Zusammenhang von Gehölzarchitektur und Schwingverhalten der Salix purpurea

Michael Luger

Zusammenhang von Gehölzarchitektur und Schwingverhalten der Salix purpurea

Interrelationship of tree architecture and oscillation of Salix purpurea

Masterarbeit

Ing. Michael Luger, Bakk. techn.

Matrikel Nr.: 9709956

Betreuung

O.Univ.Prof. Dr. Florin Florineth

Univ. Ass. DI Dr.nat.techn. Johann Peter Rauch

DI Clemens Weissteiner

Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Universität für Bodenkultur Wien

Wien, März 2014

INHALTSVERZEICHNIS

1. VORWORT 3

2. DANKSAGUNG 3

3. KURZFASSUNG 4

4. ABSTRACT 5

5. PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG 6

6. GRUNDLAGEN 8

7. STAND DES WISSENS 13

7.1. Messen der Schwingungsdynamik in Zugversuchen 13

7.2. Methodische Ansätze zur Schwingungsmessung 18

7.3. Ergebnisse von durchgeführten Schwingungsversuchen 19

7.4. Einfluss der Achsenordnungen auf das Schwingverhalten 20

8. METHODIK 22

8.1. Arbeitsplan 23

8.2. Gehölzauswahl 24

8.3. Versuchsumgebung und Messwerkzeuge 24

8.4. Gehölzfixierung 25

8.5. Parametrisierung der Gehölzcharakteristik 27

8.6. Zugbelastung 31

8.7. Schwingungsmessung 32

8.8. Zugversuche 35

8.9. Gehölzrückschnitt ... 36

8.10. Auswertung ... 38

9. ERGEBNISSE ... 39

9.1. Parametrisierung der Gehölzcharakteristik ... 39

9.2. Versuchsreihe Gamma1 ... 45

9.3. Versuchsreihe Gamma2 ... 54

9.4. Versuchsreihe Gamma3 ... 61

9.5. Übersicht und Vergleich der Ergebnisse der Zugversuche ... 68

10. DISKUSSION DER ERGEBNISSE ... 69

11. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK ... 76

12. QUELLENVERZEICHNIS ... 78

12.1. Literaturverzeichnis ... 78

12.2. Abbildungsverzeichnis ... 81

12.3. Tabellenverzeichnis ... 93

12.4. Verwendete Software ... 94

12.5. Abkürzungsverzeichnis ... 95

13. ANHANG ... 96

1. Vorwort

Während meines Studiums war die Ingenieurbiologie immer jenes Themengebiet, welches mich am Meisten interessierte. Die Prüfung zur Vorlesung Ingenieurbiologie war wohl eine der wenigen, bei der ich beim Lernen richtig Spaß hatte. So ist es nicht verwunderlich, dass ich dieses Themengebiet mit technischen Problemstellungen und Lösungsansätzen für meine Masterarbeit wählte.

Es begeisterte mich, eine Methodik zu Schwingungsanalysen mittels statischen Zugversuchen an Weiden anzuwenden. Die für mich persönlich sehr zufriedenstellenden Ergebnisse zeigen, in welcher Art und Weise diese Pflanzen hin und her schwingen. Die Darstellung der Ergebnisse in Form von Diagrammen ist eine Schönheit für sich und sagt einiges über die Dynamik und Vergänglichkeit aus, die auch wir im Leben stets erfahren, aber nicht immer sehen.

Das Thema wurde vom Institut für Ingenieurbiologie an der Universität für Bodenkultur Wien ausgeschrieben. Nach einem einführenden Gespräch mit Herrn H.P. Rauch und ein paar Tagen Bedenkzeit nahm ich mich des Themas Ende Jänner 2012 an. Ein weiteres Gespräch fand kurz danach mit Clemens Weissteiner statt. Arbeitsbeginn dieser Arbeit war März 2012.

2. Danksagung

Großer Dank geht an Clemens Weissteiner für die intensive Unterstützung bei dieser Arbeit.

Dank geht an das Institut für Ingenieurbiologie für die Bereitstellung aller notwendigen Ressourcen.

Dank geht an Dagmar Dampfhofer für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Dank geht an die liebe Sonne, die uns ein paar nette Tage für die Versuchsreihen beschert hat.

3. Kurzfassung

In der Ingenieurbiologie werden Weiden als Baustoffe eingesetzt. Gehölze werden verwendet, um Flussufer vor Erosion zu schützen und Hänge zu stabilisieren. Die ingenieurstechnische Berechenbarkeit von ingenieurbiologischen Baustoffen ist die Grundlage und Voraussetzung für die praktische Anwendung von ingenieurbiologischen Bauprojekten. Durch Beobachten und Messen des dynamischen Verhaltens unter Belastung können die Belastbarkeit und die Biegeeigenschaften dieses Baustoffs quantifiziert werden. In dieser Arbeit wurden Versuche diesbezüglich durchgeführt. Als Versuchsgehölze dienten drei bis vier Jahre alte Exemplare der Art Salix purpurea L. Das Gehölz wurde mechanisch durch Zugversuche in Schwingung versetzt. Durch Messen der Schwingung einzelner Pflanzenteile wurde der Einfluss von Ästen und Blättern auf das Gesamtschwingverhalten des Gehölzes festgestellt. In den Zugversuchen wurden sukzessive die Achsen, beginnend mit den höheren Ordnungen, zurückgeschnitten und die Schwingung gemessen. Die Eigenfrequenz war sehr stark von der Masse des Gehölzes abhängig. Mit jedem Rückschnitt erhöhte sich die Eigenfrequenz. Sie stieg sprunghaft an, als nur mehr der Hauptstamm übrig war und sich das Gehölz in Form einer freien, gedämpften Schwingung bewegte. Das Dämpfungsverhältnis, also die Verringerung der Amplitude von einer Periode zur nächsten, war nicht eindeutig aus der Gehölzarchitektur ableitbar.

Schlüsselwörter: *Biomechanik, Schwingungsanalysen, Zugversuche, Gehölzdynamik*

4. Abstract

Soil bioengineering techniques use willows as a construction material for stabilizing slopes and protecting river banks against erosion. The engineering calculability of soil bioengineering construction material is the basis and a prerequisite for the application of bioengineering construction projects. To learn more about the dynamic behaviour of the material, tests were conducted. These tests included observation of dynamic behaviour of trees under stress, investigation of load carrying capacity and bending properties. For this study, three and four year old trees of the specimen Salix purpurea L. were used. The tree was pulled into motion mechanically. Movements of structural elements were measured, thus inquiring about the relevance of leaves, twigs and branches on the tree. Pull and release experiments were undertaken while cropping the axes of the tree gradually and measuring its oscillation. The eigenfrequency of the tree was strongly related to the total mass of the tree. Cropping the tree elevated the eigenfrequency. With only the main axis left the eigenfrequency increased erratically. When only the main stem was left the tree vibrated in the form of a free, dampened oscillation. The damping ratio, which represents the decrease of the amplitude from one oscillation movement to the next, could not be derived clearly from the architectural properties of the trees.

Keywords: *Biomechanics, analyses of oscillations, pull and release experiments, tree dynamics*

5. Problemstellung und Zielsetzung

Ingenieurbiologie ist ein Teilgebiet des Bauwesens, das technische, ökologische, gestalterische und ökonomische Ziele verfolgt und zwar vorwiegend durch den Einsatz lebender Baustoffe, also Saatgut, Pflanzenteile und Pflanzengesellschaften ***(SCHEINOST, W., 2012, S. 5).*** Pflanzen sind in der Ingenieurbiologie ein wichtiger Werkstoff, um Hänge und Ufer zu sichern, beziehungsweise einen Schutz vor Erosion, verursacht durch Regen oder durch Fließgewässer, zu erreichen. Beim Bau einer Brücke oder eines Hochhauses ist sehr viel über die Eigenschaften der Materialien Stahl und Beton, welche dort hauptsächlich verwendet werden, bekannt. Als lebender Baustoff verändert sich ein Gehölz ständig. Kurzfristig kann sich die Materialbeschaffenheit aufgrund von Wassergehalt oder Blattaustrieb stark ändern. Mittelfristig verändert sich die Charakteristik der Pflanze: Die Baumarchitektur verändert sich durch eine sich ändernde Beschaffenheit einzelner Äste und Zweige aufgrund von Längen- und Dickenwachstum und Verholzung sowie durch das Entstehen neuer Äste und Zweige. Vor allem Wind und fließendes Wasser wirken mechanisch auf die Pflanze ein und versetzen diese in Schwingung. Es ist relativ wenig darüber bekannt, wie sich verschiedene Gehölze aufgrund dieser Einwirkung verhalten. In der Ingenieurbiologie ist es wichtig, die Kräfte und das daraus resultierende Materialverhalten zu kennen. In Bezug auf die Belastbarkeit des Materials wurde schon einiges an Forschung betrieben. Es wurden verschiedene Gehölzarten bezüglich Elastizität und Biegefestigkeit untersucht ***(vgl. FLORINETH., 2012; SUTILI et al., 2012).*** Das Gehölz als Ganzes ist ein dynamisches System, auf welches Kräfte einwirken. In diesem dynamischen System werden die einzelnen Strukturelemente in Schwingung versetzt. Die sich bewegenden einzelnen Elemente des Systems beeinflussen sich gegenseitig. Die Schwingung wiederum beeinflusst das Verformungsverhalten. Bleibt die Verformung der Pflanze im elastischen Bereich, wird das Gehölz in seinen Ursprungszustand zurückkehren, nachdem die durch Krafteinwirkung entstandene Schwingung abgeklungen ist. Ist die Krafteinwirkung zu stark, kommt es zum Bruch. Es gibt schon einige Arbeiten über die Schwingungsdynamik verschiedener Spezies von Gehölzen und welchen Einfluss die Gehölzarchitektur auf das Schwingverhalten hat ***(vgl. SELLIER et al., 2006; SELLIER und FOURCAUD, 2005; SPATZ et al., 2007; MOORE und MAGUIRE, 2005; MOORE und***

MAGUIRE, 2008). In Bezug auf Weiden wurden diesbezüglich noch keine Untersuchungen durchgeführt.

Ziel dieser Arbeit ist ein besseres Verstehen der Schwingungsdynamik von Weiden unter Belastung. Es soll erforscht werden, welchen Einfluss die Architektur von Weiden, im speziellen Achsenordnungen und das Blattwerk, auf die Gesamtschwingung des Gehölzes haben, dabei die Architektur des Gehölzes parametrisch zu erfassen und festzustellen, ob es einen Zusammenhang gibt. Als Versuchsmedium dienen in dieser Arbeit Gehölze der Art *Salix purpurea L*.

6. Grundlagen

Im Folgenden werden einige Begriffe erklärt, welche in dieser Arbeit verwendet werden. Es wird eine kurze Übersicht über die Grundlagen der Schwingungsdynamik gegeben. Es folgt eine Erklärung, was eine periodische Schwingung und was eine gedämpfte, harmonische Schwingung ist. Diese Schwingungsdefintionen sind Voraussetzung, um das Schwingverhalten eines Gehölzes zu beschreiben. Es wird erklärt, wie die natürliche Frequenz bzw. die Eigenfrequenz eines Gehölzes definiert ist. Am Ende dieses Kapitels wird dargestellt, wie ein Gehölz architektonisch analysiert werden kann.

Periodische Schwingungen

Eine (nicht konstante) Zeitfunktion $x(t)$ *heißt periodisch, wenn es eine Konstante* $T>0$ *gibt mit der Eigenschaft, dass für alle Zeitpunkte* t *die Beziehung* $x(t+T)=x(t)$ *gilt, wobei* T *für die Schwingungsdauer steht und* φ_1 *für einen bestimmten Phasenwinkel.*

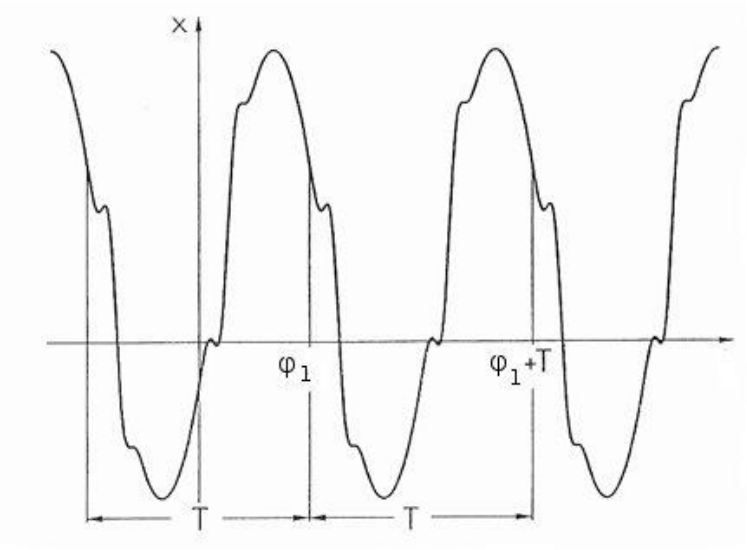


Abbildung 1: Periodische Schwingung, ***(HAGEDORN et al., 1987, S. 8)***

Unter einer Periode verstehen wir ein Zeitintervall, dessen Länge gerade mit der Schwingungsdauer übereinstimmt, unabhängig von der Lage dieses Intervalls auf der Zeitachse.

Der Kehrwert der Schwingungsdauer heißt Frequenz $F = \frac{1}{T}$ *und gibt die Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit an. Häufig wird auch die Kreisfrequenz* $\omega = 2F\pi$ *verwendet.*

Als Amplitude definiert man $\hat{x} = \frac{\max x(t) - \min x(t)}{2}$. *Sie ist nach ihrer Definition niemals negativ* ***(HAGEDORN et al., 1987, S. 8ff).***

Harmonische Schwingungen

Eine Zeitfunktion $x(t)$ *nennt man harmonisch, wenn sie sich in der Form* $x(t) = C_0 + C\cos\omega t + S\sin\omega t$ *darstellen lässt. Die Konstanten* C_0, C *und* S *bezeichnet man als FOURIERkoeffizienten, insbesondere ist der Koeffizient* C_0 *identisch mit dem Mittelwert* $\bar{x}$, *entsprechend gilt:* $C_0 = \bar{x}$. *Bei harmonischen Schwingungen ist der Mittelwert* $\bar{x}$ *das arithmetische Mittel der beiden Größen* $\max x(t)$ *und* $\min x(t)$*; dies ist bei anderen periodischen Funktionen im Allgemeinen nicht so. Weiter beschreibt der (positive) Parameter* ω *die Kreisfrequenz (siehe oben), denn die Schwingungsdauer* T *ist durch* $\frac{2\pi}{\omega}$ *gegeben. Die harmonische Schwingung kann man ebenso gut in der Form* $x(t) = \bar{x} + \hat{x}\cos(\omega t + \alpha)$ *schreiben, in der statt der FOURIERkoeffizienten* C *und* S *die beiden Parameter* $\bar{x}$ *und* α *auftreten, von denen der Erste gemäß obiger Definition die Amplitude wiedergibt. Das Argument* $\varphi_x = \omega t + \alpha$ *der Cosinusfunktion heißt Phasenwinkel. Er ändert sich linear mit der Zeit und charakterisiert die momentane Phase der Schwingung* ***(HAGEDORN et al., 1987, 8ff).***

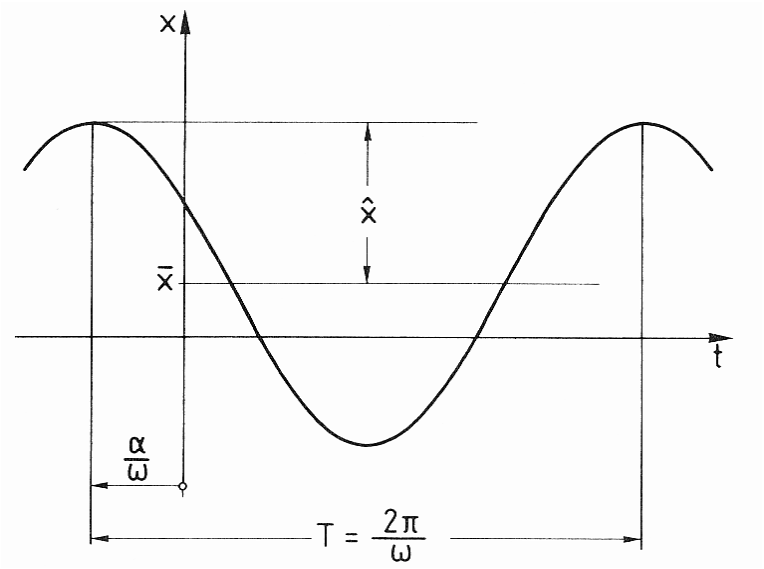


Abbildung 2: Harmonische Schwingung, *(HAGEDORN et al., 1987, S. 8)*

Gedämpfte harmonische Schwingungen

Tatsächliche physikalische Systeme sind immer gedämpft, da sie, z. B. durch Reibung, immer Energie an die Umgebung abgeben. Überlässt man ein solches System sich selbst (freie Schwingung), so führt dieses letztendlich zum „Stillstand“, wie aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik hervorgeht. Perpetua Mobilia sind also nicht möglich ***(WIKIPEDIA, 2012B)****.*

Eine gedämpfte harmonische Schwingung wird auch „unterkritisch gedämpfte Schwingung“ genannt, deren Amplitude exponentiell mit der Zeit abnimmt ***(HAGEDORN et al., 1987, S. 62ff).***

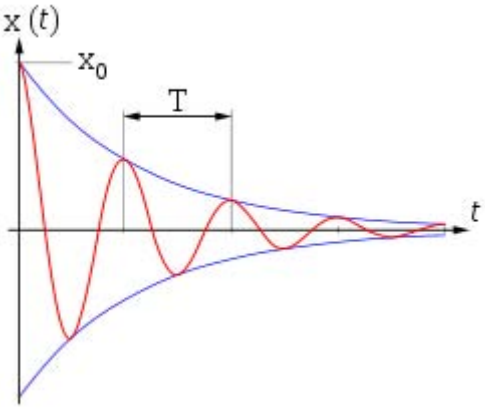


Abbildung 3: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Funktion x(t) bei einer freien gedämpften Schwingung *(WIKIMEDIA, 2007)*

Um die Funktion zu einem Zeitpunkt t zu berechnen, verwendet man die Eulersche Formel und setzt für $\delta = \frac{d}{2m}$ ein, wobei d die Dämpfungskonstante und m die Masse ist. So ergibt sich folgende Schwingfunktion:

$$x(t) = x_0 e^{-\delta t} \sin(\omega_d t + \varphi_0)$$

δ bezeichnet das Dämpfungsverhältnis, dass sich aus der Dämpfungskonstante d und der Masse m ergibt, x_0 die Anfangsamplitude, φ_0 den Nullphasenwinkel und $\omega_d t$ die Eigenkreisfrequenz zum Zeitpunkt t.

(vgl. WIKIPEDIA, 2012B)

Die Schwingungen von Gehölzen entsprechen freien, gedämpften Schwingungen. Jede einzelne Achse eines Gehölzes schwingt in dieser Weise. Die einzelnen Äste beeinflussen sich dabei gegenseitig, weil sie nicht mit gleicher Amplitude, Frequenz und Nullphasenwinkel schwingen.

Eigenfrequenz – Natürliche Frequenz

Die Frequenz mit der ein Objekt schwingt, nachdem eine Kraft einmalig darauf wirkte, nennt man seine Eigenfrequenz. Ein Pendel zum Beispiel schwingt mit der gleichen Frequenz, die es in Bewegung setzt. Wenn man ein Objekt einer Kraft aussetzt, die seiner Eigenfrequenz entspricht, wird das Objekt durch seine Bewegung in Resonanz schwingen und es wird eine maximale Amplitude erzielt. Im Kontext einer Gehölzschwingung spricht man von Eigenfrequenz, wenn man eine Achse betrachtet. Man spricht von der natürlichen Frequenz des Gehölzes, wenn man das Gehölz als Ganzes betrachtet ***(vgl. BURNS, D. P. und RUDNICKI, M.).***

Hierarchischer Aufbau eines Gehölzes

Im Folgenden wird der hierarchische Aufbau eines Gehölzes erklärt. In Tabelle 1 werden die Bezeichnungen der Achsenordnungen angeführt und die dafür verwendeten Abkürzungen.

Tabelle 1: Abkürzungen zu den Achsenbezeichnungen

A°1	Achse erster Ordnung
A°2	Achse zweiter Ordnung
A°3	Achse dritter Ordnung
A°4	Achse vierter Ordnung
A°5	Achse fünfter Ordnung
A°6	Achse sechster Ordnung
A°7	Achse siebenter Ordnung

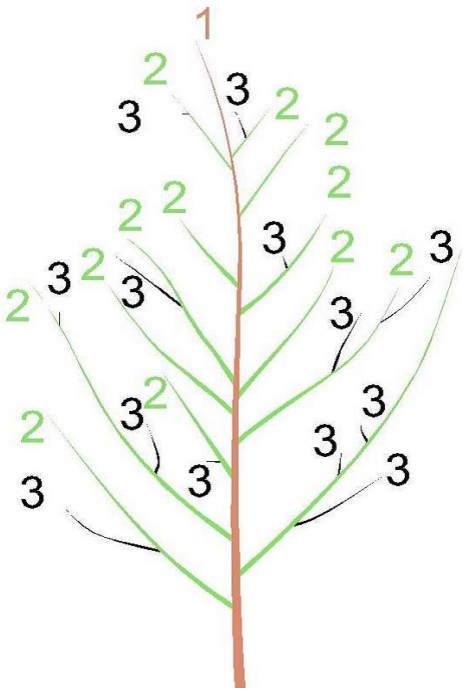


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Astordnungen: braun – Achse 1. Ordnung (Stamm); grün – Achse 2. Ordnung; schwarz – Achse 3. Ordnung; *(SCHEINOST, W.,2012, S. 17)*

Das Wachstum von Pflanzen findet nicht willkürlich über das ganze Individuum verteilt statt. Vielmehr werden neue Teile der Pflanze durch das Wachstum der Apikalmeristeme quasi auf die bestehenden Pflanzenteile „aufgesetzt“. Dies hat auch die Verbindung sämtlicher Komponenten mit dem Stamm zur Folge und wird im Allgemeinen als Baumstruktur wahrgenommen ***(vgl. GODIN und CARAGLIO, 1998; SCHEINOST, W., 2012).***

Analog zu ***BARTHÈLÈMY UND CARAGLIO (2007)*** werden in dieser Arbeit die Ordnungen der Pflanzenachsen folgendermaßen bezeichnet:

- Achse erster Ordnung (A°1): Der Hauptstamm: Er ist direkt mit dem Untergrund verbunden und bildet entlang seiner Achse die Ausgangspunkte für Äste 2. Ordnung (A°2).
- Achsen 2. Ordnung (A°2) entspringen der Achse 1. Ordnung (A°1). Sie verbinden die Achsen 3. Ordnung (A°3) mit dem Stamm.
- Jede weitere Achse sind Äste oder Zweige, welche der vorangegangenen Achse entspringen. Ihre Bezeichnung entwickelt sich analog zu den bestehenden Strukturen (A°4, A°5 usw.) weiter.

7. Stand des Wissens

In diesem Kapitel ist der aktuelle Stand des Wissens bezüglich der Schwingungsdynamik von Gehölzen festgehalten. Am Beginn dieses Kapitels wird darauf eingegangen, welche Parameter beim Messen der Schwingungsdynamik wichtig sind. Danach wird eine Übersicht über die bekannten Messgeräte zur Schwingungsmessung und Architekturerfassung gegeben. Im Anschluss daran wird auf die Methodik der Zugversuche und des Gehölzrückschnitts vergangener Arbeiten eingegangen.

7.1. Messen der Schwingungsdynamik in Zugversuchen

Wenn ein Gehölz durch äußere dynamische Einflüsse, vor allem durch Wind, in Schwingung versetzt wird, spielt jeder einzelne Teil des Gehölzes eine Rolle. Ein Gehölz ist eine komplexe Struktur, die aus einem oder mehreren Stämmen, Ästen, Zweigen und Blättern besteht. Die Biegefestigkeit jedes strukturellen Teils hängt von der Größe und der Form der Querschnittsfläche sowie der Biegefestigkeit des Materials ab ***(vgl. JAMES, 2003).*** Die Äste eines Baums reagieren mit komplexen Schwingbewegungen, wobei sich die verschiedenen Achsen des Baumes nicht synchron bewegen. Man kann diese Bewegungen als ein nicht abgestimmtes System sehen, das dafür sorgt, dass das Gehölz als Ganzes eine kritische Schwingamplitude nicht erreicht, indem die Energie, die in den Hauptstamm geht, an die einzelnen Achsen weitergeleitet wird und somit eine harmonische Schwingung nie erreicht wird ***(vgl. JAMES, 2003).***

Gehölzschwingungen werden durch folgende Faktoren charakterisiert:

- **Frequenz** F : Anzahl der Pendelbewegungen pro Sekunde.
- **Dämpfungsverhältnis** δ : Drückt aus, wie effizient die Amplituden der Pendelbewegung aufgelöst werden.
- **Deformation:** Deformation des Materials erfolgt im elastischen oder im plastischen Bereich bis zum Bruch.

(vgl. SELLIER und FOURCAUD, 2009; SELLIER et al., 2006; FLORINETH et al., 2008)

Frequenz von Gehölzschwingungen

Die Frequenz wird als Kehrwert der durchschnittlichen Zeit zwischen den maximalen Biegungspositionen, also des maximalen Ausschlags des Stamms ermittelt ***(vgl. SELLIER et al., 2006).*** In Versuchen von ***SPATZ et al. (2007)*** mit *Pseudotsuga menziesii*-Exemplaren wurde gezeigt, dass jeder Teil eines Gehölzes mit einer spezifischen Frequenz, seiner Eigenfrequenz schwingt. Der Begriff Eigenfrequenz wird verwendet, um die Charakteristik der errechenbaren Resonanzfrequenz der Zweige, die an einem fixen, theoretisch starren Ast angewachsen sind, zu ermitteln. Die Eigenfrequenz kann durch eine Gleichung für horizontale Objekte, wie Äste und Zweige, exakt ermittelt werden. Für vertikale Objekte gibt es Annäherungen. Die Eigenfrequenz kann für ein Gehölz als Ganzes, dann wird sie als natürliche Frequenz des Baumes bezeichnet, aber auch für einzelne Äste bzw. Zweige gemessen werden ***(vgl. SPATZ et al., 2007)***. ***SPATZ et al. (2007)*** setzten in ihren Versuchen die Länge der Äste (für alle Äste länger als 0,2 Meter) in Beziehung zur Frequenz. Dabei zeigte sich, dass sehr kurze Äste eine höhere Frequenz als längere Äste aufweisen. Die Eigenfrequenz von Ästen länger als 0,5 Meter hingegen lag sehr nahe an der natürlichen Frequenz des Gehölzes.

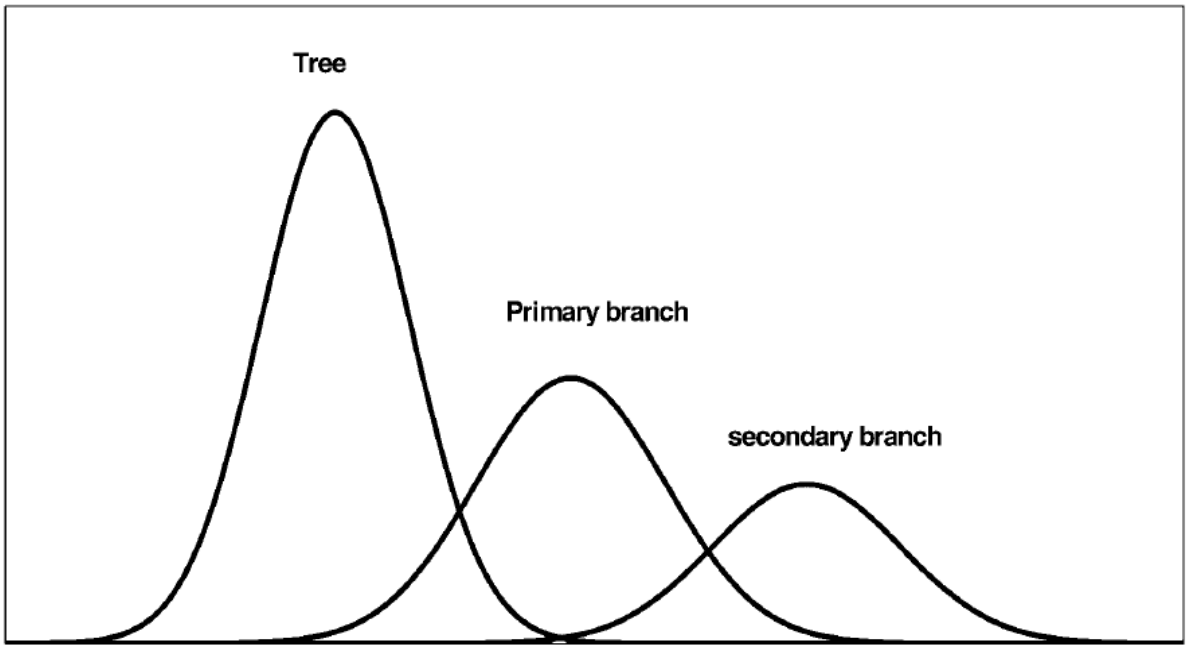


Abbildung 5: Unterschiedliche Eigenfrequenzen der Achsen als Voraussetzung für die Übertragung der mechanischen Energie von den höher geordneten Achsen bis zum Hauptstamm *(SPATZ et al., 2007)*.

Für Schwingungen verursacht durch Wind, spielt einerseits die Windgeschwindigkeit eine Rolle und andererseits in welchen Abständen die Windstöße auftreten. Bei geringer Windgeschwindigkeit kommt es häufig zum Stillstand der Gehölzschwankung bevor ein neuer Windstoß auftritt. Dies bedeutet, das Gehölz schwingt aus, nachdem es eine Belastung erfuhr. Die Perioden werden nicht durch einen erneuten Windstoß verstärkt ***(vgl. SELLIER und FOURCAUD, 2009).*** Wenn sich die Windgeschwindigkeit erhöht und sich die Frequenz der Windstöße an die Eigenschwingfrequenz des Gehölzes nähert oder synchron mit dieser ist, wird die Schwingamplitude des Gehölzes erhöht. Eine einmalige, statische Belastung durch ein Seil, an dem gezogen wird, würde etwa einem einmaligen Windstoß, der plötzlich nachlässt, entsprechen. Die Schwankungen des Gehölzes lösen sich auf, bevor eine neue Belastung kommt. Wie lange es dauert bis das Gehölz wieder zum Stillstand kommt, also wie effizient die Schwingamplitude gedämpft wird, hängt in diesem Fall vom Dämpfungsverhältnis ab.

Dämpfungsverhältnis bei Gehölzschwingungen

Ein hohes Dämpfungsverhältnis wirkt einer großen Amplitude entgegen ***(vgl. SELLIER und FOURCAUD, 2009)***. Dämpfung bedeutet, mechanische Energie wird abgeleitet.

Es sind folgende Hauptursachen für die Dämpfung von Gehölzschwingungen bekannt:

- Aerodynamische Dämpfung
- Boden-Wurzel Dämpfung
- Dämpfung durch Kollision
- Materialdämpfung
- Strukturelle Dämpfung

(vgl. KERZENMACHER und GARDINER, 1998; SPECK und SPATZ, 2004; ENGLAND et al., 2000; THECKES et al., 2011; MOORE und MAGUIRE, 2008; SPATZ et al., 2007)

Aerodynamische Dämpfung

Ist ein Gehölz dem Wind ausgesetzt, beginnen sich die Stämme, Zweige, Äste und Blätter zu biegen. Dabei reduziert sich die dem Wind ausgesetzte Fläche mit erhöhter Windgeschwindigkeit. Wird die Windgeschwindigkeit zu groß, brechen die Zweige, Äste oder Blätter ab ***(vgl. SPECK, 2003; NIKLAS, 2000; SELLIER et al., 2006)***. Das aerodynamische Bremspotential des Blattwerks und zu einem geringeren Grad

der Achsen bewirkt einen Dämpfungseffekt. Das aerodynamische Bremspotential spielt bei Nadel- oder Blattwerk eine große Rolle, bei nackten Ästen weniger ***(vgl. SPECK und SPATZ, 2004)***. ***NETSVETOV und NIKULINA (2010)*** untersuchten die aerodynamische Bremswirkung des Blattwerks im Speziellen. Sie analysierten deren Einfluss auf die natürliche Frequenz des Gehölzes. Dabei wurde gezeigt, dass blatttragende Bäume im Durchschnitt mit 1,6-facher Frequenz im Vergleich zu Bäumen ohne Blätter außerhalb der Vegetationsperiode schwingen. Ebenso veränderte sich das Dämpfungsverhältnis signifikant. So war dieses bei blatttragenden Bäumen in der Vegetationsperiode im Schnitt 1,2 bis 1,8 Mal höher als im blattlosen Zustand. Für die Schwingfrequenz scheint vor allem die Masse des schwingenden Elements verantwortlich zu sein, für das Dämpfungsverhältnis die aerodynamische Bremswirkung, vor allem durch Blätter. Um die aerodynamische Bremswirkung von der strukturellen Dämpfung zu unterscheiden, würde man eine eigene Analyse benötigen ***(vgl. NETSVETOV und NIKULINA, 2010)***.

Boden-Wurzel Dämpfung

Hier spielt die Reibung zwischen Boden und Wurzelwerk eine Rolle. Diese Reibung kann in Abhängigkeit der Zusammensetzung des Substrats und des Feuchtigkeitsgehalts stark variieren. In Versuchen von ***SPECK und SPATZ (2004)*** konnte, mit Ausnahme eines Versuchs einer ganzen Versuchsreihe, keine signifikante Auswirkung der Boden-Wurzel Dämpfung festgestellt werden ***(vgl. SPECK und SPATZ, 2004)***.

Dämpfung durch Kollision

Die Reibung bzw. Kollision zwischen benachbarten Pflanzen, wenn diese nahe aneinander stehen, ist für die Übertragung der mechanischen Energie, durch Wind induziert, ein wesentlicher Faktor. Die Pflanze kommt entweder abrupt zum Stillstand, wenn Teile von ihr mit anderen Pflanzenteilen kollidieren, oder es findet eine sanfte Dämpfung statt, wenn Teile der Pflanzen lediglich aneinander reiben ***(vgl. KERZENMACHER und GARDINER, 1998)***.

Materialdämpfung

Hier spielt die materielle Beschaffenheit der Pflanze, speziell die Viskosität des Holzes eine Rolle. Die Materialdämpfung hat eine wesentliche Dämpfungswirkung im

dynamischen Schwingprozess. Der bestimmende Faktor für die Materialdämpfung ist die Biegefestigkeit der Pflanze. Diese kann unter anderem mit dem Elastizitäts-Modul (E-Modul) beschrieben werden. Es wird die aufgewendete Kraft der Durchbiegung des Materials gegenübergestellt ***(vgl. SUTILI, F. J., 2007)***.

Strukturelle Dämpfung (Einfluss der Baumstruktur)

Das Gehölz besteht aus einem System mehrfach schwingender Komponenten (Stamm, Äste, Zweige und Blätter), die mechanisch miteinander verbunden sind. Als strukturelle Dämpfung wird das dämpfende Verhalten von Ästen, Zweigen und Blättern bezeichnet, die mit anderen Frequenzen oder Phasenwinkeln als der Hauptstamm schwingen. Durch die Bewegung lateraler Elemente der Pflanze (der Blätter oder verschiedener Achsen) wird Energie aufgenommen bzw. transferiert. Der Dämpfungseffekt von Ästen, Zweigen und Blättern ist zweierlei: Einerseits der aerodynamische Bremseffekt, andererseits die mechanische Kraftübertragung in andere strukturellen Elemente (Achsen) und die daraus folgende dämpfende Wirkung, wenn sich diese nicht phasengleich mit dem Hauptstamm bewegen. In Versuchen von ***SPECK und SPATZ (2004)*** betrug der strukturelle Dämpfungseffekt 26% der gesamten Dämpfung ***(SPECK und SPATZ, 2004).*** Bei Versuchen von ***SPATZ et al. (2007)*** spielte die aerodynamische Bremswirkung bei nackten Ästen im Vergleich zur strukturellen Dämpfung kaum eine Rolle. Bei deren Versuchen konnte auch nachgewiesen werden, dass die aerodynamische Bremswirkung und die Materialdämpfung keineswegs ausreichen, um den Dämpfungseffekt zu erklären. Ganz im Gegenteil, der Effekt der strukturellen Dämpfung scheint ein Hauptfaktor für die Dämpfungswirkung zu sein. Dabei spielt es eine Rolle, ob die A°2 und die A°3 phasensynchron zur A°1 oder mit einem anderen Phasenwinkel schwingen. Solange die Schwingfrequenz des Gehölzes wesentlich von den natürlichen Frequenzen der Achsen abwich, bewegten sich die A°2 und die A°3 weitgehend phasensynchron. Je näher die tatsächliche Schwingung an deren Eigenfrequenz lag, desto unterschiedlicher schwankten die Seitenäste. In diesem Fall konnte ein doppelt so hohes Dämpfungsverhältnis beobachtet werden. Hier wird die mechanische Energie zwischen den strukturellen Elementen des Gehölzes hin- und her transferiert ***(vgl. SPATZ et al., 2007)***. Bei der strukturellen Dämpfung spielt nicht nur die Masse des Astwerks eine Rolle, sondern das Schwingen jedes einzelnen Astes. Dabei werden die Äste nicht als diskrete Masse, die am Hauptstamm befestigt sind, gesehen, sondern als eigenständige, freitragende Einheiten, gekoppelt an den Hauptstamm.

Um dies zu modellieren wird die Finite Element Methode (FEM) verwendet ***(MOORE und MAGUIRE, 2008)***.

Deformation

Ein Gehölz kann Deformation im elastischen Bereich erfahren, dann findet keine Materialveränderung statt. Wird es über den elastischen Bereich hinaus belastet, kommt es zu einer plastischen Verformung und folglich zu einer Materialveränderung. Das Gehölz wird nicht mehr völlig in seinen räumlichen Ausgangszustand zurückkehren. Geht die Verformung über den plastischen Bereich hinaus, kommt es zum Bruch. Die Biegesteifigkeit kann als Maß für die Verformbarkeit eines Materials betrachtet werden ***(vgl. FLORINETH., 2012; SUTILI, F. J., 2007; SUTILI et al., 2012)***.

Bei statischen Zugversuchen ist zu beachten, dass die Deformation im elastischen Bereich bleibt. Somit ist die Wiederholbarkeit des Versuchs gegeben und die Deformation kann als Einflussfaktor auf die Dämpfung vernachlässigt werden.

7.2. Methodische Ansätze zur Schwingungsmessung

Zum Aufzeichnen der Gehölzschwingungen können verschiedene Geräte verwendet werden. Die Schwingung kann in Bezug auf das gesamte Gehölz gemessen werden (also auf der Hauptachse), aber auch auf den übergeordneten Achsen. Zur Messung der Schwingung einzelner Achsen gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- **Inklinometer**

  SELLIER und FOURCAUD (2005) befestigten Inklinometer auf einer Höhe von 0.1 m über der Stammbasis sowie auf einem Drittel bzw. auf der Hälfte der gesamten Gehölzhöhe. Die Masse der Inklinometer war mit 0.2 kg nicht unerheblich im Vergleich zur Gesamtmasse des Gehölzes. Um einen zu großen Einfluss auf die Schwingung zu vermeiden wurde am dünneren Stamm auf eine Messung verzichtet.

- **Extensometer**

  SPATZ et al. (2007) verwendeten Extensometer um die Schwingungsamplituden zu messen. Auch bei dieser Methode musste Rücksicht auf die Masse des Messgeräts (0.32 kg) genommen werden. Zwei Stück wurden am Hauptstamm in

einer Höhe von 2.26 m befestigt. So konnten ausreichende Amplituden gemessen werden, der Einfluss der zusätzlichen Masse hielt sich jedoch in Grenzen.

