



Escuela de Postgrado



Technische Universität Ilmenau  
Fakultät für Maschinenbau

# Masterarbeit

## SCHWINGUNGSVERHALTEN VON SPINNENNETZEN

von  
Richard Bäumer

Datum

6. July 2012

Verantwortlicher Betreuer der Pontificia Universidad Católica del Perú

Dipl. Ing. Jorge Alencastre Miranda

Verantwortlicher Betreuer der Technischen Universität Ilmenau

Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte

Lima 2012

## Aufgabenstellung für die Masterarbeit

von Herrn Richard Bäumer

**Thema:** Schwingungsverhalten von Spinnennetzen

Die Bionik befasst sich mit der Nachahmung von biologischen Prozessen. Diese hat das Ziel Prinzipien der Natur in verschiedene Technologien oder wissenschaftliche Gebiete zu übertragen. Die Netzspinnen zum Beispiel produzieren ein Netz, welches besonders gute mechanische Eigenschaften aufweist. Mit den außergewöhnlichen guten Eigenschaften des Netzes kann die Netzspinne hohe kinetische Energien abfangen. Die Seide der Netzspinnen ist reißfester als Stahl und elastischer als Gummi. Des Weiteren weist das Spinnennetz ein besonderes Schwingungsverhalten auf. Hypothese dieser Masterarbeit ist, dass das Spinnennetz einen Eigenfrequenzbereich hat. Die Eigenfrequenz des Spinnennetzes ist abhängig von der Größe des Spinnennetzes, der Masse des Spinnentiers und der Vorspannung. In Erprobungen soll dieser Eigenfrequenzbereich genauer untersucht werden. Hierbei soll Größe des Netzes und Masse der Spinnentiere variiert werden.

Folgende Teilaufgaben sind zu bearbeiten.

- Einarbeiten in die Thematik der Spinnennetze
- Erlernen des Umgangs mit den Spinnentieren
- Auswerten der bereits vorliegenden Versuchsergebnissen
- Konzeption und Installation des Versuchsaufbaus
- Durchführen der Versuche und der statistischen Auswertung
- Diskussion der Ergebnisse

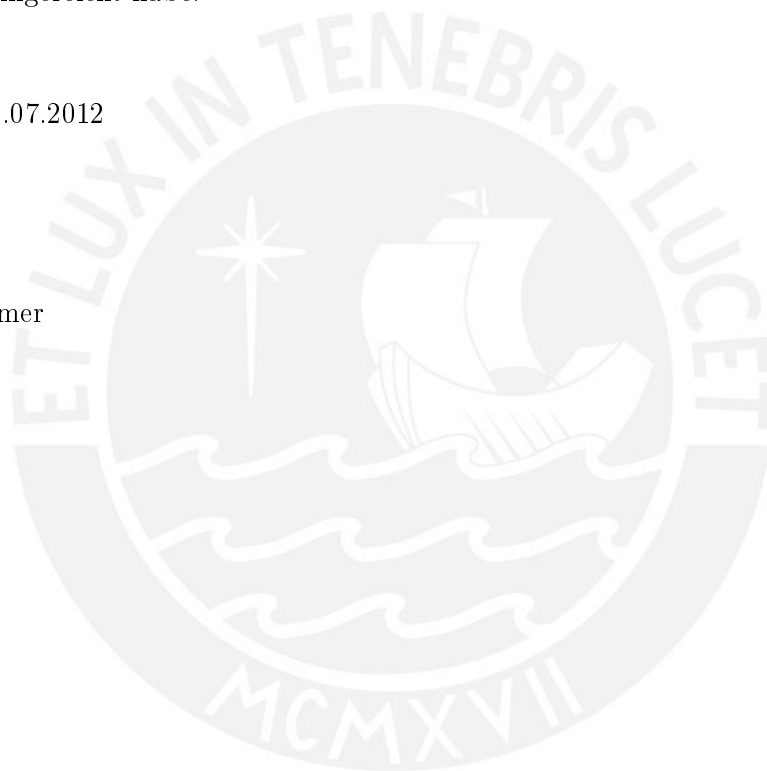
## Eidesstattliche Versicherung

Erklärung nach §12, Absatz 7 der Masterprüfungsordnung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet, sowie dass ich die Arbeit nicht in gleicher oder ähnlicher Weise oder auszugsweise an einer anderen Hochschule als Prüfungsarbeit eingereicht habe.

