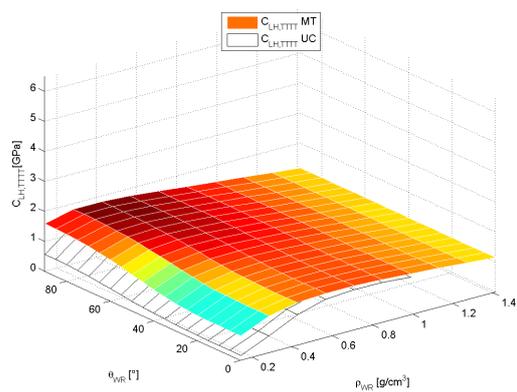
Abbildung 3.20 zeigt den Einfluss des Mikrofibrillenwinkels der Holzstrahlen und deren Dichte auf die Modellergebnisse auf Laubholzebene. Die Eingangswerte werden dazu im Bereich von 0 bis  $90^\circ$  für den Mikrofibrillenwinkel und zwischen 0 und  $1,400 \text{ g/cm}^3$  für die Dichte variiert. Eine Holzstrahlendichte von  $0 \text{ g/cm}^3$  würde bedeuten, dass diese keinerlei Tragfunktion in radialer Richtung aufweisen. Eine Dichte von  $1,400 \text{ g/cm}^3$  hingegen, was der Zellwanddichte entspricht, würde eine massive Zunahme der Steifigkeit bedeuten. Wie bereits in der Parameterstudie beschrieben, hat des Weiteren der Mikrofibrillenwinkel einen großen Einfluss auf die richtungsmäßige Verteilung der Steifigkeit des Zellulosetragwerks. Der Effekt wird bei Erhöhung der Dichte der Holzstrahlen und der damit verbundenen Zunahme des Volumenanteils der Holzstrahlen verstärkt, was bei der Darstellung der radialen Steifigkeit deutlich wird (siehe Abbildung 3.20(c)). Die Steifigkeitszunahme in radialer Richtung bei hohen Holzstrahlendichten und niedrigem Mikrofibrillenwinkel sollte eigentlich mit einer Abnahme der Steifigkeit in tangentialer und longitudinaler Richtung verbunden sein, was jedoch nicht der Fall ist. Durch die Zunahme des Volumenanteils der Holzstrahlen bei steigender Holzstrahlendichte nimmt der Volumenanteil der Zellstruktur in der Laubholzebene ab (siehe Abbildung 3.15). Dies bewirkt in allen Ergebnissen eine leichte Abnahme der Steifigkeit des Laubholzes, bis auf die zuvor beschriebene Zunahme in radialer Richtung. Dort kommt es zu einer Überlagerung der Zunahme der Steifigkeit der Holzstrahlen bei niedrigen Mikrofibrillenwinkeln und der Abnahme zufolge der Reduktion des Volumenanteils der Zellstruktur. Die Resultate zufolge der Einheitszellenmethode und der kontinuums-mikromechanischen Berechnung stimmen in dem in der Parameterstudie betrachteten Bereich gut überein. Einflüsse der Variation des Mikrofibrillenwinkels auf die Komponenten des Biot-Tensors sind nicht festzustellen. Ebenfalls für die Variation der Dichte ist nur im Bereich sehr geringer Dichten (bis  $0,400 \text{ g/cm}^3$ ) eine Auswirkung auf die Biot-Tensor-Komponenten, und zwar eine Abnahme, aller Komponenten, festzustellen. Ab einer Dichte von  $0,700 \text{ g/cm}^3$  ergibt sich eine rasche Zunahme der longitudinalen Komponenten des Biot-Tensor zufolge der Einheitszellenmethode. Diese liegt jedoch außerhalb des in der Modellierung vorgesehen Bereichs der Einheitszellenmethode, da ab einer Dichte von  $0,700 \text{ g/cm}^3$  das Mora-Tanaka-Schema verwendet wird.