- **DMS**

MOORE und MAGUIRE (2005) befestigten Dehnmessstreifen (DMS) im rechten Winkel jeweils an der Nordseite bzw. an der Ostseite des Baumes. Durch eine Spektralanalyse der Signale, welche die DMS an einen Computer übermittelten, konnte die natürliche Schwingfrequenz berechnet werden. Auf der Zeitachse wurde die Dichtheit des Spektrums (PSD) extrapoliert. Die höchsten Werte stimmten mit der Schwingfrequenz des Stamms überein. Die Schwingung wurde durch die Veränderung der Kraft, welche auf die Dehnmessstreifen wirkte, gemessen. Die Zeit, die zwischen den jeweiligen maximalen Belastungen (Kraftwirkung) verstrich, entsprach der Schwingfrequenz.

- **Polhemus Fastrak**

SCHEINOST, W (2012) verwendete zum Digitalisieren von Gehölzen den *Polhemus Fastrak*. Mit dem Polhemus Fastrak kann nicht nur ein statisches Modell aufgenommen, sondern es können auch Bewegungen gemessen werden. Eine Aufnahmefrequenz von 30-120 Hertz, je nach Anzahl der angeschlossenen Sensoren, ermöglicht ein Messen der Schwingungen eines Gehölzes. Beim montieren auf den Achsen muss auf die Masse der Sensoren Rücksicht genommen werden.

7.3. Ergebnisse von durchgeführten Schwingungsversuchen

Durch eine Zugbelastung zur Seite und anschließende, plötzliche Entlastung des Gehölzes werden die einzelnen Achsen eines Baumes in Schwingung versetzt. ***SELLIER et al. (2006)*** zogen das Gehölz aus der Ruheposition mit Hilfe eines Seils. Anschließend wurde das Seil losgelassen und somit die Zugspannung abrupt reduziert. Das Seil sollte leicht genug sein, damit der Einfluss des Gewichts des Seiles vernachlässigbar ist. Aus diesem Grund wurde ein Nylonseil (0.02 kg) verwendet ***(vgl. SELLIER und FOURCAUD, 2005)***. Wird das Gehölz an einem bestimmten Punkt des Stammes gezogen, kann das hochfrequentere Schwingungen verursachen als bei gleichmäßiger Belastung z.B. durch Wind ***(vgl. SELLIER und FOURCAUD, 2005)***. Dies bedeutet, ein punktueller Zugversuch (mit Seil) ist nicht direkt vergleichbar mit einer Situation in der Natur, sei es eine Belastung durch Wind oder

fließendes Wasser. Bei ***SPATZ et al. (2007)*** wurde das Gehölz mittels Seil 0.3 bis 0.4 m zur Seite gezogen. Das Seil war auf einer Höhe von 2.63 m knapp über den Messgeräten befestigt. ***SELLIER und FOURCAUD (2005)*** befestigten das Seil in einer Versuchsreihe auf einem Drittel der gesamten Gehölzhöhe. In einer anderen Versuchsreihe wurde das Seil an der Spitze des Stammes festgemacht. Die anfängliche Amplitude war in beiden Fällen gleich groß, im Falle der Seilbefestigung an der Spitze des Stammes konnte ein schnellerer Rückgang der Amplitude festgestellt werden.

7.4. Einfluss der Achsenordnungen auf das Schwingverhalten

Das Astwerk sowie das Blattwerk haben Einfluss auf die natürliche Schwingfrequenz des Gehölzes sowie auf die Dämpfung. ***MOORE und MAGUIRE (2005)*** betrachten das Gehölz als eine Reihe konkreter Massen, die mit dem Stamm verbunden sind, wenn sie die dynamische Wirkung von Wind auf ein Gehölz untersuchen möchten. Es ist möglich, dass die Schwingungen der A°2 und der A°3 das dynamische Schwingverhalten des Gehölzes mehr beeinflussen als nur durch ihre zusätzliche Masse ***(MOORE und MAGUIRE, 2008). MOORE und MAGUIRE (2005)*** begannen die Krone von unten her abzuasten. Zuerst ein Drittel, dann das zweite Drittel und zu Letzt den oberen Rest der Krone. Das entnommene Astmaterial wurde in seiner Länge sowie Trockengewicht (48 Stunden Trocknung bei 60°C) gemessen. Es wurde bei diesen Messungen zwischen A°1, A°2 sowie Nadeln unterschieden.

SELLIER und FOURCAUD (2005) wandten bei Ihren Versuchen zwei Methoden des Rückschnitts an. Bei der ersten Methode wurde mit dem Entfernen der Nadeln bzw. des Blattwerks begonnen, dann wurden die A°3 und schließlich die A°2 entfernt. Bei deren zweiten Methode wurde das Entfernen der A°3 und der A°2 ohne vorheriges Entfernen des Blattwerks durchgeführt. Das entfernte Blattwerk sowie das Astwerk wurden abgewogen ***(vgl. SELLIER und FOURCAUD, 2005). SPATZ et al. (2007)*** versetzten zuerst den Baum als Ganzes in Schwingung. In einem zweiten Versuch entfernten sie alle A°2, inklusive der oberen 80 Zentimeter von der A°1. Dabei stellte sich heraus, dass die flexible, obere Spitze der A°1 für das Dämpfungsverhältnis eine erhebliche Rolle spielt. Bei ***SELLIER et al (2006)*** wurden sukzessive Nadeln, die A°3 und höhere Ordnungen und schließlich die A°2 entfernt, bis nur mehr der Hauptstamm übrig blieb. *50% Entastung oder weniger wirken sich nicht wesentlich*

auf die Schwingungsfrequenz aus, der Dämpfungseffekt ist wesentlich reduziert, wenn die ganze Krone entfernt wird ***(MOORE und MAGUIRE, 2005, S. 10)***.

8. Methodik

Die Methodik beinhaltet einen Arbeitsplan und beschreibt den Vorgang bezüglich vorbereitender Arbeiten, Erfassung und Parametrisierung der Architektur der Gehölze sowie des Versuchsablaufs zum Messen der Schwingungsdynamik.

Zuerst wird auf die Methodik bei der Auswahl der Gehölze und das Ermitteln einer passenden Versuchsumgebung sowie geeigneter Messwerkzeuge eingegangen. Im Anschluss daran werden Details zur Fixierung der Gehölze erklärt, welche Parameter zur Beschreibung der Gehölzarchitektur gemessen wurden und welche Methodik bei der Zugbelastung und der Schwingungsmessung angewandt wurde. Danach wird auf die Methodik der Zugversuche an sich und des Gehölzrückschnitts nach jedem Zugversuch eingegangen. Am Schluss wird die Methodik der Auswertung erklärt.

Am Beginn dieser Arbeit wurde eine geeignete Umgebung für die Versuchsreihen im April 2012 gesucht und erprobt. Es wurden einige Vorversuche durchgeführt, um die Vorgangsweise bei den Versuchen zu erarbeiten. Die Vorversuchsreihen, namentlich „*Alpha*“ und „*Beta*“, wurden mit je zwei Gehölzen im Zeitraum von März bis Juni 2012 durchgeführt. Ab Juli 2012 wurde mit der ersten Hauptversuchsreihe „*Gamma1*“ begonnen. Die zweite Hauptversuchsreihe „*Gamma2*“ wurde im August 2012 durchgeführt. Im Herbst bzw. Winter danach wurden die Daten ausgewertet. Nach einer längeren Pause wurde im Mai 2013 die dritte Hauptversuchsreihe „*Gamma3*“ durchgeführt. Nach einer längeren Sommerpause wurden ab November 2013 alle Daten ausgewertet und die Arbeit im März 2014 abgeschlossen.

8.1. Arbeitsplan

Ein grober Arbeitsplan wurde erstellt um eine strukturierte Herangehensweise an diese Arbeit zu forcieren. Der Plan wurde bei Bedarf laufend verändert.

Tabelle 2: Arbeitsplan mit Zeitrahmen und am Arbeitsschritt teilnehmende Personen

Arbeitsschritte	Zeitrahmen	Personen
Arbeitsplan	3. März 2012 – 21 März 2012	ML
Literaturrecherche	19. März 2012 – 15. Juli 2012	ML
Methodik	4. April 2012 – 15. Juli 2012	ML
1. Versuchsreihe	16. Juli 2012 – 20. Juli 2012	ML, CW
2. Versuchsreihe	13. August 2012 – 5. Oktober 2012	ML, CW
Auswertung	15. Oktober 2012 – 28. Feb.. 2013	ML
Überarbeitung	1. April 2013 – 30. April. 2013	ML
3. Versuchsreihe	1. Mai 2013 – 30. Mai 2013	ML, CW
Auswertung	7. Nov. 2013 – 27. Nov 2013	ML, CW
Interpretation	28. Nov 2013 – 19. Dez 2013	ML, CW
Überarbeitung	8. Jänner 2014 – 31. Jänner 2014	ML, CW
Feedback, Korrekturen	1. Feb. 2014 – 24. Feb. 2014	ML, CW, HPR
Überarbeitung, Layout,	25. Feb. 2014 – 1. März 2014	ML
Korrektur, Bewertung	März 2014	ML, CW, HPR, FF
Präsentation, Defensio	7. April 2014	ML, CW, HPR, FF, GS, LL

ML: Michael Luger; CW: Clemens Weissteiner; HPR: H.P. Rauch; FF: Florin Florineth; GS: Gerda Schneider, LL: Lilli Lička

8.2. Gehölzauswahl

Alle Gehölze wurden von der Versuchsfläche des Instituts für Ingenieurbiologie der Universität für Bodenkultur in Großenzersdorf entnommen. Die Versuchsfläche befindet sind an folgenden Koordinaten: 16°33‘59“ östlich von Greenwich und 48°11‘54“ nördlicher Breite auf einer Höhe von 156 m über dem Meeresspiegel. Die Gehölze wurden als Steckhölzer angesetzt und waren drei bis vier Jahre alt. Es handelte sich ausschließlich um die Art *Salix purpurea*. Bei der Auswahl der Gehölze wurde darauf geachtet, dass sie einen markanten Hauptstamm haben sowie eine Achse zweiter Ordnung, welche stark genug ist, um den Messsensor des Polhemus Fastrak zu tragen. Die Gehölze wurden mit einer Astschere oder einer kleinen Säge (Fuchsschwanz) auf einer Höhe von maximal 50 cm geschnitten und mit dem Auto zur Universität für Bodenkultur transportiert. Sie wurden über Nacht in einen kleinen Eimer mit Wasser gestellt, damit sie frisch blieben. Am nächsten Tag wurden die Versuche durchgeführt.

8.3. Versuchsumgebung und Messwerkzeuge

Zum Digitalisieren der Gehölzarchitektur, als auch zum Messen der Schwingungsdynamik wurde beschlossen, den *Polhemus Fastrak* zu verwenden. Voraussetzung für die Versuche war eine metallfreie Umgebung um das Magnetfeld des *Polhemus Fastrak* nicht zu beeinflussen.

Das Messsystem *Polhemus Fastrak* umfasst:

- Einen EM-Sender (Transmitter) in einer fixen Position, welcher die Magnetfelder aufrechterhält.
- Einen oder mehrere EM-Empfänger (Receiver-Sensoren), welche die Feldstärke des EM-Feldes an einem Punkt messen.
- Eine Steuerungseinheit, welche die Stromversorgung übernimmt und für die Übertragung an einen Computer zuständig ist.

(vgl. SCHEINOST, W., 2012; POLHEMUS, E., 2005)

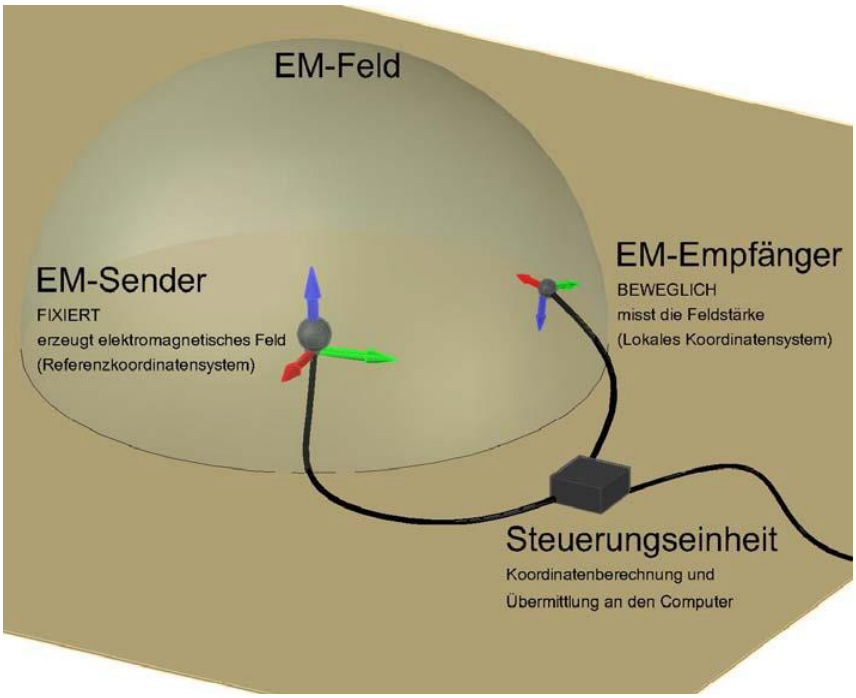


Abbildung 6: Aufnahmeprinzip eines elektromagnetischen Digitalisierungsinstruments *(SCHEINOST, W., 2012, S. 31)*.

Die Versuche wurden vor dem Haupteingang des Schwackhöferhauses der Universität für Bodenkultur, auf der Ebene des Kellers, durchgeführt. Dort war keine elektromagnetische Beeinflussung vorhanden und die Nähe zum Haus garantierte eine einfache Versorgung der Geräte durch elektrischen Strom. Es wurde eine Vorrichtung konstruiert, um das Gehölz zu fixieren und die Zugversuche durchführen zu können. In Vorversuchen („*Alpha*“ und „*Beta*“) wurden Messmethodik und Versuchsablauf verfeinert. Schließlich wurde die Hauptversuchsreihe „*Gamma*“ mit Architekturaufnahmen und Schwingungsmessungen durchgeführt.

8.4. Gehölzfixierung

Die Versuche fanden isoliert von anderen Bäumen statt. Das Gehölz wurde in eine Vorrichtung eingespannt. Der Stamm wurde starr in der Haltevorrichtung mit Plastikschrauben fixiert. Durch das Entwurzeln und Einspannen konnte auch der Dämpfungseinfluss der Boden-Wurzelwerk-Verbindung ausgeschlossen werden ***(vgl. ENGLAND et al., 2000)***.

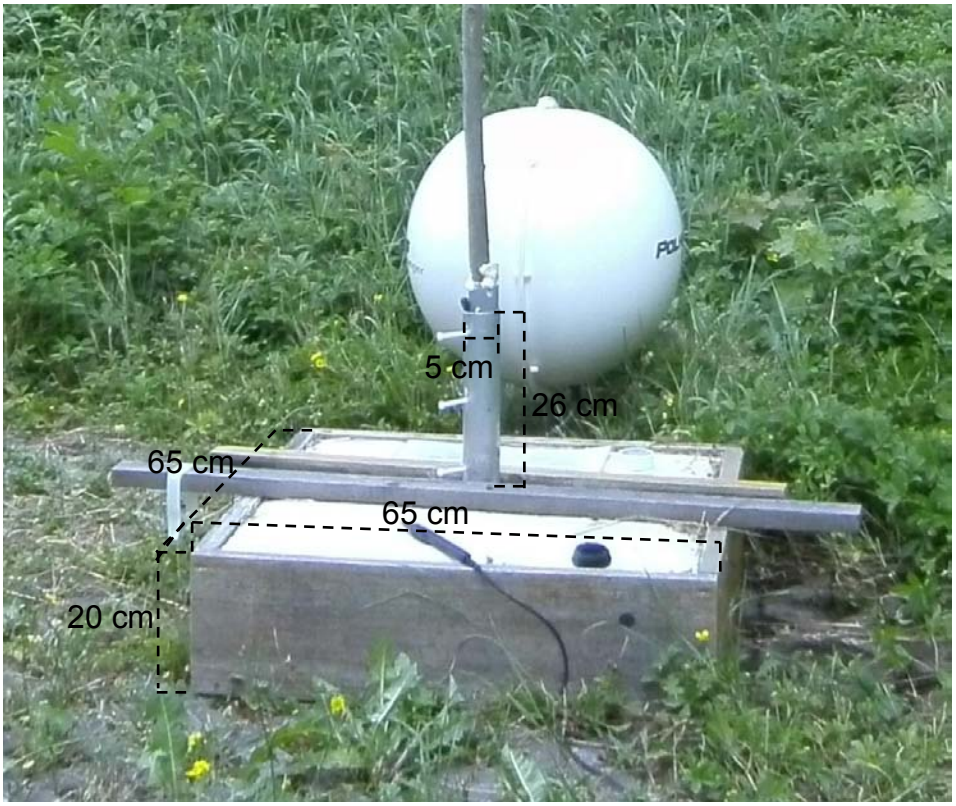


Abbildung 7: Gegossener Betonsockel mit Haltevorrichtung, 09.07.2013.

Als Konstruktion zur Bodenfixierung diente ein gegossener Betonsockel von 65 cm mal 65 cm Grundfläche mit einer Höhe von 20 cm. Das ergab ein Volumen von 85 Liter und einer Betonmasse von etwa 210 kg für den Sockel. Im Zentrum des Sockels war ein Aluminiumrohr mit einem Durchmesser von 5 cm eingelassen. Das Gehölz wurde mit dem unteren Ende des Hauptstammes in ein Plastikrohr eingeführt und durch Einfüllen von Isolierschaum (BU-Schaum) fixiert. Das Plastikrohr mit dem Gehölz wurde mittels Plastikschrauben im Aluminiumrohr des Sockels befestigt. Durch die große Masse des Sockels und die starre Befestigung des Gehölzes wurde gewährleistet, dass der Stamm an der Basis fixiert war.

8.5. Parametrisierung der Gehölzcharakteristik

Für die Versuche, welche dieser Arbeit zu Grunde liegen, wurden folgende Parameter erfasst:

- D_x:Stammdurchmesser in der Höhe von x Meter (z.B.: $d_{0.2} = 5.1$ würde bedeuten, in einer Höhe von 0.2 Meter beträgt der Stammdurchmesser 5.1 cm)
- h: Gesamthöhe des Gehölzes
- m: Biomasse des gesamten Gehölzes inkl. Blattwerk
- C_b: Kronenbreite (horizontaler Kronendurchmesser)
- C_h: Kronenhöhe (vertikaler Kronendurchmesser)
- Ex_{gew}: Die gewichtete Exzentrizität ist die Abweichung des Baumwuchses von einer symmetrischen Wuchsform. Für die Berechnung der Exzentrizität wurde das Gehölz, von oben betrachtet, in vier Kreisviertel eingeteilt. Das Zentrum war dabei die Stammbasis auf 0.0 m Höhe. Der Durchmesser des Kreises wurde vom maximalen, tatsächlichen Baumkronenradius bestimmt.

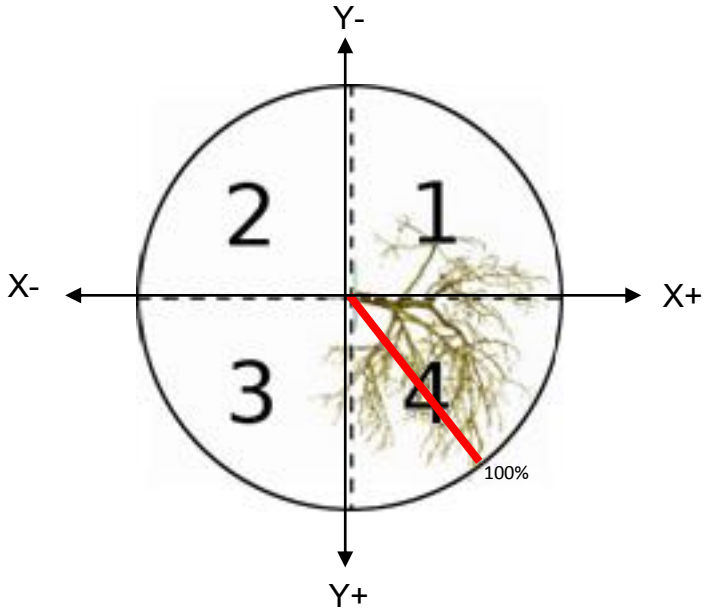


Abbildung 8: Einteilung der Baumkrone in Kreisviertel mit X- und Y-Achsen als Teiler des Kreises, 09.01.2014.

Für jedes gemessene Segment wurde die radiale Position innerhalb dieses Kreises bestimmt, wobei ganz außen 100% bedeutete, im Kreismittelpunkt liegend bedeutete 0%. Dieser Wert bestimmte die Gewichtung der Exzentrizität eines Segments innerhalb eines Kreisviertels, welche mit der projizierten Fläche des Segments

multipliziert wurde. Es wurden nicht alle Segmente innerhalb eines Kreisviertels über die gesamten Höhe aufsummiert, sondern pro Höhenklasse:

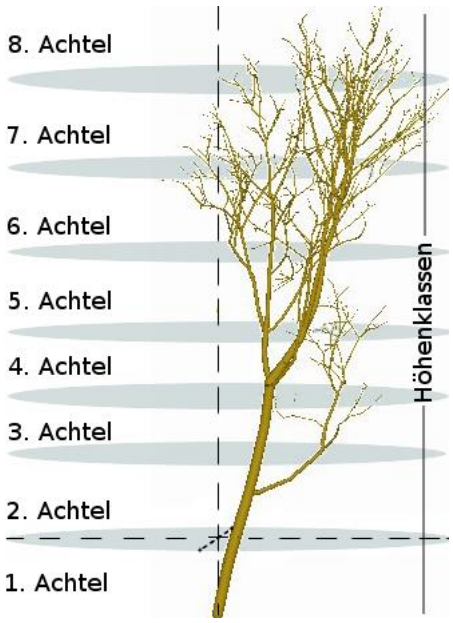


Abbildung 9: Einteilung des Gehölzes in Kreisviertel und Höhenklassen, 09.01.2014.

Die Summe der gewichteten Flächenprojektionen aller Segmente eines Kreisviertels einer Höhenklasse ergab somit einen absoluten Exzentrizitätswert pro Kreisviertel-Höhenklasse.

$$A_{gew/K4tel_HK} = \sum A_{Seg} * \frac{rpos_{Seg}}{r_\max}$$

Alle Höhenklassen eines Viertels wurden aufsummiert. Somit ergaben sich Werte aller vier Viertel.

$$A_{gew/K4tel} = \sum_{HK=1}^{8} A_{gew/K4tel_HK}$$

Aus diesen Werten wurde ein Mittelwert gebildet. Die Abweichung von der mittleren Viertelfläche ergab den gewichteten Exzentrizitätswert, wobei galt, die maximale Exzentrizität pro Viertel konnte nur 0.25 ausmachen.

$$Ex_{gew} = \sum_{allerK4tel} \frac{A_{gew_K4tel} - \phi A_{gew_K4tel}}{\phi A_{gew_K4tel}} / 4$$

A_{gew} : Flächenprojektion, gewichtet nach der radialen Position: Ganz außen (100%) bedeutet volle Gewichtung.

$K4tel$: Kreisviertel.

$K4tel_HK$: Kreisviertel innerhalb einer Höhenklasse.

HK : Höhenklasse (1-8).

A_{Seg} : Projizierte Fläche eines Achsensegments.

r_pos_{Seg} : Radiale Position eines Segments.

$r_\max$: Maximalradius.

Weitere Kennzahlen:

Für jeden Ast (Achse) wurden

- die Höhe, wo dieser am Stamm entspringt,
- der Anwuchswinkel,
- die Ausrichtung sowie
- der basale Durchmesser

gemessen.

Für jede Achsenordnung wurden

- die Anzahl der Achsen,
- die Summe der Längen aller Achsen dieser Ordnung,
- der durchschnittliche, basale Durchmesser,
- die Summe der Massen aller Achsen im frischen Zustand sowie
- die Summe der Massen aller Achsen im getrockneten Zustand

festgehalten.

Für jede Achsenordnung wurden diese Werte tabellarisch aufgelistet. Bezüglich des Blattwerks wurde die Biomasse im frischen sowie im getrockneten Zustand ermittelt. Die meisten der Parameter konnten aus dem digitalen Pflanzenmodell abgeleitet werden. Zur Digitalisierung der Pflanze wurde das System *Polhemus Fastrak* verwendet.

Der *Polhemus Fastra*k wurde so aufgestellt, dass die positive Y-Achse in Zugrichtung zeigte. Für eine genaue Verwendung des Polhemus Fastrak zum Digitalisieren des Gehölzes vergleiche ***SCHEINOST, W. (2012).***

Durch Abtasten des gesamten Gehölzes konnte dieses vollständig bezüglich dessen räumlicher Ausmaße digitalisiert werden. Die jeweiligen Achsendurchmesser wurden

per Hand gemessen und digitalisiert. Die Messungen wurden an jenen Punkten vorgenommen, welche die Pflanze charakterisieren, also an Astansätzen und bei signifikanten Änderungen des Durchmessers. So erhielt man ein digitalisiertes, abstrahiertes Modell der Pflanze. Das Offset des Stylus wurde auf 6.438/-0.037/0.057 eingestellt. Das Offset ist ein Koordinaten-Triplet, bestehend aus X-, Y- und Z-Koordinate. Es berichtigt die Distanz zwischen der Position des Messsensors, also der Spulen und dessen Spitze, wo tatsächlich gemessen wurde. Mit diesem wurde das Gehölz „abgetastet“. Dabei wurde dieser wie ein Kugelschreiber mit der Spitze direkt an die Rinde am entsprechenden Messpunkt angelegt. Der Auslöser am Stylus wurde gedrückt und der Durchmesser manuell gemessen. Eine zweite Person am Computer überprüfte den Dateneingang und gab die Änderung der Ordnungszahl ein. Aufgenommen wurden alle Knotenpunkte entlang der Achse und Zwischenpunkte auf längeren Segmentstücken. Als Software für die Architekturaufnahme diente das Programm ***PIAFDIGIT***. Nach Beendigung der Aufnahme wurden die aufgenommenen Daten zusätzlich als Excel-Datei abgespeichert.

8.6. Zugbelastung

Der Hauptstamm des Gehölzes wurde durch Zug zum seitlichen Boden belastet. Das Seil wurde an einem Punkt entlang des Stammes befestigt. Zuerst wurde eine Nylon Fischerleine verwendet. Nach ein paar Versuchen riss diese immer wieder, deshalb wurde schließlich ein etwa ein Millimeter dicker Spagat (Bindfaden) verwendet. Der Stamm wurde zuerst mit einem dicken, doppelseitigen Klebeband umwickelt, auf welchem die Schnur befestigt wurde. Somit war die Gefahr, dass der Spagat verrutscht, nicht gegeben und der Stamm war geschützt.

Zum Spannen der Schnur wurde eine Seilwinde verwendet. Die Seilwinde umwickelte eine verzwirbelte Eisenschnur von etwa drei Millimeter Durchmesser. Dazwischen befand sich ein Kraftabnehmer (*Voltcraft Hängewaage HS-30*: Wiegebereich bis 30 kg, Auflösung 20 g), welcher die Zugkraft aufnahm. Für die gesamte Versuchsreihe betrug die horizontale Distanz vom Gehölz zur Seilwinde 3.10 m (siehe Abbildung 10).

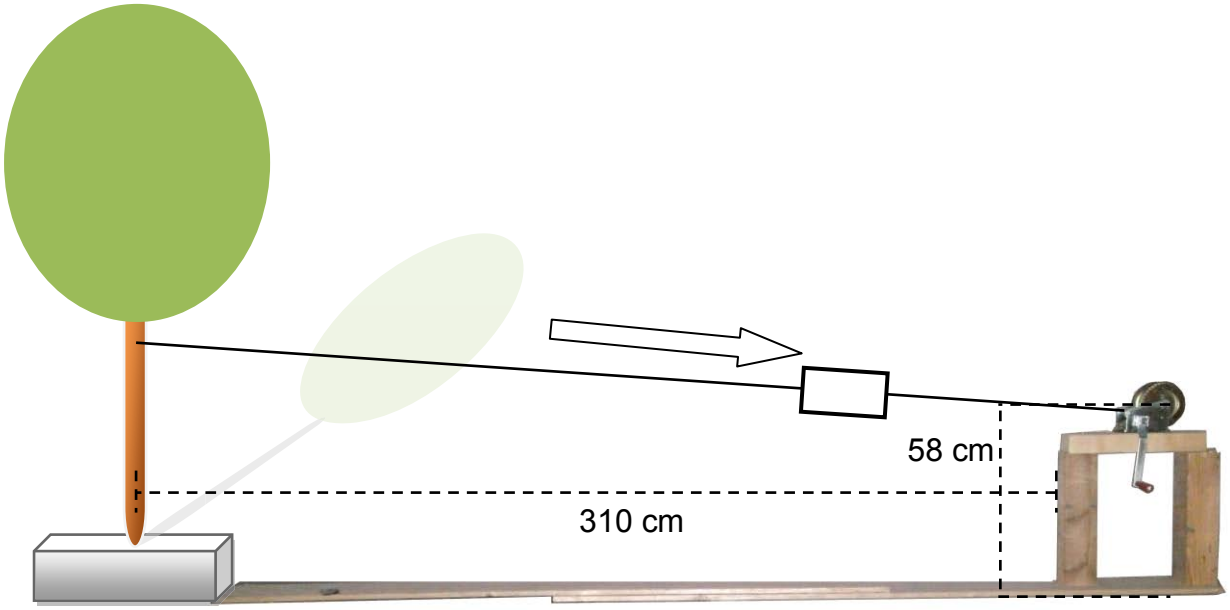


Abbildung 10: Seilwinde auf Bock zum Spannen des Spagats, 22. 01.2014.

Die Seilwinde war auf einem Holzbock montiert, welcher wiederum fix auf einer Holzlatte befestigt war. Die Holzlatte verband die Seilwinde mit dem Betonsockel und garantierte den fixen Abstand zum Gehölz. Die Achsenhöhe der Seilwinde betrug 58 cm, die Schnur wurde am Hauptstamm, bevor sich dieser verzweigte (h=45 bis 70cm), montiert. Die Spannschnur war somit in einem flachen Winkel nach unten gespannt. Die Seilwinde wurde solange gespannt, bis ein horizontaler Versatz von

10 bis 15 cm in Höhe des unteren Messsensors (Stylus) erreicht war. Gemessen wurde der Versatz mit dem *Polhemus Fastrak*, Zugrichtung war die Y-Achse. Es wurde darauf geachtet, dass die Deformation im elastischen Bereich blieb, ansonsten würden die Ergebnisse bei Versuchswiederholung durch Materialveränderung verfälscht. Sichergestellt wurde dies in unseren Versuchen durch eine Kontrolle der Raumposition der Hauptachse. Solange diese wieder in ihre Ausgangsposition zurückkehrte, konnten plastische Verformungen ausgeschlossen werden.

Abbildung 11: Verknotung des Spagats am Gehölz Gamma2, 15.04.2013.

8.7. Schwingungsmessung

Zum Messen der Schwingungen wurde der *Polhemus Fastrak* eingesetzt. Es wurden drei Receiver Sensoren (ein Stylus und zwei Teardrop mini) verwendet. Das ergab eine Auflösung von 40 Hertz pro Sensor. Obwohl dies sehr viel erscheint, ergaben sich bei hohen Frequenzen durch die Messauflösung Ungenauigkeiten. Dazu ein Beispiel: Bei einer Frequenz von 4 Hertz gehen 10 Messwerte pro Periode ein. Zwischen zwei Messungen liegt in diesem Fall ein Intervall von 25 Millisekunden. Es ist sehr wahrscheinlich, dass der Zeitpunkt der Messung nicht genau mit dem tatsächlichen Wendepunkt (und somit dem Beginn einer neuen Periode) einhergeht. Wird der Wendepunkt durch die Messung beim 10. Messwert definiert, ergibt sich eine Frequenz von 4 Hertz. Wird der Wendepunkt schon beim 9. Messwert definiert, ergibt sich eine Frequenz von 3.64 Hertz. Wird der Wendepunkt erst beim 11. Messwert definiert, ergibt sich eine Frequenz von 4.44 Hertz. Durch welchen

Messwert der Wendepunkt definiert wird, hängt vom exakten Zeitpunkt der Aufnahme eines Messwerts ab, wobei Verschiebungen im Millisekundenbereich den Ausschlag für den 9., 10. oder 11. Messwert geben können. Somit können sich rechnerische Frequenzsprünge im Bereich 0.8 Hertz ergeben, obwohl die tatsächliche Frequenzabweichung viel geringer ist.

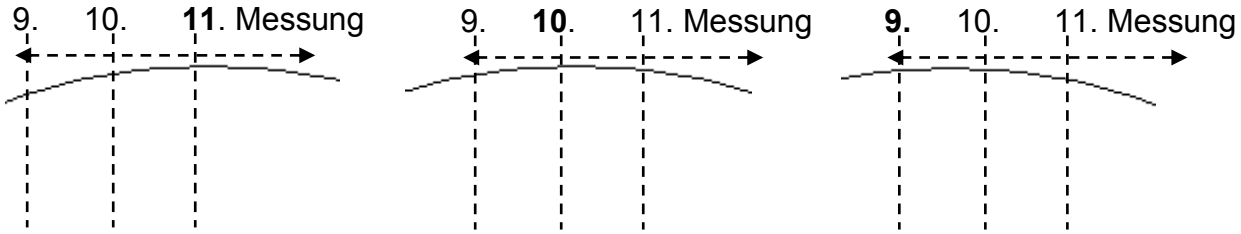


Abbildung 12: Ungenauigkeiten ergeben durch die Intervalle zwischen den Messungen. Der tatsächliche Wendepunkt kann oft nicht exakt erfasst werden und hängt davon ab, zu welchem exakten Zeitpunkt die Messung durchgeführt wird, 18.03.2014.

Der Hauptsensor (Stylus), der schwerste, wurde am Hauptstamm im unteren Bereich in einer Höhe zwischen 45 und 70 cm, recht knapp unter der ersten Verzweigung, montiert. Die beiden leichteren Sensoren (Teardrop mini) wurden in mittlerer Höhe des Gehölzes auf der A°1 und A°2 in einer Höhe von etwa 115 bis 130 cm montiert.

Abbildung 13: Versuchsgehölz Beta2, drei Sensoren wurden am Gehölz montiert, 07.09.2012.

Die drei Receiver-Sensoren wurden am Gehölz parallel zur Achse mit der Spitze nach oben mit Isolierband befestigt (Abbildung 13). Das Kabel verlief entlang der Achsen bis ganz nach unten. Die Receiver-Sensoren wurden angeschlossen. Mit der

Software ***FTGUI*** wurden die Koordinaten überprüft. Als Stylus-Offset wurde nun (0/0/0) eingestellt, da sich die Spule zum Messen nun direkt am Stamm, ein einer Position parallel dazu, befand. Eine Beeinflussung der Schwingamplitude durch die Masse der Receiver-Sensoren wurde vernachlässigt. Das Gerät misst Punkte im Raum relativ zur Sendeeinheit und zeichnet Werte entlang der X-, Y- und Z-Achse auf. Wir stellten die Sendeeinrichtung so auf, dass sich die Zugrichtung auf der Y-Achse befand. Die Z-Achse verlief in der Vertikalen von unten nach oben. Voraussetzungen für gültige Versuche waren Windstille oder sehr schwacher Wind, kein Niederschlag und eine Temperatur über 10°C.

Frequenz der Gehölzbewegung

Um die Gehölzbewegung zu charakterisieren, wurde die Eigenfrequenz gemessen bzw. berechnet ***(vgl. KANE und JAMES, 2011)***. Zur Berechnung der Eigenfrequenz wurde die durchschnittliche Frequenz aus den Perioden zwei, drei und vier der freien Schwingung berechnet. Die erste Periode begann beim ersten Maximum, nachdem das Gehölz losgelassen wurde und dauerte bis zum zweiten Maximum. Die zweite Periode begann beim zweiten Maximum und endete beim dritten Maximum, und so weiter. ***KANE und JAMES (2011)*** verwendeten die ersten drei Perioden, um die Eigenfrequenz der Pflanze zu beschreiben. Dies wäre bei unseren Messungen ebenso repräsentativ wie die Beschreibung durch die zweite bis vierte Periode. Wie man später sehen kann, erschien uns beim Dämpfungsverhältnis die Beschreibung durch die zweite bis vierte Periode sinnvoller, weil die erste noch stark von der Zugbelastung beeinflusst war. Der Einheitlichkeit und Vergleichbarkeit wegen wurde deshalb auch für die Frequenz die zweite bis vierte Periode gewählt.

Berechnung des Dämpfungsverhältnisses

Das Dämpfungsverhältnis δ wurde durch den Vergleich der Amplituden zweier aufeinanderfolgender Perioden berechnet:

$\delta = \frac{\hat{x}_t}{\hat{x}_{t-1}}$, wobei $\hat{x}_t$ die Amplitude zum Zeitpunkt t und $\hat{x}_{t-1}$ die Amplitude zum Zeitpunkt $t-1$ ist.

Ein Dämpfungsverhältnis von 1 würde bedeuten, dass keine Dämpfung vorhanden war. Ein Dämpfungsverhältnis von 2 würde bedeuteten, dass die Amplitude von der

einen auf die darauffolgende Periode genau halbiert wurde. Das Dämpfungsverhältnis geht mit dieser Formel also nach unten hin gegen den Wert 1. Ein Dämpfungsverhältnis unter 1 würde bedeuten, dass die Schwingungsamplitude größer wurde. Nach oben hin ist die Skala offen. Man beschränkte sich darauf, die Bremswirkung des Blattwerks als einen Einflussfaktor auf das Dämpfungsverhältnis zu betrachten. Es wurde nicht zwischen struktureller Dämpfung und aerodynamischer Bremswirkung unterschieden. Die Berechnung des Dämpfungseffekts wurde für die Periode 2 bis 4 durchgeführt, um den Einfluss der Zugbelastung zu verringern. Ab der fünften Periode wurden die Aufzeichnungen in Bezug auf eindeutige Zuordnung zu Perioden schwierig: In manchen Schnittzuständen war die Amplitude so gering, sodass aber der fünften Periode auch der geringste Windstoß eine zu starke Beeinflussung darstellte, um die Daten eindeutig auswerten zu können.

8.8. Zugversuche

Die Aufzeichnungen mit dem ***FTGUI*** wurden gestartet. Unmittelbar danach wurde der Spagat mit einer Schere durchtrennt. Die Aufzeichnung fand so lange statt, bis die Schwingung des Gehölzes vollständig abgeklungen war.

Festgehalten wurden manuell bei jedem Zugversuch

- der Schnittzustand,
- die Zugkraft, welches auf das Gehölz wirkte sowie
- der Versatz des belasteten Gehölzes im Vergleich zur Ausgangsposition im unbelasteten Zustand.

Die Zugversuche wurden wiederholt, um eine zweite Messung zu erhalten, Es wurden jeweils zwei Messungen nach jedem Rückschnitt durchgeführt. Die zweite Messung (b) wurde im Regelfall als Basis zur Analyse herangezogen, außer diese Messung wurde durch Wind gestört oder war durch einen technischen Fehler nicht verwendbar. Nach Abschluss von zwei Zugversuchen wurde mit dem ersten Rückschnitt begonnen.

8.9. Gehölzrückschnitt

In den Versuchen zu dieser Arbeit orientierte man sich vorrangig an der Arbeit von ***SELLIER und FOURCAUD (2005)***. Da der Einfluss der einzelnen Achsen auf das Schwingverhalten analysiert werden sollte, schien deren Methode am sinnvollsten. Im ersten Schritt wurde das gesamte Blattwerk entfernt. Im nächsten Schritt wurden die A°5 inklusive alle darüber liegenden Achsenordnungen entfernt. Danach wurden die A°4, die A°3, usw. entfernt. Da nach ***SPATZ et al. (2007)*** die obere Spitze der A°1 eine erhebliche Rolle beim Schwingverhalten spielt, wurde diese am Schluss noch gekappt.

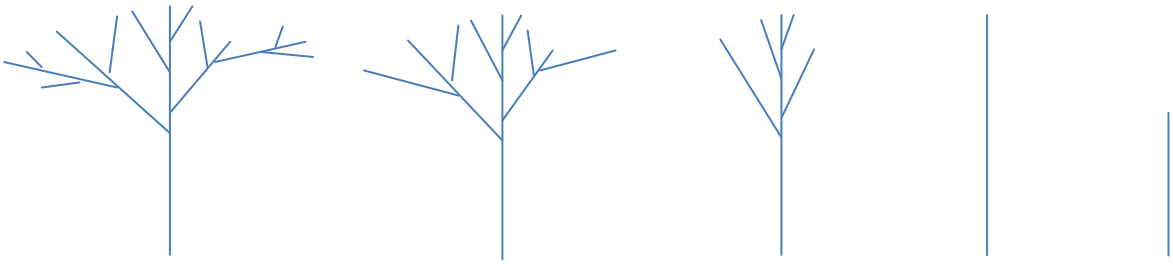


Abbildung 14: Schematische Darstellung eines Rückschnitts, von links nach rechts: Gehölz bis zur A°4, bis zur A°3, bis zur A°2, die A°1 und die A°1 ohne Spitze, 31.01.2013.