Lima, den 06.07.2012

Richard Bäumer



## Abstrakt/Abstract

Wissenschaftliche Arbeiten zeigen einen Zusammenhang zwischen der Eigenfrequenz des Spinnennetzes, dessen Geometrie, dem Eigengewicht der Netzspinne und der äquivalenten Vorspannung. Hypothese dieser Masterarbeit ist, dass die Eigenfrequenz von Spinnennetzen konstant ist. Die vorliegende Masterarbeit zeigt jedoch, dass dies nur bedingt richtig ist. Wir belegen dies mit unseren Experimenten mit verschiedenen Individuen der Spinnenart *Argiope Argentata* durch Ermittlung derer Eigengewichte und der Eigenfrequenzen der erbauten Spinnennetze. Unsere Daten zeigen, dass die Webnetzspinne die Netzvorspannung nicht proportional zu ihrem Eigengewicht erhöht, so dass die Eigenfrequenz für verschiedene Netze nicht konstant bleibt. Es wird das Vorhandensein eines Eigenfrequenzbereichs vermutet, da ihr Gewicht und ihre Möglichkeiten zur Vorspannung in einem bestimmten Bereich liegen. Eigenfrequenzen von Spinnennetzen werden mit dem in dieser Arbeit erweiterten Schwingungsmodell und auf Basis veröffentlichter Arbeiten berechnet.

Previous theoretical work links the natural frequency of a spiderweb to its geometry, the spider's weight, and the equivalent preloaded tension. A common assumption is that the natural frequency of spiderwebs created by a spider species is constant. However, our study proves that this is not necessarily true. More specifically, there exists a range of natural frequency for spiderwebs from the same species, as the spider's weight, the geometry and the preloaded tension of a spider's type have a range. We conduct our experiments with different *Argiope Argentata* spiders by collecting the spiders' weight and the natural frequency of the webs. Our empirical data show that as the web spider weight increases, the preloaded tension does not increase proportionally and thus, the natural frequency does not remain constant for different webs. Natural frequencies are calculated with our adjusted model and published theoretical work.

## Danksagung

Ich danke allen Mitarbeitern der Pontificia Universidad Católica del Perú, die mich bei der Durchführung der Masterarbeit mit Rat und Tat unterstützt haben. Mein ganz spezieller Dank gilt Herrn Prof. Dipl. Ing. Jorge Hernan Alencastre Miranda der mich während der Bearbeitungszeit in zahlreichen Diskussionen mit Anregungen und Kritik unterstützte und mir bei Fragen zur Seite stand.

Mit seinen messtechnischen und numerischen Kenntnissen hat Herr Ing. Msc. Richard Alberto Rivera Campos maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen, wofür ich ihm sehr dankbar bin.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Fernando Torres sowohl für den fruchtbaren Austausch über die Materialeigenschaften der Spinnenseide als auch für die Bereitstellung von Kapazitäten, Herrn Prof. Dr. Jorge Moreno Ruiz für die Bereitstellung der Messausrüstung, Frau Prof. Ing. Msc. Gladys Aida Francisca Villa Garcia Medina für die Nutzung der Räumlichkeiten, Herrn Prof. Ing. Msc. Carlos Nilberto Veliz Capunay für die Gespräche bezüglich der Statistik und und Herrn Prof. Ing. Msc. Roy Wil Sánchez Gutiérrez für die Unterstützung mit dem Programm MATLAB.

Mein Dank gilt auch Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte für die Betreuung meiner Masterarbeit.