### 3.6.2.3 Ergebnisse der Variation der Volumenanteile und der Form der Holzstrahlen

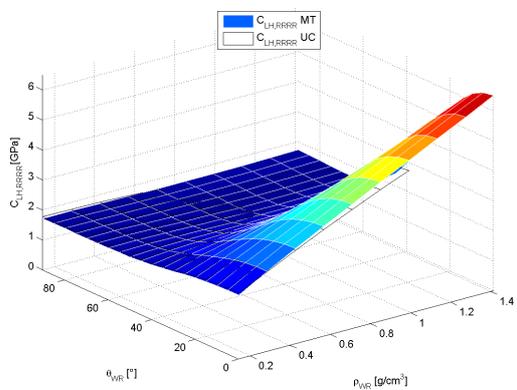
Abbildung 3.21 beschreibt den Zusammenhang zwischen den Modellergebnissen und dem Volumenanteil ( $f_{WR}$ ) und der Form der Holzstrahlen ( $1/ar_{WR}$  und  $slend_{WR}$ ) im Laubholz. Das Seitenverhältnis der Holzstrahlen bleibt für alle Variationsschritte unverändert mit einem Wert von  $1/ar_{WR} = 0,001$ . Die Schlankheit dagegen wird im Bereich von 1 bis 1000 variiert, wobei eine Schlankheit von  $slend_{WR} = 1000$  eine runde Holzstrahlenform beschreibt, und eine Schlankheit  $slend_{WR} = 1$  eine in radial-longitudinaler Ebene ausgerichtete Scheibe repräsentiert. Des Weiteren wird der Volumenanteil der Holzstrahlen im Laubholz ( $f_{WR}$ ) im Bereich von 0 bis 50 % variiert. Wie bereits in Abschnitt 3.6.1.3 beschrieben, nimmt die Steifigkeit in longitudinaler Richtung mit steigendem Holzstrahlenanteil ab. Eine Zunahme der Volumenfraktion der Holzstrahlen bewirkt eine Verschiebung der Volumenanteile von der Zellstruktur zu den Holzstrahlen. Dies beeinflusst besonders die Steifigkeiten in longitudinaler und radialer Richtung, was auf die Ausrichtung der



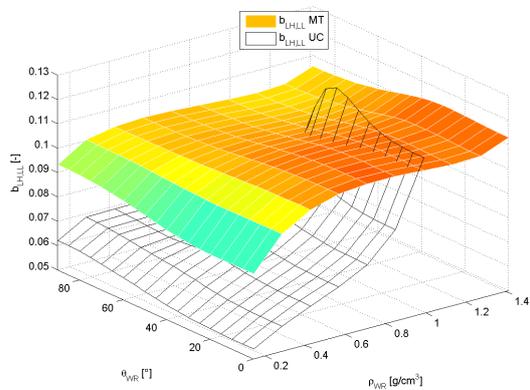
(a)  $C_{LH,LLLL}$



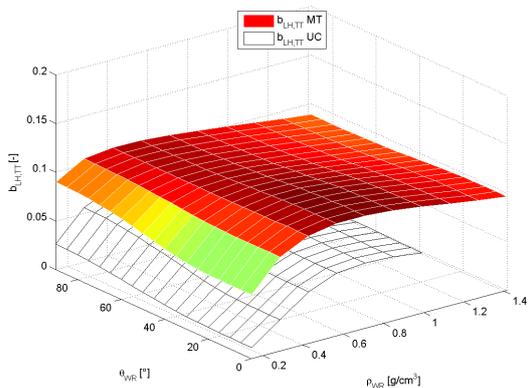
(b)  $C_{LH,TTTT}$



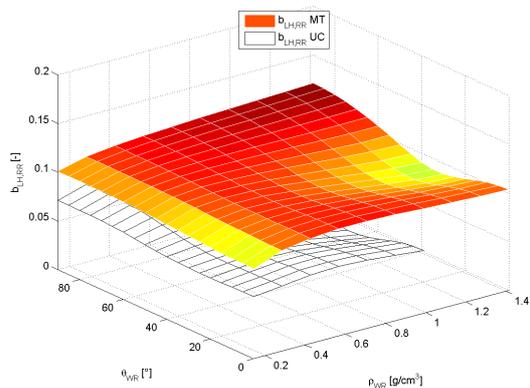
(c)  $C_{LH,RRRR}$



(d)  $b_{LH,LL}$



(e)  $b_{LH,TT}$



(f)  $b_{LH,RR}$

Abbildung 3.20: Variation der Dichte und des Mikrofibrillenwinkels der Holzstrahlen

Zellulosefasern in den Holzstrahlen und die Zellstruktur des Laubholzes zurückzuführen ist. Zusätzlich müssten Einflüsse auf die Ergebnisse in tangentialer Richtung zu erkennen sein. Tatsächlich erkennt man eine leichte Abnahme der Steifigkeit beim Übergang zwischen einer runder Form der Holzstrahlen zu einer Scheibe.