Aus diesen Schnitten resultierten die Schnittzustände wie in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht über die Schnittzustände, die sich durch den Rückschnitt ergeben

Abkürzung	Schnittzustand
1_5+B	Das Gehölz ist vollständig, inkl. Blattwerk.
1_5+	Das Gehölz ist vollständig, das Blattwerk wurde entfernt.
1_4	A°5, A°6, bei vorhanden sein auch A°7 und darüber wurden entfernt.
1_3	A°4 wurde entfernt.
1_2	A°3 wurde entfernt.
1	A°2 wurde entfernt, die gesamte Hauptachse ist noch vorhanden.
1_oSp	Das obere Drittel der Hauptachse wurde gekappt.

Die Rückschnitte wurden mit einer Baumschere durchgeführt. Das geschnittene Material wurde in Kuverts verpackt, um anschließend die Biomasse jeder Achsenordnung im frischen und trockenen Zustand zu messen. Die Versuchsreihe einer Pflanze war beendet, nachdem die Hauptachse um ein Drittel zurückgestutzt,

die letzten zwei Schwingungsmessungen durchgeführt und die gesamte Hauptachse zerkleinert in Kuverts verpackt war. Die Frisch- und Trockenbiomasse des kompletten Blattwerks sowie des Holzes jeder Achsenordnung wurden gewogen. Die A°5, die A°6 und die A°7 wurden gemeinsam als A°5+ festgehalten.

8.10. Auswertung

Alle gemessenen Daten wurden mit den Softwaretools ***PIAFDIGIT, FTGUI, XPLO*** und ***MICROSOFT EXCEL*** erfasst bzw. weiterverarbeitet. Tabellen und Diagramme wurden mit ***MICROSOFT EXCEL*** erstellt. Nach Auswertung der Hauptversuchsreihe (Gamma) wurden die Ergebnisse diskutiert. Bei der Auswertung wird zwischen der Auswertung der Architekturaufnahme sowie der Auswertung der Schwingungsmessungen unterschieden.

Auswertung der Daten der Architekturaufnahme

Die Auswertung der Daten wurde mit den Programmen ***XPLO*** und ***MICROSOFT EXCEL*** vorgenommen. Die Rohdaten wurden mit der Software ***PIAFDIGIT*** erfasst. Diese liest die Daten direkt über den USB-Port ein. Mit ***PIAFDIGIT*** wurden die erfassten Daten als eine ***AMAPMOD-DATEI (.MTG)*** exportiert und in die Software ***XPLO*** importiert. Mit ***XPLO*** können den einzelnen Segmenten Ordnungen zugewiesen sowie die Achsenlängen berechnet werden. Die Visualisierung der Gehölze wurde mit ***PIAFDIGIT*** realisiert, nachdem die Daten im ***MICROSOFT EXCEL*** bearbeitet und die Koordinaten der einzelnen Punkte, mit der Stammbasis als Nullpunkt, transformiert wurden. Für die Auswertung wurden die projizierten Flächen, die Volumina und die gewichtete Exzentrizität berechnet. Zusätzlich wurden Achsenlängen und Durchmesser für Diagramme verwendet.

Auswertung der Schwingungsmessungen

Die Aufzeichnungen der Schwingungen wurden mit der Software ***FTGUI*** durchgeführt und die Daten als CSV-Datei abgespeichert. Im ***MICROSOFT EXCEL*** wurden sie importiert, wo die Koordinaten relativ zum gemessenen Nullpunkt transformiert wurden. Von den drei Messpunkten erhielt man so jeweils drei Koordinaten Triplets (X-, Y- und Z-Achse). Den Fortschritt der Zeit konnte man aus der Anzahl der eingegangen Messwerte ableiten, nachdem die Anzahl der Messungen pro Sekunde bekannt war. Aus diesen wurden Schwingungsdiagramme generiert. Aus dem Verlauf der Frequenz und der Amplitude wurde die Eigenfrequenz abgeleitet bzw. das Dämpfungsverhältnis berechnet.

9. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Hauptversuchsreihe Gamma dargestellt. Es sind dies die Ergebnisse der Untersuchung der Gehölzcharakteristik und der Schwingungsmessungen. In dieses Kapitel wurden die am relevantesten eingestuften Tabellen und Diagramme eingeschlossen. Diagramme der Rohdaten zu den einzelnen Versuchen sind im Anhang zu finden.

9.1. Parametrisierung der Gehölzcharakteristik

Im Folgenden sind Parameter ausgewiesen, welche auf das Gehölz als Ganzes bezogen sind. Sie sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Basisparameter der Gehölze Gamma 1-3: Pflanzenhöhe h_{tot}, Durchschnittlicher Durchmesser ϕD_X, Durchmesser des Hauptstamms an der Basis $D_{0.0}$, Durchmesser des Hauptstamms auf Brusthöhe (1.3m) $D_{1.3}$, Kronenbereite C_b, Kronenhöhe C_h, gesamte projizierte Fläche aller Achsen A_p, Volumen des Gehölzes V_p, Achsenlängensumme ΣL_x..

Gehölz	h_{tot} [cm]	ϕD_X [cm]	$D_{0.0}$ [cm]	D_{Bh} [cm]	C_b [cm]	C_h [cm]	A_p [cm²]	V_p [cm³]	ΣL_x [cm]
Gamma1	247.50	0.191	2.3	1.1	49	189	1962	1045	6836
Gamma2	217.33	0.227	2.2	0.9	48	168	1341	646	3795
Gamma3	266.73	0.206	2.7	1.95	66	199	2979	1524	11101

Die Gesamthöhe von Gamma1 ist 7% niedriger als Gamma3. Betrachtet man das Volumen, ist Gamma3 um 50% größer als Gamma1. Die Achsenlängensumme von Gamma3 ist sogar um 62% größer als die von Gamma1. Gamma2 weist bei allen Parametern die kleinsten Werte auf, einzige Ausnahme ist der durchschnittliche Achsendurchmesser. Dieser ist bei Gamma2 um 10% größer als bei Gamma3. Da bei Gamma2 die Parameter $D_{0.0}$ und $D_{1.3}$ die kleinsten Werte aller drei Gehölze aufweisen, liegt die Vermutung nahe, dass die höheren Achsenordnungen bei diesem Gehölz im Vergleich dicker sind.

Betrachtet man die frische Biomasse, entspricht diese einer ähnlichen Verteilung wie bei den Volumina. Gamma1 hat mit 50% die größte gewichtete Exzentrizität. Gamma2 hat dagegen nur 23% Exzentrizität. Gamma3 weist beim durchschnittliches Durchmesser/Längen-Verhältnis einen Wert auf, der nur 46% des Wertes von Gamma1 entspricht.

In Tabelle 5: Normalisierte Parameter der Gehölze Gamma 1-3werden (durchschnittliche) Achsendurchmesser, auf die Achsenlänge normalisiert, einheitslos dargestellt.

Tabelle 5: Normalisierte Parameter der Gehölze Gamma 1-3.

Gehölz	$D_{0.0} / h$	$D_{1.3} / h$	$\phi(D_x / L_x)$
Gamma1	92.93	44.44	24.67
Gamma2	101.22	39.11	21.84
Gamma3	101.23	69.36	11.40

In Abbildung 15 werden die Durchmesser jeder Achse der jeweiligen Achsenlänge gegenübergestellt. Betrachtet man die Achsenlängen, fällt auf, dass Gamma2 gleich sieben Achsen mit einer Länge größer oder gleich einem Meter hat, Gamma1 und Gamma3 hingegen jeweils nur vier bzw. fünf Stück. Bei Gamma2 gibt es ein paar Auffäligkeiten. Es gibt dort zwei Achsen, die eine Länge kleiner als ein Zentimer haben aber 0.3 bzw. 0.8 cm dick sind. Der rechteste rote Punkt ist die Hauptachse von Gamma2. Dieser hat auch ein abweichendes Verhältnis. Dies kann durch den Bruch der Hauptachse erklärt werden. In Abbildung 16 werden die durchschnittlichen Durchmesser der durchschnittlichen Länge aller Achsen einer Ordnung der Gehölze Gamma1-3 gegenübergestellt. Das Verhältnis der beiden Durchschnittswerte ist über die Pflanzen hinweg relativ konstant, bei Gamma2 bis zur A°2, die A°1 weist aufgrund der abgebrochenen Hauptachse ein geringeres Verhältnis auf.

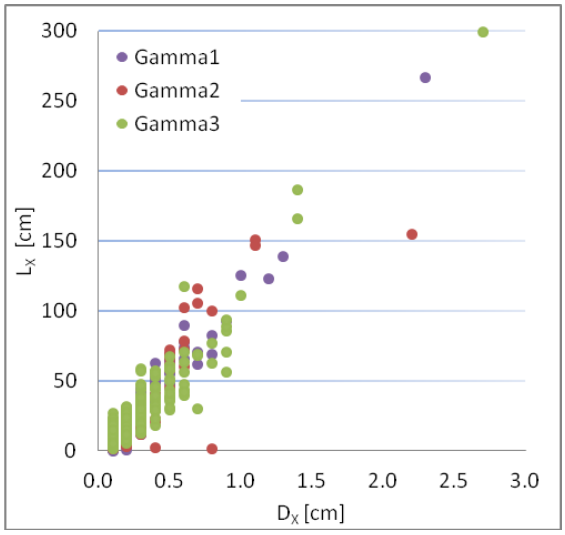


Abbildung 15: Gegenüberstellung Durchmesser zur Länge jeder Achse der Gehölze Gamma1-3.

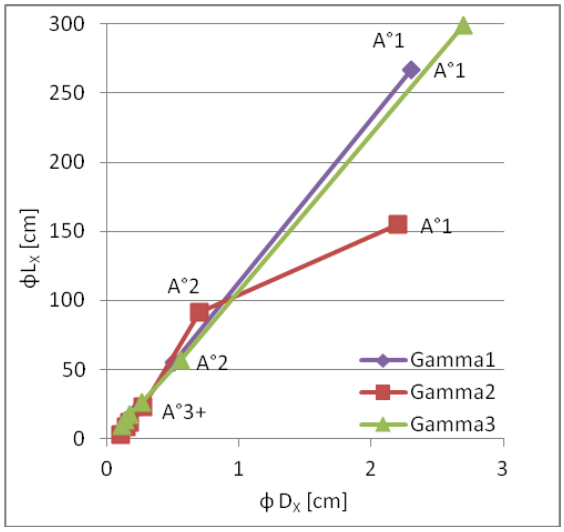


Abbildung 16: Gegenüberstellung des durchschnittlichen Durchmessers jeder Achse mit deren durchschnittlicher Länge; A°1 bis A°7 für die Gehölze Gamma1-3.

In Abbildung 17 bis Abbildung 26 werden die Gehölze bezüglich ihrer Charakteristika und deren vertikaler Verteilung dargestellt. In den Diagrammen rechts wird die Höhe relativ zur Gesamtpflanzenhöhe in acht Höhenklassen dargestellt.

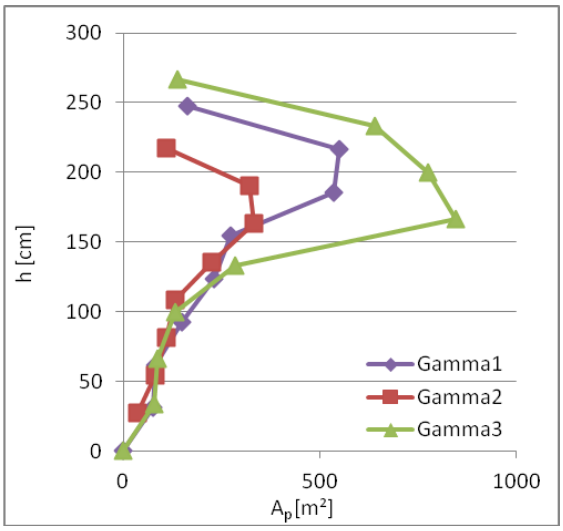


Abbildung 17: Vertikalverteilung der projizierten Flächen der Gehölze Gamma1-3.

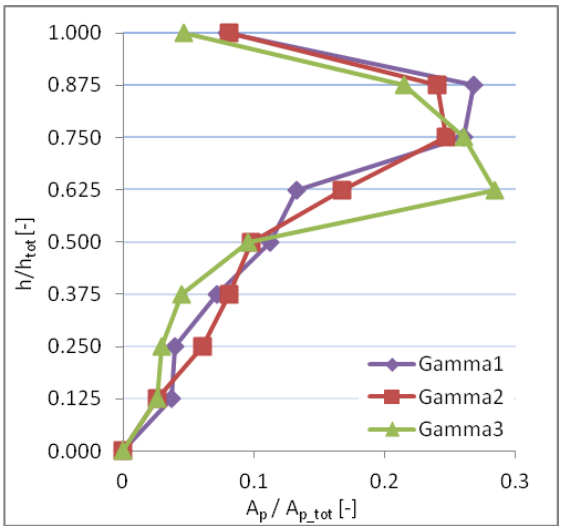


Abbildung 18: Vertikalverteilung der Anteile der projizierten Flächen an der Flächenprojektionssumme der Gehölze Gamma1-3.

In Abbildung 17 weisen alle drei Gehölze bis zu einer Höhe von 120 cm eine sehr ähnliche Flächenprojektion auf. Ab einer Höhe von 160 cm steigt der Wert dieses Parameters bei Gamma3 im Vergleich zu den beiden anderen Gehölzen stark an. Betrachtet man die Flächenprojektion anteilsmäßig am gesamten Gehölz (Abbildung 18), so fällt auf, dass lediglich der Anteil von Gamma3 in der Höhenklasse 0.625 im

Vergleich zu den beiden anderen Gehölzen größer ist. Betrachtet man diesen Parameter kumulativ über die Höhe, zeigt sich in Abbildung 19, dass dieser bei Gamma3 auf einer Höhe von ca. 130 cm stärker ansteigt. In Abbildung 20 kann man erkennen, dass Gamma3 relativ gesehen im unteren Bereich den kleineren Anteil an projizierten Flächen hat. Generell ist ein langsamer Anstieg der projizierten Flächensummen im unteren Bereich der Gehölze erkennbar. Erst bei einer Höhe von 50% nehmen die Flächensummen stärker zu.

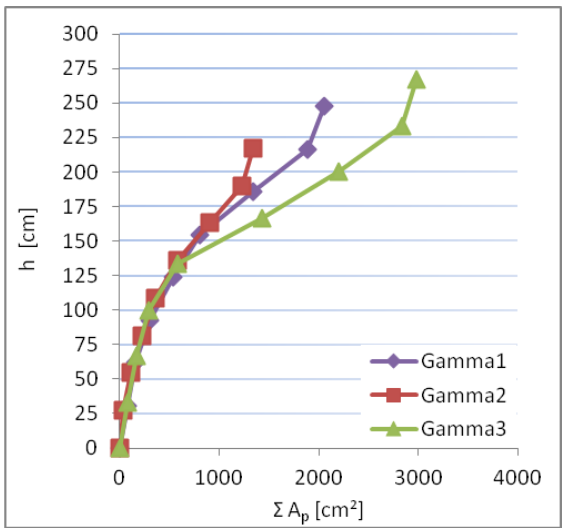


Abbildung 19: Vertikalverteilung der projizierten Flächen der Gehölze Gamma1-3, kumulativ.

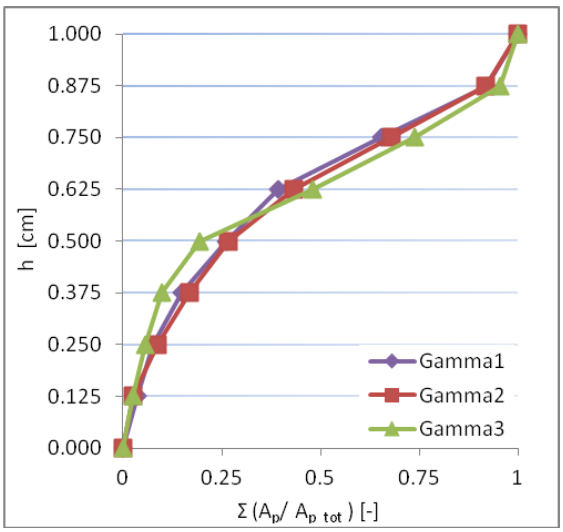


Abbildung 20: Vertikalverteilung der Anteile der projizierten Flächen der Gehölze Gamma1-3 an der Flächenprojektionssumme des jeweiligen Gehölzes, kumulativ.

Bezüglich des Parameters Volumen (Abbildung 21) weist Gamma2 in allen Bereichen das geringste Volumen auf, Gamma3 hingegen in allen Bereichen das größte. In der Höhenklasse 0.625 ist der Volumenszuwachs bei Gamma3 anteilsmäßig am größten, bei Gamma2 hingegen in der Höhenklasse 0.250 (Abbildung 22). Bei den Anteilen der Volumina im Vergleich der Gehölze ist kein eindeutiger Trend erkennbar.

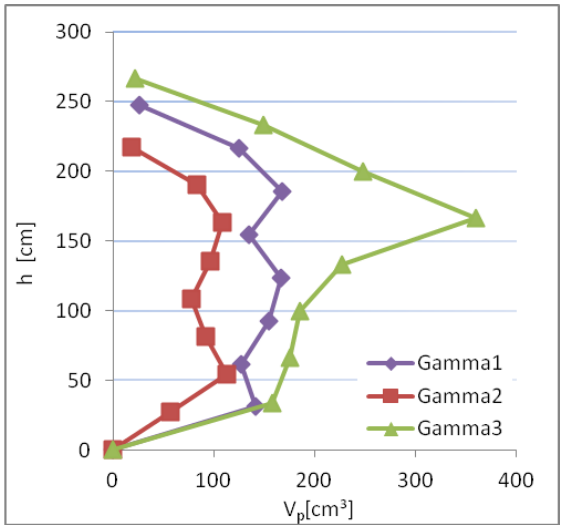


Abbildung 21: Vertikalverteilung der Volumina der Gehölze Gamma1-3.

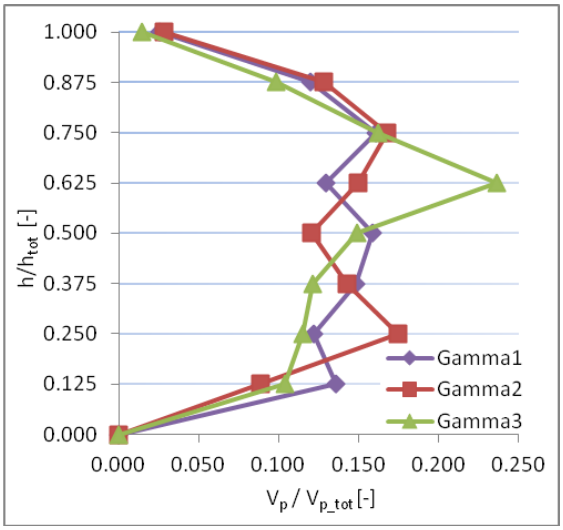


Abbildung 22: Vertikalverteilung der Anteile der Volumina der Gehölze Gamma1-3 am jeweiligen Gesamtvolumen.

Betrachtet man die Volumina und kumulierten Volumina (Abbildung 23 und Abbildung 24) ergibt sich ein ganz ähnliches Bild bei den projizierten Flächen.

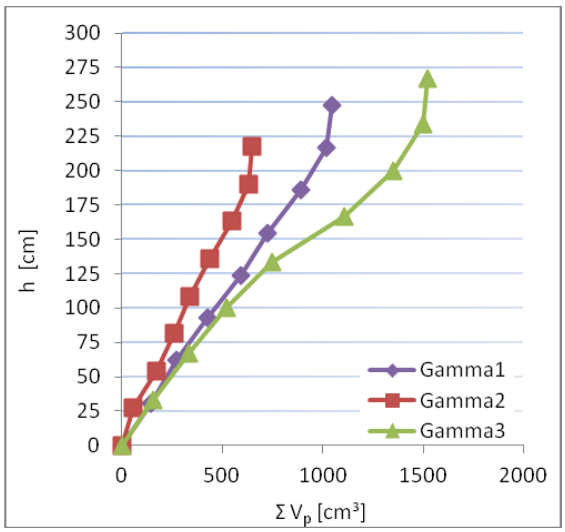


Abbildung 23: Vertikalverteilung der Volumina der Gehölze Gamma 1-3, kumulativ.

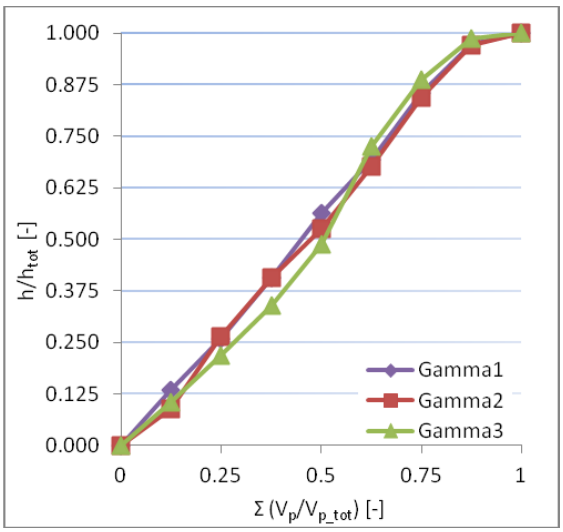


Abbildung 24: Vertikalverteilung der Anteile der Volumina der Gehölze Gamma 1-3 am Gesamtvolumen des jeweiligen Gehölzes, kumulativ.

In Bezug auf die gewichtete Exzentrizität (Abbildung 25) sind alle drei Gehölze im unteren Viertel sehr ähnlich. Im zweiten Viertel von unten steigt die gewichtete Exzentrizität von Gamma2 und Gamma3 über 50%, wobei Gamma2 diesen Trend nach oben hin beibehält, Gamma3 hingegen wieder symmetrischer wird und sich in der obersten Höhenklasse einer gewichteten Exzentrizität von 30%, ähnlich Gamma1, annähert.

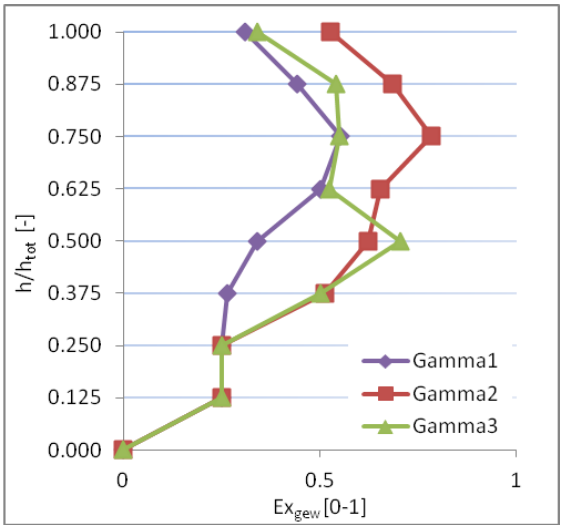


Abbildung 25: Vertikalverteilung der Exzentrizität des Wuchses der Gehölze Gamma1-3, gewichtet nach radialer Position, gruppiert nach Kreisvierteln, berechnet anhand der projizierten Flächen.

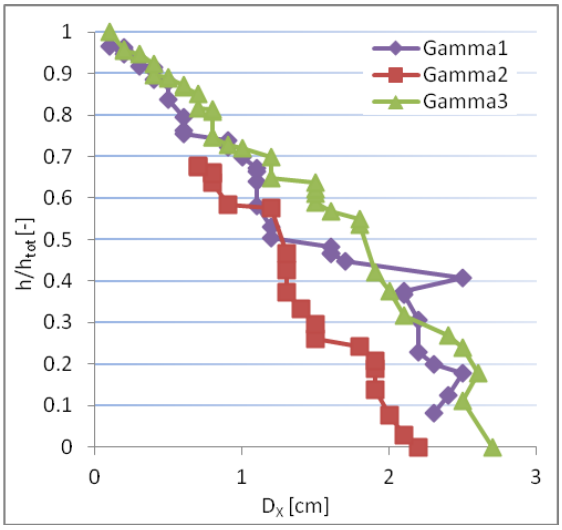


Abbildung 26: Vertikalverteilung der Durchmesser der A°1 der Gehölze Gamma1-3.

Betrachtet man den vertikalen Verlauf des Durchmessers des Hauptstamms (Abbildung 26), so ist zu erkennen, dass der Hauptstamm bei Gamma3 fast durchgehend die größten und Gamma2 die geringsten Durchmesser aufweist.

9.2. Versuchsreihe Gamma1

Im Folgenden wird die Charakteristik der Versuchspflanze Gamma1 dargestellt und beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der Zugversuche präsentiert. In Abbildung 27 bis Abbildung 30 wird das Gehölz visuell dargestellt. In Abbildung 27 ist der schiefe Wuchs dieses Gehölzes entlang der X-Achse erkennbar.

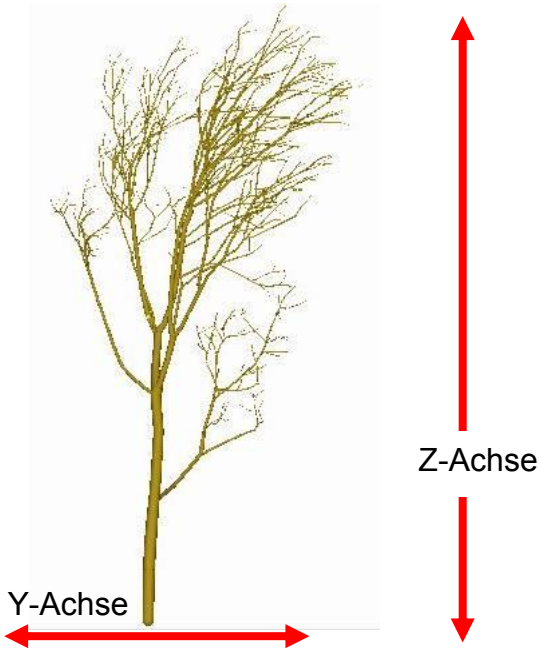


Abbildung 27: Abbildung der Baumarchitektur von Gamma1, Y-Z-Ebene, 06.12.2013.

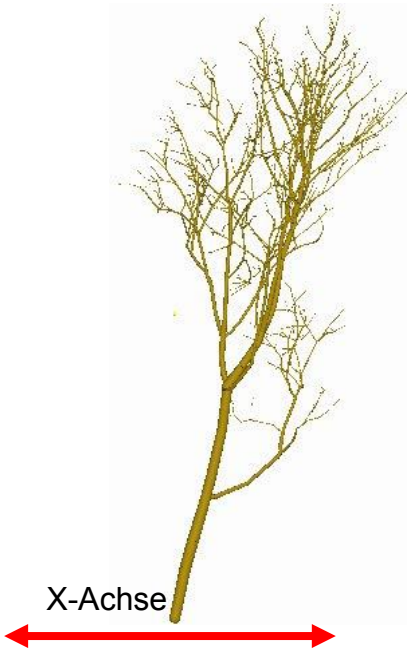


Abbildung 28: Abbildung der Baumarchitektur von Gamma1, X-Z-Ebene, 06.12.2013.

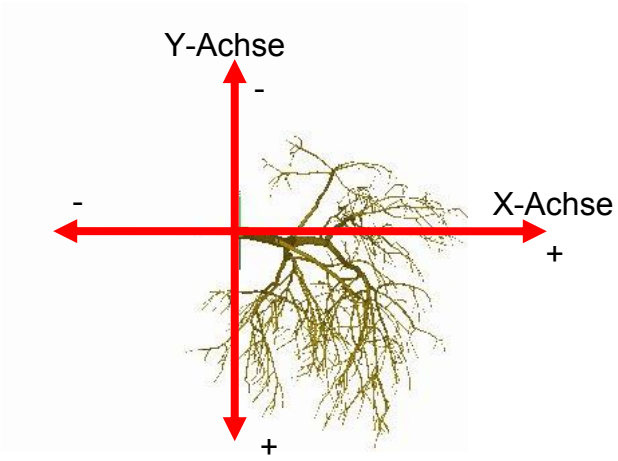


Abbildung 29: Grundriss, Gehölz Gamma1, X-Y-Ebene, 06.12.2013.

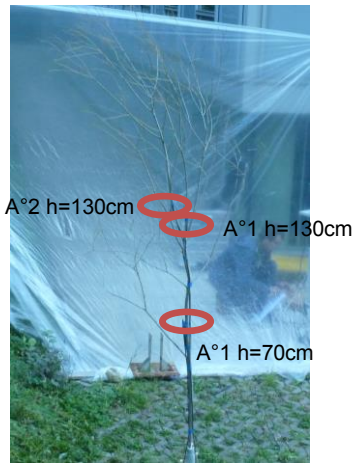


Abbildung 30: Foto des Gehölzes Gamma1, Ansicht: Y-Z-Ebene; rot markiert sind die Messpunkte, 29.10.2012.

In Abbildung 29 sieht man, dass das Gehölz vorwiegend auf ein Kreisviertel verteilt ist. Betrachtet man die Frisch- und Trockenmassen der Achsenordnungen bzw. des

Blattwerks (Abbildung 31), so kann man sehen, dass der größte Anteil in der A°1 liegt. Das Blattwerk wiegt beinahe genau so viel wie die A°3. Betrachtet man die Gesamtlänge jeder Achsenordnung (Abbildung 32), sieht man, dass die A°3 und die A°4 doppelt so lang sind wie jeweils die A°2 und die A°5.

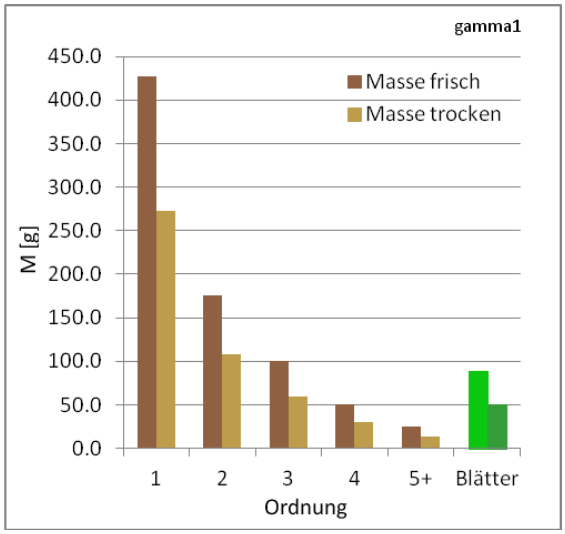


Abbildung 31: Frisch- und Trockenmasse der einzelnen Ordnungen und des Blattwerks von Gehölz Gamma1.

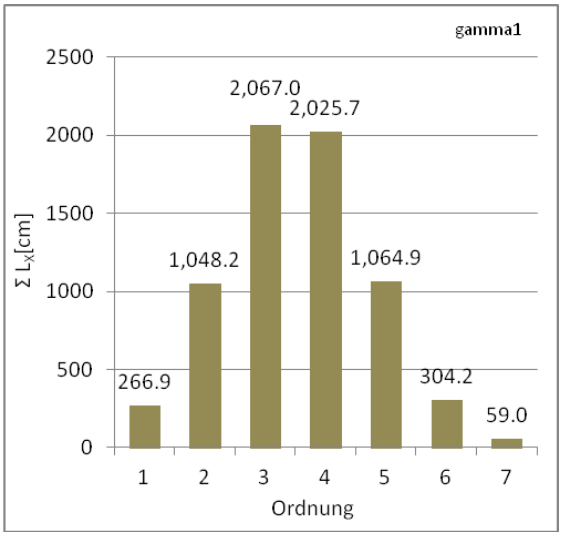


Abbildung 32: Summierte Gesamtlänge der Achsen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma1.

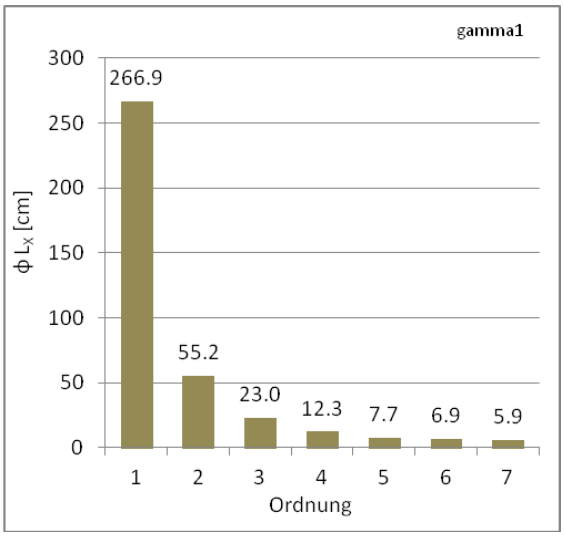


Abbildung 33: Durchschnittliche Achsenlänge der Achsen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma1.

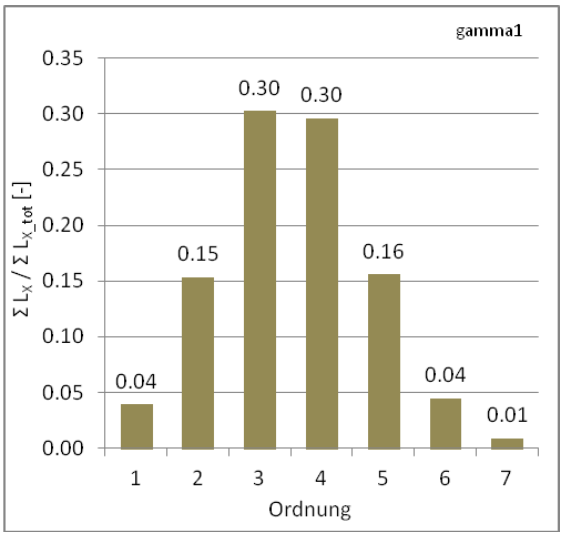


Abbildung 34: Anteil der Achsenlängensummen jeder Ordnung an der Achsenlängensumme des gesamten Gehölzes Gamma1.

Betrachtet man die durchschnittlichen Achsenlängen pro Ordnung (Abbildung 33), so sieht man einen Anstieg zur Potenz von der A°7 zur A°1. Betrachtet man die Längensummenanteile jeder Achsenordnung (Abbildung 34) im Verhältnis zur Achsenlängensumme des gesamten Gehölzes, sieht man, dass die A°3 und die A°4 jeweils 30% einnehmen.

In Abbildung 35 und Abbildung 36 werden die projizierten Flächen über die Höhe verteilt pro Ordnung dargestellt: In Abbildung 35 sieht man, dass die A°1 im unteren Bereich dominiert. Erst ab einer Höhe von über einem Meter sind die Flächen der A°2 größer. Im oberen Bereich sind die A°3 und die A°4, in Bezug auf die projizierten Flächen, die am stärksten vertretenen Achsenordnungen.

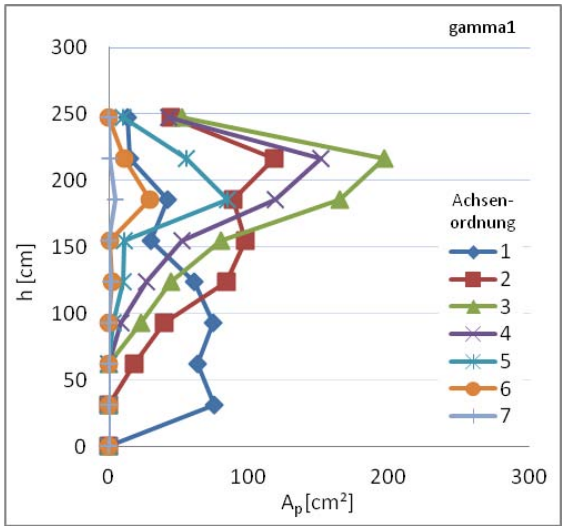


Abbildung 35: Vertikalverteilung der projizierten Flächen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma1.

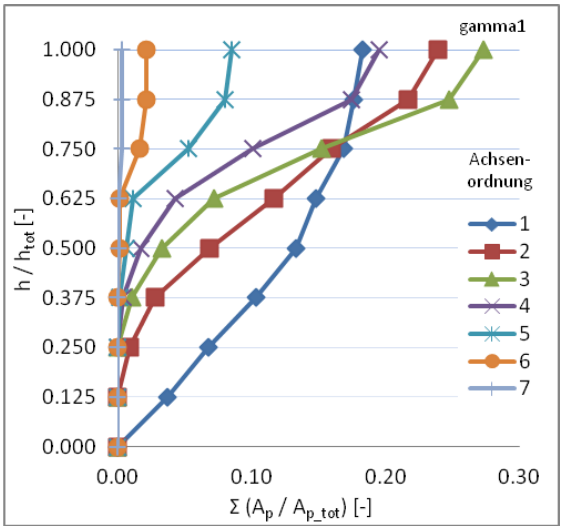


Abbildung 36: Vertikalverteilung der Anteile der projizierten Flächen jeder Ordnung an der Summe der projizierten Flächen des gesamten Gehölzes Gamma1, kumulativ.

In Abbildung 36 kann man erkennen, dass kumuliert gesehen die A°1 bis zur Höhenklasse 0.750 dominiert. Erst darüber sind die Projektionsflächen der A°2 und der A°3 größer.

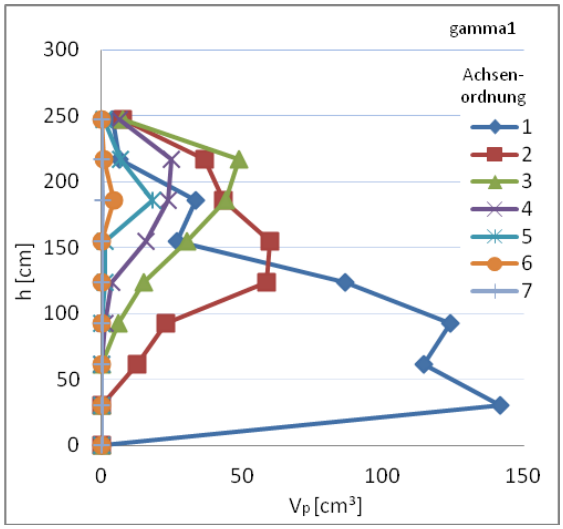


Abbildung 37: Vertikalverteilung des Volumens jeder Achsenordnung des Gehölzes Gamma1.

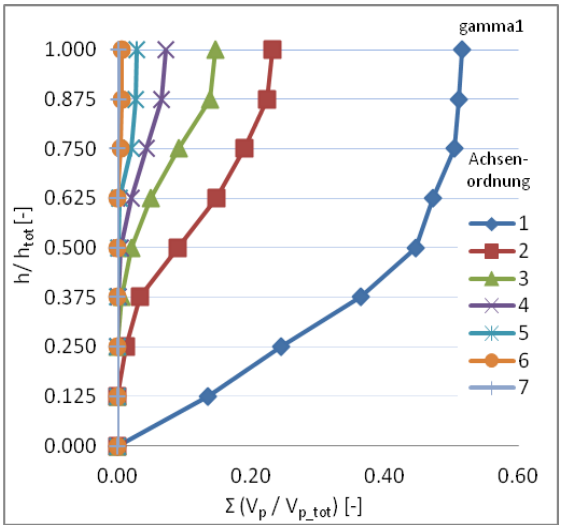


Abbildung 38: Vertikalverteilung der Anteile der Volumina jeder Achsenordnung am Gesamtvolumen des Gehölzes Gamma1, kumulativ.

In Bezug auf das Volumen (Abbildung 37) ist die A°1 bis zu einer Höhe von 140 cm, kumuliert gesehen (Abbildung 39) sogar bis zur Spitze klar dominant.

Zugversuche

In Tabelle 6 wird ersichtlich, um welche Distanz der Messpunkt am Hauptstamm durch den Zug versetzt wird und welche Kraft dabei auf das Zugseil wirkt.