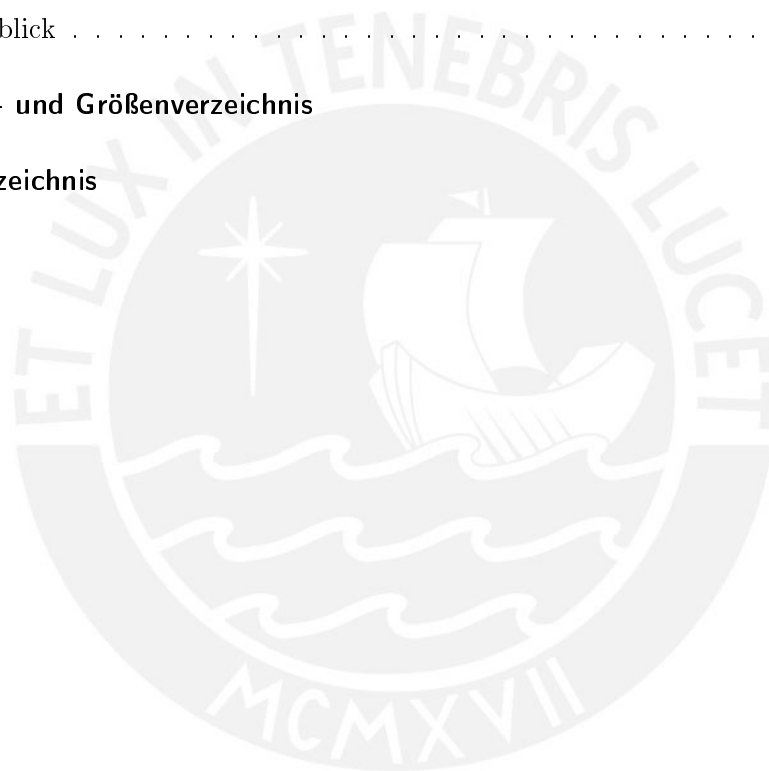
Ich danke außerdem Herrn Prof. Dr.-Ing. René Theska, Herrn Prof. Dipl. Ing. Francisco Antonio De Zela Martinez und Herrn Prof. Dipl. Ing. Jorge Rodríguez Hernández für die Möglichkeit und die Organisation des Doppelmasterprogramms.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	2
1.3	Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Die Webspinne, das Spinnennetz und seine Eigenschaften</b>	<b>4</b>
2.1	Vorwort . . . . .	4
2.2	Webspinne . . . . .	4
2.2.1	Aufbau . . . . .	4
2.2.2	Vibrationssinn . . . . .	6
2.3	Spinnenseide und Spinnennetz . . . . .	6
2.3.1	Seidenarten und ihre Funktion . . . . .	6
2.3.2	Konstruktion des Spinnennetzes . . . . .	9
2.3.3	Asymmetrie des Spinnennetzes . . . . .	11
2.4	Mechanische Eigenschaften der Spinnenseide . . . . .	12
2.4.1	<i>Dragline</i> - und <i>Flagelliform</i> -Seide . . . . .	12
2.4.2	Varianz der mechanischen Eigenschaften . . . . .	14
2.5	Kräfte- und Spannungsverteilung in den Fäden . . . . .	15
2.5.1	Axiale Kräfte in Radial-, Rahmen-, und Fixierfäden . . . . .	15
2.5.2	Spannungsverteilung in den unterschiedlichen Fadentypen . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Schwingungen</b>	<b>18</b>
3.1	Hinführung Schwingungen . . . . .	18
3.2	Freie Schwingungen . . . . .	19
3.3	Erzwungene Schwingungen . . . . .	22
3.3.1	Krafterregung . . . . .	22
3.3.2	Fußerregung . . . . .	24

3.4	Schwingungsmodell des Spinnennetzes . . . . .	28
3.4.1	Modellbildung . . . . .	28
3.4.2	Aufstellen der Differentialgleichung . . . . .	30
3.4.3	Linearisierung . . . . .	31
3.4.4	Vereinfachtes Schwingungsmodell des Spinnennetzes . . . . .	32
3.5	Zusammensetzung des Dämpfungskoeffizienten . . . . .	33
3.5.1	Dämpfungsarten . . . . .	33
3.5.2	Äquivalente Dämpfung und die Dämpfungskonstante des Spinnennetzes . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Erprobungen</b>	<b>37</b>
4.1	Materialien . . . . .	37
4.1.1	Beschaffung und Aufbewahrung der Spinnentiere . . . . .	37
4.1.2	Konstruktion und Vorbereitung der Spinnennetze . . . . .	38
4.2	Berechnung der maximal zulässigen Verschiebung . . . . .	40
4.3	Versuchsaufbau . . . . .	41
4.4	Versuchsdurchführung . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>45</b>
5.1	Evaluierung und Anpassung des Schwingungsmodells mit vorliegenden Versuchsergebnissen . . . . .	45
5.1.1	Berechnung der äquivalenten Vorspannung des Spinnennetzes . . . . .	45
5.1.2	Modellbildung mit Berücksichtigung der Gewichtskraft . . . . .	47
5.1.3	Modellbildung mit Berücksichtigung der Gewichtskraft und der Asymmetrie . . . . .	49
5.2	Messdatenauswertung . . . . .	51
5.2.1	Gemessene Daten, Filterung und Datenverarbeitung . . . . .	51
5.2.2	Ergebnisausgabe . . . . .	64
5.2.3	Messfehler verursacht durch Versuchsdurchführung . . . . .	66
5.2.4	Zusammenfassung Messfehler . . . . .	71
5.3	Auswertung der Eigenfrequenzen . . . . .	72
5.3.1	Korrektur der Massen und Anpassung der Toleranzen . . . . .	72
5.3.2	Bewertung der Länge und Einführung längenunabhängiger Eigenfrequenz . . . . .	73