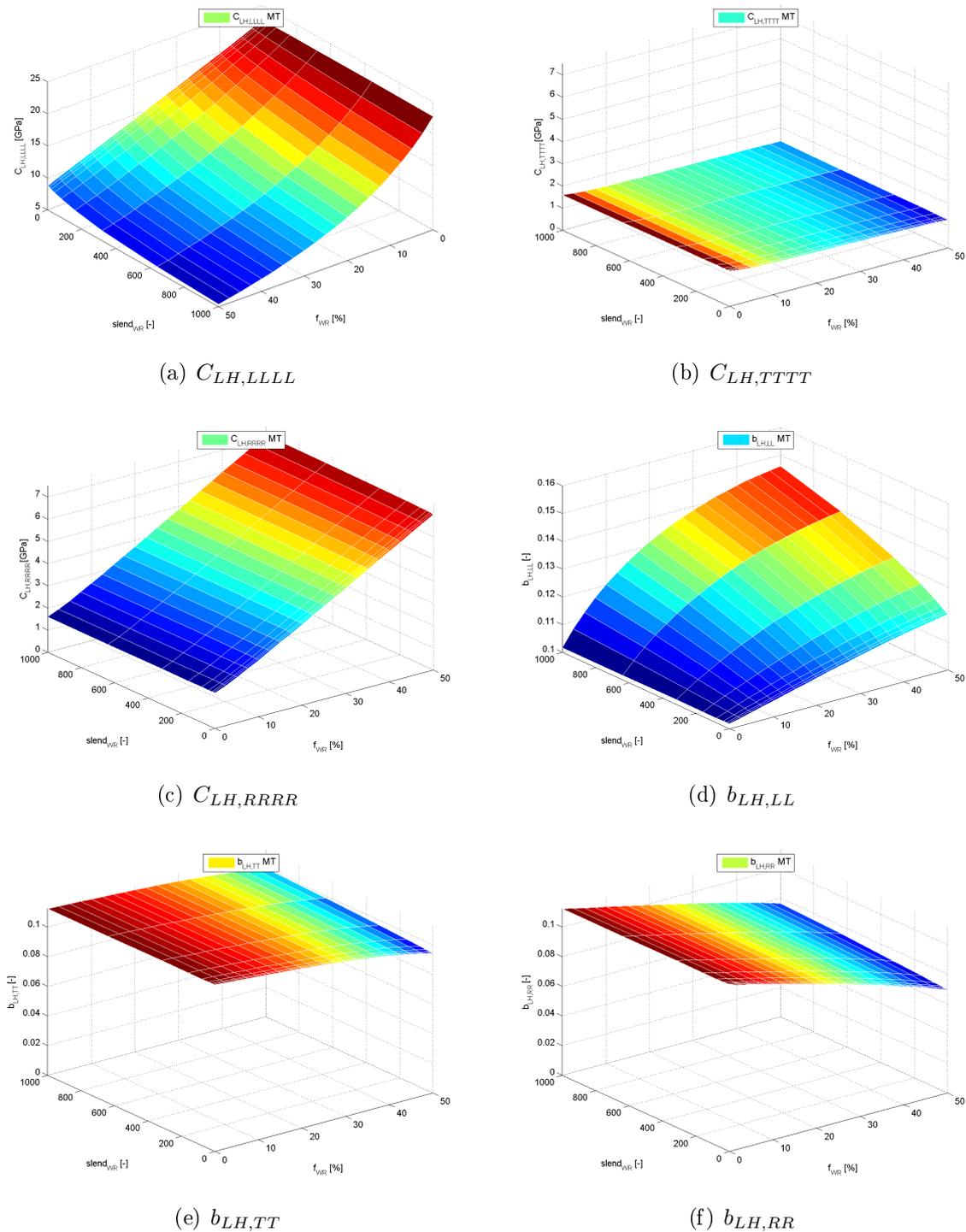
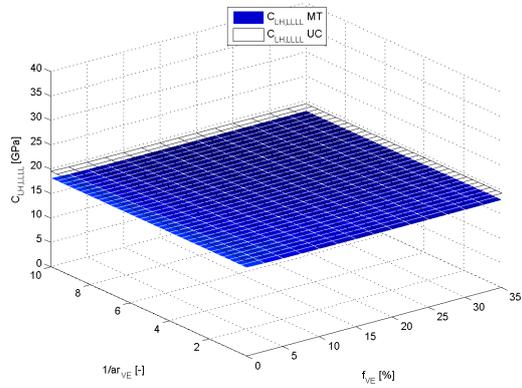