Tabelle 6: Zugversuche Gamma1

Schnittzustand	Zugkraft [N]	Zugdistanz [cm] entlang der Y-Achse	Textliche Erklärung Schnittzustand
1_5+B	53.37	-14.38	Alle Ordnungen vorhanden, inkl. Blätter
1_5+	56.90	-15.16	Alle Ordnungen vorhanden, ohne Blätter
1_4	57.49	-15.32	Ordnung 1-4 vorhanden
1_3	55.91	-14.84	Ordnung 1-3 vorhanden
1_2	56.70	-14.97	Ordnung 1-2 vorhanden
1	53.66	-14.95	Hauptstamm
1oSp	55.91	-14.89	Hauptstamm, Spitze gekappt

In den folgenden Abbildungen sehen wir Darstellungen des Schwingverhaltens des ersten Versuchsschritts, von oben betrachtet. Es sind die Bewegungen auf der X- und Y-Achse ersichtlich. Abbildung 39 zeigt einen Ausschnitt im höheren Bereich der X-Achse, im Vergleich zur Abbildung 40; d.h. also die beiden Punkte auf der A°1 bzw. auf der A°2 liegen nicht übereinander, sondern sind versetzt.

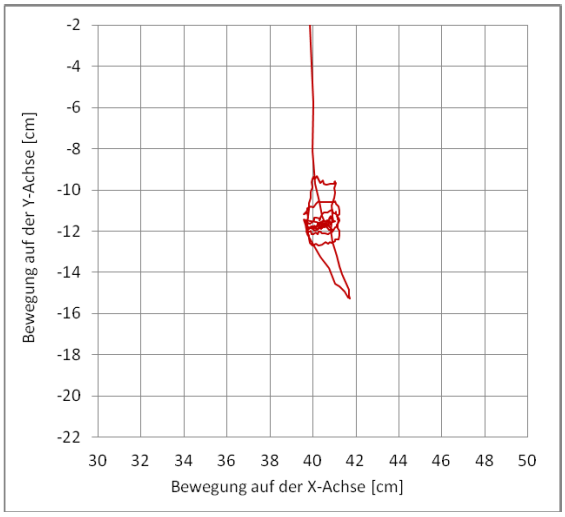


Abbildung 39: Schwingbewegung des Punktes auf der A°1 auf Höhe 130 cm von oben gesehen, auf der Ebene gebildet durch die X- und Y-Achse, Gehölz Gamma1, Schnittzustand 1_5+B.

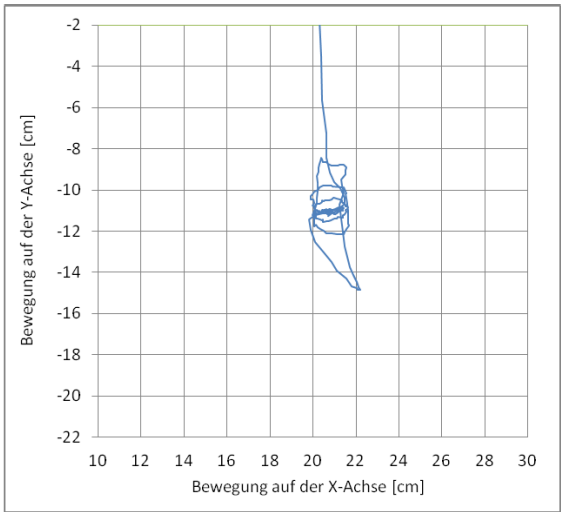


Abbildung 40: Schwingbewegung des Punktes auf der A°2 auf Höhe 130 cm von oben gesehen, auf der Ebene gebildet durch die X- und Y-Achse, Gehölz Gamma1, Schnittzustand 1_5+B.

Klar erkennbar ist in diesen Abbildungen, dass das Gehölz nicht nur in Zugrichtung, nämlich der Y-Achse schwingt, sondern auch entlang der X-Achse, auch wenn die Amplitude entlang der Y-Achse wesentlich stärker ist. Für die Berechnung der Eigenfrequenz und des durchschnittlichen Dämpfungsverhältnisses wurden lediglich die Schwingungen entlang der Y-Achse herangezogen, die Schwingungen entlang der X-Achse wurden vernachlässigt.

In Abbildung 41 bis Abbildung 44 werden Frequenz und Dämpfungsverhältnis im Versuchsverlauf dargestellt. Die Abbildungen beziehen sich auf die Zugversuche in den Schnittzuständen 1_5+B und 1oSp, also der erste und der letzte Schnittzustand der Versuchsreihe.

.

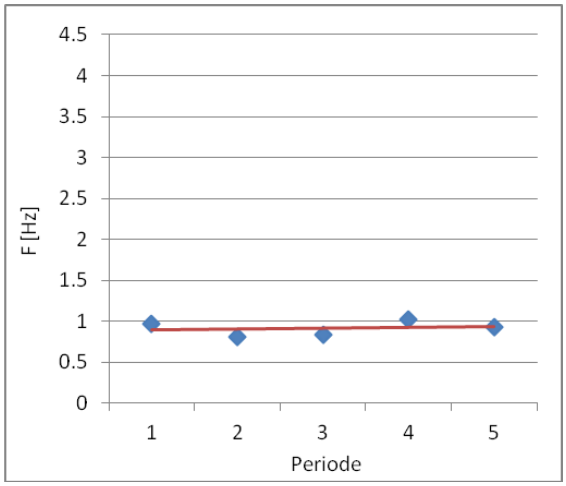


Abbildung 41: Frequenz gemessen entlang der Y -Achse, Gehölz Gamma1, Schnittzustand 1_5+B, Messung (a).

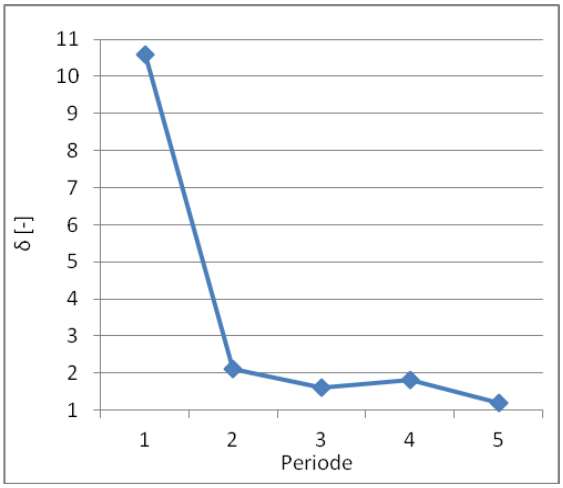


Abbildung 42: Dämpfungsverhältnis gemessen entlang der Y -Achse, Gehölz Gamma1, Schnittzustand 1_5+B, Messung (a).

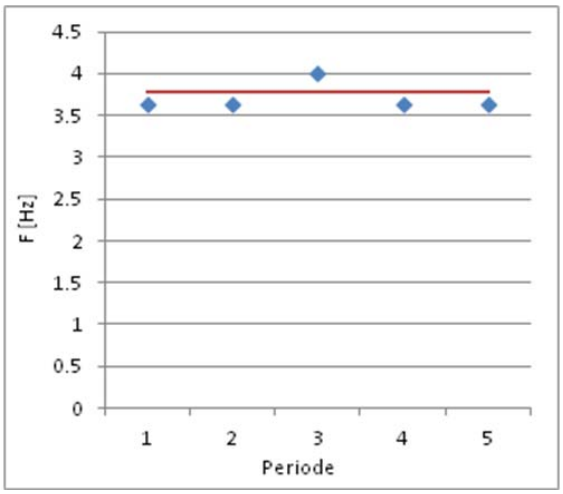


Abbildung 43: Frequenz gemessen entlang der Y -Achse, Gehölz Gamma1, Schnittzustand 1oSp, Messung (b).

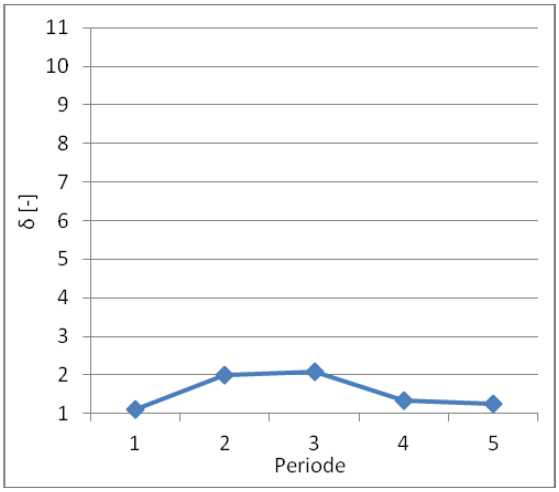


Abbildung 44: Dämpfungsverhältnis entlang der Y -Achse, Gehölz Gamma1, Schnittzustand 1oSp, Messung (b).

Die Frequenz war über den Versuchsverlauf hinweg sehr konstant. Der große Sprung um ca. 0.4 Hertz in Abbildung 43 kam durch Messungenauigkeiten (siehe Methodik) zustande. Ein Mittelwert von etwa 3.7 Hertz (rote Trendlinie) gibt eine repräsentative Annäherung wieder. Beim Versuch Gamma1 im Schnittzustand 1_5+B (Abbildung 42) war das starke Dämpfungsverhältnis durch den Luftwiderstand der Blätter in der ersten Periode sehr deutlich. In der fünften Periode ging das Dämpfungsverhältnis gegen 1.

Im Abbildung 44 (bei diesem Versuch war nur der um ein Drittel gestutzte Hauptstamm übrig) kann man sehen, dass die größte Dämpfung während der zweiten und dritten Periode stattfand und dann wieder rapide zurückging. Auffällig ist,

dass in der ersten Periode das Dämpfungsverhältnis im Vergleich zum Schnittzustand 1_5+B sehr niedrig war. Das Dämpfungsverhältnis war ab der vierten Periode sehr gering. In Abbildung 45 wird jedoch ersichtlich, dass die Schwingamplitude zu diesem Zeitpunkt (2 Sekunden nach dem Loslassen) noch 7 cm betrug und das Gehölz, bis es den völligen Stillstand erreicht hatte, noch 8 Sekunden brauchte. In diesem Schnittzustand wurde deutlich, dass das Gehölz in die Schwingungsform einer gedämpften, harmonischen Schwingung hatte.

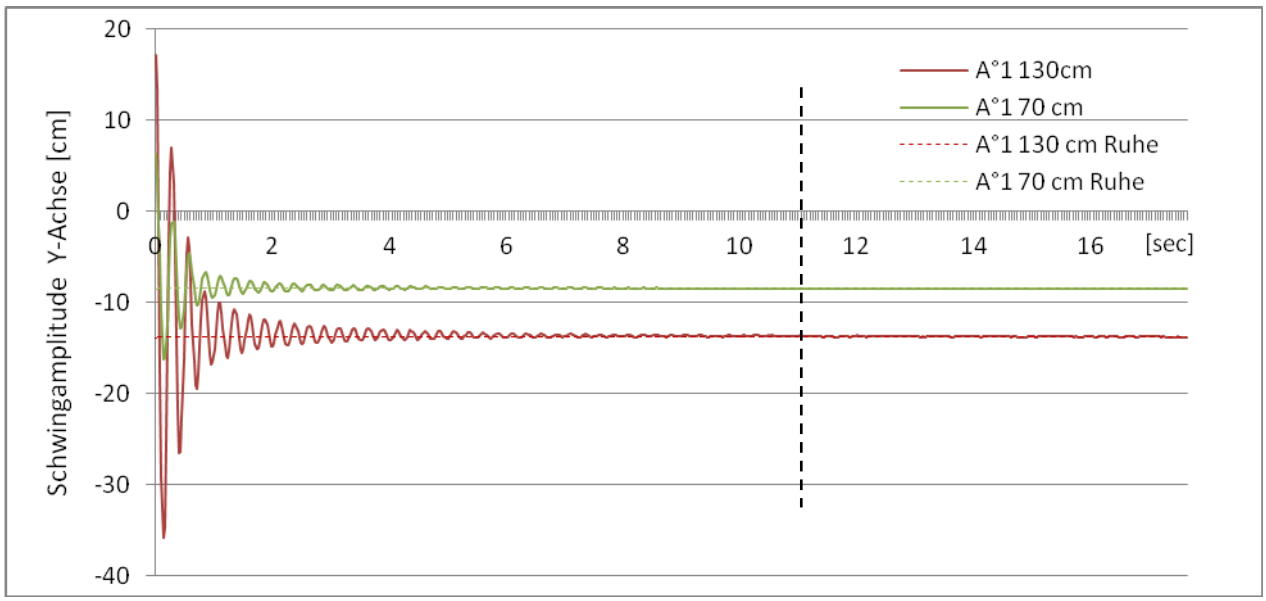


Abbildung 45: Versuch Gamma1, Schnittzustand 1oSp, Messung (a).

In Abbildung 46 und Abbildung 47 werden die berechnete Eigenfrequenz (durchschnittliche Frequenz der Schwingungen entlang der Y-Achse), so wie das durchschnittliche Dämpfungsverhältnis dargestellt. Beide Parameter sind Durchschnittswerte und wurden aus dem arithmetischen Mittel der Werte aus den Perioden zwei bis vier berechnet. Die exakte Berechnung dieser Parameter wurde in der Methodik (siehe Kapitel 8.7) erklärt.

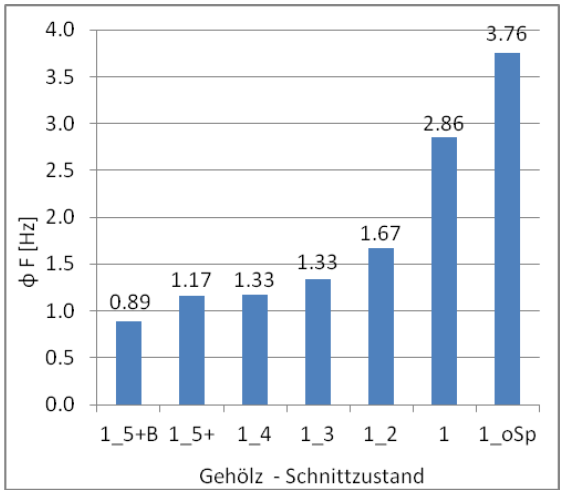


Abbildung 46: Durchschnittliche Frequenz (Eigenfrequenz) entlang der Y-Achse, Versuchsreihe Gamma1.

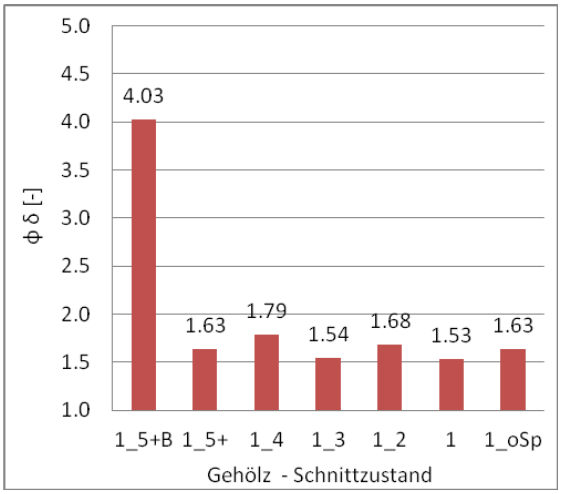


Abbildung 47: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis entlang der Y-Achse, Versuchsreihe Gamma1.

Die Eigenfrequenz (Abbildung 46) stieg kontinuierlich mit jedem Rückschnitt an. Das Dämpfungsverhältnis (Abbildung 47) war im Schnittzustand 1_5+B mehr als doppelt so hoch als in den folgenden Schnittzuständen. Bei den Versuchen in den Schnittzuständen 1_5+B bis 1_oSp änderte sich das durchschnittliche Dämpfungsverhältnis kaum und es ist kein Trend erkennbar.

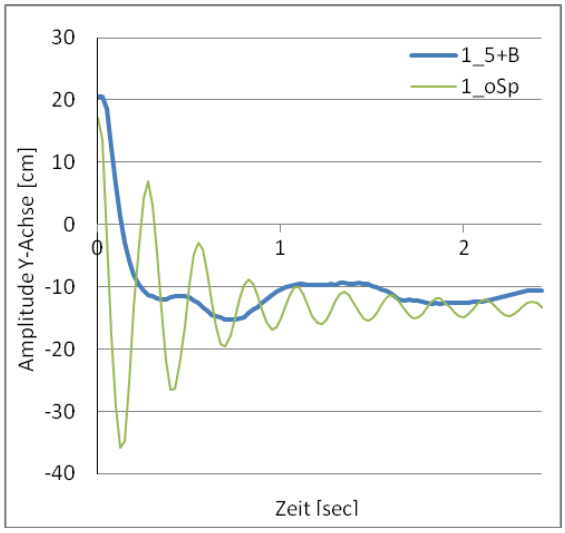


Abbildung 48: Vergleich der Periodendauer: Gesamtes Gehölz mit Blättern in blau - Hauptachse ohne Spitze in grün.

Vergleicht man (Abbildung 48) die Schwingung der Hauptachse ohne Spitze (1_oSp - grün) mit der Schwingung des gesamten Gehölzes mit Blättern (1_5+B - blau), wird ersichtlich, wie unterschiedlich die Dauer einer Periode war. Wenn im Schnittzustand 1_5+B eine Periode etwa eine Sekunde dauerte, liefen im Schnittzustand 1_oSp beinahe fünf Perioden ab.

Das heißt, während im ersten Schnittzustand noch die erste Periode lief, waren im letzten bereits alle, für unsere Statistik herangezogenen Perioden (zwei bis vier) absolviert. Die horizontale Achse wird in nahezu allen Abbildungen also nicht auf Zeitintervalle abgebildet, sondern bezieht sich rein auf Perioden, welche

unterschiedliche Zeitmaßstäbe aufweisen. Bei der Interpretation muss deshalb auf die unterschiedliche Periodendauer Rücksicht genommen werden.

Die Schwingungen entlang der X-Achse wurden in der Auswertung dieser Arbeit vernachlässigt. Die Schwingamplituden entlang dieser Achse waren kurz nach dem Loslassen wesentlich geringer als die entlang Y-Achse. Im Abbildung 49 kann man erkennen, dass auch die Dämpfung bei diesem Versuch in der X-Ebene geringer war als in der Y-Ebene. Daraus resultiert, dass nach etwa drei Sekunden die Amplitude der X-Achse gleich groß oder später sogar größer als jener der Y-Achse war.

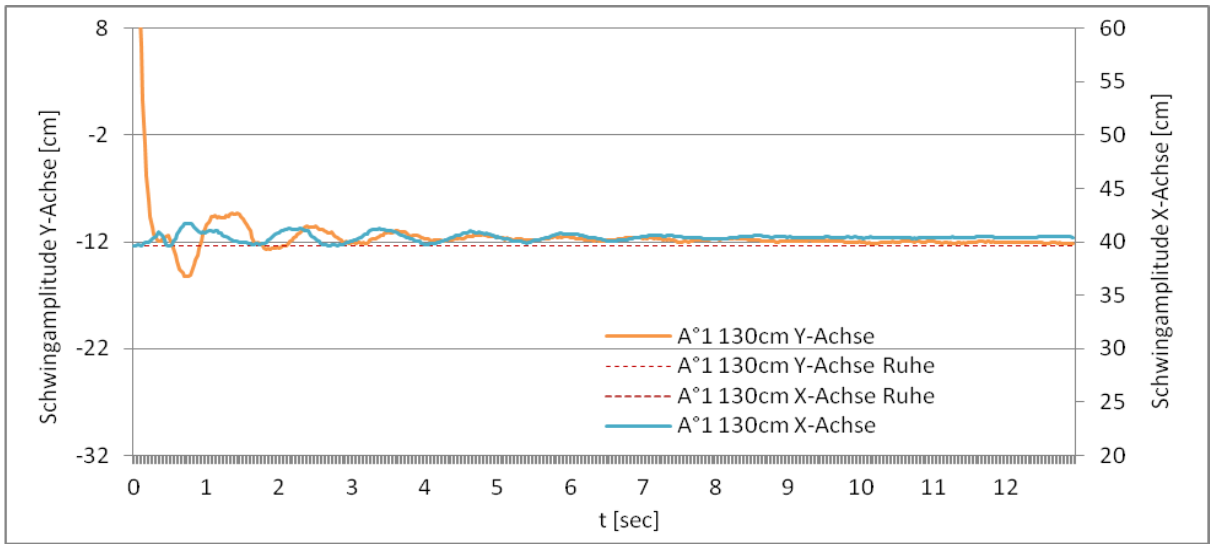


Abbildung 49: Schwingungsdynamik des Gehölzes Gamma1 im Schnittzustand 1_5+B, Messung(a), Abbildung beider Schwingungsebenen überlagert, mit der gleichen Skalierung.

9.3. Versuchsreihe Gamma2

Im Folgenden wird die Charakteristik der Versuchspflanze Gamma2 dargestellt und beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der Zugversuche präsentiert. In Abbildung 50 bis Abbildung 53 wird das Gehölz visuell dargestellt.

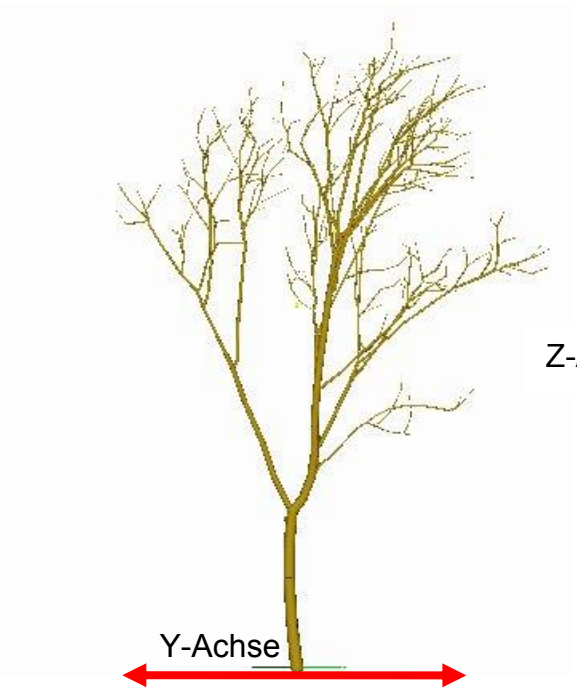


Abbildung 50: Gamma2, Abbildung der Baumarchitektur, Y-Z-Ebene, 06.12.2013.

Abbildung 51: Gamma2, Abbildung der Baumarchitektur, X-Z-Ebene, 06.12.2013.

In Abbildung 51 sieht man im Vergleich zur Abbildung 28, dass die Wuchsrichtung von Gamma2 im Gegensatz zu Gamma1 nicht so schief ist. In Abbildung 52 ist das ebenso ersichtlich, die Äste sind gleichmäßiger auf die Kreisviertel verteilt als bei Gamma1.

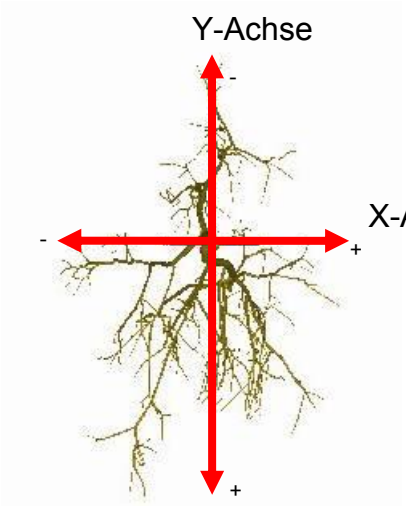


Abbildung 52: Gamma2, Grundriss, X-Y-Ebene, 06.12.2013.

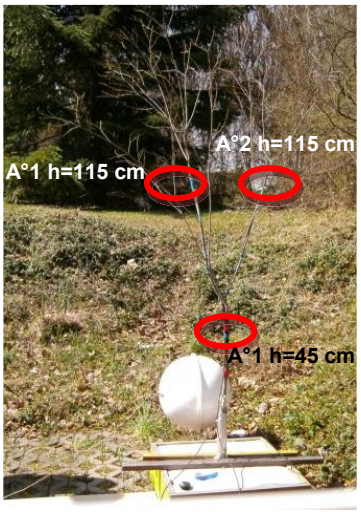


Abbildung 53: Versuchsgehölz Gamma2, rot markiert die Messpunkte, 15.04.2013.

In Bezug auf Frisch- und Trockenmasse (Abbildung 54) ergab sich eine ähnliche Verteilung wie bei Gamma1. Die frische Biomasse der A°1 betrug bei Gamma2 nur 150% der frischen Biomasse der A°2, bei Gamma1 waren es hingegen 240%. Dies kann durch die abgebrochene Spitze des Gehölzes Gamma2 erklärt werden. Bei diesem Gehölz war von Anfang an kein Blattwerk vorhanden, da zum Zeitpunkt des Versuchs der Blattaustrieb noch nicht eingesetzt hatte.

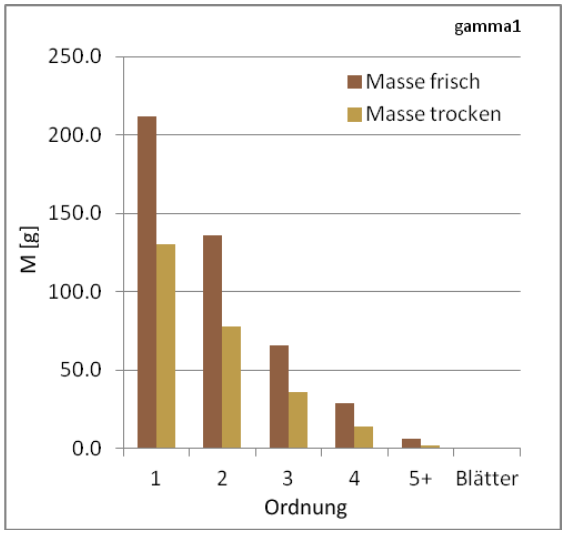


Abbildung 54: Frisch- und Trockenmasse des Gehölzes Gamma2 verteilt auf die Ordnungsklassen.

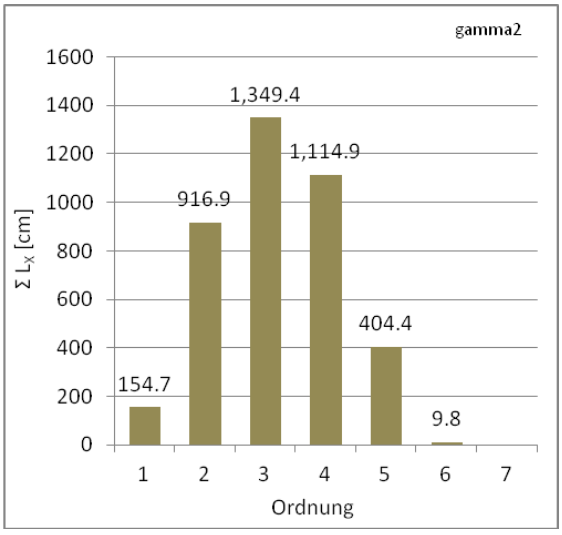


Abbildung 55: Gesamtlänge aller Achsen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma2.

Betrachtet man die Gesamtlänge aller Achsenordnungen (Abbildung 55), war die A°3 am stärksten vertreten. Während die A°3 und die A°4 bei Gamma1 beinahe zwei Drittel der Gesamtachsenlänge ausmachten, war beim Gehölz Gamma2 die A°2 nur um 18% kürzer als die A°4. Die Achsenlängensumme der A°4 war um 18% geringer

als jene der A°3. Die durchschnittlichen Achsenlängen (Abbildung 56) pro Ordnung fielen von der A°1 zur A°6 hin stark ab. Es waren keine A°7 vorhanden. Betrachtet man die Längenanteile jeder Achsenordnung (Abbildung 57), gemessen an der Achsenlängensumme des gesamten Gehölzes, nahmen die A°2, die A°3 und die A°4 85 % des gesamten Gehölzes ein.

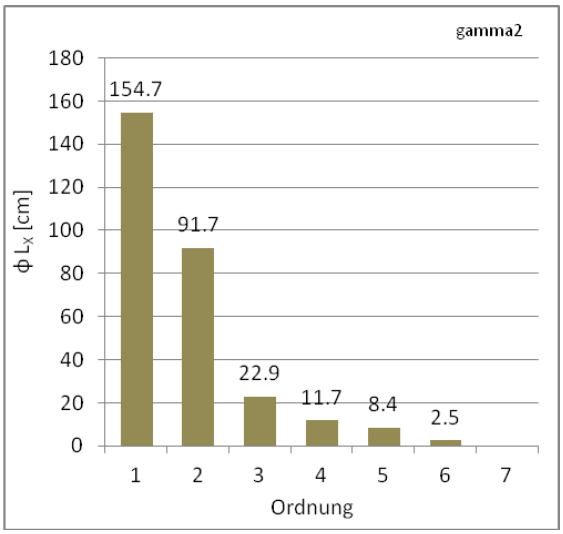


Abbildung 56: Durchschnittliche Achsenlänge der Achsen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma2.

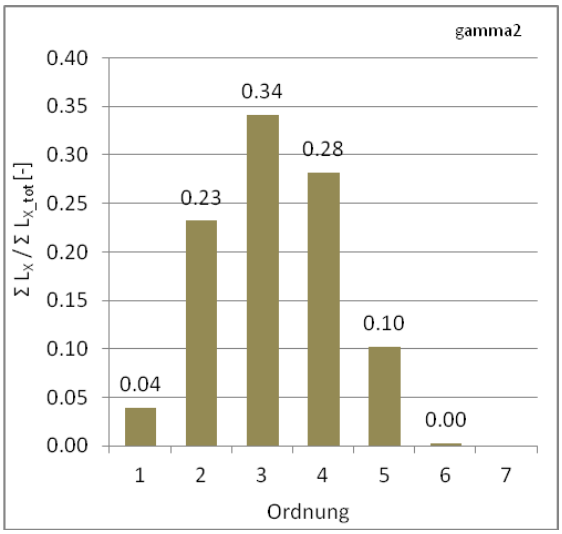


Abbildung 57: Anteil der Achsenlängensumme jeder Ordnung an der Achsenlängensumme des gesamten Gehölzes Gamma2.

In Abbildung 58 und Abbildung 59 werden die projizierten Flächen über die Höhe verteilt und pro Ordnung dargestellt: Die A°1 ist im unteren Viertel dominant. Bereits ab 80 cm Höhe waren die A°2 und die A°3 in Bezug auf die Flächenprojektion stärker vertreten. Im oberen Bereich fällt auf, dass sich die A°4 kumulativ gesehen an die A°1 annähert.

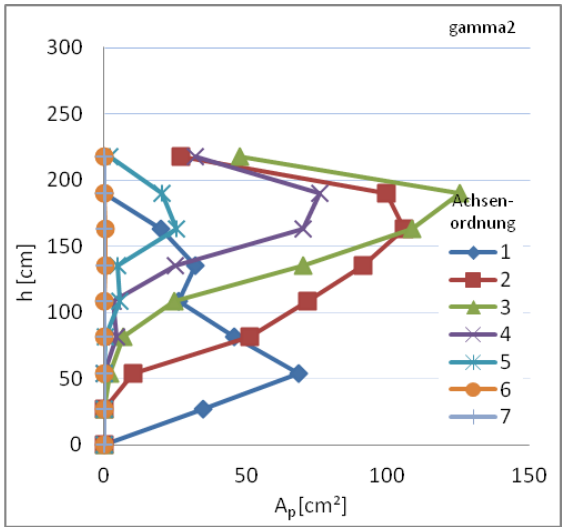


Abbildung 58: Vertikalverteilung der projizierten Flächen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma2.

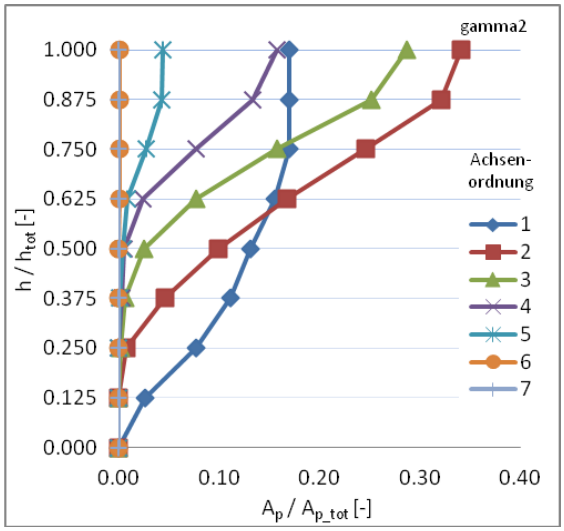


Abbildung 59: Vertikalverteilung der Anteile der projizierten Flächen jeder Ordnung an der Flächenprojektion des gesamten Gehölzes Gamma2, kumulativ.

In Bezug auf das Volumen (Abbildung 60, Abbildung 61) ist die A°1 klar dominant, selbst bis in den oberen Bereich bleibt die Hauptachse kumulativ gesehen am stärksten vorhanden. Die A°2 nimmt ebenso einen sehr großen Anteil in Bezug auf das Volumen ein.

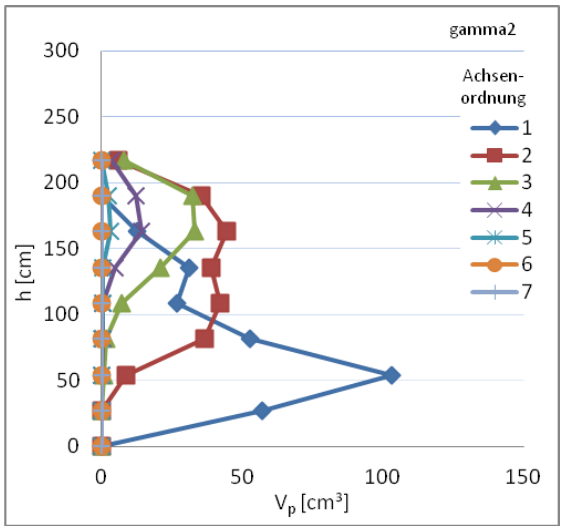


Abbildung 60: Vertikalverteilung der Volumina jeder Achsenordnung des Gehölzes Gamma2.

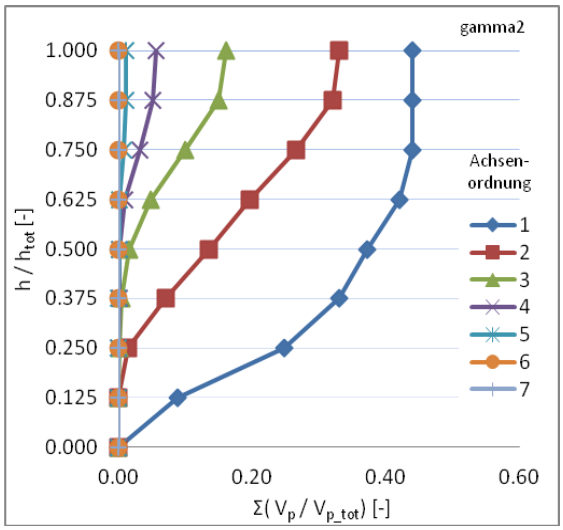


Abbildung 61: Vertikalverteilung der Anteile der Volumina jeder Achsenordnung am Volumen des gesamten Gehölzes Gamma2, kumulativ.

Zugversuche

Das Versuchsgehölz Gamma2 hatte kaum Blattwerk, da der Blattaustrieb im Frühjahr noch nicht eingesetzt hatte. Das Gehölz war an der Spitze abgebrochen, deshalb wurde auch keine Spitze zurückgeschnitten, d.h. es fehlen im Vergleich mit den anderen Versuchen der erste und der letzte Schritt. Im Gegensatz zu Gamma1 wurde hier die Zugdistanz auf rund 10 cm reduziert, um einer plastischen Verformung vorzubeugen.

Tabelle 7: Zugversuche Gamma2

Schnittzustand	Zugkraft [N]	Zugdistanz entlang der Y-Achse [cm]	Textliche Erklärung Schnittzustand
1_5+	50.82	-11.65	Alle Ordnungen vorhanden, keine Blätter
1_4	45.52	-10.37	Ordnung 1-4 vorhanden
1_3	42.40	-10.37	Ordnung 1-3 vorhanden
1_2	37.28	-11.44	Ordnung 1-2 vorhanden
1	41.38	-10,63	Hauptstamm

Im Abbildung 62 und Abbildung 63 wird das Schwingverhalten der ganzen Pflanze, noch ohne Rückschnitt, mit Sicht von oben, dargestellt. Klar ersichtlich ist erneut die verhältnismäßig geringe Amplitude auf der X-Achse.

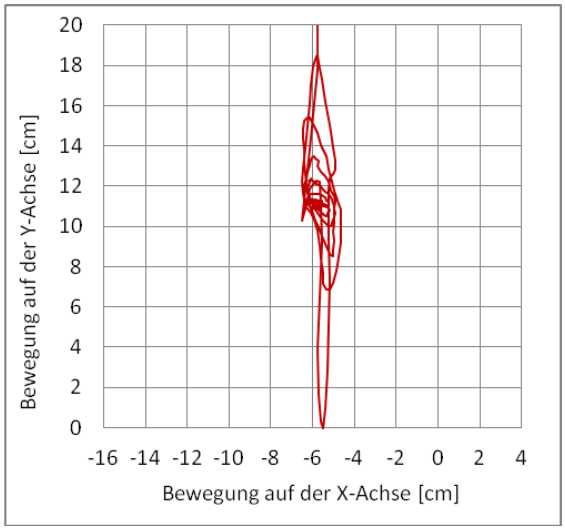


Abbildung 62: Schwingbewegung des Punktes auf der A°1 auf Höhe 115 cm von oben gesehen, auf der Ebene gebildet durch die X- und Y-Achse, Gehölz Gamma 2, Schnittzustand 1_5+.

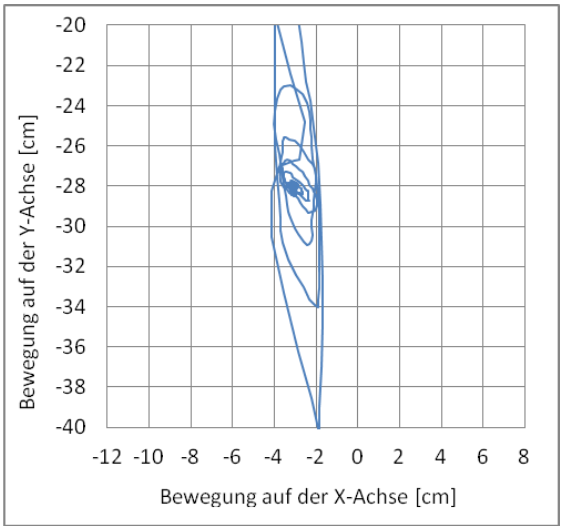


Abbildung 63: Schwingbewegung des Punktes auf der A°2 auf Höhe 115 cm von oben gesehen, auf der Ebene gebildet durch die X- und Y-Achse, Gehölz Gamma, Schnittzustand 1_5+.

In Abbildung 64 wird ersichtlich, dass sich die Frequenz der ersten fünf Perioden rund um 1 Hertz bewegt. Das Dämpfungsverhältnis (Abbildung 65) sinkt in den Perioden zwei bis vier knapp unter 2. In der fünften Periode steigt es hingegen wieder auf 3 an.

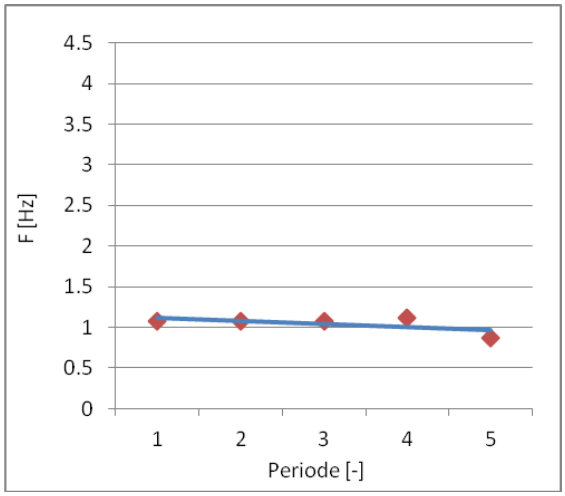


Abbildung 64: Frequenz gemessen entlang der Y -Achse, Gehölz Gamma2, Schnittzustand 1_5+.