5.3.3	Berechnung der äquivalenten Vorspannkraft . . . . .	75
5.3.4	Zusammenhang zwischen der Spinnentiermasse und der Eigenfrequenz . . . . .	77
5.3.5	Bewertung der Hypothese auf Basis der durchgeführten Erprobungen	79
5.4	Geometrische Auswertung der Spinnennetze . . . . .	79
5.4.1	Untersuchte Parameter . . . . .	79
5.4.2	Asymmetrie . . . . .	80
5.4.3	Verteilung der Radien . . . . .	81
<b>6</b>	<b>Schluss</b>	<b>82</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	82
6.2	Ausblick . . . . .	84
	<b>Abkürzungs- und Größenverzeichnis</b>	<b>85</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>88</b>
	<b>Anhang</b>	<b>92</b>





# Abbildungsverzeichnis

2.1	Anatomie der Webspinne . . . . .	5
2.2	Spinnindrüsen und Fäden der Gartenkreuzspinne . . . . .	7
2.3	Verwendung und Funktion der Seidenarten der Gartenkreuzspinne <i>Araneus</i> <i>Diadematus</i> . . . . .	8
2.4	Asymmetrie des Spinnennetzes . . . . .	11
2.5	Spannungs-Dehnungs-Diagramm der <i>Dragline</i> -Seide und die <i>Flagelliform</i> - Seide der Gartenkreuzspinne . . . . .	13
2.6	Varianz der Spannungs-Dehnungs-Kurven einer Gartenkreuzspinne . . . . .	15
2.7	Vorspannungskräfte im fertiggestellten Spinnennetz einer Gartenkreuzspinne .	16
3.1	Aufbau und Freikörperbild einer freien Schwingung . . . . .	19
3.2	Diagramm: Freie Schwingung . . . . .	21
3.3	Erzwungene Schwingung durch Krafterregung . . . . .	22
3.4	Diagramm: Verstärkungsfunktion für verschiedene Dämpfungen in Abhängig- keit des Frequenzverhältnisses . . . . .	24
3.5	Erzwungene Schwingung durch Wegeinprägung . . . . .	24
3.6	Diagramm: relative Wegverstärkung $\frac{Z}{Y_0}$ für verschiedene Dämpfungen in Ab- hängigkeit des Frequenzverhältnisses . . . . .	26
3.7	Diagramm: absolute Wegverstärkung $\frac{U}{Y_0}$ für verschiedene Dämpfungen in Ab- hängigkeit des Frequenzverhältnisses . . . . .	27
3.8	Spinnennetz und abstrahiertes Modell . . . . .	28
3.9	System mit nichtlinearen Eigenschaften . . . . .	29
3.10	Freikörperbild der Masse bei horizontaler Auslenkung . . . . .	30
3.11	Dämpfungstypen des Spinnennetzes . . . . .	34
3.12	Versuchsaufbau bezüglich der durchgeführten Dämpfungserprobungen . . . .	36
4.1	Bilder zu Spinnen und Aufbewahrung . . . . .	37