Abbildung 3.21: Variation des Volumenanteils und der Schlankheit der Holzstrahlen in der Laubholzebene

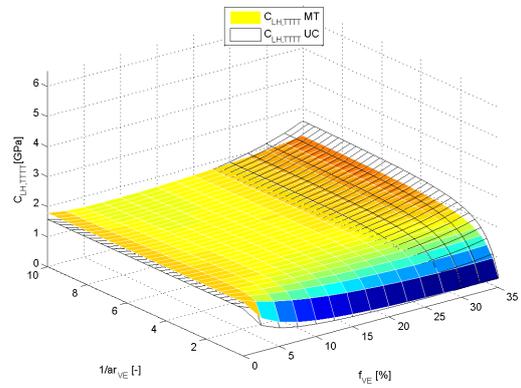
### 3.6.2.4 Ergebnisse der Variation der Volumenanteile und der Form der Gefäße

Abbildung 3.22 beschreibt den Zusammenhang zwischen den Modellergebnissen und dem Volumenanteil ( $f_{VE}$ ) und der Form der Gefäße ( $1/ar_{VE}$  und  $slend_{VE}$ ) im Laubholz. Das Seitenverhältnis der Gefäße  $1/ar_{VE}$  wird dazu im Bereich von 0 bis 10 variiert, wobei ein Seitenverhältnis von  $1/ar_{VE} = 0$  einer in radialer Richtung über den gesamten Quer-

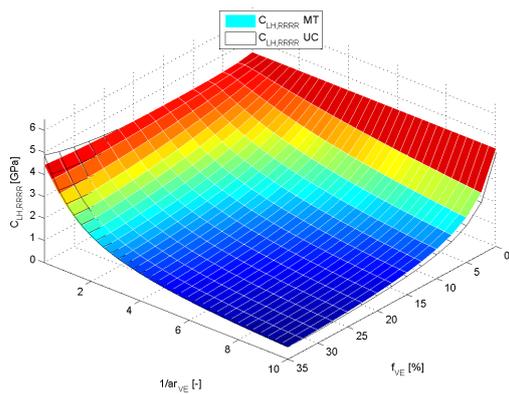
schnitt verlaufenden Gefäßscheibe entspricht, wodurch es zu einer Trennung des Querschnittes kommt, und ein Seitenverhältnis von  $1/ar_{VE} = 10$  eine Ellipse mit Hauptrichtung in tangentialer Richtung beschreibt. Die Schlankheit der Gefäße ( $slend_{VE}$ ) bleibt im Zuge der Variation konstant. Eine Zunahme des Gefäßanteils bewirkt in der Modellierung eine Abnahme des Lumenanteils, wodurch die Dichte der Zellstruktur ansteigt. Dies bewirkt, dass die Steifigkeit der Zellstruktur zunimmt. Da jedoch der Volumenanteil der Zellstruktur abnimmt, bleibt die Steifigkeit des Laubholzes in longitudinaler Richtung nahezu konstant. Das gilt ebenso für die Steifigkeiten in radialer und tangentialer Richtung, wobei hier noch ein Einfluss zufolge der Gefäßform berücksichtigt werden muss. Dieser Einfluss ergibt sich bei sehr langen, in radialer Richtung verlaufenden Gefäßen ( $1/ar_{VE} = 0 \dots 2$ ), wobei eine Zunahme der Steifigkeit in radialer Richtung und eine Abnahme der Steifigkeit in tangentialer Richtung bei abnehmendem Seitenverhältnis  $1/ar_{VE}$  erfolgt. Dies ist auf die theoretische Teilung des Querschnittes in zwei Hälften zurückzuführen. Bei kleinen Volumenanteilen der Gefäße im Bereich von 0 bis 5 % ergibt sich ebenfalls eine geringe Erhöhung der radialen Laubholzsteifigkeit. Diese resultiert aus der Überlagerung der Steifigkeitsbeiträge der Holzstrahlen und der Zellstruktur, da ein niedriger Gefäßanteil nur Einfluss auf die Dichte der Zellstruktur, jedoch nicht auf die Dichte der Holzstrahlen hat. In Abbildung 3.22 ist des Weiteren zu erkennen, dass beide Modelle (Einheitszellenmethode und Kontinuums-Mikromechanik) die Einflüsse einer Variation der Gefäße qualitativ äquivalent abbilden, jedoch mit einer größeren Differenz der Absolutwerte.