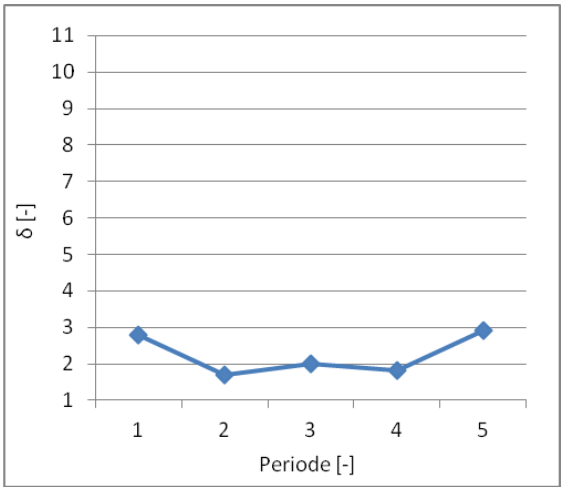


Abbildung 65: Dämpfungsverhältnis entlang der Y -Achse, Gehölz Gamma2, Schnittzustand 1_5+.

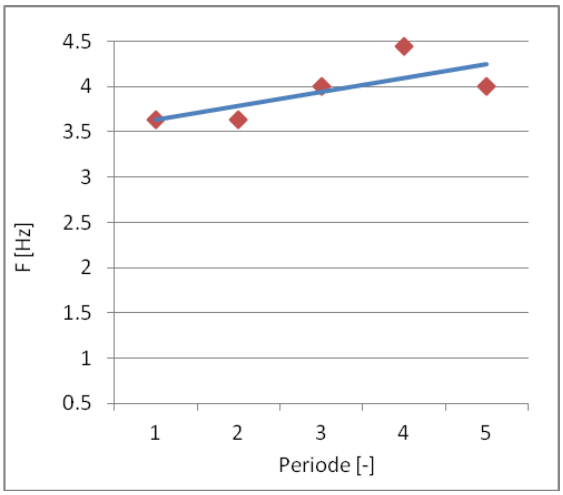


Abbildung 66: Frequenz gemessen entlang der Y -Achse, Gehölz Gamma2, Schnittzustand 1.

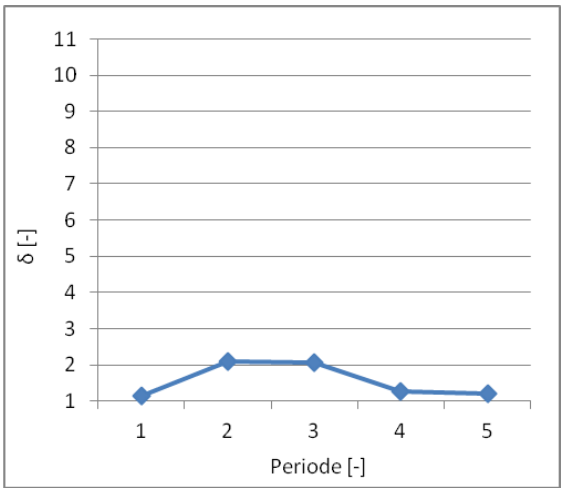


Abbildung 67: Dämpfungsverhältnis entlang der Y -Achse, Gehölz Gamma2, Schnittzustand 1.

In den Zugversuchen, die Abbildung 66 und Abbildung 67 zugrunde liegen, wurde das Gehölz bereits auf den Hauptstamm reduziert. Die Frequenz lag hier zwischen 3.5 und 4.5 Hertz. Das Dämpfungsverhältnis, bei der ersten Periode nach dem Loslassen noch kaum vorhanden, stieg in den folgenden zwei Perioden und sank dann in den Perioden vier und fünf rasch wieder ab.

In Abbildung 68 und Abbildung 69 werden die berechnete Eigenfrequenz (durchschnittliche Frequenz der Schwingungen entlang der Y-Achse), so wie das durchschnittliche Dämpfungsverhältnis dargestellt. Die Eigenfrequenz stieg mit jedem Rückschnitt geringfügig an. Sobald das Gehölz auf die Hauptachse reduziert wurde, war der Anstieg sprunghaft.

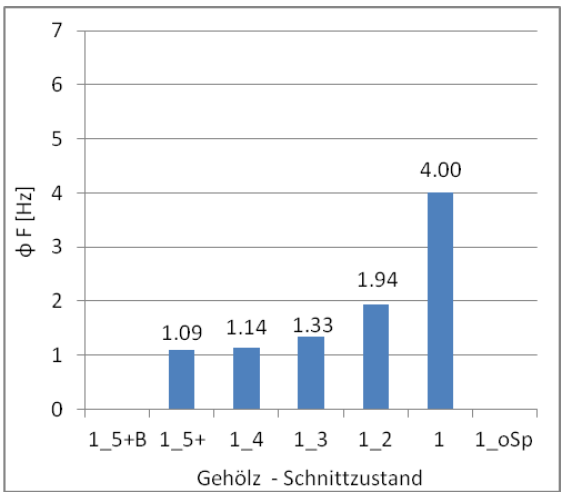


Abbildung 68: Durchschnittliche Frequenz entlang der Y-Achse, Versuchsreihe Gamma2.

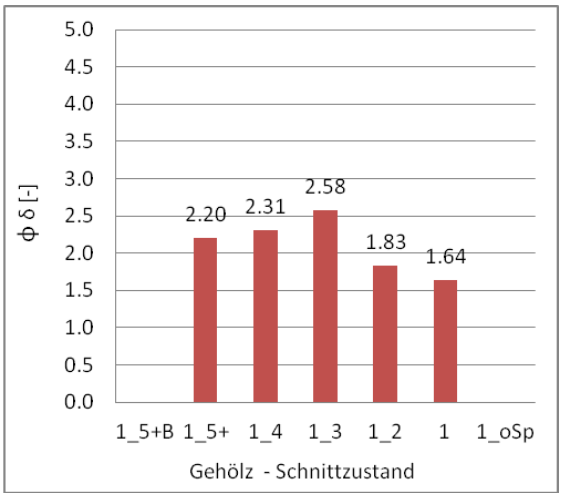
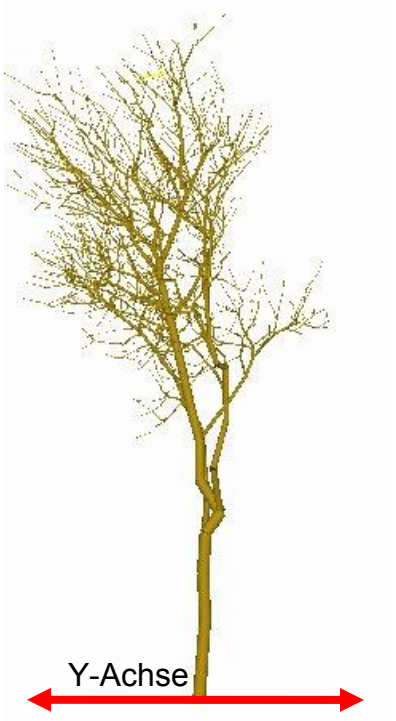


Abbildung 69: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis entlang der Y-Achse, Versuchsreihe Gamma2.

Das Dämpfungsverhältnis stieg zum Schnittzustand 1_3 hin geringfügig an, wo es seinen Höhepunkt erreichte, bevor es zum letzten Versuchsschritt hin wieder absank.

9.4. Versuchsreihe Gamma3

Im Folgenden wird die Charakteristik der Versuchspflanze Gamma3 dargestellt und beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der Zugversuche präsentiert. In Abbildung 70 bis Abbildung 73 wird das Gehölz visuell dargestellt.



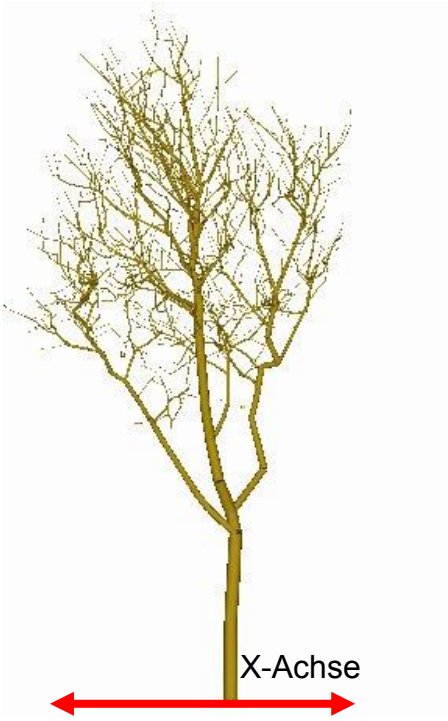


Abbildung 70: Gamma3, Abbildung der Baumarchitektur, Y-Z-Ebene, 06.12.2013.

Abbildung 71: Gamma3, Abbildung der Baumarchitektur, X-Z-Ebene, 06.12.2013.

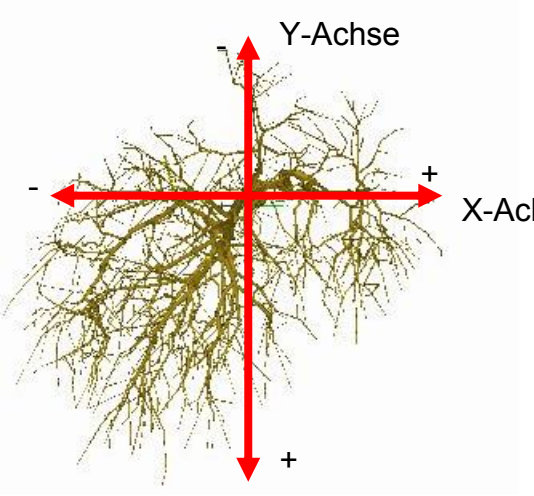


Abbildung 72: Gehölz Gamma3, Grundriss, X-Y-Ebene, 06.12.2013.

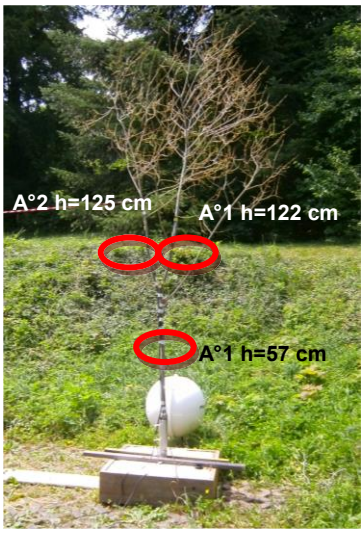


Abbildung 73: Gehölz Gamma3, entlaubt, rot markiert die Messpunkte, 09.07.2013.

Betrachtet man die Frischbiomassen dieses Gehölzes (Abbildung 74), betrug die Masse der A°1 um 80% mehr als jene der A°2. Einen auffallend hohen Masseanteil

von 18% hatte hier das Blattwerk. Dies kann an der großen, dichten Baumkrone liegen, bzw. am Schnittzeitpunkt im Hochsommer (Juli). Betrachtet man die Gesamtlänge jeder Achsenordnung (Abbildung 75), ist die A°4 am stärksten vertreten. Die Achsenlängensumme der A°3 war um 14% geringer als jene von der A°4. Dieses Gehölz wies diesbezüglich eine ähnliche Verteilung auf wie das Gehölz Gamma1. Die A°2 und die A°5 hatten nur etwa 46% der Achsenlängensumme der A°3 und der A°4.

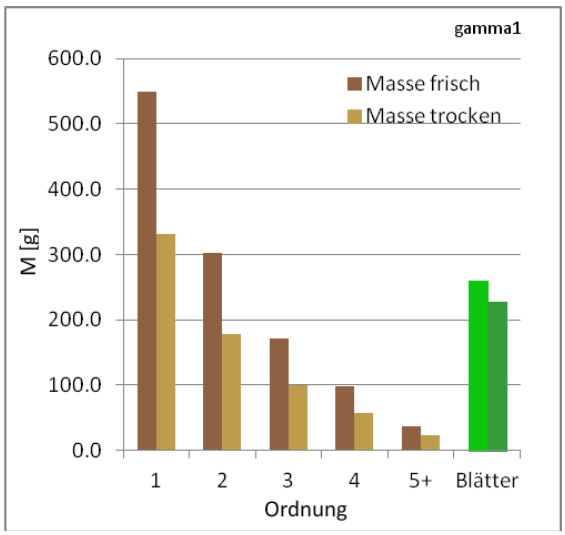


Abbildung 74: Frisch- und Trockenmasse des Gehölzes Gamma3 verteilt auf die Ordnungsklassen und das Blattwerk.

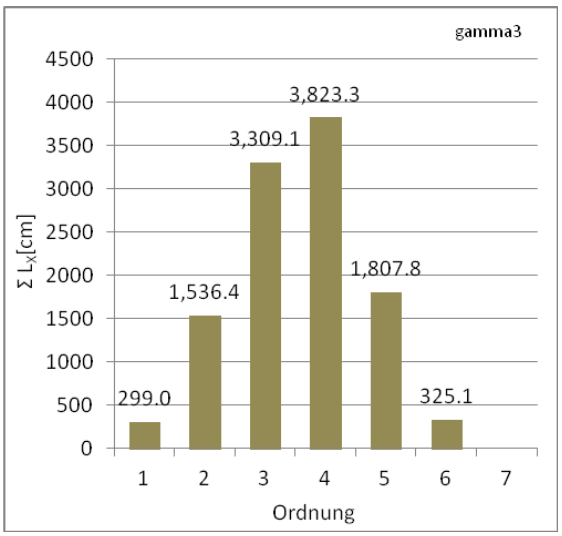


Abbildung 75: Gesamtlänge aller Achsen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma3.

Die durchschnittlichen Achsenlängen (Abbildung 76) pro Ordnung fielen im Vergleich zu Gamma1 und Gamma2 überdurchschnittlich stark von der A°1 zur A°2 ab. Ab der A°3 sank der Achsenlängendurchschnitt bis zur A°6 hin nur noch gering. Betrachtet man die Längenanteile jeder Achsenordnung (Abbildung 77) gemessen an der Achsenlängensumme des gesamten Gehölzes, nahmen die A°3 und die A°4 einen Anteil von 64% des gesamten Gehölzes ein. Der Anteil der A°5 war größer als der von der A°2.

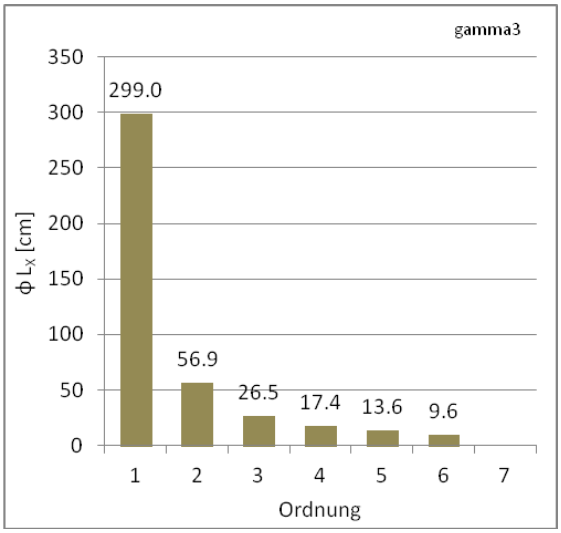


Abbildung 76: Durchschnittliche Achsenlänge der Achsen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma3.

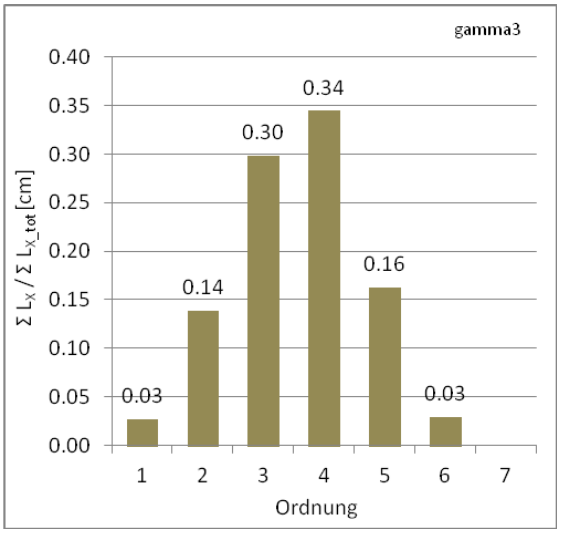


Abbildung 77: Anteil der Achsenlängensumme jeder Ordnung an der Summe der Achsenlängen des gesamten Gehölzes Gamma3.

In Abbildung 78 und Abbildung 79 werden die projizierten Flächen über die Höhe verteilt und pro Ordnung dargestellt: Die A°1 war diesbezüglich im unteren Viertel dominant, aber schon ab einer Höhe von einem Meter war die Flächenprojektion der A°2 größer. Ab 130 cm bildeten die A°3 und die A°4 die größten Projektionsflächen. Kumulativ gesehen war die A°1 ab der Höhenklasse 0.625 nicht mehr dominant.

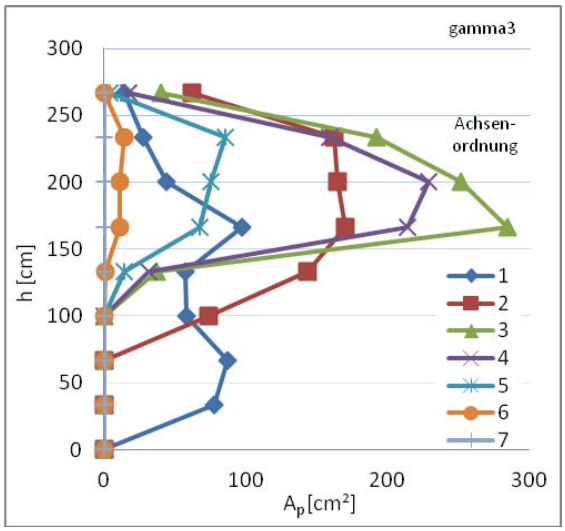


Abbildung 78: Vertikalverteilung der projizierten Flächen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma2.

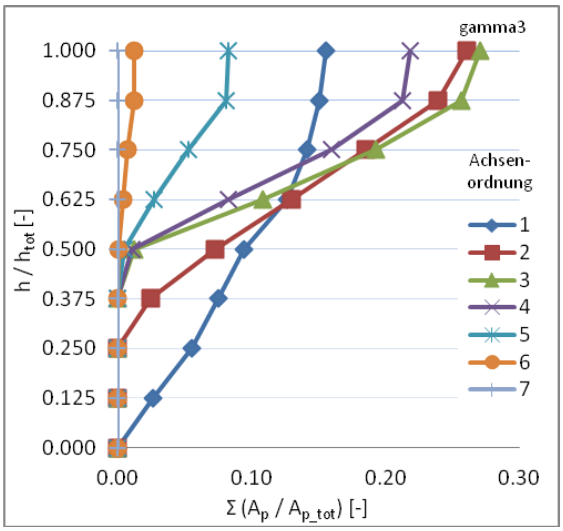


Abbildung 79: Vertikalverteilung der Anteile der projizierten Flächen jeder Ordnung an der Flächenprojektion des gesamten Gehölzes Gamma2, kumulativ.

In Bezug auf das Volumen (Abbildung 80, Abbildung 81) war die A°1, kumulativ gesehen, bis ganz nach oben dominant. Im Gegensatz zur projizierten Fläche (22%) hatte die A°4 einen relativ geringen Anteil am Gesamtvolumen (7%).

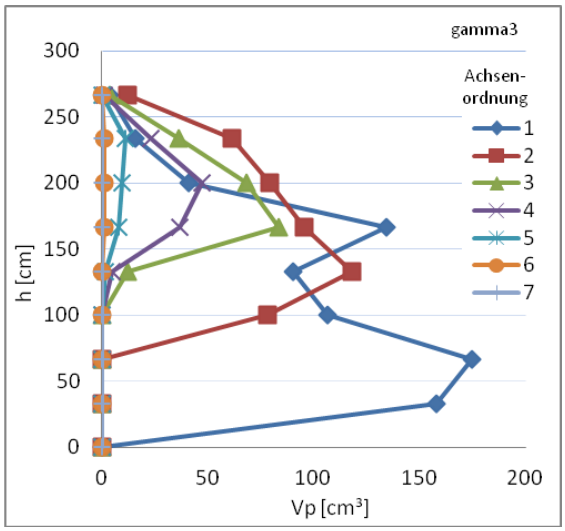


Abbildung 80: Vertikalverteilung des Volumens jeder Achsenordnung des Gehölzes Gamma3.

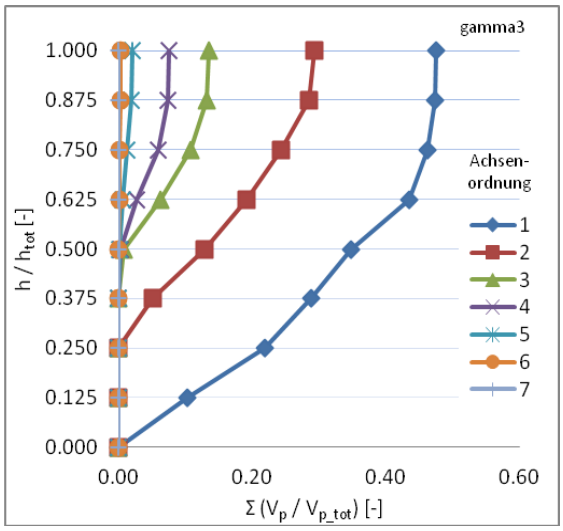


Abbildung 81: Vertikalverteilung der Anteile der Volumina jeder Achsenordnung am Volumen des gesamten Gehölzes Gamma3, kumulativ.

Zugversuche

Ebenso wie bei Gamma2 wurde hier das Seil um 10 cm angezogen. Aufgrund der Biegefestigkeit des Stammes waren hier größere Zugkräfte notwendig, um die gleiche Zugdistanz zu erreichen.

Tabelle 8: Zugversuche Gamma3

Schnittzustand	Zugkraft [N]	Zugdistanz [cm] entlang der Y-Achse	Textliche Erklärung Schnittzustand
1_5+B	105.95	-11.17	Alle Ordnungen vorhanden, inkl. Blätter
1_5+	95.35	-9.32	Alle Ordnungen vorhanden, ohne Blätter
1_4	60.43	-9.48	Ordnung 1-4 vorhanden
1_3	79.07	-9.98	Ordnung 1-3 vorhanden
1_2	79.07	-9.68	Ordnung 1-2 vorhanden
1	82.80	-9.31	Hauptstamm
1oSp	88.49	-9.62	Hauptstamm, Spitze gekappt

In Abbildung 82 und Abbildung 83 wird das Schwingverhalten des Gehölzes im Schnittzustand 1_5+B mit Sicht von oben dargestellt. Die X-Bewegung war im Vergleich zur Y-Bewegung relativ gering.

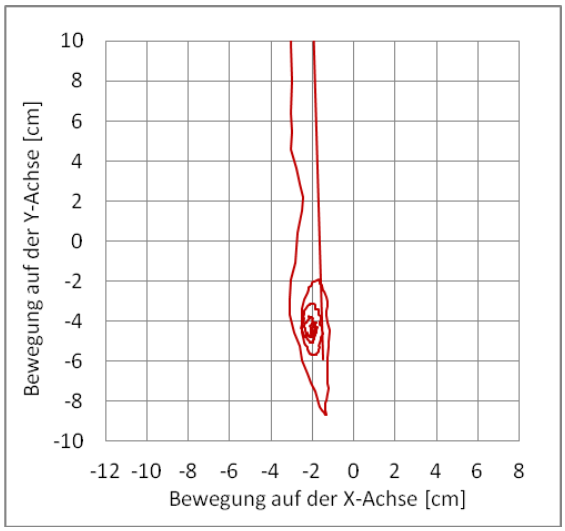


Abbildung 82: Schwingbewegung des Punktes auf der A°1 auf Höhe 130 cm von oben gesehen, auf der Ebene gebildet durch die X- und Y-Achse, Gehölz Gamma3, Schnittzustand 1_5+B, Messung (a).

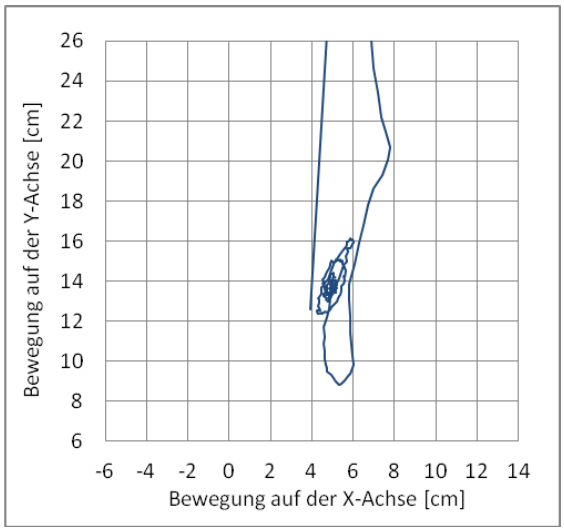


Abbildung 83: Schwingbewegung des Punktes auf der A°2 auf Höhe 115 cm von oben gesehen, auf der Ebene gebildet durch die X- und Y-Achse, Gehölz Gamma3, Schnittzustand 1_5+B, Messung (a).

Die Eigenfrequenz des gesamen Gehölzes (Abbildung 84) lag bei etwa 0.8 Hertz. Das Dämpfungsverhältnis (Abbildung 85) fiel nach dem Loslassen in der ersten Periode rapide ab. Ab der zweiten Periode verringerte es sich langsam unter 2.

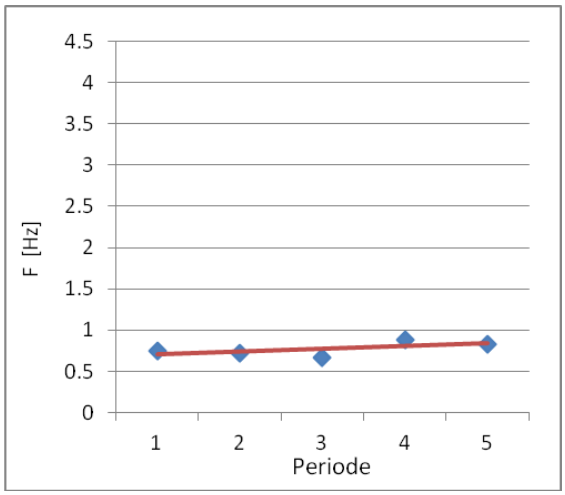


Abbildung 84: Frequenz gemessen entlang der Y -Achse, Gehölz Gamma3, Schnittzustand 1_5+B, Messung (b).

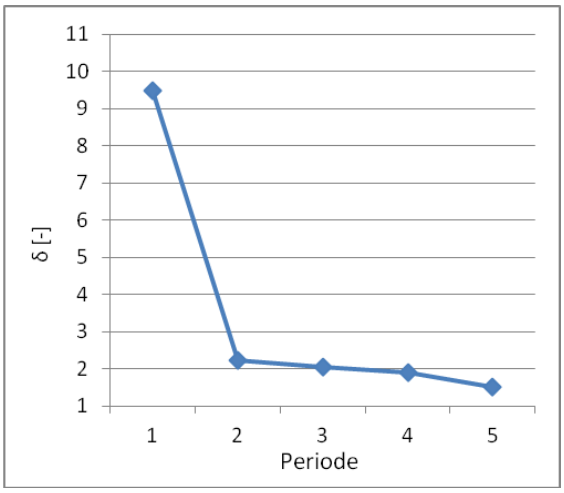


Abbildung 85: Dämpfungsverhältnis entlang der Y -Achse, Gehölz Gamma3 Schnittzustand 1_5+B, Messung (b).

Im Schnittzustand 1oSp lag die Eigenfrequenz (Abbildung 86) zwischen 2.6 und 2.9 Hertz. Der Sprung ist wiederum auf die Messauflösung zurückzuführen. Das Dämpfungsverhältnis (Abbildung 87) lag in den Perioden zwei bis vier knapp unter 2, mit sinkender Tendenz, stieg allerdings in der fünften Periode sprunghaft an.

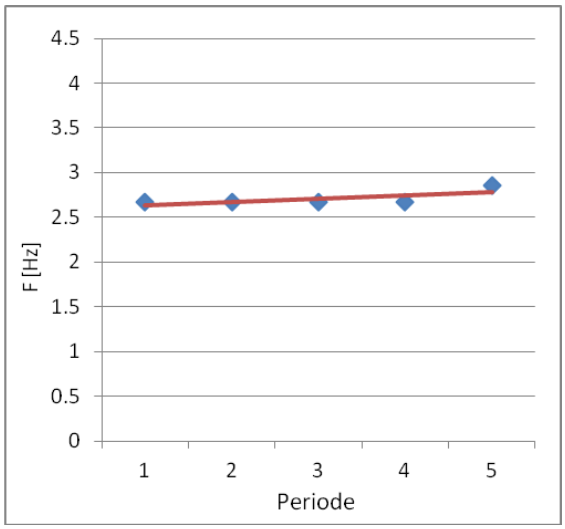


Abbildung 86: Frequenz gemessen entlang der Y -Achse, Gehölz Gamma3, Schnittzustand 1oSp, Messung (a).

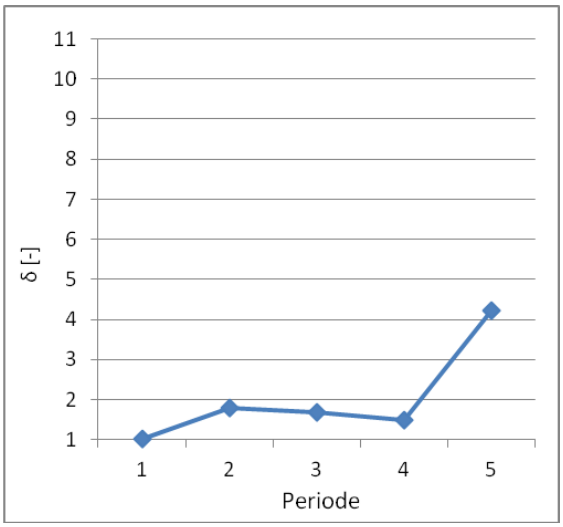


Abbildung 87: Dämpfungsverhältnis entlang der Y -Achse, Gehölz Gamma3, Schnittzustand 1oSp, Messung (a).

Berücksichtigend, dass nur mehr der Hauptstamm ohne Spitze schwang, war das Dämpfungsverhältnis ab der fünten Periode außerordentich stark und das Gehölz

kam relativ rasch, nach bereits ca. drei Sekunden (Abbildung 88 und Abbildung 89), zur Ruhe. Dies stellt ein komplett anderes Verhalten dar, als es bei den Gehölzen Gamma1 und Gamma2 beobachtet werden konnte.

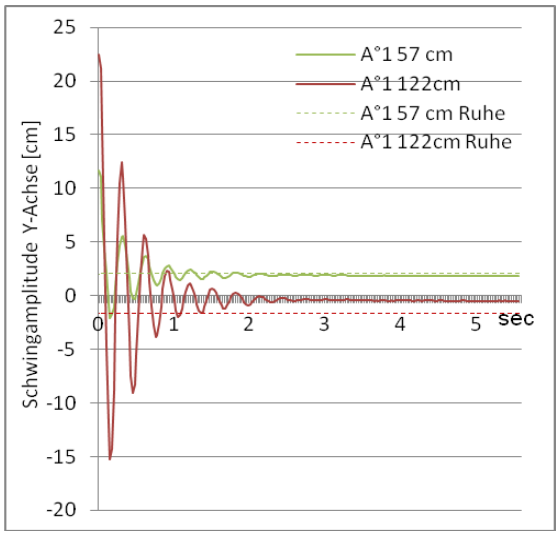


Abbildung 88: Schwingungsmessung entlang der Y-Achse des Gehölzes Gamma3 im Schnittzustand 1oSp, Messung (a).

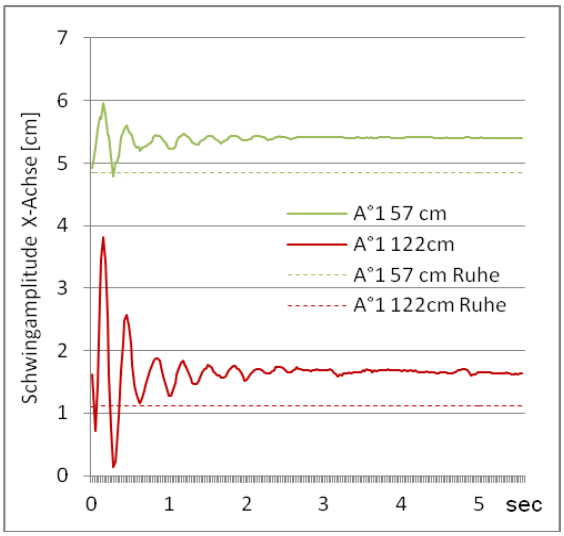


Abbildung 89: Schwingungsmessung entlang der X-Achse des Gehölzes Gamma3 im Schnittzustand 1oSp, Messung (a).

In Abbildung 90 und Abbildung 91 werden die berechnete Eigenfrequenz (durchschnittliche Frequenz der Schwingungen entlang der Y-Achse), so wie das durchschnittliche Dämpfungsverhältnis dargestellt: Die Eigenfrequenz (Abbildung 90) stieg mit jedem Rückschnitt an. Bezüglich des Dämpfungsverhältnisses (Abbildung 91) ist ein Rückgang bis zum Zugversuch im Schnittzustand 1 erkennbar. Im Schnittzustand 1oSp stieg es wieder auf 2 an.

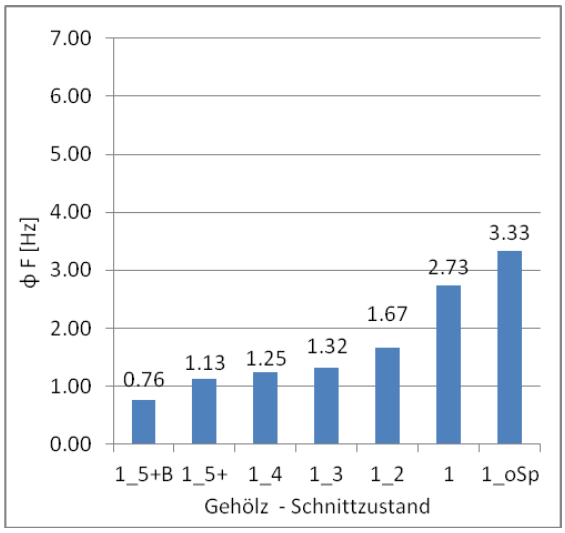


Abbildung 90: Durchschnittliche Frequenz entlang der Y-Achse, Versuchsreihe Gamma3.

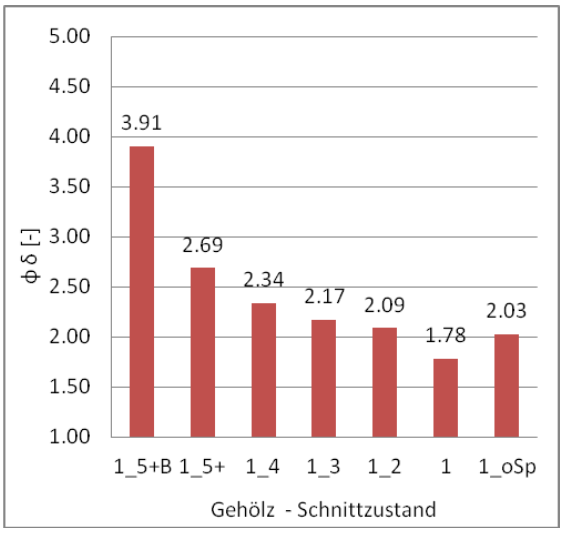


Abbildung 91: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis entlang der Y-Achse, Versuchsreihe Gamma3.

9.5. Übersicht und Vergleich der Ergebnisse der Zugversuche

In den folgenden beiden Abbildungen wird eine Übersicht der Versuche mit den Gehölzen Gamma1, Gamma2 und Gamma3 und die Veränderungen in Bezug auf deren Eigenfrequenz (Abbildung 92) und Dämpfungsverhältnis (Abbildung 93) mit jedem Rückschnitt dargestellt.

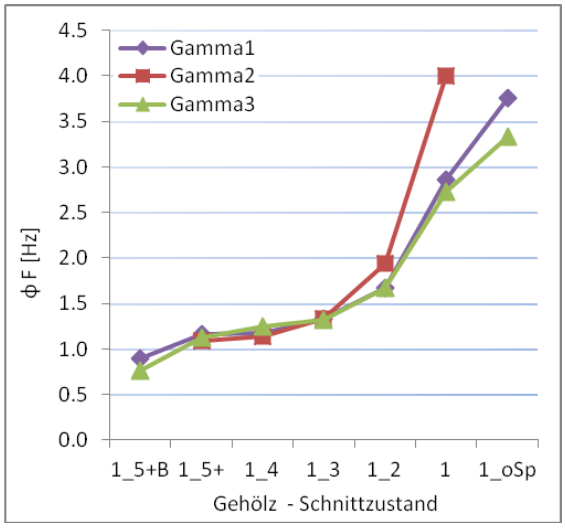


Abbildung 92: Eigenfrequenz der Gehölze Gamma1-3 in den einzelnen Schnittzuständen.

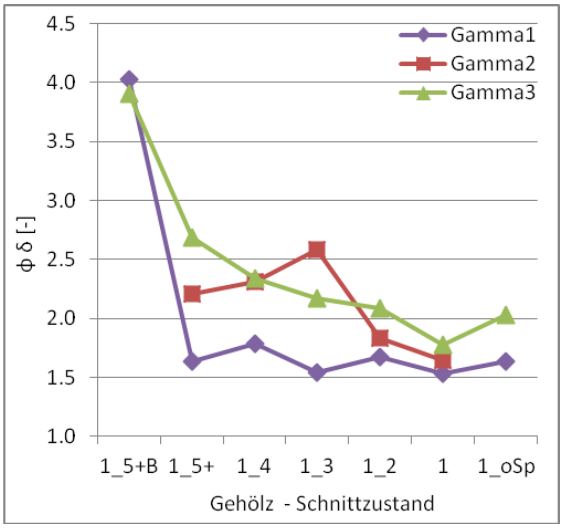


Abbildung 93: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis der Gehölze Gamma1-3 in den einzelnen Schnittzuständen.

Die Eigenfrequenzen der Gehölze im vollständigen Zustand waren sehr ähnlich, obwohl sie sich in Bezug auf deren Biomasse stark unterschieden. Erst als nur mehr die Hauptachse übrig war, wurde bei Gamma2 eine Abweichung ersichtlich. Bei Gamma2 muss allerdings erwähnt werden, dass die Hauptachse oben abgebrochen war und man den Schnittzustand 1 ebenso dem Schnittzustand 1oSp zuordnen könnte. Von diesem Standpunkt aus gesehen sind die Eigenfrequenzen durchgehend berechenbar.

Aus dem Verlauf des Dämpfungsverhältnisses scheint kein Trend ableitbar. Eindeutig erkennbar ist jedoch der starke Einfluss des Blattwerks. Bei den Versuchen im Schnittzustand 1_4 und 1_3 schien das Verhalten von Gamma2 stark abzuweichen, der Trend dort ist gegensätzlich, das Dämpfungsverhältnis stieg an. Im Vergleich, bei Gamma1 und Gamma3 sank das Dämpfungsverhältnis in diesen Schnittzuständen, wenn auch nur gering.

10. Diskussion der Ergebnisse

Hier wird vor allem versucht festzustellen, ob es Zusammenhänge zwischen der strukturellen Charakteristik der Gehölze und deren Eigenfrequenz bzw. des Dämpfungsverhältnisses gibt. Um dies zu erörtern, wurden Parameter der Gehölzcharakteristik mit Ergebnissen der Schwingungsmessungen und bekannten Ergebnissen verglichen.

Eigenfrequenz

Nach ***MOORE und MAGUIRE (2005)*** hängt die Eigenfrequenz wesentlich von der Masse der schwingenden Elemente ab. Sie fanden heraus, dass der Zusammenhang nicht linear ist, sondern die Eigenfrequenz erst einen deutlichen Anstieg erfährt, wenn mehr als 80% der Krone entfernt wurde. In Abbildung 94 wird das Volumen bzw. in Abbildung 95 die Masse (welche linear zusammenhängen) der Frequenz gegenüber gestellt.