4.2	Versuchsaufbau . . . . .	41
4.3	Bilder des Versuchsaufbaus . . . . .	42
4.4	Bewegungsprofile . . . . .	44
5.1	Modell zur Berechnung der äquivalenten Vorspannung . . . . .	46
5.2	Modell zur Berechnung der Rückstellkraft . . . . .	48
5.3	Modell zur Berechnung der Rückstellkraft mit Berücksichtigung der Gewichtskraft und der Asymmetrie . . . . .	50
5.4	Werteverlauf der beiden Sensoren . . . . .	54
5.5	Verläufe der Daten über die Zeit . . . . .	56
5.6	Erregerfrequenzwerte vor und nach Anwendung des Mittelwertfilters . . . . .	59
5.7	Detailansicht der Erregerfrequenzwerte vor und nach Anwendung des Mittelwertfilters . . . . .	59
5.8	Programmablaufplan des Unterprogramms <i>Mittelwertfilter</i> . . . . .	60
5.9	Abschneiden der verrauschten Bereiche . . . . .	61
5.10	Programmablaufplan des Unterprogramms <i>Löschen</i> . . . . .	62
5.11	Programmablaufplan des Unterprogramms <i>Maximas</i> . . . . .	63
5.12	Erregerfrequenzwerte und Wegamplituden . . . . .	64
5.13	Abweichung der Erregerfrequenzwerte . . . . .	65
5.14	Wegamplituden für verschiedene zeitliche Erregerfrequenzveränderungen . . . . .	68
5.15	Verlauf der freien Schwingung des Spinnennetzes mit der Nummer sieben . . . . .	69
5.16	Abweichungen verursacht durch die Versuchsdurchführung . . . . .	70
5.17	Korrektur des ursprünglichen Geometrieparameters $L$ . . . . .	74
5.18	Darstellung der positiven Korrelation zwischen der Spinnenmasse und der äquivalenten Vorspannkraft <i>bzw</i> der genormten äquivalenten Vorspannkraft . . . . .	76
5.19	Darstellung der negativen Korrelation zwischen der Spinnenmasse $m_{Sp}$ und der Eigenfrequenz $f_0$ <i>bzw</i> der genormten Eigenfrequenz $f_{0,gen}$ . . . . .	77
5.20	Prozentuale Asymmetrie in Abhängigkeit von der Masse der Spinnentiere . . . . .	80

# Tabellenverzeichnis

2.1	Seidenarten der Gartenkreuzspinne und ihre Funktion . . . . .	8
2.2	Mechanische Daten natürlicher und synthetischer Werkstoffe . . . . .	14
2.3	Durchmesser und Einzelfadenanzahl der verschiedenen Seidentypen der Gartenkreuzspinne . . . . .	17
3.1	Dämpfungstypen des Spinnennetzes . . . . .	35
4.1	Rahmengrößen mit zugehörigen Längenparametern . . . . .	38
4.2	Daten der Versuchsnetze, Massen und Versuchsspinnentiere . . . . .	40
5.1	Sortierung der Vorspannkkräfte in obere und untere Netzhälfte . . . . .	47
5.2	Berechnung der Eigenfrequenz $f_{0G}$ . . . . .	49
5.3	Längenparameter zur Berechnung der Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Asymmetrie . . . . .	51
5.4	Berechnung der Eigenkreisfrequenz $\omega_{0A}$ unter Berücksichtigung der Asymmetrie $\omega_{0A}$ . . . . .	51
5.5	Phasenverschiebung des Beschleunigungs- und Lasersensors durch Filterung . . . . .	57
5.6	Gemessene Eigen- und Resonanzfrequenzwerte . . . . .	66
5.7	Mittelwerte der Resonanzfrequenzen für die Netze sieben bis neun . . . . .	69
5.8	Eigenfrequenzen aller Netze mit Anpassung der Massendifferenz . . . . .	73
5.9	Korrigierter Längenparameter $L_k$ . . . . .	73
5.10	Berechnung der äquivalenten Vorspannkkräfte . . . . .	75
5.11	Berechnung der Parameter $a$ und $b$ für die Korrelationsgeraden für den Zusammenhang zwischen der Spinnentiermasse und der äquivalenten Vorspannkraft . . . . .	76
5.12	Berechnung der Parameter $a$ und $b$ für die Korrelationsgeraden für den Zusammenhang zwischen der Spinnentiermasse und der Eigenfrequenz . . . . .	77
5.13	Berechnung der Steigungen $b$ bei Normung auf die verschiedenen Längen mit und ohne Berücksichtigung des Spinnennetzes mit der Nummer 10 . . . . .	78

5.14 Asymmetrie des Spinnennetzes der Spinnenart <i>Argiope Argentata</i> . . . . .	80
5.15 Verteilung der Radien . . . . .	81



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die Biometrie befasst sich mit der Nachahmung von biologischen Strukturen und Mechanismen. Immer wieder sind Ingenieure, Chemiker, Physiker und Biologen begeistert von der Komplexität und der Funktionsfähigkeit von biologischen Systemen. Deshalb versuchen Wissenschaftler biologische Prozesse zu verstehen und in technologische Prozesse zu übertragen.