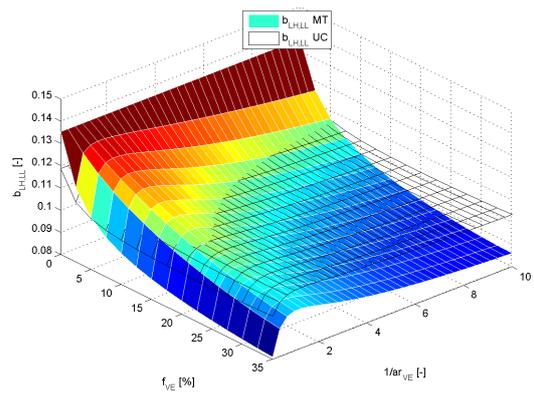
(a)  $C_{LH,LLL}$



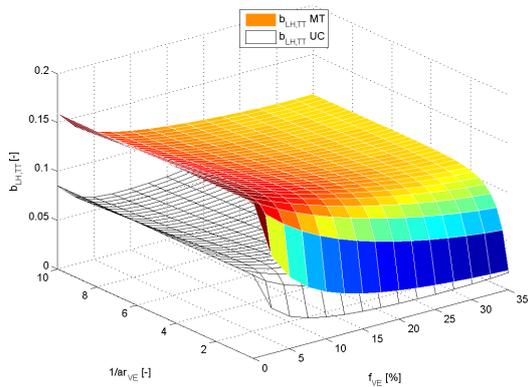
(b)  $C_{LH,TTT}$



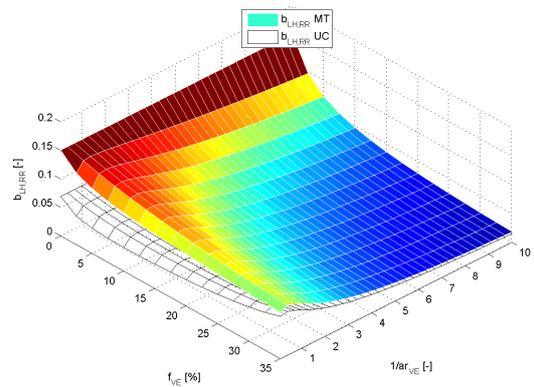
(c)  $C_{LH,RRR}$



(d)  $b_{LH,LL}$



(e)  $b_{LH,TT}$



(f)  $b_{LH,RR}$

Abbildung 3.22: Variation des Gefäßanteiles sowie deren Formbeiwerts  $ar_{VE}$

## Schlussfolgerungen

Wie die Ergebnisse der Parameterstudie, der Validierung und der Sensibilitätsanalyse gezeigt haben, liefert das Modell recht brauchbare Aussagen über das mechanische Verhalten von Holz. Des Weiteren wurde gezeigt, dass einerseits die Beschreibung des hierarchischen Aufbaues der Laubhölzer mittels einer Homogenisierung über mehrere Ebenen durchführbar ist, und andererseits, dass dafür ein möglichst großer Datensatz über verschiedenen Strukturparameter und Materialeigenschaften zur Verfügung stehen muss.

Als wichtigste Eingangsgröße wurde dabei die chemische Zusammensetzung identifiziert, welche die größt mögliche Variation der Steifigkeit verursachen kann.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass Form und Anteil der Gefäße und der Lumen der Probe eher unbedeutende Parameter darstellen, da sie nur einen geringen Einfluss auf die resultierenden Steifigkeiten des Laubholzes haben. Der Anteil der Gefäße besitzt Einfluss auf die Steifigkeit der Strukturebene  $C_{ZS}$ , da seine Erhöhung eine Reduktion des Lumenanteils in der Zellstruktur bewirkt.

Ebenfalls wichtige Materialeigenschaften und Strukturgrößen sind der Volumenanteil der Holzstrahlen, deren Dichte und deren Mikrofibrillenwinkel. In weiterer Folge wäre noch der Einfluss der chemischen Zusammensetzung der Holzstrahlen von Interesse, der im Rahmen dieser Arbeit nicht analysiert wurde. Wie aus der Modellierung folgt, können diese Parameter erheblichen Einfluss auf die longitudinale und radiale Steifigkeit haben. Für die Durchführung der Modellierung konnten leider nur die Volumenteile und die Zellwandanteile der Holzstrahlen erhoben werden, da eine experimentelle Bestimmung der Dichte und des Mikrofibrillenwinkels der Holzstrahlen nicht möglich war.