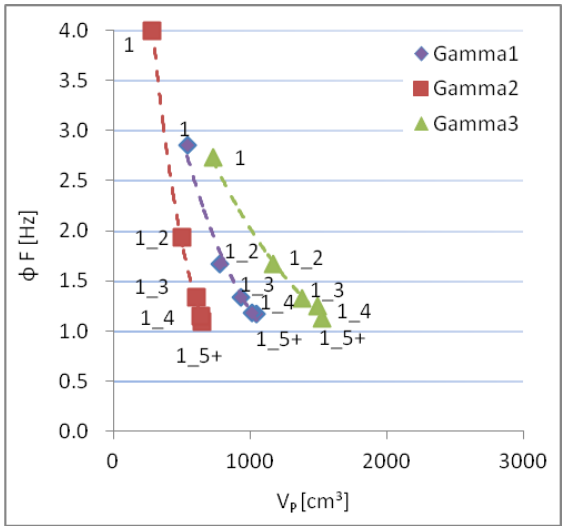


Abbildung 94: Eigenfrequenz als Funktion der Volumina bei verschiedenen Schnittzuständen der Gehölze Gamma1-3.

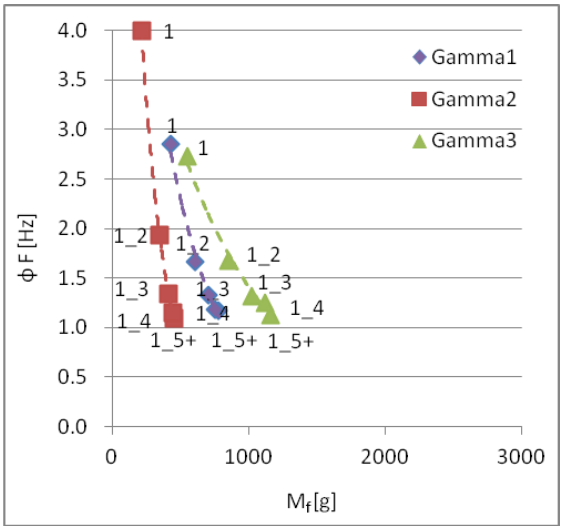


Abbildung 95: Eigenfrequenz als Funktion der Frischbiomasse bei verschiedenen Schnittzuständen der Gehölze Gamma1-3.

In Abbildung 94 und Abbildung 95 wird der Zusammenhang zwischen Volumen bzw. Masse und Frequenz bestätigt. Mit beginnendem Rückschnitt stieg die Eigenfrequenz zunächst geringfügig an. Ab dem Schnittzustand 1_2 ist ein deutlicherer Anstieg erkennbar. Gehölz Gamma2 wies einen überaus starken Sprung zum Schnittzustand 1_h in auf, was sich durch die abgebrochene Spitze erklären lässt. Darüber hinaus lässt sich klar in Abbildung 92 erkennen, dass sich mit dem

Rückschnitt der Spitze (ob eres Drittel) d es Hau ptstammes, die Eigenfrequenz weiterhin deutlich erhöhte.

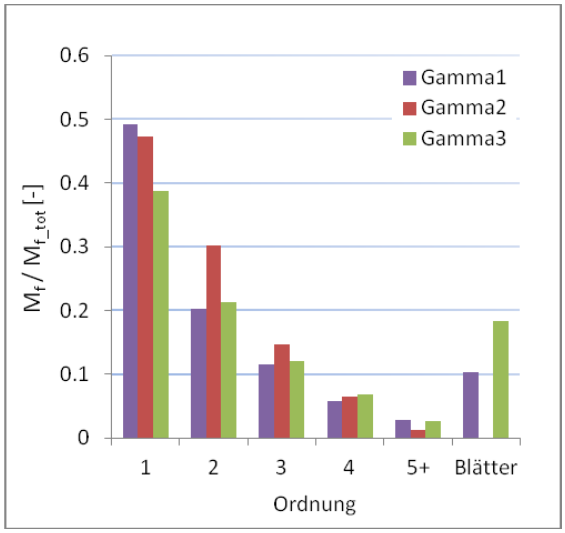


Abbildung 96: Anteile d er Biomasse jeder Ordnung b zw. des Bl attwerks an der Biomasse des gesamten Gehölzes; Gehölze Gamma1-3.

Durch die Versuche dieser A rbeit wird nicht b estätigt, dass e in wesentlicher Anstieg der E igenfrequenz, wie bei ***MOORE und MAGUIRE (2005)***, erst n ach 80% des Rücksch nitts d er Krone z u verzeichnen ist. Da bei den Versuchen dieser A rbeit der Rüc kschnitt auf die Achsenordnungen abgestimmt war und der Rücksch nitt einer a nderen Methodik fo lgte, ergibt sich diesbezüglich kein direkter Vergleich.

Die Hauptachse hielt in allen Versuchsgehölzen m indesten 38% der Gesamtmasse, die A°2 mindestens 20%, ein deutlicher Anstieg der Eigenfrequenz war deshalb auch in den letzten beiden Schnittstadien die logische Konsequenz. In Abbildung 95 ist ein exponentieller Zusammenhang zw ischen M asse und Frequenz erkennbar. Nach ***SELLIER und FOURCAUD (2005)*** spielt die Höhe d es M asseschwerpunktes e ine wesentliche Rolle für d ie Eigenfrequenz. Je niedriger d er S chwerpunkt ist, des to höher ist die Eigenfrequenz (***vgl. SELLIER und FOURCAUD, 2005)***. E in Rückschnitt würde nach der in unseren V ersuchen v erwendeten M ethodik den S chwerpunkt senken un d somit die E igenfrequenz er höhen. Dies könnte d en ex ponentiellen Zusammenhang zwischen der Masse der Gehölze un d d eren E igenfrequenz erklären.

Zusammenfassend ka nn g esagt werden, Gehölze m it g eringerer Masse sch wingen mit e iner höheren Fr equenz. Dieser Zusammenhang ist jed och n icht li near. Um diesen g enau erklären z u kö nnen, müssten w eitere Berechnungen, wie z.B. die Berechnung des Schwerpunktes o der evtl. auch w eitere Versuche d urchgeführt werden.

Dämpfungsverhältnis

Nach ***SELLIER et al. (2006)*** sowie ***MOORE und MAGUIRE (2008)*** beeinflussen die strukturellen, schwingenden Elemente eines Gehölzes durch ihre Eigenschaften die Dynamik der ganzen Baumstruktur. Es wird das Dämpfungsverhältnis den Parametern der Gehölzcharakteristik gegenüber gestellt. Es soll außerdem gezeigt werden, dass das Blattwerk den größten Einfluss auf das Dämpfungsverhältnis hat ***(vgl. SELLIER und FOURCAUD, 2005).***

Das Dämpfungsverhältnis (Abbildung 93) verhielt sich bei den Versuchen der Gehölze Gamma1-3 sehr verschieden. Es ist kein eindeutiger Trend erkennbar. Bei Gamma3 war ein kontinuierlicher Abfall des Dämpfungsverhältnisses bis zum Schnittzustand 1 zu sehen. Bei Gamma1 hingegen war der Abfall nach dem Schnitt der Blätter sehr sprunghaft und pendelte sich dann schließlich zwischen 1.5 und 1.8 Hertz ein. Das Verhalten von Gamma2 ist vor allem im Schnittzustand 1_3 stark abgewichen.

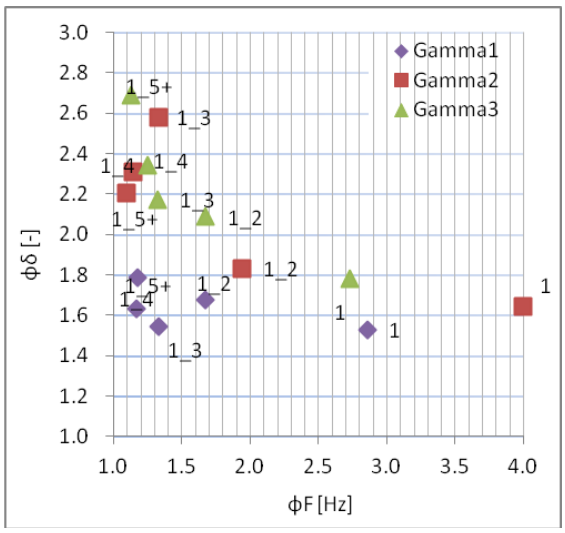


Abbildung 97: Dämpfungsverhältnis als Funktion der Frequenz der Gehölze Gamma 1-3 mit den einzelnen Schnittzuständen als Datenpunkte.

Betrachtet man das Dämpfungsverhältnis als Funktion der Frequenz (Abbildung 97), so ist erkennbar, dass das Dämpfungsverhältnis tendenziell zum Schnittzustand 1 hin sank, während die Eigenfrequenz stieg. Während in den Schnittzuständen 1_4 bis 1_2 das Dämpfungsverhältnis und die Eigenfrequenz bei Gamma1 und Gamma3 innerhalb einer Spanne von 0.4 lagen, tat sich bei Gamma2 bei beiden Kennzahlen eine Spanne von 0.8 auf.

Das Gehölz Gamma2 schien generell sensibler auf eine Veränderung der Gehölzarchitektur zu reagieren. Auch wenn sich die Gehölze in den Schnittzuständen 1_4 und 1_3 recht verschieden verhielten, die A°3 und die A°4 dürften hier ganz differenzierte Auswirkungen haben, ab dem Schnittzustand 1_2 gab es doch bei allen große Ähnlichkeiten. Würde der aerodynamische

Dämpfungseffekt bei den Ästen eine große Rolle spielen, müsste ein Zusammenhang zwischen dem Dämpfungsverhältnis und den projizierten Flächen in den verschiedenen Schnittzuständen erkennbar sein. Im Schnittzutand 1 liegen die Punkte (Abbildung 98) sehr nahe beieinander, in den anderen Schnittzuständen scheint es hier aber kaum einen Zusammenhang zu geben. Dies deckt sich mit den Beobachtungen von ***SPECK und SPATZ (2004).***

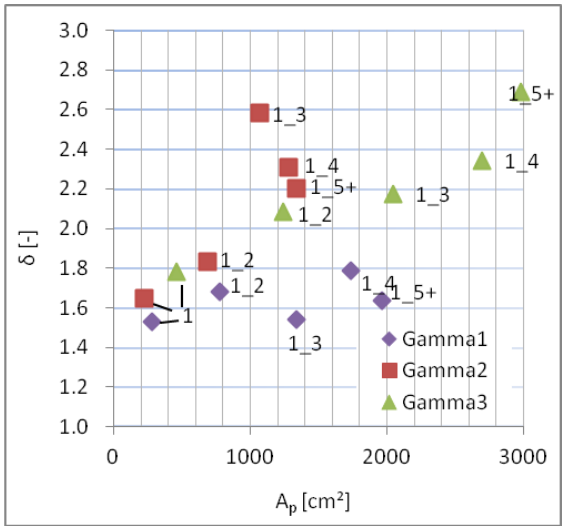


Abbildung 98: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis als Funktion der projizierten Flächen der Gehölze Gamma1-3 entsprechend dem Schnittzustand.

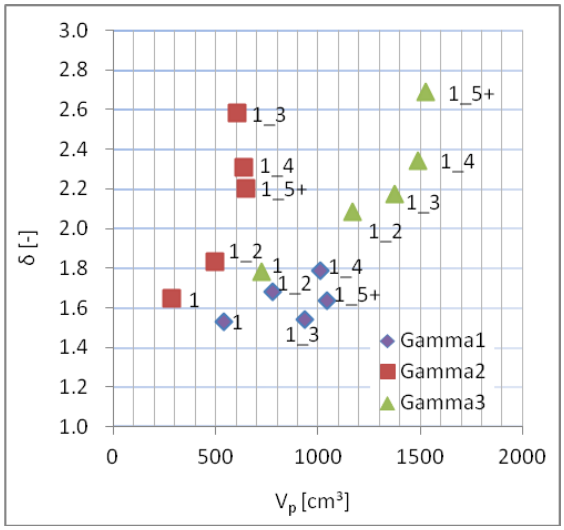


Abbildung 99: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis als Funktion der Volumina der Gehölze Gamma1-3 entsprechend dem Schnittzustand.

Bezüglich Volumen (Abbildung 99) ist pflanzenübergreifend kein Zusammenhang ersichtlich. Bei Gehölz Gamma3 scheint es hier einen exponentiellen Zusammenhang zu geben, dieser ist aber bei den beiden anderen Gehölzen nicht mal annähernd vorhanden. ***MOORE und MAGUIRE (2008)*** haben schon festgestellt, dass das Dämpfungsverhältnis nicht nur von der Masse (und damit auch dem Volumen) abhängig ist. Im Folgenden wird überprüft, ob es einen Zusammenhang zwischen der gewichteten Exzentrizität und des Dämpfungsverältnisses gibt. Die Gegenüberstellung der beiden Parameter zeigt (Abbildung 101), dass dies nicht der Fall ist.

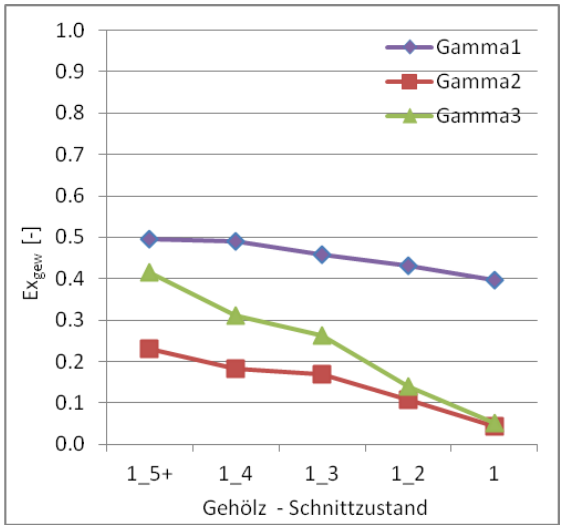


Abbildung 100: Die gewichtete Exzentrizität der Gehölze Gamma1-3 in den verschiedenen Schnittzuständen.

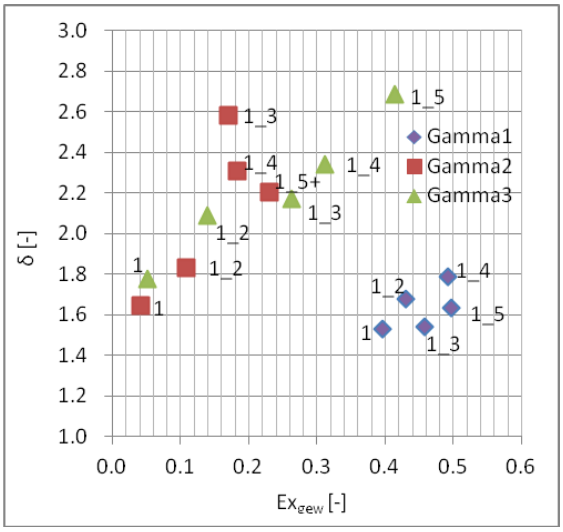


Abbildung 101: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis als Funktion der gewichteten Exzentrizität bei den Gehölzen Gamma1-3 in den Schnittzuständen.

BRÜCHERT und GARDINER (2006) stellten eine 22%-ige Abhängigkeit des Dämpfungsverhältnisses vom Durchmesser-Längenverhältnis fest. Für das Gehölz Gamma3 (Abbildung 103) können diese Ergebnisse nicht bestätigt werden. Bei Gamma1 und Gamma2 gibt es keine Korrelation dieser beiden Parameter.

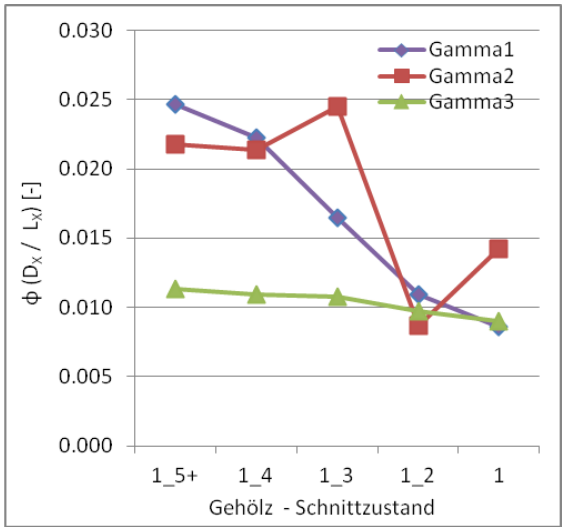


Abbildung 102: Durchschnittliches Durchmesser/Längen-Verhältnis der Gehölze Gamma1-3 in den verschiedenen Schnittzuständen.

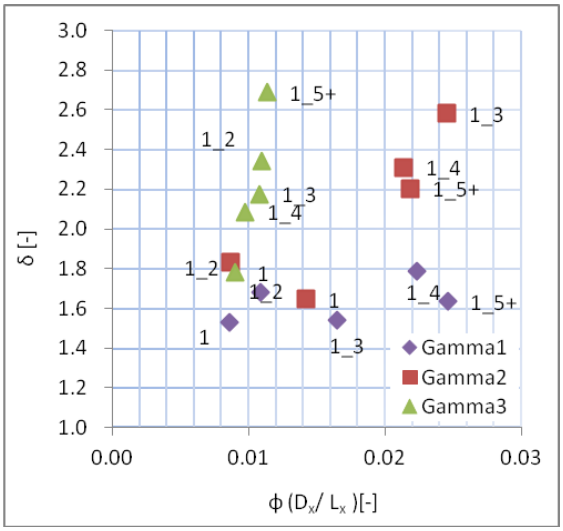


Abbildung 103: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis als Funktion des gemittelten Durchmesser/ Längen-Verhältnisses bei den Gehölzen Gamma1-3 in den Schnittzuständen.

Die Perioden dauerten aufgrund unterschiedlicher Frequenzen bei den Zugversuchen in den verschiedenen Schnittzuständen sehr unterschiedlich lang. Um diese über die Zeit vergleichbar zu machen wurde hier das Dämpfungsverhältnis mit der Dauer jener Schwingungsperioden, welche zur Berechnung des

duchschnittlichen Dämpfungsverhältnisses verwendet wurden, dividiert. In den folgenden bei den Abbildungen wird das Dämpfungsverhältnis mit der Dauer der Perioden zwei bis vier normalisiert.

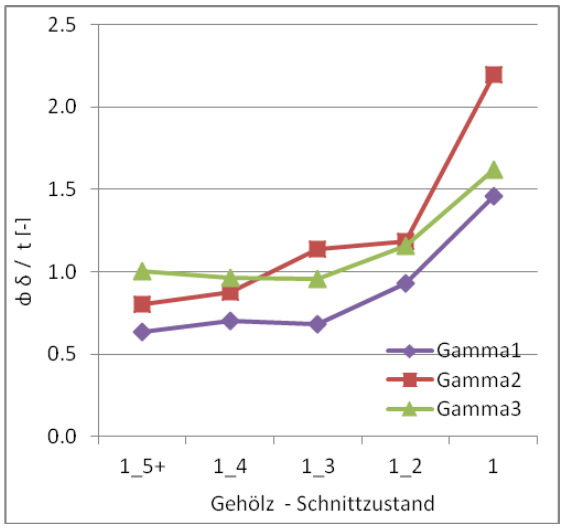


Abbildung 104: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis, normalisiert mit der Dauer der drei Perioden, welche zur Berechnung des durchschnittlichen Dämpfungsverhältnisses herangezogen wurden bei den Gehölzen Gamma1-3 in den verschiedenen Schnittzuständen.

Durch die Normalisierung (**Error! Reference source not found.**) wird das Verhalten von Gamma2, bezüglich des Zugversuchs im Schnittzustand 1_3 erklärt. Das Verhalten des über die Periodendauer normalisierten Dämpfungsverhältnisses war in diesem Fall nicht mehr komplett gegensätzlich, auch wenn diese noch immer stark vom Verhalten der beiden anderen Gehölze abwich. Auf die Schwingungsdauer normalisiert scheint es, als hätten Gamma1 und Gamma2 in den Schnittständen 1 bis 1_4 ähnlich reagiert.

Bemerkenswert ist, dass das Dämpfungsverhältnis auf die Zeit normalisiert spätestens ab dem Schnittzustand 1_2 in den Perioden zwei bis vier bei allen Gehölzen tatsächlich anstieg. D.h. in den ersten Sekunden war bei einem, auf zwei Ordnungen reduzierten Gehölz, die Dämpfung größer. Es muss aber beachtet werden, dass die Gehölze in diesem reduzierten Zustand meist mit geringen Amplituden sehr lange schwankten (mit Ausnahme von Gamma3), bevor diese schließlich zum Stillstand kamen. Trotzdem, die großen Amplituden wurden im Schnittzustand 1_2 und 1 schneller gedämpft. Dies wirft die Frage auf, ob es nicht sinnvoller wäre, das durchschnittliche Dämpfungsverhältnis auf einen Zeitraum bezogen zu berechnen, und nicht auf Basis der Perioden.

Betrachtet man Abbildung 49, stellt man fest, die Schwingungen relativ zur X-Achse wurden mit Fortlauf der Schwingungsdauer relativ gesehen im Vergleich zu den Schwingungen auf der Y-Achse immer größer. In dieser Arbeit wurde die X-Achse komplett vernachlässigt. Dies bringt eine Verzerrung des Ergebnisses mit sich. Das Dämpfungsverhältnis nur aufgrund der Y-Achse zu berechnen mag zwar eine

gewisses Aussagekraft haben, für eine umfassende Interpretation wäre allerdings auch die X-Achse miteinzubeziehen.

In dieser Arbeit konnte kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen einzelnen Parametern der Gehölzarchitektur und dem durchschnittlichen Dämpfungsverhältnis festgestellt werden. Betrachtet man den Verlauf des Dämpfungsverhältnisses über die Rückschnitte hinweg, weisen Gamma1 und Gamma3 Ähnlichkeiten auf, Gamma2 hatte vor allem im Schnittzustand 1_3 ein gegensätzliches Verhalten: Das durchschnittliche Dämpfungsverhältnis stieg in diesem Schnittzustand stark an, während es bei anderen Gehölzes gesunken ist. Es scheint nicht unerheblich zu sein, dass die A°3 bei Gamma2 in Bezug auf die Biomasse dominant war. In diesem Schnittzustand wies Gamma2 auch das größte Durchmesser/Längen-Verhältnis auf. Es scheint auch wichtig zu beachten, dass die Perioden mit jedem Rückschnitt immer kürzer werden und so ein Vergleich der durchschnittlichen Dämpfungsverhältnisse schwierig wird. Das durchschnittliche Dämpfungsverhältnis, normalisiert auf die Periodendauer zur Analyse zu verwenden, könnte sinnvoller sein.

11. Schlussfolgerungen und Ausblick

In Bezug auf die Eigenfrequenz konnte eine Abhängigkeit von der Gehölzcharakteristik nachgewiesen werden, das Ziel der Arbeit wurde diesbezüglich also durchaus erreicht. In Bezug auf das Dämpfungsverhältnis konnten keine definitiven Aussagen getätigt werden. Es konnten jedoch Ansätze gefunden werden, und für zukünftige Arbeiten gibt es Ideen, was verbessert werden kann. Es wurden einige Faktoren vernachlässigt. Der *Polhemus Fastrak* scheint bedingt geeignet, die Schwingungsmessungen durchzuführen, da er mit maximal vier Sensoren bestückt werden kann und die Messauflösung zu gering ist. Es wurde Erfahrung bezüglich der Durchführung solcher Versuche gesammelt. Dies ist ein wertvoller Input für die Zukunft.

Jedes Gehölz hat eine komplexe Struktur. Beim Reduzieren der Charakteristik der Architektur auf einige wenige Parameter gehen Informationen und komplexe Zusammenhänge verloren. Die Zusammenhänge zwischen der Eigenfrequenz bzw. des durchschnittlichen Dämpfungsverhältnisses und der Charakteristik der Architektur scheinen nicht auf einen Parameter beschränkt zu sein.

Bezüglich der Eigenfrequenz konnte ein Zusammenhang zwischen Masse und Frequenz eindeutig nachgewiesen werden. Dennoch kann aus dieser Beziehung noch keine Formel abgeleitet werden. Andere Parameter haben hier noch Einfluss. Weitere Berechnungen könnten angestellt werden, z.B. die Ermittlung des Schwerpunkts, um das Verhalten der Eigenfrequenz noch näher zu untersuchen.

Beim Dämpfungsverhältnis stellen wir fest, dass es sehr komplexen Zusammenhängen unterliegt. Es könnte sinnvoller sein, dieses normalisiert auf die Zeit zu betrachten. Es müsste darüber nachgedacht werden, das durchschnittliche Dämpfungsverhältnis nicht über die Perioden, sondern über die Zeit zu berechnen.

Ein wesentlicher Faktor, die Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, quer zur Zugrichtung, wurde völlig vernachlässigt. Obwohl die X-Achse direkt nach dem Loslassen eine weit geringere Amplitude aufwies, sorgte teilweise eine geringere Dämpfung entlang dieser Achse dafür, dass das Gehölz in dieser Ebene manchmal länger in Bewegung blieb als entlang der Y-Achse (Abbildung 49). Für zukünftige Versuche müsste diese Achse in die Berechnungen miteinbezogen werden.

Auffällig ist die Abweichung des Gehölzes Gamma2 bezüglich Dämpfungsverhältnis im Schnittzustand 1_3 (nach Verlust der A°4) und dessen Abweichung von der A°3 in Bezug auf die Parameter der Architekturcharakteristik. Es wären zusätzliche Untersuchungen notwendig, um festzustellen, ob das Schwingverhalten individueller Achsen mit ihrer Frequenz, Amplitude, aber vor allem ihrem Phasenwinkel und ihrer eigenen Dämpfungskonstante vorausgesagt werden könnten. Eine erste Annäherung dahingehend wären mehr Messsensoren. Obwohl in unseren Versuchen ein Messsensor auf der A°2 montiert war, wurde dieser nicht ausgewertet. Weitere Messpunkte auf weiteren Achsen wären durchaus sinnvoll, um mehr Information über die schwingenden Elemente des Gehölzes zu erhalten. So könnte erfasst werden, mit welchen verschiedenen Phasenwinkeln die einzelnen Elemente schwingen, und so vielleicht eine Erklärung für die strukturelle Dämpfung zu liefern. Allerdings sind der Verwendung des *Polhemus Fastrak* in dieser Hinsicht Grenzen gesetzt. Schon in unseren Versuchen zeigte sich, dass die Messauflösung teilweise zu gering ist. Andere Messinstrumente, wie z.B. die Verwendung von Dehnmessstreifen, erscheinen sinnvoll. Dabei muss auch stets auf die Masse der Sensoren geachtet werden, vor allem im Verhältnis zur tragenden Achse, um die Schwingung des strukturellen Elements, auf dem sie montiert sind, nicht zu beeinflussen.

In dieser Arbeit wurden jeweils zwei Messungen pro Rückschnitt durchgeführt. Oft war eine dieser Messungen nicht brauchbar, weil sie zu stark vom Wind beeinflusst war. Generell war es schwierig, bei geringen Amplituden noch genaue Messungen vorzunehmen und Daten vernünftig auszuwerten. Die Kombination der geringen Messauflösung und der Windeinfluss haben dies schwierig gemacht. Eine völlig windstille Versuchsumgebung, wie z.B. eine Halle, wäre erstrebenswert. Die Versuche fanden über die Jahreszeiten hinweg sehr verteilt statt.

Zu guter Letzt lieferte die Auswertung der Schwingungsdynamik von nur drei Gehölzen zwar erste Ansätze, reicht jedoch nicht aus, um konkretere Aussagen bezüglich Ursachen des Dämpfungsverhältnisses zu tätigen. Mehr Versuchsgehölze wären sinnvoll.

12. Quellenverzeichnis

Das Quellenverzeichnis beinhaltet das Literaturverzeichnis, das Abbildungsverzeichnis, das Tabellenverzeichnis, eine Auflistung der in dieser Arbeit verwendeten Software und das Abkürzungsverzeichnis.

12.1. Literaturverzeichnis

BARTHÉLÉMY, D., CARAGLIO, Y. (2007). Plant architecture: A dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. Annals of Botany, Volume 99, Issue 3, March 2007, 375-407.

BRÜCHERT, F., und GARDINER, B. (2006). The effect of wind exposure on the tree aerial architecture und biomechanics of Sitka spruce (Picea sitchensis, Pinaceae). American Journal of Botany *93*, 1512–1521.

BURNS, D. P., und RUDNICKI, M. (unpublished Paper). The Branch Sway Dynamics of Four Tree Species from Eastern Hardwood Forests.

ELEKEIWECK.AT (2014). "Weiden im Wind", Franz Elek-Eiweck. 1883-1959, http://www.elekeiweck.at/oelgemaelde_bgld/weiden_im_wind.jpg. Abgerufen am 18. 03.2014

ENGLAND, A.H., BAKER, C.J., und SAUNDERSON, S.E.T. (2000). A dynamic analysis of windthrow of trees. Forestry *73*, 225–237.

FLESCH, T.K., und WILSON, J.D. (1999). Wind and remnant tree sway in forest cutblocks. I. Measured winds in experimental cutblocks. Agricultural and Forest Meteorology *93*, 229–242.

FLORINETH, F., KLOID, F., und WEISSTEINER C. (2008). Studienblätter zur Vorlesung Ingenieurbiologie, Studienjahr 2007/2008, (Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Ingenieurbiologie).

FLORINETH, F. (2012). Pflanzen statt Beton, (Berlin: Patzer Verlag).

GODIN, C., und CARAGLIO, Y. (1998). A multiscale model of plant topological structures. Journal of Theoretical Biology *191*, 1–46.

HAGEDORN, P., OTTERBEIN, S., und KELKEL, K. (1987). Technische Schwingungslehre (Berlin [u.a.]: Springer).

JAMES, K. (2003). Dynamic loading of trees. Journal of Arboriculture *29*, 165–171.

KANE, B., und JAMES, K.R. (2011). Dynamic properties of open-grown deciduous trees. Canadian Journal of Forest Research *41*, 321–330.

KERZENMACHER, T., und GARDINER, B. (1998). A mathematical model to describe the dynamic response of a spruce tree to the wind. Trees - Structure and Function *12*, 385–394.

MOORE, J.R., und MAGUIRE, D.A. (2005). Natural sway frequencies and damping ratios of trees: Influence of crown structure. Trees - Structure and Function *19*, 363–373.

MOORE, J.R., und MAGUIRE, D.A. (2008). Simulating the dynamic behavior of Douglas-fir trees under applied loads by the finite element method. Tree Physiology *28*, 75–83.

NETSVETOV, M., und NIKULINA, V. (2010). Seasonal variations of oscillation and vibration parameters of acer platanoides. Dendrobiology *64*, 37–42.

NIKLAS, K.J. (2000). Computing factors of safety against wind-induced tree stem damage. Journal of Experimental Botany *51*, 797–806.

POLHEMUS, E. (2005). 3Space™ Fastrak® User´s Manual (Colchester, VT).

SCHEINOST, W. (2012). 3d – Pflanzendigitalisierung. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur.

SELLIER, D., and FOURCAUD, T. (2005). A mechanical analysis of the relationship between free oscillations of Pinus pinaster Ait. saplings and their aerial architecture. Journal of Experimental Botany *56*, 1563–1573.

SELLIER, D., und FOURCAUD, T. (2009). Crown structure and wood properties:Influence on tree sway and response to high winds. American Journal of Botany *96*, 885–896.

SELLIER, D., FOURCAUD, T., und Lac, P. (2006). A finite element model for investigating effects of aerial architecture on tree oscillations. Tree Physiology *26*, 799–806.

SENSOREX (2014), http://www.sensorex.fr/meggitt/en/portfolio/sx41200-series/ (2014). Sensorex Single axis servo-inclinometer product data sheet. Abgerufen am 17. 03.2014

SPATZ, H.-C., BRÜCHERT, F., und PFISTERER, J. (2007). Multiple resonance damping or how do trees escape dangerously large oscillations? American Journal of Botany *94*, 1603–1611.

SPECK, O. (2003). Field measurements of wind speed and reconfiguration in Arundo donax (Poaceae) with estimates of drag forces. American Journal of Botany *90*, 1253–1256.

SPECK, O., and SPATZ, H.-C. (2004). Damped oscillations of the giant reed Arundo donax (Poaceae). American Journal of Botany *91*, 789–796.

SUTILI, F.J., DENARDI, L., DURLO, M.A., RAUCH, H.P., und WEISSTEINER, C. (2012). Flexural behaviour of selected riparian plants under static load. Ecological Engineering *43*, 85–90.

SUTILI, F. J. (2007). Ingenieurbiologie an Fließgewässern in Südbrasilien. Dissertation. Universität für Bodenkultur.

THECKES, B., DE LANGRE, E., und BOUTILLON, X. (2011). Damping by branching: A bioinspiration from trees. Bioinspiration and Biomimetics *6*.

WIKIMEDIA (2007), http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d4/Damped_oscillation_graph2.svg. Abgerufen am 17. 03.2014.

WIKIPEDIA (2012A), http://de.wikipedia.org/wiki/Hookesches_Gesetz (2012). Hookesches Gesetz. Abgerufen am 17. 03.2014.

WIKIPEDIA (2012B), http://de.wikipedia.org/wiki/Schwingung (2012). gedämpfte harmonische Schwingung. Abgerufen am 17. 03.2014.

WIKIPEDIA (2013) http://en.wikipedia.org/wiki/Extensometer (2013). Extensometer. abgerufen am 17. 03.2014.

ZEH, H. (2007). Ingenieurbiologie. Handbuch Bautypen (Zürich: VDf Hochschulverlag).

12.2. Abbildungsverzeichnis

Sofern nicht anders angegeben, wurden sämtliche Grafiken vom Autor erstellt.

Abbildung 1: Periodische Schwingung, *(HAGEDORN et al., 1987, S. 8)* 8

Abbildung 2: Harmonische Schwingung, *(HAGEDORN et al., 1987, S. 8)* 10

Abbildung 3: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Funktion x(t) bei einer freien gedämpften Schwingung *(WIKIMEDIA, 2007)* 10

Abbildung 4: Schematische Darstellung der Astordnungen: braun – Achse 1. Ordnung (Stamm); grün – Achse 2. Ordnung; schwarz – Achse 3. Ordnung; *(SCHEINOST, W.,2012, S. 17)* 12

Abbildung 5: Unterschiedliche Eigenfrequenzen der Achsen als Voraussetzung für die Übertragung der mechanischen Energie von den höher geordneten Achsen bis zum Hauptstamm *(SPATZ et al., 2007)*. 14

Abbildung 6: Aufnahmeprinzip eines elektromagnetischen Digitalisierungsinstruments *(SCHEINOST, W., 2012, S. 31).* 25

Abbildung 7: Gegossener Betonsockel mit Haltevorrichtung, 09.07.2013. 26

Abbildung 8: Einteilung der Baumkrone in Kreisviertel mit X- und Y-Achsen als Teiler des Kreises, 09.01.2014. 27

Abbildung 9: Einteilung des Gehölzes in Kreisviertel und Höhenklassen, 09.01.2014 28

Abbildung 10: Seilwinde auf Bock zum Spannen des Spagats, 22. 01.2014. 31

Abbildung 11: Verknotung des Spagats am Gehölz Gamma2, 15.04.2013. 32

Abbildung 12: Ungenauigkeiten ergeben durch die Intervalle zwischen den Messungen. Der tatsächliche Wendepunkt kann oft nicht exakt erfasst werden und hängt davon ab, zu welchem exakten Zeitpunkt die Messung durchgeführt wird, 18.03.2014. 33

Abbildung 13: Versuchsgehölz Beta2, drei Sensoren wurden am Gehölz montiert, 07.09.2012..... 33

Abbildung 14: Schematische Darstellung eines Rückschnitts, von links nach rechts: Gehölz bis zur A°4, bis zur A°3, bis zur A°2, die A°1 und die A°1 ohne Spitze, 31.01.2013..... 36

Abbildung 15: Gegenüberstellung Durchmesser zur Länge jeder Achse der Gehölze Gamma1-3..... 41

Abbildung 16: Gegenüberstellung des durchschnittlichen Durchmessers jeder Achse mit deren durchschnittlicher Länge; A°1 bis A°7 für die Gehölze Gamma1-3..... 41

Abbildung 17: Vertikalverteilung der projizierten Flächen der Gehölze Gamma1-3.. 41

Abbildung 18: Vertikalverteilung der Anteile der projizierten Flächen an der Flächenprojektionssumme der Gehölze Gamma1-3. 41

Abbildung 19: Vertikalverteilung der projizierten Flächen der Gehölze Gamma1-3, kumulativ. 42

Abbildung 20: Vertikalverteilung der Anteile der projizierten Flächen der Gehölze Gamma1-3 an der Flächenprojektionssumme des jeweiligen Gehölzes, kumulativ. 42

Abbildung 21: Vertikalverteilung der Volumina der Gehölze Gamma1-3..... 43

Abbildung 22: Vertikalverteilung der Anteile der Volumina der Gehölze Gamma1-3 am jeweiligen Gesamtvolumen..... 43

Abbildung 23: Vertikalverteilung der Volumina der Gehölze Gamma 1-3, kumulativ. 43

Abbildung 24: Vertikalverteilung der Anteile der Volumina der Gehölze Gamma 1-3 am Gesamtvolumen des jeweiligen Gehölzes, kumulativ. 43

Abbildung 25: Vertikalverteilung der Exzentrizität des Wuchses der Gehölze Gamma1-3, gewichtet nach radialer Position, gruppiert nach Kreisvierteln, berechnet anhand der projizierten Flächen. 44

Abbildung 26: Vertikalverteilung der Durchmesser der A°1 der Gehölze Gamma1-3. 44

Abbildung 27: Abbildung der Baumarchitektur von Gamma1, Y-Z-Ebene, 06.12.2013. 45

Abbildung 28: Abbildung der Baumarchitektur von Gamma1, X-Z-Ebene, 06.12.2013. 45

Abbildung 29: Grundriss, Gehölz Gamma1, X-Y-Ebene, 06.12.2013. 45

Abbildung 30: Foto des Gehölzes Gamma1, Ansicht: Y-Z-Ebene; rot markiert sind die Messpunkte, 29.10.2012. 45

Abbildung 31: Frisch- und Trockenmasse der einzelnen Ordnungen und des Blattwerks von Gehölz Gamma1. 46

Abbildung 32: Summierte Gesamtlänge der Achsen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma1. 46

Abbildung 33: Durchschnittliche Achsenlänge der Achsen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma1. 46

Abbildung 34: Anteil der Achsenlängensummen jeder Ordnung an der Achsenlängensumme des gesamten Gehölzes Gamma1. 46

Abbildung 35: Vertikalverteilung der projizierten Flächen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma1. 47

Abbildung 36: Vertikalverteilung der Anteile der projizierten Flächen jeder Ordnung an der Summe der projizierten Flächen des gesamten Gehölzes Gamma1, kumulativ. 47

Abbildung 37: Vertikalverteilung des Volumens jeder Achsenordnung des Gehölzes Gamma1. 47

Abbildung 38: Vertikalverteilung der Anteile der Volumina jeder Achsenordnung am Gesamtvolumen des Gehölzes Gamma1, kumulativ. 47

Abbildung 39: Schwingbewegung des Punktes auf der A°1 auf Höhe 130 cm von oben gesehen, auf der Ebene gebildet durch die X- und Y-Achse, Gehölz Gamma1, Schnittzustand 1_5+B. 49

Abbildung 40: Schwingbewegung des Punktes auf der A°2 auf Höhe 130 cm von oben gesehen, auf der Ebene gebildet durch die X- und Y-Achse, Gehölz Gamma1, Schnittzustand 1_5+B..... 49

Abbildung 41: Frequenz gemessen entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma1, Schnittzustand 1_5+B, Messung (a)..... 50

Abbildung 42: Dämpfungsverhältnis gemessen entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma1, Schnittzustand 1_5+B, Messung (a). 50

Abbildung 43: Frequenz gemessen entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma1, Schnittzustand 1oSp, Messung (b)..... 50

Abbildung 44: Dämpfungsverhältnis entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma1, Schnittzustand 1oSp, Messung (b)..... 50

Abbildung 45: Versuch Gamma1, Schnittzustand 1oSp, Messung (a). 51

Abbildung 46: Durchschnittliche Frequenz (Eigenfrequenz) entlang der Y-Achse, Versuchsreihe Gamma1..... 52

Abbildung 47: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis entlang der Y-Achse, Versuchsreihe Gamma1..... 52

Abbildung 48: Vergleich der Periodendauer: Gesamtes Gehölz mit Blätter in blau - Hauptachse ohne Spitze in grün..... 52