Einer der bekanntesten und interessantesten Bereiche ist das Spinnennetz. Die Radnetzspinne produziert dieses mit spezialisierten Drüsen. Das Spinnennetz zeichnet sich durch besondere mechanische Eigenschaften aus. Das Material des Netzes ist zäher als Gummi, fester als Stahl und leichter als Baumwolle. Außerdem weisen die Einzelfäden einen sehr kleinen Querschnitt auf. Diese einzigartigen Eigenschaften ermöglichen es der Radnetzspinne die hohen kinetischen Energien ihrer Opfer abzufangen. Erprobungen zur Ermittlung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms von verschiedenen Spinnenarten wurden durch Spinnenforscher durchgeführt. Aufgrund der guten mechanischen Eigenschaften der Spinnenseide versuchen Wissenschaftler dieses Material mit seinen Eigenschaften künstlich herzustellen bzw in großen Mengen zu produzieren. Da die Radnetzspinnen Kannibalen sind, ist es nicht möglich, diese in hoher Anzahl zu züchten und zu melken. Anwendungsgebiet der Spinnenseide ist vor allem die Medizin. Weitere Anwendungsphantasien sind Airbags, leichte schussichere Westen oder wiederentfaltbare Autoknautschzonen [Han12].

Nicht nur die mechanischen Eigenschaften der Spinnenseide sind einmalig. Die Spinnenart *Argiope argentata*, welche im Rahmen dieser Arbeit untersucht wird, hat die Fähigkeit mit ihren Beinen die Vorspannung und somit das Schwingungsverhalten des Spinnennetzes zu beeinflussen. Dies ist von Bedeutung, da durch die veränderte Vorspannung

die Eigenfrequenz des Spinnennetzes variiert. Die Parameter, welche Einfluss auf die Eigenfrequenz des Spinnennetzes haben sind bekannt. Unklar ist, wie stark die Spinne die Vorspannung und somit die Eigenfrequenz des Netzes beeinflusst [Bau11].

## 1.2 Problemstellung und Zielsetzung

In dieser Masterarbeit werden experimentelle Untersuchungen über das Schwingungsverhalten des Spinnennetzes durchgeführt. Ziel ist die Identifikation eines möglichen Eigenfrequenzbereichs des Spinnennetzes.

Die Eigenfrequenz des Spinnennetzes ist abhängig von der Masse des Spinnentiers, der Geometrie des Spinnennetzes (Länge) und der äquivalenten Vorspannkraft. Die äquivalente Vorspannkraft ist derzeit weder direkt messbar noch gibt es ein Modell zur Berechnung. Messbar sind die Masse des Spinnentiers und die Geometrie des Spinnennetzes. Diese beiden messbaren Parameter werden im Rahmen der Erprobungen dieser Masterarbeit variiert. Da die Spinne mit ihren Beinen die Vorspannung des Netzes und somit die Eigenfrequenz des Spinnennetzes beeinflussen kann, wird bei den Erprobungen das Spinnentier entfernt und durch eine äquivalente Masse ersetzt [Bau11]. Anschließend erfolgt die Ermittlung der Eigenfrequenzen der Netze, welche sich durch räumliche Größe und schwingender Masse unterscheiden.

Für die Bearbeitung dieser Aufgabe sind folgende Arbeitsschritte notwendig.

- Einarbeitung in die Thematik der Spinnennetze
- Erlernen des Umgangs mit den Spinnen
- Auswerten der bereits vorliegenden Versuchsergebnisse
- Konzeption und Installation des Versuchsaufbaus
- Durchführen der Erprobungen und der statistischen Auswertung
- Diskussion der Ergebnisse

### 1.3 Aufbau der Arbeit

In dieser Arbeit werden im folgenden Kapitel die Webspinne, das Spinnennetz der Radnetzspinne und die Seidenarten sowie deren mechanischen Eigenschaften vorgestellt. Außerdem behandelt dieser Abschnitt den Aufbau, die Konstruktion und die Kräfte- und Spannungsverteilungen des Netzes.