Trotz Modellierung unter Zuhilfenahme einiger Literaturwerte als Eingangsgrößen, anstelle problemspezifischer Messwerte zeigen die Resultate auf der Laubholzebene zufolge der Homogenisierung des hierarchischen Aufbaues der Holzstruktur, eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Messwerten auf. Dies weist das Modell als geeignet für weitere Untersuchungen des mechanischen Verhaltens von Holz aus.

# Abkürzungsverzeichnis

$\alpha$ .....	Faserabweichung
$\lambda$ .....	Verhältnis der tangentialen zur radialen Länge der periodisch betrachteten Struktur
$\rho$ .....	Dichte der Probe
$\theta$ .....	Mikrofibrillenwinkel
$\varphi$ .....	Winkel der radialen Zellwand zur radialen Richtung
$ar_{lum}$ .....	Seitenverhältnis der Lumen
$ar_{VE}$ .....	Seitenverhältnis der Gefäße
$ar_{WR}$ .....	Seitenverhältnis der Holzstrahlen
$b_{LL}$ .....	Longitudinale Komponente des Biot-Tensors
$b_{RR}$ .....	Radiale Komponente des Biot-Tensors
$b_{TT}$ .....	Tangentiale Komponente des Biot-Tensors
$f_C$ .....	Volumenfraktion der Zellulose
$f_{EW}$ .....	Volumenanteil des Frühholzes bei den untersuchten ringporigen Holzarten
$f_{Ext}$ .....	Volumenfraktion der Extraktstoffe
$f_{H_2O}$ .....	Volumenfraktion des Wassers
$f_{HC}$ .....	Volumenfraktion der Hemizellulose
$f_{IH}$ .....	Volumenfraktion der Inklusionen im RVE
$f_{Lig}$ .....	Volumenfraktion des Lignins
$f_{LW}$ .....	Volumenanteil des Spätholzes bei den untersuchten ringporigen Holzarten
$f_{VE}$ .....	Volumenfraktion der Gefäße
$f_{WR}$ .....	Volumenfraktion der Holzstrahlen
$l_r$ .....	Radiale Länge der periodisch betrachteten Struktur
$l_t$ .....	Tangentiale Länge der periodisch betrachteten Struktur
$LH$ .....	Homogenisierungsebene des Laubholzes
$N$ .....	Biot-Modul
$slend_{lum}$ .....	Schlankheit der Lumen
$slend_{VE}$ .....	Schlankheit der Gefäße

$slend_{WR}$ .....	Schlankheit der Holzstrahlen
$u$ .....	Feuchtegehalt der Probe ausgedrückt als $m\%$
$w_C$ .....	Gewichtsanteil der Zellulose
$w_{Ext}$ .....	Gewichtsanteil der Extraktstoffe
$w_{H_2O}$ .....	Gewichtsanteil des Wassers
$w_{HC}$ .....	Gewichtsanteil der Hemizellulose
$w_{Lig}$ .....	Gewichtsanteil des Lignins
$ZS$ .....	Homogenisierungsebene der Zellstruktur
$C_{LLLL}$ .....	Longitudinale Komponente des Stefigkeitstensors
$C_{RRRR}$ .....	Radiale Komponente des Stefigkeitstensors
$C_{TTTT}$ .....	Tangentiale Komponente des Stefigkeitstensors
$E$ .....	Elastizitätsmodul
$N_{ind}$ .....	Indentationsmodul
$d$ .....	Beschreibt die Länge der in einer Matrix eingebetteten Inklusion
$l$ .....	Beschreibt die Länge eines betrachteten Kontinuums