Abbildung 49: Schwingungsdynamik des Gehölzes Gamma1 im Schnittzustand 1_5+B, Messung(a), Abbildung beider Schwingungsebenen überlagert, mit der gleichen Skalierung. 53

Abbildung 50: Gamma2, Abbildung der Baumarchitektur, Y-Z-Ebene, 06.12.2013.. 54

Abbildung 51: Gamma2, Abbildung der Baumarchitektur, X-Z-Ebene, 06.12.2013.. 54

Abbildung 52: Gamma2, Grundriss, X-Y-Ebene, 06.12.2013. 55

Abbildung 53: Versuchsgehölz Gamma2, rot markiert die Messpunkte, 15.04.2013.55

Abbildung 54: Frisch- und Trockenmasse des Gehölzes Gamma2 verteilt auf die Ordnungsklassen. 55

Abbildung 55: Gesamtlänge aller Achsen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma2. . 55

Abbildung 56: Durchschnittliche Achsenlänge der Achsen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma2. 56

Abbildung 57: Anteil der Achsenlängensumme jeder Ordnung an der Achsenlängensumme des gesamten Gehölzes Gamma2. 56

Abbildung 58: Vertikalverteilung der projizierten Flächen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma2. 57

Abbildung 59: Vertikalverteilung der Anteile der projizierten Flächen jeder Ordnung an der Flächenprojektion des gesamten Gehölzes Gamma2, kumulativ. 57

Abbildung 60: Vertikalverteilung der Volumina jeder Achsenordnung des Gehölzes Gamma2. 57

Abbildung 61: Vertikalverteilung der Anteile der Volumina jeder Achsenordnung am Volumen des gesamten Gehölzes Gamma2, kumulativ. 57

Abbildung 62: Schwingbewegung des Punktes auf der A°1 auf Höhe 115 cm von oben gesehen, auf der Ebene gebildet durch die X- und Y-Achse, Gehölz Gamma 2, Schnittzustand 1_5+. 58

Abbildung 63: Schwingbewegung des Punktes auf der A°2 auf Höhe 115 cm von oben gesehen, auf der Ebene gebildet durch die X- und Y-Achse, Gehölz Gamma, Schnittzustand 1_5+. 58

Abbildung 64: Frequenz gemessen entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2, Schnittzustand 1_5+. 59

Abbildung 65: Dämpfungsverhältnis entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2, Schnittzustand 1_5+. 59

Abbildung 66: Frequenz gemessen entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2, Schnittzustand 1. 59

Abbildung 67: Dämpfungsverhältnis entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2, Schnittzustand 1. 59

Abbildung 68: Durchschnittliche Frequenz entlang der Y-Achse, Versuchsreihe Gamma2. 60

Abbildung 69: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis entlang der Y-Achse, Versuchsreihe Gamma2. 60

Abbildung 70: Gamma3, Abbildung der Baumarchitektur, Y-Z-Ebene, 06.12.2013.. 61

Abbildung 71: Gamma3, Abbildung der Baumarchitektur, X-Z-Ebene, 06.12.2013.. 61

Abbildung 72: Gehölz Gamma3, Grundriss, X-Y-Ebene, 06.12.2013. 61

Abbildung 73: Gehölz Gamma3, entlaubt, rot markiert die Messpunkte, 09.07.2013. 61

Abbildung 74: Frisch- und Trockenmasse des Gehölzes Gamma3 verteilt auf die Ordnungsklassen und das Blattwerk. 62

Abbildung 75: Gesamtlänge aller Achsen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma3. . 62

Abbildung 76: Durchschnittliche Achsenlänge der Achsen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma3. 63

Abbildung 77: Anteil der Achsenlängensumme jeder Ordnung an der Summe der Achsenlängen des gesamten Gehölzes Gamma3. 63

Abbildung 78: Vertikalverteilung der projizierten Flächen jeder Ordnung des Gehölzes Gamma2. 63

Abbildung 79: Vertikalverteilung der Anteile der projizierten Flächen jeder Ordnung an der Flächenprojektion des gesamten Gehölzes Gamma2, kumulativ. 63

Abbildung 80: Vertikalverteilung des Volumens jeder Achsenordnung des Gehölzes Gamma3. 64

Abbildung 81: Vertikalverteilung der Anteile der Volumina jeder Achsenordnung am Volumen des gesamten Gehölzes Gamma3, kumulativ. 64

Abbildung 82: Schwingbewegung des Punktes auf der A°1 auf Höhe 130 cm von oben gesehen, auf der Ebene gebildet durch die X- und Y-Achse, Gehölz Gamma3, Schnittzustand 1_5+B, Messung (a). 65

Abbildung 83: Schwingbewegung des Punktes auf der A°2 auf Höhe 115 cm von oben gesehen, auf der Ebene gebildet durch die X- und Y-Achse, Gehölz Gamma3, Schnittzustand 1_5+B, Messung (a). 65

Abbildung 84: Frequenz gemessen entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma3, Schnittzustand 1_5+B, Messung (b). 66

Abbildung 85: Dämpfungsverhältnis entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma3 Schnittzustand 1_5+B, Messung (b). 66

Abbildung 86: Frequenz gemessen entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma3, Schnittzustand 1oSp, Messung (a). 66

Abbildung 87: Dämpfungsverhältnis entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma3, Schnittzustand 1oSp, Messung (a). 66

Abbildung 88: Schwingungsmessung entlang der Y-Achse des Gehölzes Gamma3 im Schnittzustand 1oSp, Messung (a). 67

Abbildung 89: Schwingungsmessung entlang der X-Achse des Gehölzes Gamma3 im Schnittzustand 1oSp, Messung (a). 67

Abbildung 90: Durchschnittliche Frequenz entlang der Y-Achse, Versuchsreihe Gamma3. 67

Abbildung 91: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis entlang der Y-Achse, Versuchsreihe Gamma3. 67

Abbildung 92: Eigenfrequenz der Gehölze Gamma1-3 in den einzelnen Schnittzuständen. 68

Abbildung 93: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis der Gehölze Gamma1-3 in den einzelnen Schnittzuständen. 68

Abbildung 94: Eigenfrequenz als Funktion der Volumina bei verschiedenen Schnittzuständen der Gehölze Gamma1-3. 69

Abbildung 95: Eigenfrequenz als Funktion der Frischbiomasse bei verschiedenen Schnittzuständen der Gehölze Gamma1-3. 69

Abbildung 96: Anteile der Biomasse jeder Ordnung bzw. des Blattwerks an der Biomasse des gesamten Gehölzes; Gehölze Gamma1-3. 70

Abbildung 97: Dämpfungsverhältnis als Funktion der Frequenz der Gehölze Gamma 1-3 mit den einzelnen Schnittzuständen als Datenpunkte. 71

Abbildung 98: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis als Funktion der projizierten Flächen der Gehölze Gamma1-3 entsprechend dem Schnittzustand. 72

Abbildung 99: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis als Funktion der Volumina der Gehölze Gamma1-3 entsprechend dem Schnittzustand. 72

Abbildung 100: Die gewichtete Exzentrizität der Gehölze Gamma1-3 in den verschiedenen Schnittzuständen. 73

Abbildung 101: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis als Funktion der gewichteten Exzentrizität bei den Gehölzen Gamma1-3 in den Schnittzuständen. 73

Abbildung 102: Durchschnittliches Durchmesser/Längen-Verhältnis der Gehölze Gamma1-3 in den verschiedenen Schnittzuständen. 73

Abbildung 103: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis als Funktion des gemittelten Durchmesser/ Längen-Verhältnisses bei den Gehölzen Gamma1-3 in den Schnittzuständen. 73

Abbildung 104: Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis, normalisiert mit der Dauer der drei Perioden, welche zur Berechnung des durchschnittlichen Dämpfungsverhältnisses herangezogen wurden bei den Gehölzen Gamma1-3 in den verschiedenen Schnittzuständen. 74

Abbildung 105: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1_5+B, Messung (b). 101

Abbildung 106: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1_5+B, Messung (b). 101

Abbildung 107: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1_5, Messung (b). 101

Abbildung 108: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1_5, Messung (b). 101

Abbildung 109: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1_4, Messung (b). 102

Abbildung 110: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1_4, Messung (b). 102

Abbildung 111: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1_3, Messung (b). 102

Abbildung 112: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1_3, Messung (b). 102

Abbildung 113: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1_2, Messung (b). 103

Abbildung 114: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1_2, Messung (b). 103

Abbildung 115: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1, Messung (b). 103

Abbildung 116: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1, Messung (b). 103

Abbildung 117: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1oSp, Messung (b). 104

Abbildung 118: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1oSp, Messung (b). 104

Abbildung 119: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma1 im Schnittzustand 1_5+B, Messung (a). 105

Abbildung 120: : Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma1 im Schnittzustand 1_5+B, Messung (a). 105

Abbildung 121: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma1 im Schnittzustand 1_5, Messung (b). 105

Abbildung 122: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma1 im Schnittzustand 1_5, Messung (b). 105

Abbildung 123: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma1 im Schnittzustand 1_4, Messung (b). 106

Abbildung 124: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma1 im Schnittzustand 1_4, Messung (b). 106

Abbildung 125: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma1 im Schnittzustand 1_3, Messung (b). 106

Abbildung 126: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma1 im Schnittzustand 1_3, Messung (b). 106

Abbildung 127: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma1 im Schnittzustand 1_2, Messung (b). 107

Abbildung 128: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma1 im Schnittzustand 1_2, Messung (b). 107

Abbildung 129: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma1 im Schnittzustand 1, Messung (b). 107

Abbildung 130: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma1 im Schnittzustand 1, Messung (b). 107

Abbildung 131: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma1 im Schnittzustand 1oSp, Messung (b). 108

Abbildung 132: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma1 im Schnittzustand 1oSp, Messung (b). 108

Abbildung 133: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_5, Messung (b). 109

Abbildung 134: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_5, Messung (b). 109

Abbildung 135: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_4, Messung (b). 109

Abbildung 136: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_4, Messung (b). 109

Abbildung 137: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_3, Messung (b). 110

Abbildung 138: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_3, Messung (b). 110

Abbildung 139: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_2, Messung (b). 110

Abbildung 140: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_2, Messung (b). 110

Abbildung 141: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1, Messung (b). 111

Abbildung 142: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1, Messung (b). 111

Abbildung 143: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_5+B, Messung (b). 112

Abbildung 144: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_5+B, Messung (b). 112

Abbildung 145: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_5, Messung (b). 112

Abbildung 146: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_5, Messung (b). 112

Abbildung 147: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_4, Messung (a). 113

Abbildung 148: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_4, Messung (a). 113

Abbildung 149: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_3, Messung (a). 113

Abbildung 150: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_3, Messung (a). 113

Abbildung 151: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_2, Messung (b). 114

Abbildung 152: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_2, Messung (b). 114

Abbildung 153: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1, Messung (a). 114

Abbildung 154: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1, Messung (a). 114

Abbildung 155: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1oSp, Messung (a). 115

Abbildung 156: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Gamma2 im Schnittzustand 1oSp, Messung (a). 115

12.3. Tabellenverzeichnis

Alle Tabellen wurden vom Autor erstellt.

Tabelle 1: Abkürzungen zu den Achsenbezeichnungen 12

Tabelle 2: Arbeitsplan mit Zeitrahmen und am Arbeitsschritt teilnehmenden Personen 23

Tabelle 3: Übersicht über die Schnittzustände, die sich durch den Rückschnitt ergeben 36

Tabelle 4: Basisparameter der Gehölze Gamma 1-3: Pflanzenhöhe h_{tot}, Durchschnittlicher Durchmesser ϕD_X, Durchmesser des Hauptstamms an der Basis $D_{0.0}$, Durchmesser des Hauptstamms auf Brusthöhe (1.3m) $D_{1.3}$, Kronenbereite C_b, Kronenhöhe C_h, gesamte projizierte Fläche aller Achsen A_p, Volumen des Gehölzes V_p, Achsenlängensumme $\Sigma L_{x..}$ 39

Tabelle 5: Normalisierte Parameter der Gehölze Gamma 1-3. 40

Tabelle 6: Zugversuche Gamma1 48

Tabelle 7: Zugversuche Gamma2 58

Tabelle 8: Zugversuche Gamma3 65

Tabelle 10: Parameter der Gehölzcharakteristik, Details 98

Tabelle 11: Versuche Beta2 99

Tabelle 12: Versuche Gamma1 99

Tabelle 13: Versuche Gamma2 100

Tabelle 14: Versuche Gamma3 100

12.4. Verwendete Software

PiafDigit; Version 1.1.1; © DONES, N.;ADAM B.; SINOQUET H.;

FTGui; Graphical User Interface for Polhemus Fastrak; © Polhemus

XPLO; Version 0.9; GRIFFON S. Et. Al,© 2008-2011

Microsoft Excel 2007; © Microsoft Corporation

12.5. Abkürzungsverzeichnis

Im Folgenden werden die Abkürzungen erklärt, die in dieser Arbeit verwendet wurden.

Tabelle 9: Abkürzungen

T [t]	Schwingungsdauer
T [t]	Zeit, Zeitpunkt
φ [rad]	Phasenwinkel
F [Hz]	Frequenz
ω [s^{-1}]	Kreisfrequenz
$\hat{x}$ [cm]	Amplitude
max [cm]	Maximum (oberer Wendepunkt)
min [cm]	Minimum (unterer Wendepunkt)
C_0, C, S [-]	FOURIERkoeffizienten
$\bar{x}$ [cm]	Arithmetisches Mittel des Minimums und Maximums
d [-]	Dämpfungskonstante
m [g]	Masse
δ [-]	Dämpfungsverhältnis
ϕ	Durchschnitt, arithmetisches Mittel
D_X [cm]	Durchmesser einer Achse an deren Basis
h [cm]	Höhe
C_b [cm]	Kronenbreite
C_h [cm]	Kronenhöhe
Ex_{gew} [-]	Gewichtete Exzentrizität
A_{gew} [-]	Flächenprojektion, gewichtet nach der radialen Position
K4tel	Kreisviertel
K4tel_HK	Kreisviertel innerhalb einer Höhenklasse
HK	Höhenklasse
A_{Seg} [cm²]	Projizierte Fläche eines Achsensegments
r_pos_{Seg} [cm]	Radiale Position eines Segments
r_max [cm]	Maximalradius
Σ	Summe
$h_{_tot}$ [cm]	Gesamthöhe des Gehölzes
ϕ δ [-]	Durchschnittliches Dämpfungsverhältnis (berechnet aus den Perioden 2-4)
ϕ F [Hz]	Eigenfrequenz, durchschnittliche Frequenz (berechnet aus den Perioden 2-4)
A_p [cm²]	Projizierte Flächen der Achsen des Gehölzes
V_p [cm³]	Volumen des Gehölzes
M_f [g]	Biomasse im frischen Zustand
M_t [g]	Biomasse im getrockneten Zustand
L_X [cm]	Achsenlänge
$D_{1.3}$ [cm]	Durchmesser des Hauptstammes auf Brusthöhe (1.3 Meter)
$D_{0.0}$ [cm]	Durchmesser des Hauptstammen an der Basis
$[]_{_tot}$	Fußnote [tot] bedeutet immer des gesamten Gehölzes, meist angegeben im Rahmen einer Anteilsberechnung

13. Anhang

Im Anhang werden Details zu den einzelnen Versuchen dargelegt. Zu Beginn wird eine kurze Übersicht über die Versuchsreihen geben. Es werden detailliertere Tabellen zur Gehölzcharakteristik und zu den Schwingungsmessungen gezeigt. Anschließend werden die Abbildungen bezüglich Frequenz und Dämpfungsverhältnis für alle Messungen, die zur Analyse verwendet wurden, dargestellt.

Folgende Versuchsreihen wurden durchgeführt:

Alpha1

Diese Versuchsreihe war eine erste Annäherung und dient der Entwicklung der Methodik. Es liegen keine Ergebnisse dazu vor. Die Versuchsreihe Alpha1 wurde im Juli 2012 bei etwa 25°C bis 30°C, schönem Wetter und leichten Wind durchgeführt.

Beta1

Die Versuchsreihe Beta1 war ein Vorversuch um die Methodik für die Versuche zu testen und zu verfeinern. Es wurden noch keine vollständigen Aufzeichnungen gemacht, deshalb gibt es in dieser Arbeit auch keine Statistik dazu. Der Ablauf der Messung wurde geprobt. Das Programm ***FTGUI***, eine Software, die zum *Polhemus Fastrak* gehört, wurde zum Aufzeichnen der Schwingungen verwendet. Der Datenoutput wurde analysiert. Die Methodik des Rückschnitts des Gehölzes wurde entwickelt. Versuchsreihe Beta1 fand am 5. September 2012. Es war ein windstiller, sonniger Tag bei etwa 25°C.

Beta2

Die war die erste vollständige Versuchsreihe, bei der ein systematischer Rückschnitt vom Blattwerk bis zur A°1 durchgeführt wurde und auch die Massen der einzelnen Achsen gemessen wurden. Es wurde noch keine Architekturaufnahme durchgeführt. Die Schwingungsmessungen sind grundsätzlich vollständig. Es gab jedoch teilweise Schwierigkeiten mit dem Output der Software ***FTGUI***. Methoden wurden erprobt, um diese Schwierigkeiten zu beseitigen. Die Messdaten wurden in Excel-Listen transferiert, wo die Daten ausgewertet werden. Erste Abbildungen der Schwinungen

wurden erstellt. Versuchsreihe Beta2 wurde am 9. September 2012 durchgeführt. Es war ein windruhiger Tag bei etwa 20°C.

Gamma1

Bei diesem Gehölz wurde erstmalig eine vollständige Architekturaufnahme mit dem *Polhemus Fastrak* mittels der Software ***PIAFDIGIT*** durchgeführt. Die komplette Versuchsreihe Gamma (1-3) wurde zur Auswertung der Ergebnisse und Interpretation in dieser Arbeit verwendet. Versuchsreihe Gamma1 wurde am 5. und 6. Oktober 2012 durchgeführt. Die Architekturaufnahme erfolgte am 5. Oktober nachmittags. Die Zugversuche mit den Schwingungsmessungen wurden am 6. Oktober vormittags durchgeführt. Es herrschte sanfter, sporadischer Wind, die Temperatur lag bei etwa 12°C.

Gamma2

Versuchsreihe Gamma2 wurde am 16. April 2013 durchgeführt. Es herrschte mäßiger Wind, die Temperatur betrug etwa 20°C. Der Blattaustrieb hatte noch nicht eingesetzt, deshalb fehlen bei diesem Gehölz auch Schwingungsmessungen zum Schnittzustand „1_5+B“. Da bei diesem Gehölz die Spitze abgebrochen war, wurden keine Versuche im Schnittzustand „1oSp“ durchgeführt.

Gamma3

Versuchsreihe Gamma3 wurde am 10. Juli 2013 durchgeführt. Es war ein windruhiger Tag, die Temperatur betrug ca. 25°C.

Tabelle 10: Parameter der Gehölzcharakteristik, Details

Gehölz		Spitze	1°A	2°A	3°A	4°A	5°A+	Blattwerk	Gesamt
(Beta2)									
	Gesamtlänge [cm]	90	270	k.A	k.A	k.A	k.A	-	
	Durchschn. Durchmesser [cm]		k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A
	Masse frisch [g]	21	524	298	211	85	52	175	1360
	Masse trocken [g]		384	189	92	52	32	122	870
(Gamma1)									
	Gesamtlänge [cm]	90	266.9	995.4	2004.9	2206.9	1740.4		6872.39
	Durchschn. Durchmesser.[cm]		0.941	0.306	0.219	0.200	0.202	-	0.216
	Masse frisch [g]	19	427	176	100	51	25	89	868
	Masse trocken [g]		273	108	60	30	14	50	535
(Gamma2)									
	Gesamtlänge [cm]		154.7	916.9	1349.4	1114.9	414.2	-	3950.1
	Durchschn. Durchmesser.(cm)		1.173	0.389	234	0.177	0.134	-	0.256
	Masse frisch [g]		212	136	66	29	6	-	449
	Masse trocken [g]		130	78	37	14	2	-	261
(Gamma3)									
	Gesamtlänge [cm]	100	299.0	1536.4	3309.1	3823.3	2132.9		11100.7
	Durchschn. Durchmesser [cm]		0.877	0.301	0.234	0.205	0.226		0.223
	Masse frisch [g]	34	549	302	172	98	37	260	1418
	Masse trocken [g]	18	331	178	100	58	23	228	918
	DBh [cm]		1.9						

Schwingungsmessungen

Die folgenden tabellarischen Darstellungen der einzelnen Versuchsschritte jedes Gehölzes zeigen die durchschnittliche Frequenz und das Dämpfungsverhältnis, sowie das Zeitintervall der zweiten bis vierten Periode, die Zugkraft die auf das Gehölz wirkte sowie die Zugdistanz. Die Spalte Messdatei gibt Auskunft darüber, welche der beiden Messungen zur Auswertung verwendet wurde. Grundsätzlich sind jeweils zwei Messungen nach jedem Rückschnitt vorhanden.

Tabelle 11: Versuche Beta2

Versuch	Frequenz	Dämpfung	Zeitdauer	Zugkraft	Zugdistanz	Messdatei
1_5+B	0.76	1.95	3.95	115.76	-14.24	beta2.1b
1_5+	1.11	1.51	2.73	96.53	-14.33	beta2.2b
1_4	1.12	1.54	2.70	96.14	-14.44	beta2.4b
1_3	1.34	1.59	2.25	103.59	-15.10	beta2.4b
1_2	1.77	1.80	1.70	93.00	-14.23	beta2.5b
1	5.48	3.47	0.55	101.73	-14.75	beta2.6b
1_oSp	6.00	1.58	0.53	93.20	-14.30	beta2.7b
Gesamt	**2.51**	**1.92**				

Tabelle 12: Versuche Gamma1

Versuch	Frequenz	Dämpfung	Zeitdauer	Zugkraft	Zugdistanz	Messdatei
1_5+B*	0.90	1.73	3.40			gamma1.1a
1_5+	1.16	0.81	2.58			gamma1.2b
1_4	1.19	0.78	2.55			gamma1.3b
1_3	1.33	0.77	2.25			gamma1.4b
1_2	1.69	0.82	1.80			gamma1.5b
1	2.86	0.74	1.05			gamma1.6b
1_oSp	3.82	0.78	0.80			gamma1.7b
Gesamt	**1.85**	**0.92**				

*: gamma1.1b war zur stark windbeeinflusst, deshalb wurde hier gamma1.1a verwendet. Die Messung gamma1.6a war fehlerhaft und nicht verwendbar.

Tabelle 13: Versuche Gamma2

Versuch	Frequenz	Dämpfung	Zeitdauer	Messdatei
1_5+B				
1_5+	1.09	2.20	2.75	gamma2.2a
1_4	1.14	2.31	2.63	gamma2.3a
1_3	1.33	2.58	2.28	gamma2.4a
1_2	1.94	1.83	1.55	gamma2.5a
1	4.00	1.64	0.75	gamma2.6a
1_oSp				
Gesamt	**1.90**	**2.11**		

Zur Berechnung wurden ausschließlich die Messdaten der Versuchsreihe (b) herangezogen. Es wurden keine Zugversuche im Schnittzustand 1_5+B durchgeführt, weil der Blattaustrieb noch nicht eingesetzt hatte. Es wurden keine Zugversuche im Schnittzustand 1_oSp durchgeführt, weil die Spitze abgebrochen war.

Tabelle 14: Versuche Gamma3

Versuch	Frequenz	Dämpfung	Zeitdauer	Messdatei
1_5+B	0.76	3.91	4.00	gamma3.1b
1_5+	1.13	2.69	2.68	gamma3.2b
1_4	1.25	2.34	2.43	gamma3.3a
1_3	1.32	2.17	2.28	gamma3.4a
1_2	1.67	2.09	1.80	gamma3.5b
1	2.73	1.78	1.10	gamma3.6a
1_oSp	3.33	2.03	0.90	gamma3.7a
Gesamt	**1.74**	**2.43**		

Einige Messungen waren windbeeinflusst, deshalb wurden immer die jeweils besseren Messungen verwendet.

Schwingungsmessungen

Beta2

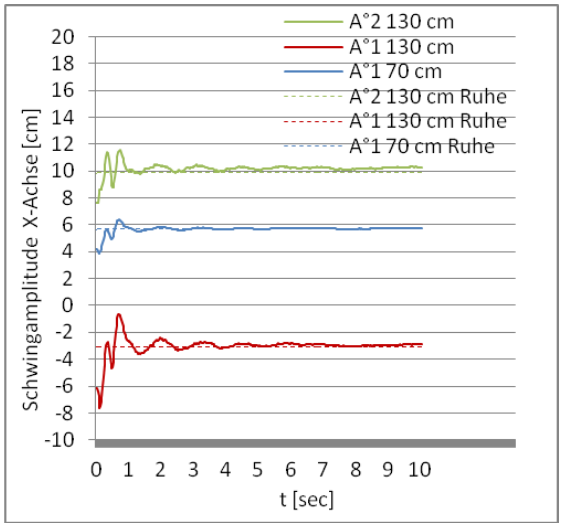


Abbildung 105: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1_5+B, Messung (b).

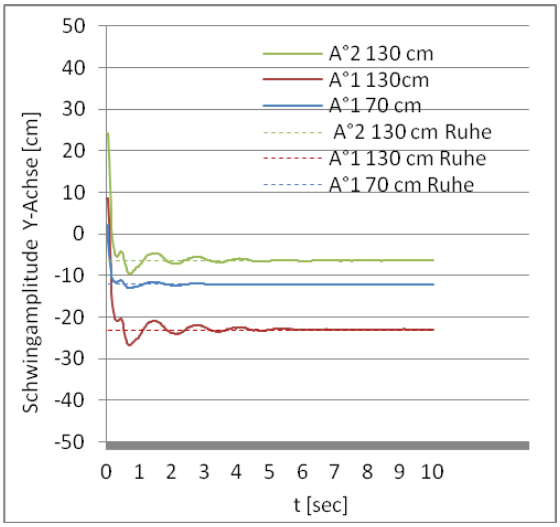


Abbildung 106: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1_5+B, Messung (b).

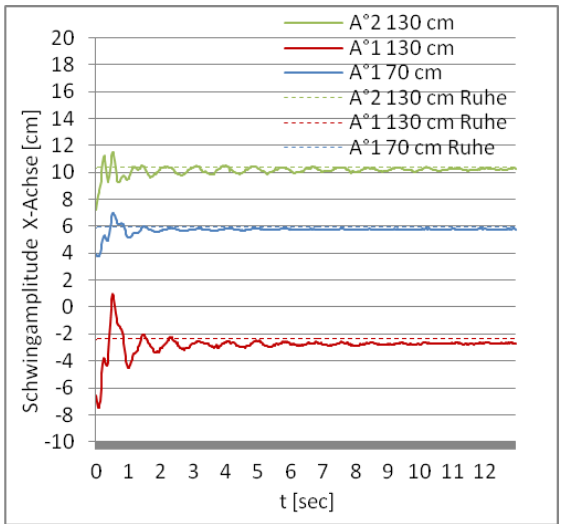


Abbildung 107: Schwingungsdynamik entlang der X-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1_5, Messung (b).

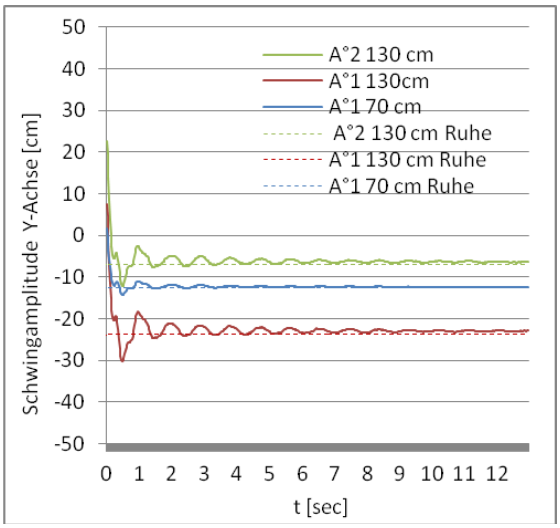


Abbildung 108: Schwingungsdynamik entlang der Y-Achse, Gehölz Beta2 im Schnittzustand 1_5, Messung (b).

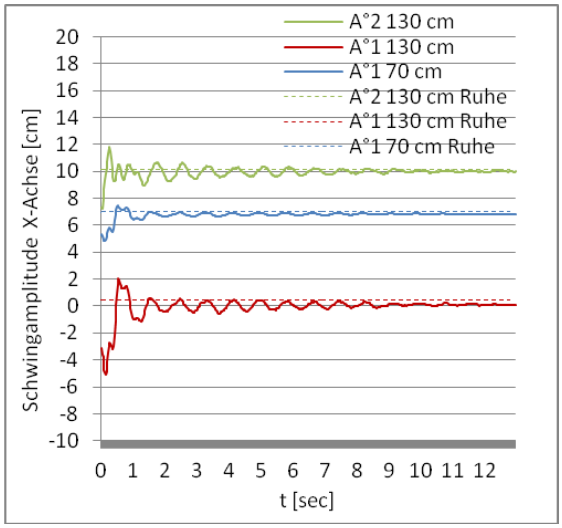


Abbildung 109: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, Gehölz Bet a2 im Schnittzustand 1_4, Messung (b).

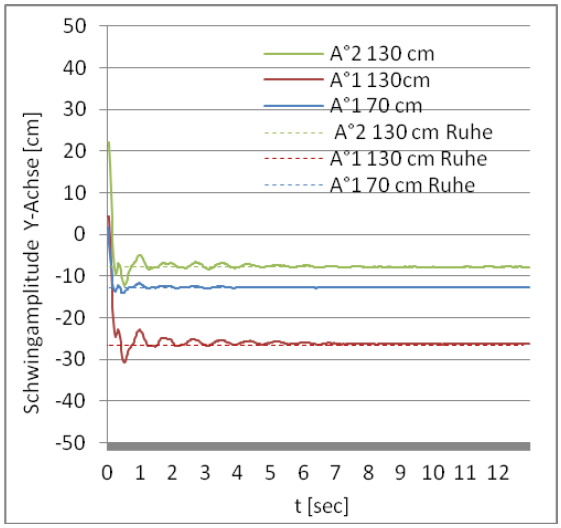


Abbildung 110: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, Gehölz Bet a2 im Schnittzustand 1_4, Messung (b).

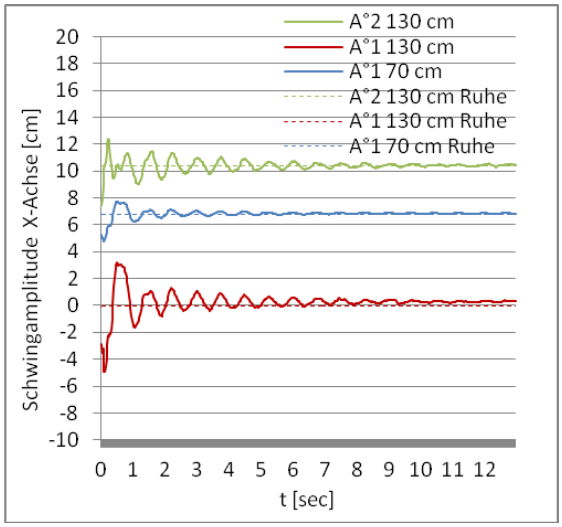


Abbildung 111: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, Gehölz Bet a2 im Schnittzustand 1_3, Messung (b).

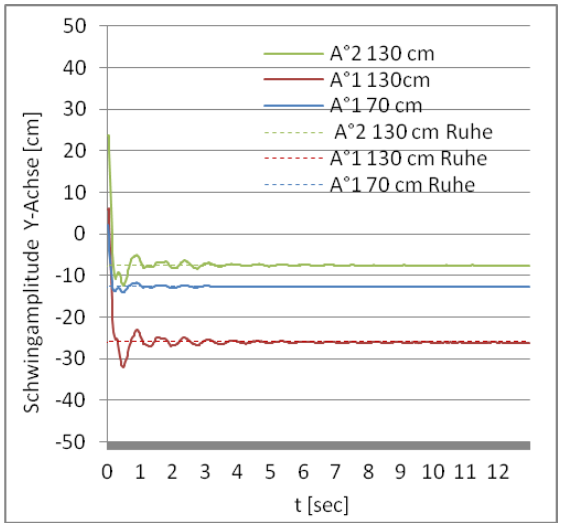


Abbildung 112: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, G ehölz Bet a2 im Schnittzustand 1_3, Messung (b).

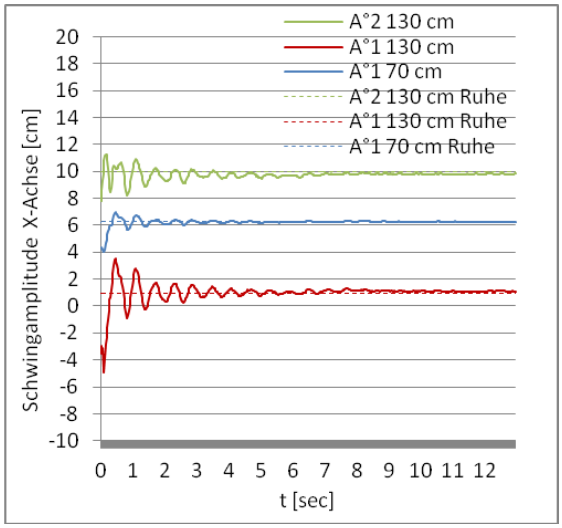


Abbildung 113: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, Gehölz Bet a2 i m Schnittzustand 1_2, Messung (b).

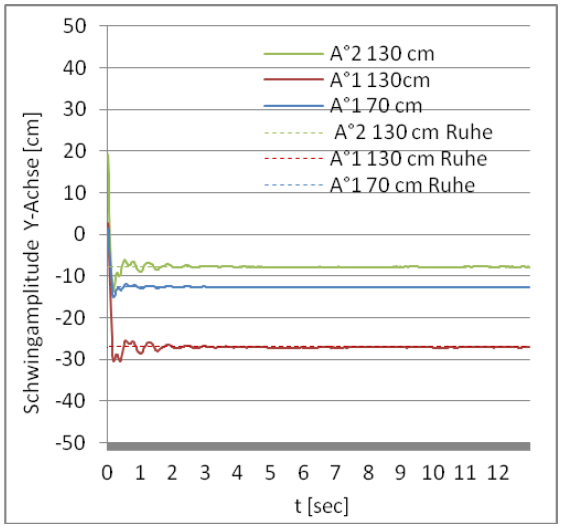


Abbildung 114: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, Gehölz Bet a2 im Schnittzustand 1_2, Messung (b).

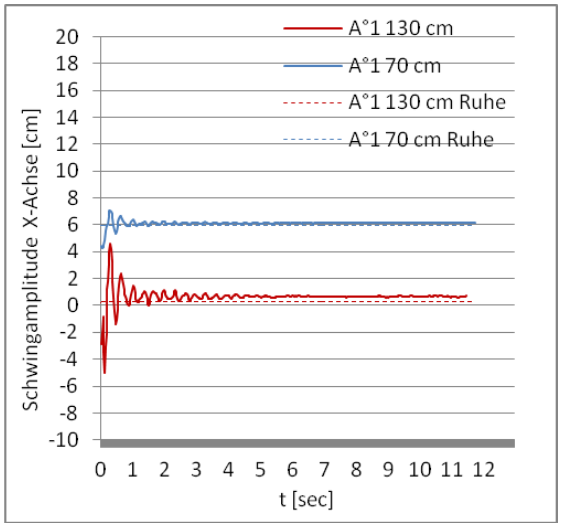


Abbildung 115: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, Gehölz Bet a2 im Schnittzustand 1, Messung (b).

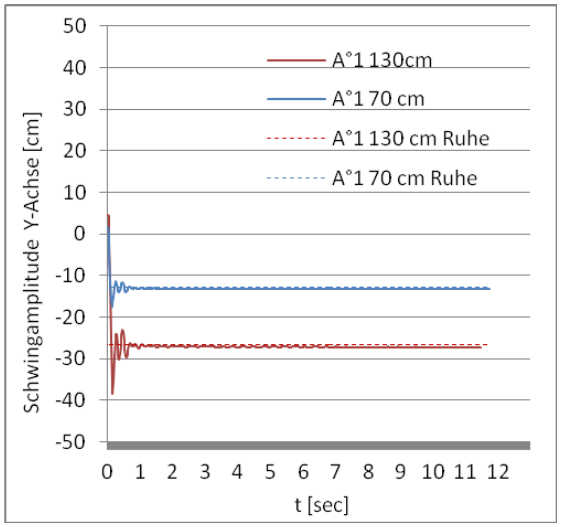


Abbildung 116: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, G ehölz Bet a2 im Schnittzustand 1, Messung (b).

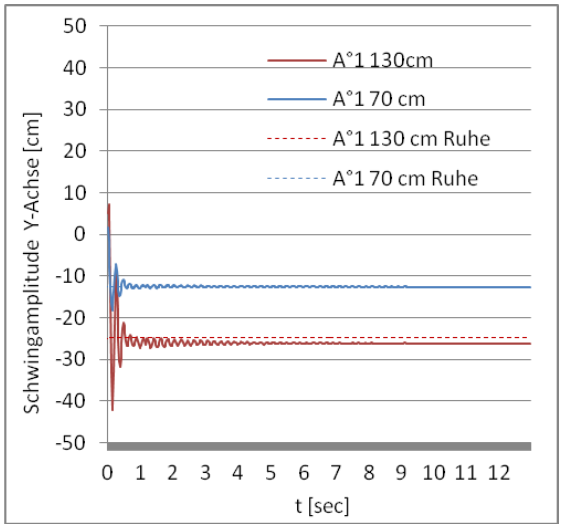


Abbildung 117: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, Gehölz Bet a2 im Schnittzustand 1oSp, Messung (b).

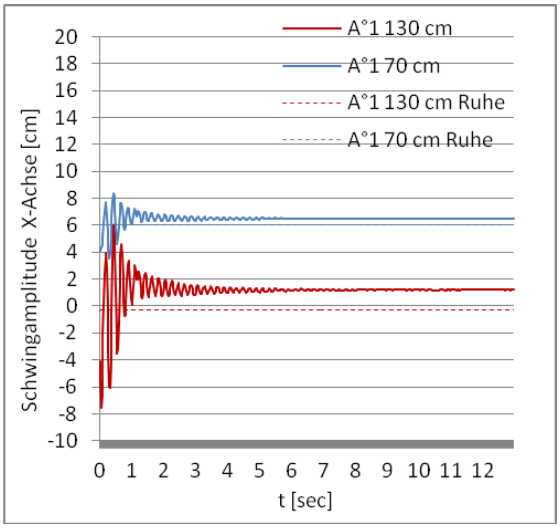


Abbildung 118: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, Gehölz Bet a2 im Schnittzustand 1oSp, Messung (b).

Gamma1

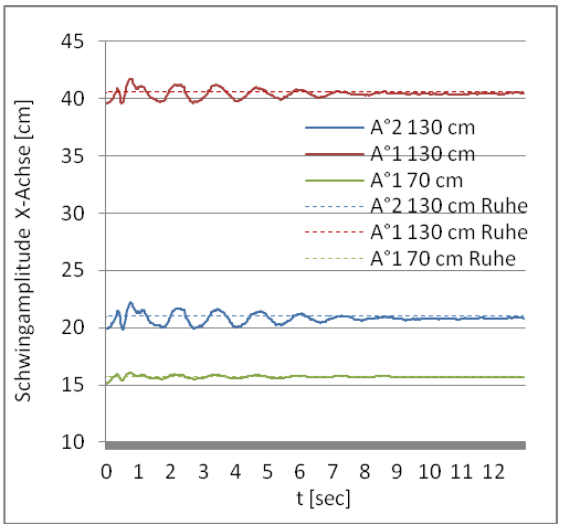


Abbildung 119: S chwingungsdynamik entlang d er X -Achse, Gehölz G amma1 im Schnittzustand 1_5+B, Messung (a).