Im dritten Kapitel werden die notwendigen Kenntnisse aus der Schwingungslehre vermittelt. Näher eingegangen wird auf Schwingungsparameter sowie das Schwingungsmodell des Spinnennetzes, welches von Herrn Jorge Alencastre erstellt wurde [Mir].

Das vierte Kapitel befasst sich zunächst mit den Aufbewahrungskonditionen der verwendeten Spinnentiere und der Konstruktion der Spinnennetze. Anschließend wird der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung beschrieben.

Im fünften Kapitel wird das bestehende Schwingungsmodell von Herrn Jorge Alencastre Miranda auf Basis von Literaturrecherchen angepasst. Das Modell wird mit konkreten Zahlenwerten evaluiert. Es erfolgt eine Beschreibung der Messdatenauswertung sowie deren Fehler. Ferner folgt die Auswertung der Eigenfrequenzen und die Beantwortung der Hypothese. Beendet wird das Kapitel mit einer geometrischen Analyse der erstellten Spinnennetze.

## 2 Die Webspinne, das Spinnennetz und seine Eigenschaften

### 2.1 Vorwort

In diesem Kapitel werden die Webspinne, das Spinnennetz und einige sich auf das Schwingungsverhalten auswirkende Eigenschaften vorgestellt. Erprobungsobjekte dieser Masterarbeit sind die Spinnennetze der Spinnenart *Argiope Argentata*. Es konnte keine deutsche Übersetzung für diese Art gefunden werden. Die Gartenkreuzspinne *Araneus Diadematus* und ihr Netz sind in der Vergangenheit von Spinnenforschern intensiver erforscht worden. Deswegen wird in Bereichen dieses Kapitels auf die Gartenkreuzspinne eingegangen. Beide genannten Spinnenarten gehören zur Familie der Echten Radnetzspinnen *Araneidae*. Dem Leser werden die Fähigkeiten der Radnetzspinnen im Bezug auf den Netzbau und die Seidenherstellung vermittelt [Hof93].

### 2.2 Webspinne

#### 2.2.1 Aufbau

Webspinnen *Araneae* gehören zur Klasse der Spinnentiere und existieren überall auf der Welt, mit Ausnahme der Antarktis. Viele sind räuberische kleine Tiere. Sie besitzen meist ein giftiges Düsenpaar, mit welchem sie ihre Bäume lähmen. Die meisten Spinnenarten sind Kannibalen. Deswegen leben sie alleine. Sie ernähren sich von lebender Beute, hauptsächlich Fliegen und Moskitos, welche die Echten Radnetzspinnen *Araneidae* mit ihrem Spinnennetz einfangen. Derzeit sind etwa 38.000 Webspinnenarten bekannt, von denen etwa ein Dutzend für den Menschen gefährlich ist. Die Körpergröße von Webspinnen beträgt zwischen  $2\text{ mm}$  und  $90\text{ mm}$ , wobei das Männchen bei fast allen Spinnenarten kleiner ist als das Weibchen. Ihre Lebenserwartung beträgt ein bis zwei Jahre [Pap00, S.2-6][Hof93].



## Die Webspinne, das Spinnennetz und seine Eigenschaften

Der Körper der Webspinne ist von einem Chitinpanzer bedeckt, welcher das Spinnentier vor seiner Umwelt schützt. Der Körper unterteilt sich in zwei Teile (Bild 2.1).