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Mikroskop-Aufnahmen der Buche . . . . .	5
2.2	Mikroskop-Aufnahmen der Eiche . . . . .	6
2.3	Mikroskop-Aufnahmen der Esche . . . . .	7
2.4	Mikroskop-Aufnahmen der Linde . . . . .	8
2.5	Mikroskop-Aufnahmen der Platane . . . . .	9
2.6	Mikroskop-Aufnahmen der Ipé . . . . .	10
2.7	Mikroskop-Aufnahmen der Manil . . . . .	11
2.8	Mikroskop-Aufnahmen der Satiné . . . . .	12
2.9	Mikroskop-Aufnahmen von Teak . . . . .	13
2.10	Mikroskop-Aufnahmen der Virola . . . . .	14
2.11	Darstellung und Gliederung des Versuchsaufbaues der Ultraschallmessungen	16
2.12	Verläufe der ersten und zweiten Ableitung des Masseverlustes über die Temperatur der thermogravimetrischen Analyse der Buche . . . . .	19
2.13	Auswertung des Flächenanteils der Gefäße der Platane . . . . .	23
2.14	Auswertung des Anteils der Holzstrahlen der Platane . . . . .	23
2.15	Auswertung des Zellwandanteils der Holzstrahlen der Platane . . . . .	24
3.1	Charakteristische Abmessungen von RVEs und Inklusionen auf unterschiedlichen Längenskalen bei einem hierarchisch strukturierten Material . . . . .	28
3.2	Beschreibung der ellipsoidalen Form der Inklusion . . . . .	29
3.3	Modell laut [3] für die Berechnung von Nadelhölzern . . . . .	31
3.4	Modell für die Berechnung ringporiger Holzarten . . . . .	34
3.5	Modell für die Berechnung zerstreutporiger Holzarten . . . . .	36
3.6	Vergleich der Zellstruktur, (a) unregelmäßige Zellstruktur der Linde, (b) regelmäßige Struktur der Virola . . . . .	38
3.7	Ergebnisse zufolge der Variation der Dichte . . . . .	40
3.8	Ergebnisse zufolge der Variation der Lumenform . . . . .	41
3.9	Ergebnisse zufolge der Variation des Feuchtegehaltes . . . . .	42
3.10	Ergebnisse zufolge der Variation des Mikrofibrillenwinkels . . . . .	43
3.11	Variation von Dichte und Feuchtegehalt . . . . .	45
3.12	Variation von Dichte und der Formbeiwerte $1/ar$ und $\lambda$ . . . . .	46
3.13	Validierung des Modells . . . . .	50
3.14	Materialeigenschaften der Buche für die Sensibilitätsanalyse . . . . .	52
3.15	3D Plot des Dichte-Verlaufes in Abhängigkeit der Anteile an Holzstrahlen und Gefäßen für die Buche mit einer Laubholzdichte von $0,700 \text{ g/cm}^3$ und einer Holzstrahlendichte von $0,931 \text{ g/cm}^3$ . . . . .	52
3.16	Variation des Zellulosegehaltes . . . . .	54
3.17	Variation der Form der Gefäße . . . . .	54
3.18	Variation der Form der Holzstrahlen in der Probe . . . . .	55
3.19	Variation der Dichte der Probe und des Formbeiwertes der Lumen . . . . .	56

3.20	Variation der Dichte und des Mikrofibrillenwinkels der Holzstrahlen . . .	58
3.21	Variation des Volumenanteils und der Schlankheit der Holzstrahlen in der Laubholzebene . . . . .	59
3.22	Variation des Gefäßanteiles sowie deren Formbeiwerts $ar_{VE}$ . . . . .	61

# Tabellenverzeichnis

1.1	Tabelle der Zusammensetzung des heimischen Baumbestandes laut [1] . . .	1
2.1	Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Buche [14] .	6
2.2	Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Eiche [14] .	7
2.3	Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Esche [14] .	8
2.4	Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Linde [14] .	9
2.5	Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Platane [14]	10
2.6	Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Ipé [14] . . .	10
2.7	Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Manil [11] .	11
2.8	Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Satiné [11] .	12
2.9	Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Teak [14] . .	13
2.10	Mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften der Virola [14] .	14
2.11	Auflistung der durchgeführten Experimente und Angabe der Betrachtungs- ebene und der Art der Resultate . . . . .	15
2.12	Mittelwerte des Elastizitätsmoduls, der Steifigkeitskomponenten und des Indentationsmoduls . . . . .	18
2.13	Mittelwert, Standardabweichung, Minimum und Maximum der Mikrofi- brillenwinkel . . . . .	18
2.14	Tabelle der Aktivierungsenergien der Komponeten Hemizellulose, Zellulose und Lignin laut [7]. . . . .	19
2.15	Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse (inklusive Extraktstoffe) .	20
2.16	Chemische Zusammensetzung der verwendeten Holzarten aus Literatur- werten und chemischen Analysen . . . . .	20
2.17	Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse (extrahierte Proben) . . .	21
2.18	Chemische Zusammensetzung der untersuchten Holzarten aus Literatur- werten und chemischen Analysen . . . . .	22
2.19	Ergebnisse der Extraktstoffbestimmung zufolge Cyclohexan und Ethanol für die heimischen Holzarten . . . . .	22
2.20	Ergebnisse der Extraktstoffbestimmung zufolge Cyclohexan und Ethanol für die tropischen Holzarten . . . . .	22
2.21	Struktureigenschaften aller getesteten heimischen Holzarten für das mikro- mechanische Modell . . . . .	25
2.22	Struktureigenschaften aller getesteten tropischen Holzarten für das mikro- mechanische Modell . . . . .	26
3.1	Literaturwerte für die Dichte der chemischen Bestandteile des Polymer- Netzwerkes . . . . .	32
3.2	Literaturwerte für die Volumenfraktionen und die Dichte der amorphen und kristallinen Zellulose . . . . .	32