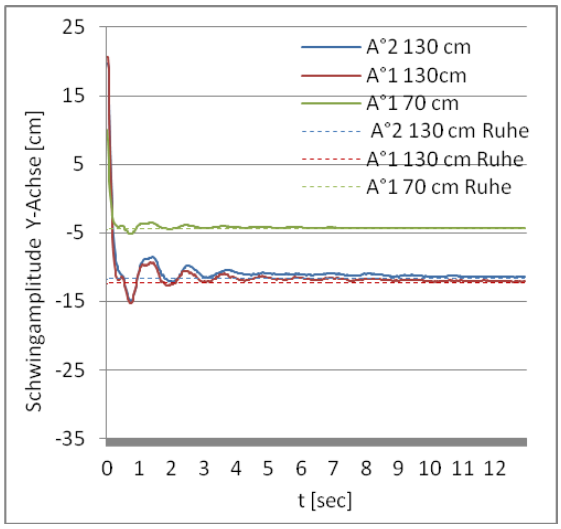


Abbildung 120: : S chwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, Gehölz G amma1 im Schnittzustand 1_5+B, Messung (a).

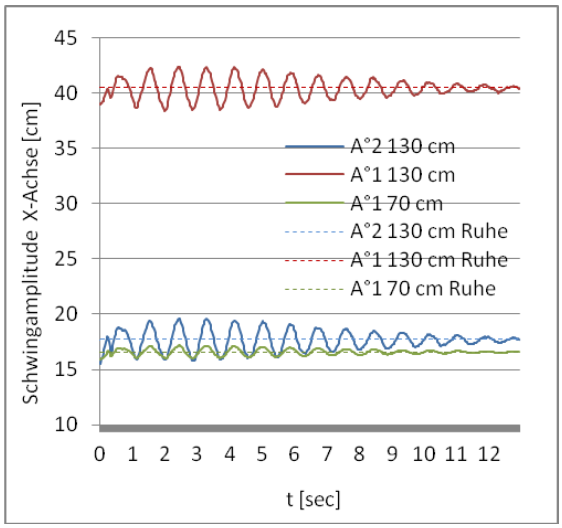


Abbildung 121: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, Gehölz G amma1 im Schnittzustand 1_5, Messung (b).

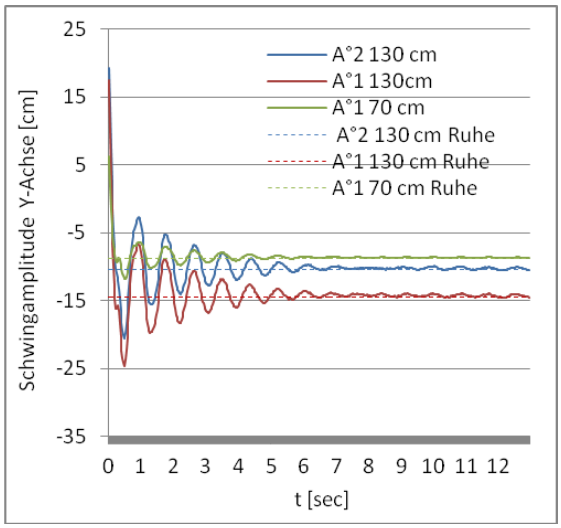


Abbildung 122: Schwingungsdynamik entlang d er Y-Achse, Gehölz G amma1 im Schnittzustand 1_5, Messung (b).

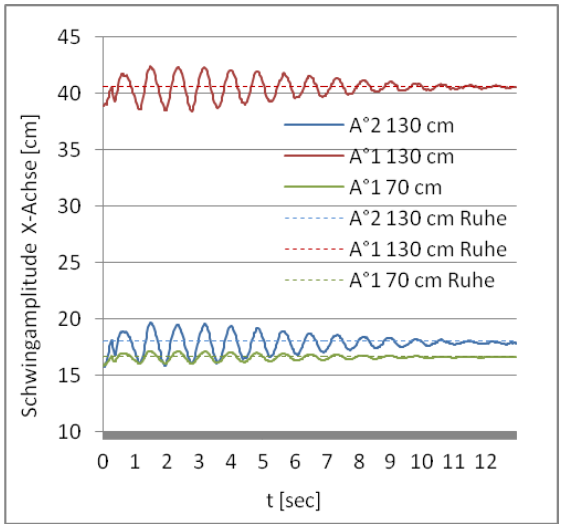


Abbildung 123: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, Gehölz G amma1 im Schnittzustand 1_4, Messung (b).

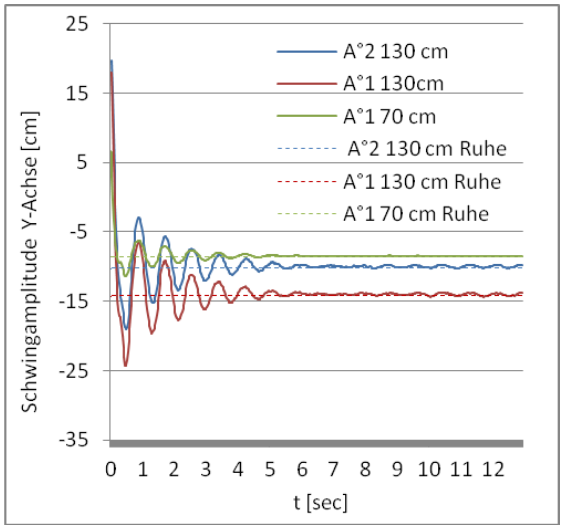


Abbildung 124: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, G ehölz G amma1 im Schnittzustand 1_4, Messung (b).

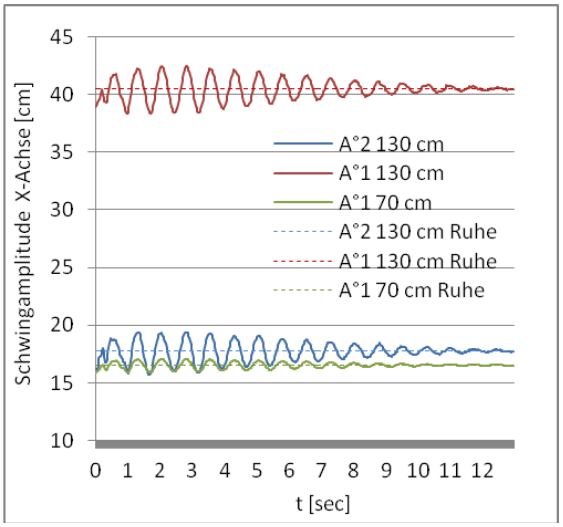


Abbildung 125: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, G ehölz G amma1 im Schnittzustand 1_3, Messung (b).

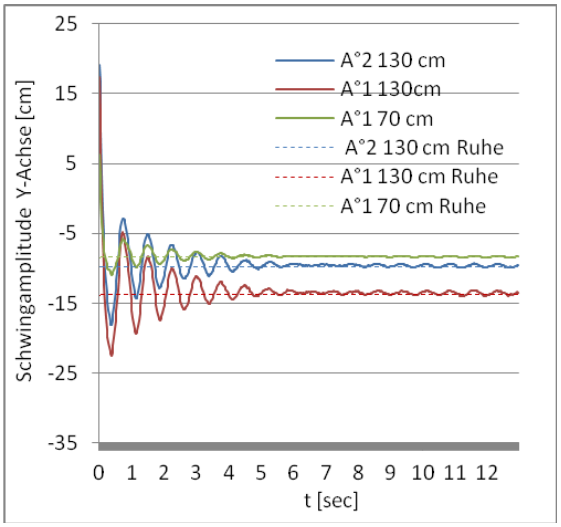


Abbildung 126: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, Gehölz G amma1 im Schnittzustand 1_3, Messung (b).

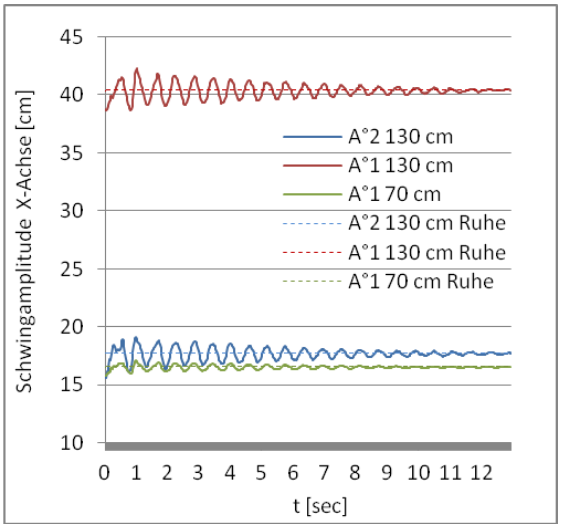


Abbildung 127: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, Gehölz G amma1 im Schnittzustand 1_2, Messung (b).

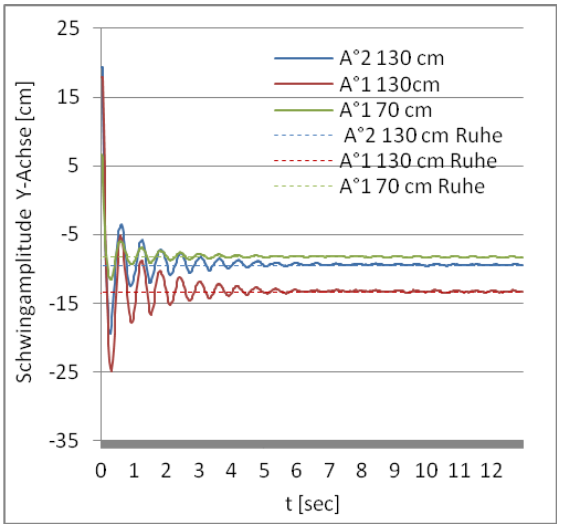


Abbildung 128: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, G ehölz Gamma1 im Schnittzustand 1_2, Messung (b).

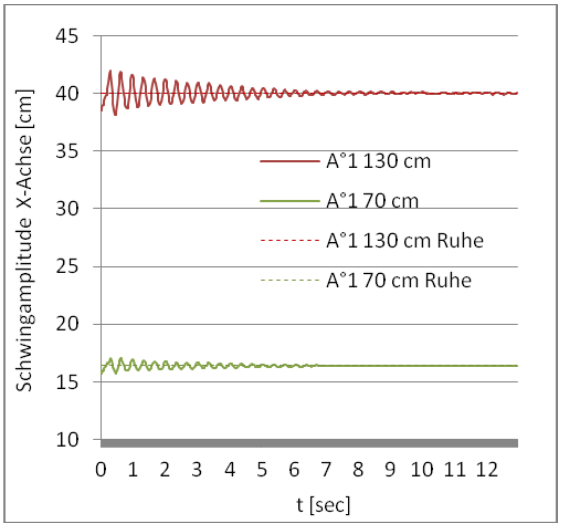


Abbildung 129: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, G ehölz G amma1 im Schnittzustand 1, Messung (b).

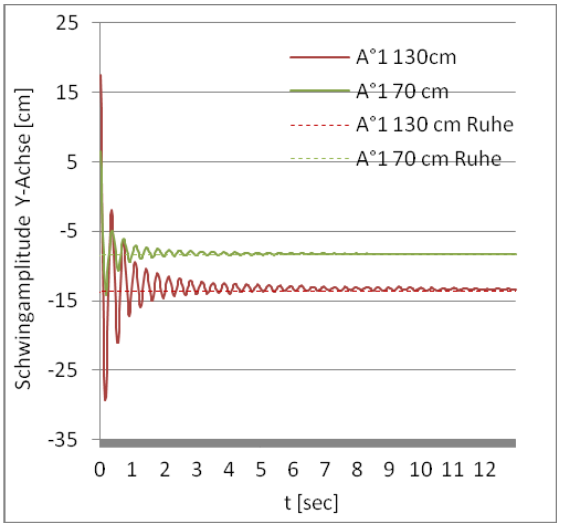


Abbildung 130: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, G ehölz G amma1 im Schnittzustand 1, Messung (b).

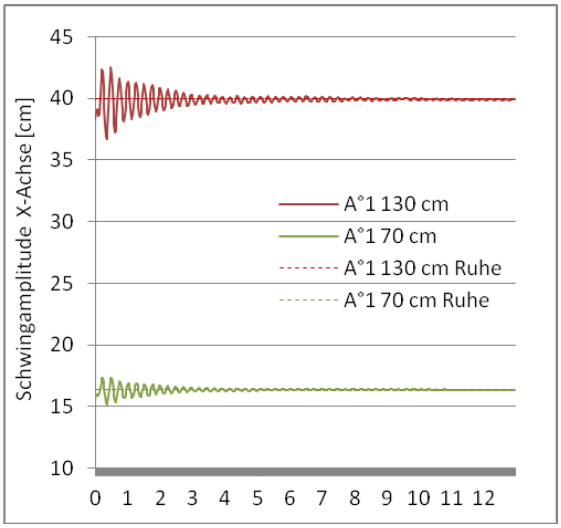


Abbildung 131: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, G ehölz G amma1 im Schnittzustand 1oSp, Messung (b).

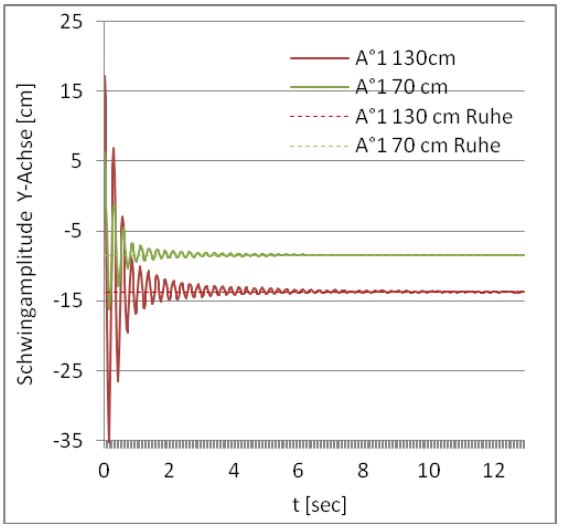


Abbildung 132: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, G ehölz G amma1 im Schnittzustand 1oSp, Messung (b).

Gamma2

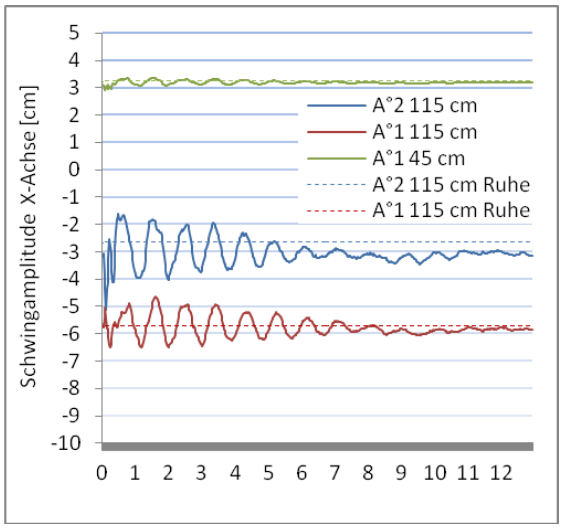


Abbildung 133: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, G ehölz Gamma2 im Schnittzustand 1_5, Messung (b).

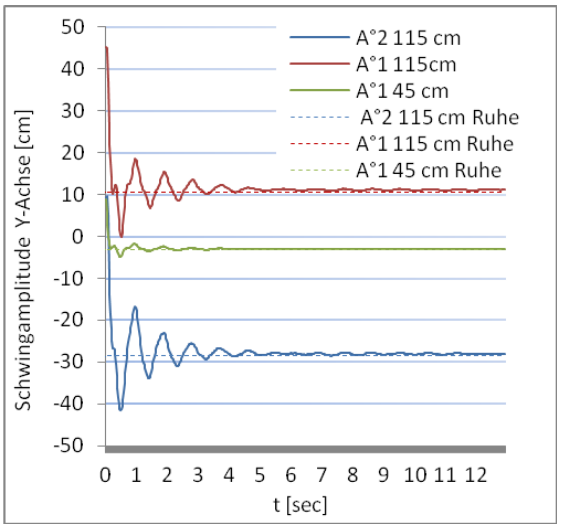


Abbildung 134: Schwingungsdynamik entlang d er Y-Achse, G ehölz G amma2 im Schnittzustand 1_5, Messung (b).

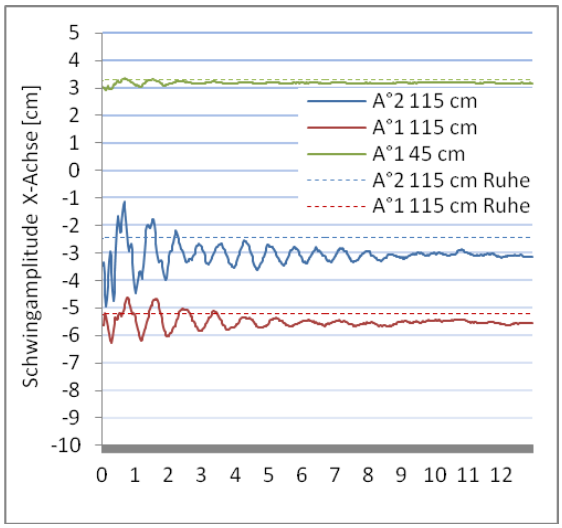


Abbildung 135: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, G ehölz G amma2 im Schnittzustand 1_4, Messung (b).

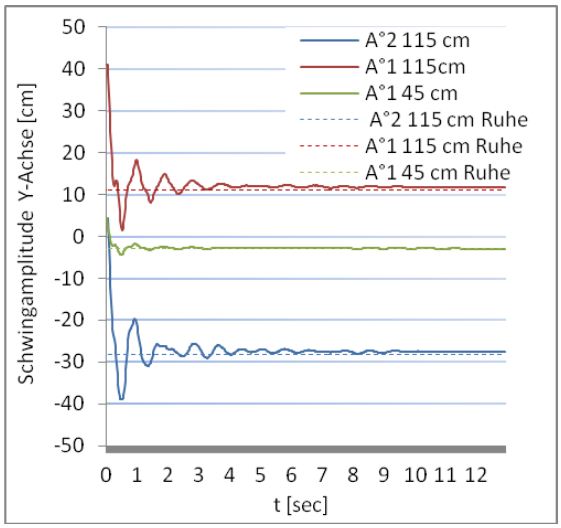


Abbildung 136: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, G ehölz G amma2 im Schnittzustand 1_4, Messung (b).

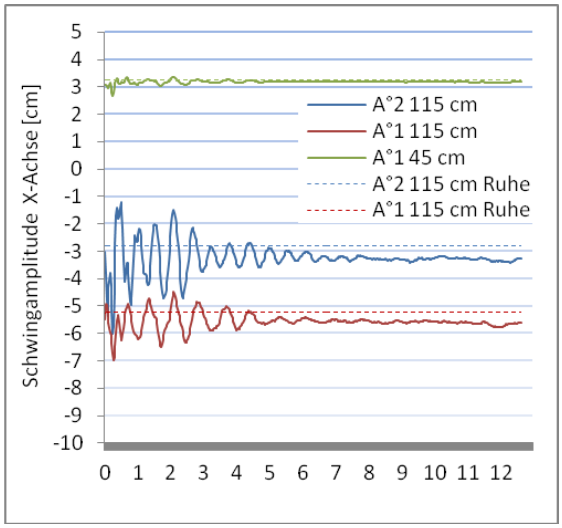


Abbildung 137: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, Gehölz G amma2 im Schnittzustand 1_3, Messung (b).

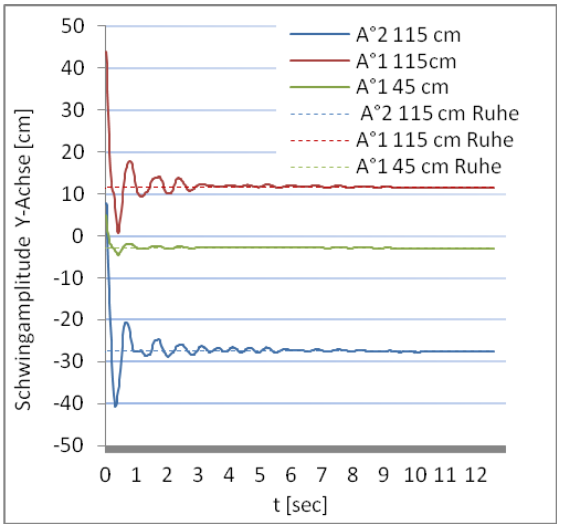


Abbildung 138: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, G ehölz G amma2 im Schnittzustand 1_3, Messung (b).

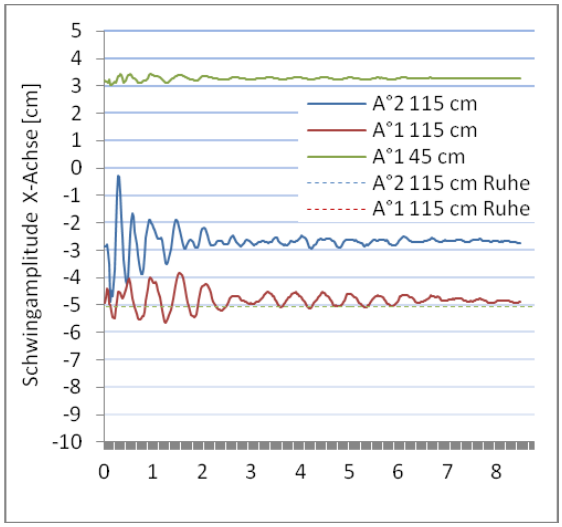


Abbildung 139: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, Gehölz G amma2 im Schnittzustand 1_2, Messung (b).

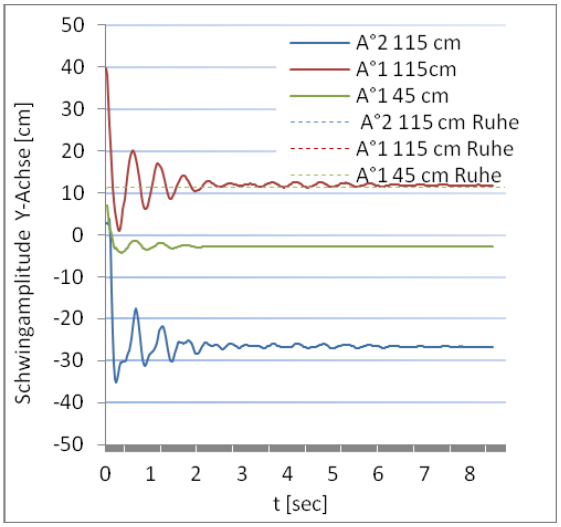


Abbildung 140: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, G ehölz G amma2 im Schnittzustand 1_2, Messung (b).

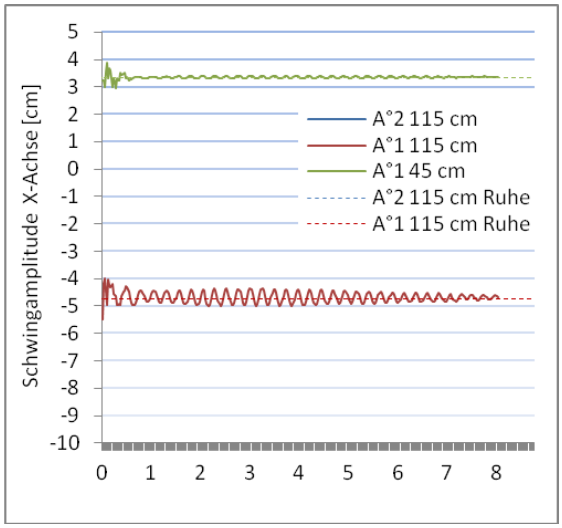


Abbildung 141: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, G ehölz G amma2 im Schnittzustand 1, Messung (b).

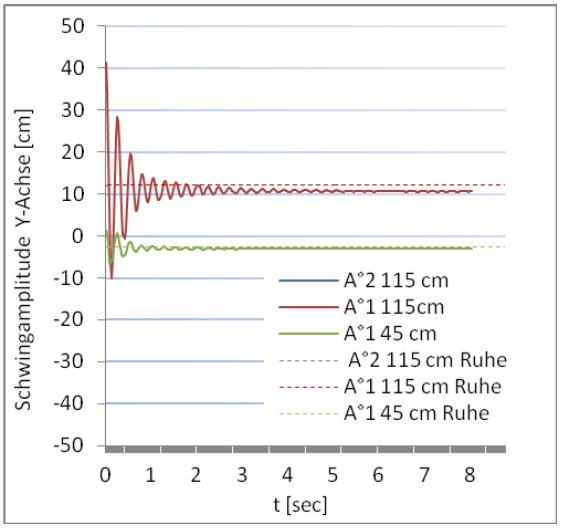


Abbildung 142: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, G ehölz G amma2 im Schnittzustand 1, Messung (b).

Gamma3

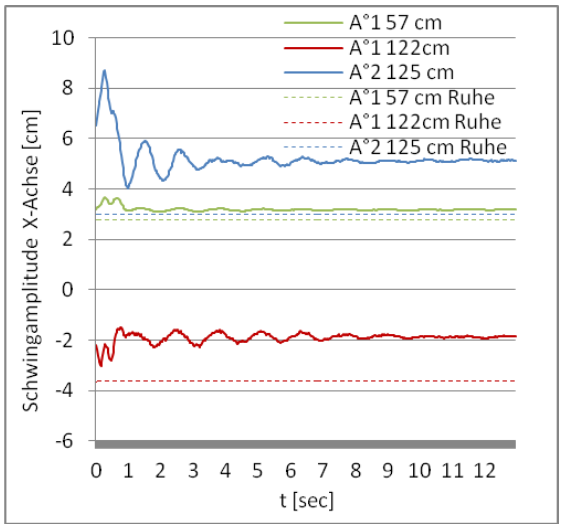


Abbildung 143: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, Gehölz G amma2 im Schnittzustand 1_5+B, Messung (b).

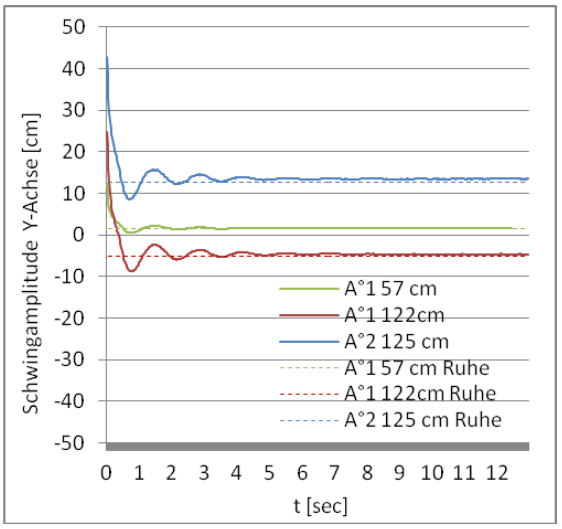


Abbildung 144: S chwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, Gehölz G amma2 im Schnittzustand 1_5+B, Messung (b).

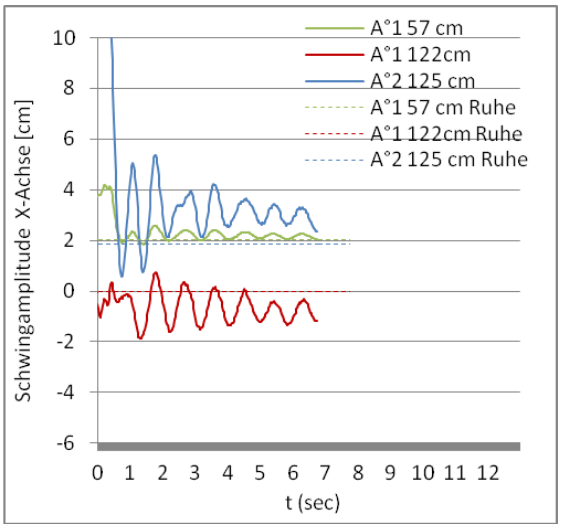


Abbildung 145: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, G ehölz G amma2 im Schnittzustand 1_5, Messung (b).

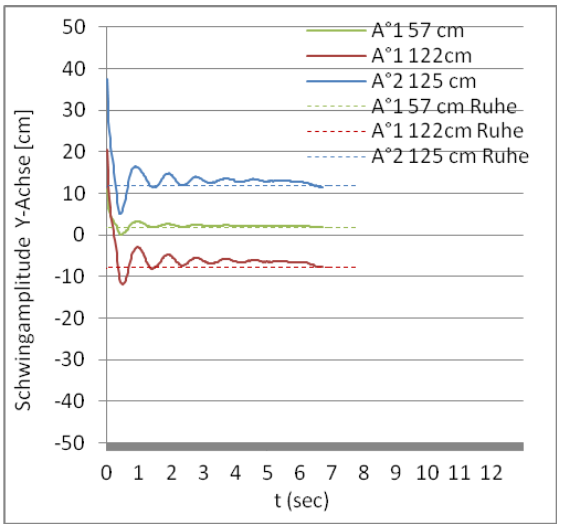


Abbildung 146: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, G ehölz G amma2 im Schnittzustand 1_5, Messung (b).

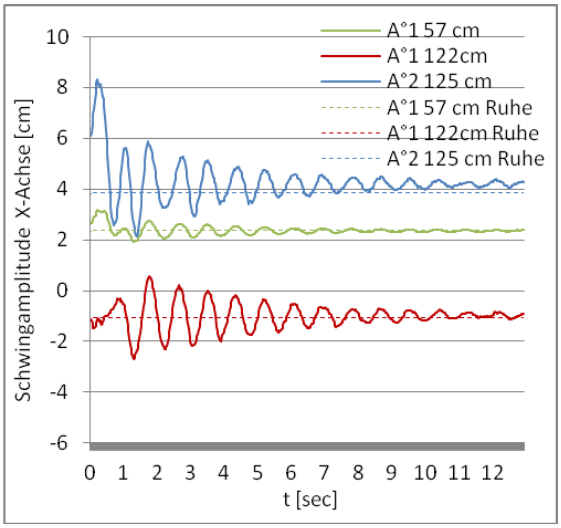


Abbildung 147: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, Gehölz G amma2 im Schnittzustand 1_4, Messung (a).

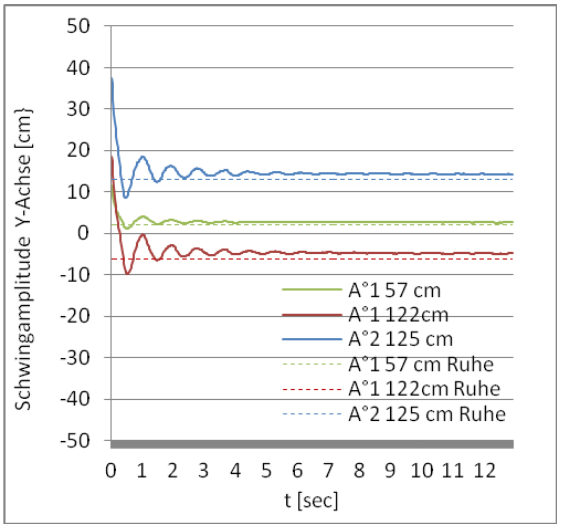


Abbildung 148: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, Gehölz G amma2 im Schnittzustand 1_4, Messung (a).

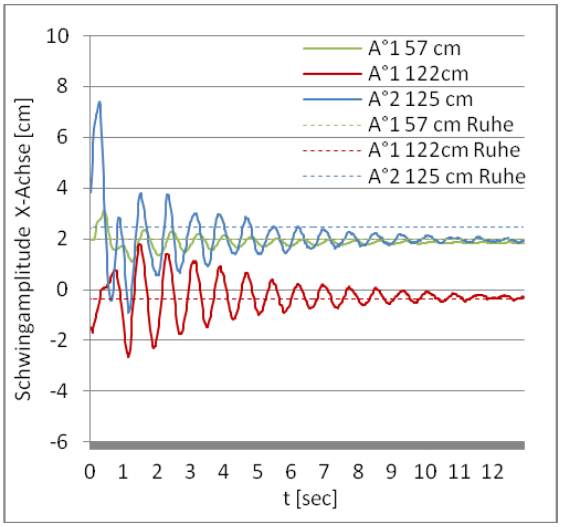


Abbildung 149: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, G ehölz G amma2 im Schnittzustand 1_3, Messung (a).

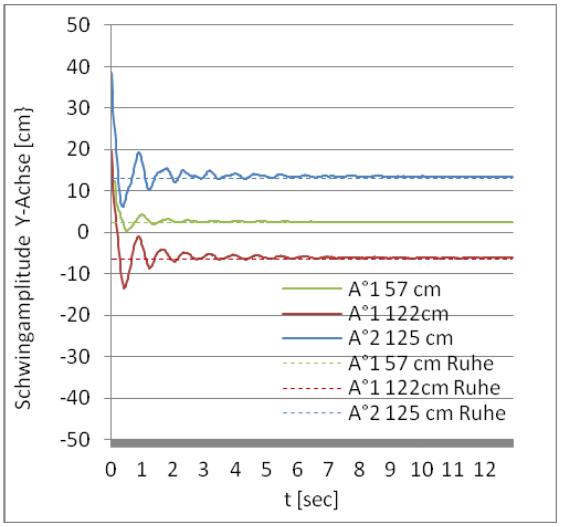


Abbildung 150: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, G ehölz G amma2 im Schnittzustand 1_3, Messung (a).

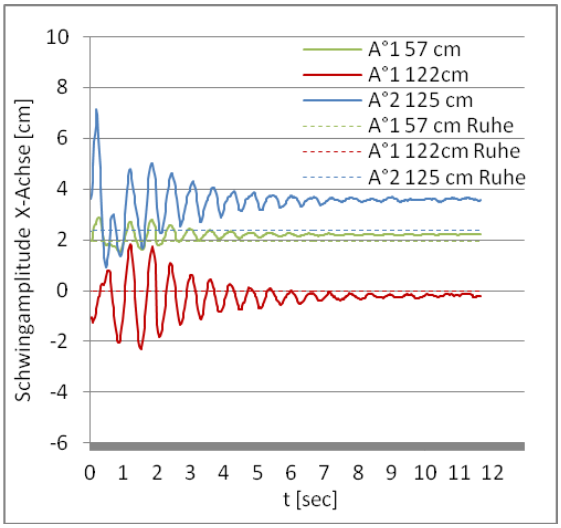


Abbildung 151: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, Gehölz G amma2 im Schnittzustand 1_2, Messung (b).

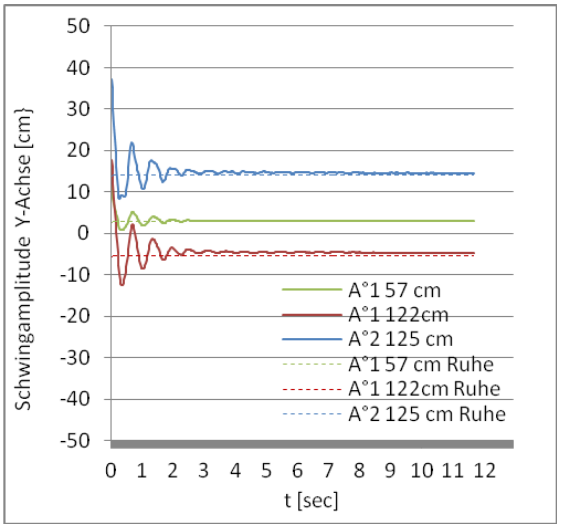


Abbildung 152: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, G ehölz G amma2 im Schnittzustand 1_2, Messung (b).

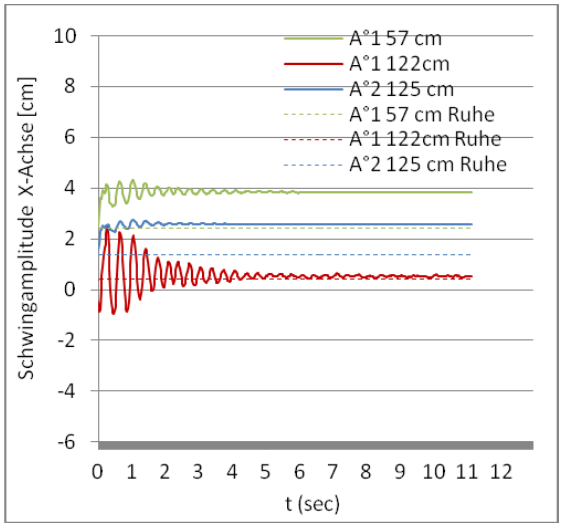


Abbildung 153: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, G ehölz G amma2 im Schnittzustand 1, Messung (a).

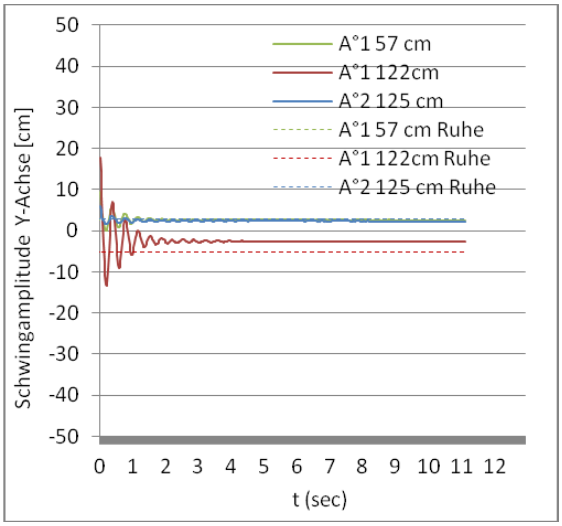


Abbildung 154: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, G ehölz G amma2 im Schnittzustand 1, Messung (a).

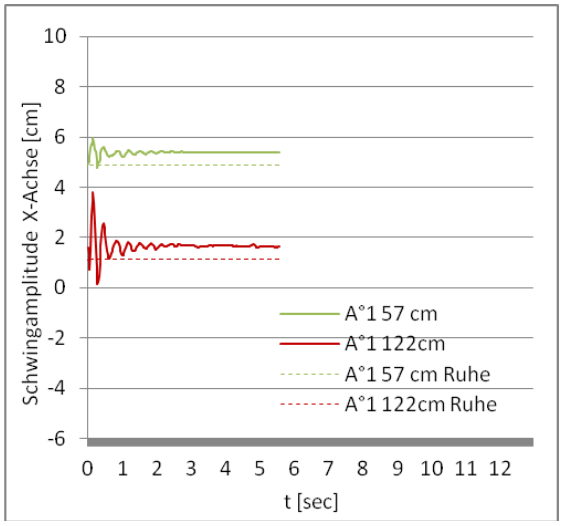


Abbildung 155: Schwingungsdynamik entlang d er X -Achse, Gehölz G amma2 im Schnittzustand 1oSp, Messung (a).

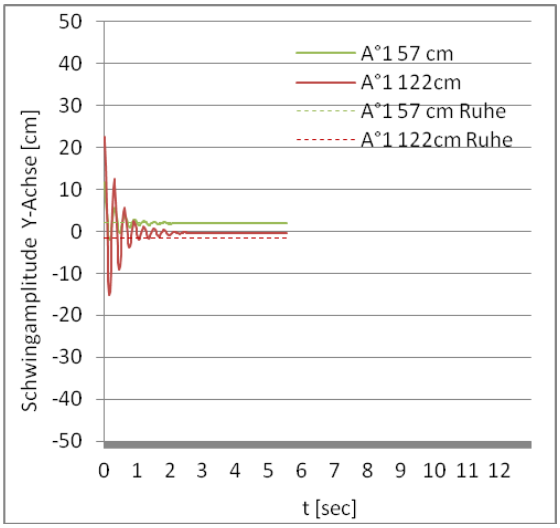


Abbildung 156: Schwingungsdynamik entlang d er Y -Achse, Gehölz G amma2 i m Schnittzustand 1oSp, Messung (a).

Lebenslauf

Name: Michael Luger

Geburtsdatum/-ort: 02.06.1977, Lilienfeld

Staatsangehörigkeit: Österreich

Bildungsweg:

1983-1987 Volksschule Böhlerwerk

1987-1990 Bundesrealgymnasium Waidhofen an der Ybbs

1990-1991 Bundesrealgymnasium Lilienfeld

1991-1996 HTBLuVA für Datenverarbeitung und Organisation, St. Pölten. Matura: 1996.

2005-2008 Bachelorstudium der Landschaftsarchitektur und Landschaftsplanung an der Universität für Bodenkultur Wien.

2009-2014 Masterstudium der Landschaftsarchitektur und Landschaftsplanung an der Universität für Bodenkultur Wien.

Auslandsaufenthalt:

2008: Erasmussemester an der *Universidad Politècnica de Valencia* in Valencia, Spanien

Präsenzdienst:

1997: Schreiber, Stabskompanie, 3. Panzergrenadierbataillon Mautern

Sprachen:

Österreichisch: Muttersprache

Deutsch: Sehr gut in Wort und Schrift

Englisch: Sehr gut in Wort und Schrift

Spanisch: Grundlagen