3.3	Gegenüberstellung der Homogenisierungsschritte I bis V für ringporige und zerstreutporige Hölzer . . . . .	33
3.4	Massenprozent der chemischen Bestandteile der Buche für die Parameterstudie und später für die Sensibilitätsanalyse . . . . .	39
3.5	Struktureigenschaften der Buche für das mikromechanische Modell . . . .	39
3.6	Materialeigenschaften aller getesteten heimischen Holzarten für das mikromechanische Modell . . . . .	48
3.7	Materialeigenschaften aller getesteten tropischen Holzarten für das mikromechanische Modell . . . . .	49

# Literaturverzeichnis

- [1] *Der österreichische Wald*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2009).
- [2] T. K. Bader, S. Braovac, K. Fackler, und K. Hofstetter, *Stiffness properties of the archaeological oak wood from the Oseberg ship*, Proceedings of European Workshop on Cultural Heritage Preservation, 2011, pp. 164–170.
- [3] T. K. Bader, *Mechanical properties of sound and of deteriorated softwood at different length scales: Poromicromechanical modeling and experimental investigations*, Dissertation, Technische Universität Wien, Juni 2011.
- [4] H. Böhm, *A short introduction to continuum micromechanics*, Springer Verlag, Wien, New York, 2004.
- [5] J.D. Eshelby, *The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems*, Proceedings of the Royal Society of London **Ser. A. 241** (1957), 376–396.
- [6] D. Fengel und G. Wegener, *WOOD Chemistry, Ultrastructure, Reactions*, Verlag Kessel, München, 2003.
- [7] M. G. Grönli, G. Várhegyi, und C. Di Blasi, *Thermogravimetric Analysis and Devolatilization Kinetics of Wood*, Industrial and Engineering Chemistry Research **7** (2002), 4201–4208.
- [8] K. Hoffstetter, Ch. Hellmich, und J. Eberhardsteiner, *Micromechanical modeling of solid-type and plate-type deformation patterns within softwood materials. A review and an improved approach*, *Holzforschung* **61** (Juli 2006), 343–351.
- [9] V. Krackler, D. Keunecke, und P. Niemz, *Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz und Laubholzresten*, Eidgenössische Hochschule Zürich, Institut für Baustoffe (Juli 15, 2010).
- [10] A. El Omri, A. Fennan, F. Sidoroff, und A. Hihi, *Elastic-plastic homogenization for layered composites*, *European Journal of Mechanics A/Solids* **19** (2000), 585–601.
- [11] H. G. Richter und M. J. Dallwitz, *Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. In English, French, German, and Spanish* (Mai 4, 2000).
- [12] C. P. Roger, *The Chemical Composition of Wood*, American Chemical Society, Madison, USA, 1984.
- [13] K.B. Thurbide und D.M. Hughes, *A rapid method for determining the extractives content of wood pulp*, *Industrial and Engineering Chemistry Research* **39** (2000), 3112–3115.
- [14] R. Wagenführ, *Holzatlas*, Fachbuchverlag, 2007.
- [15] [www.baumwaechter.de](http://www.baumwaechter.de) (Dezember 2011).
- [16] A. Zaoui, *Continuum Micromechanics: Survey*, *Journal of engineering mechanics* **128** (August 2002), 808–816.
- [17] T. Zhang, S. L. Bai, S. Bardet, T. Alméras, B. Thibaut, und J. Beauchéne, *Radial variations of vibrational properties of three tropical woods*, *The Japan Wood Research Society DOI 10.1007/s10086-011-1189-7* (2011), 377–386.