- Kopfbruststück, Vorderkörper oder Prosoma
- Hinterleib oder Abdomen

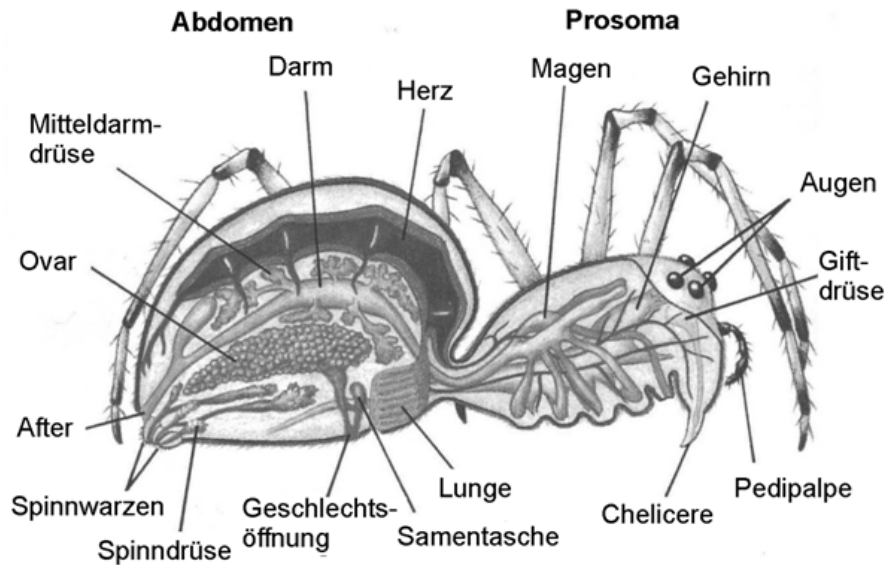


Bild 2.1: Anatomie der Webspinne [Pap00, S.3]

Vorderleib und Hinterleib sind über einen engen Stiel, welcher Petiolus genannt wird, verbunden. Im vorderen Teil, welches Kopfbruststück genannt wird, befinden sich die Sinnesorgane. Vom Kopfbruststück gehen die acht Beine ab, von denen sechs zur Fortbewegung eingesetzt werden. Die vorderen beiden Beine (Pedipalpen) dienen dem Betasten von Beute und Seide. Vor den Beinen sind die Kieferklauen (Cheliceren) positioniert, mit welchen das Spinnentier Gift in ihre Beute injiziert. Die Spinnentiere haben schnell wirkende starke Gifte, mit welchen sie ihre Beute lähmen. Im hinteren Teil, dem sogenannten Hinterleib, beherbergt die Webspinne Organe zur Vermehrung und Produktion ihrer Spinnenseide. Die Produktion der Seide ist die interessanteste Fähigkeit der Webspinnen. Das Vorhandensein der Cheliceren und die Möglichkeit der Gifteinspritzung lassen die Webspinne gefährlich erscheinen [Pap00, S.2-6][Bau11, S.5-8].

### 2.2.2 Vibrationssinn

Besonders gut entwickelt sind die mechanischen Sinne der Spinne, insbesondere bezüglich Vibrationen und Luftströmungen. Mit Mechanoreceptoren werden feinste Luftströmungen und Vibrationen wahrgenommen. Diese Fähigkeit ist für den Beutefang entscheidend. Das Außenskelett trägt Sensillen und eine reizende Hilfsstruktur zur Übertragung der Schwingungsinformationen. Über sogenannte Spalte werden die Vibrationen erfasst. 85 % dieser Spalte befinden sich auf den Beinen und Pedipalpen, das sind etwa 3300 Spalte. Netzspinnen besitzen weniger Spalte als Jagdspinnen. Eingangsgröße ist die Kompression eines Spalts, welcher mit einer Membran überdeckt ist. Senkrecht zur Spaltlängsachse verläuft die verformungswirksame Belastungsrichtung. Das Netz der Netzspinnen stellt einen erweiterten sensorischen Raum dar. Dieses dient auch als innerartliche Verständigung während der Balz [Bar01, S.75-86, S.225-252].

## 2.3 Spinnenseide und Spinnennetz

### 2.3.1 Seidenarten und ihre Funktion

Mit Hilfe der Spinnenseide belegt die Radnetzspinne freie Lufträume zwischen Büschen oder Mauern. Fast die Hälfte aller Spinnenarten verwenden das Spinnennetz zum Beutefang. Das Material für die Netze produziert sie mit ihren Drüsen, welche am Ende des Abdomens positioniert sind (Bild 2.1). Studien haben gezeigt, dass die verschiedenen Spinnenseidentypen sehr unterschiedlich sind sowohl bezüglich ihrer chemischen Zusammensetzung, als auch ihrer mechanischen Eigenschaften. Auf diese beiden Aspekte wird im Folgenden näher eingegangen. Die verschiedenen Seidenarten haben unterschiedliche Funktionen, wie in Bild 2.2 dargestellt [Vol00]. Je nach Spinnenart variiert die Anzahl der Seidenarten.

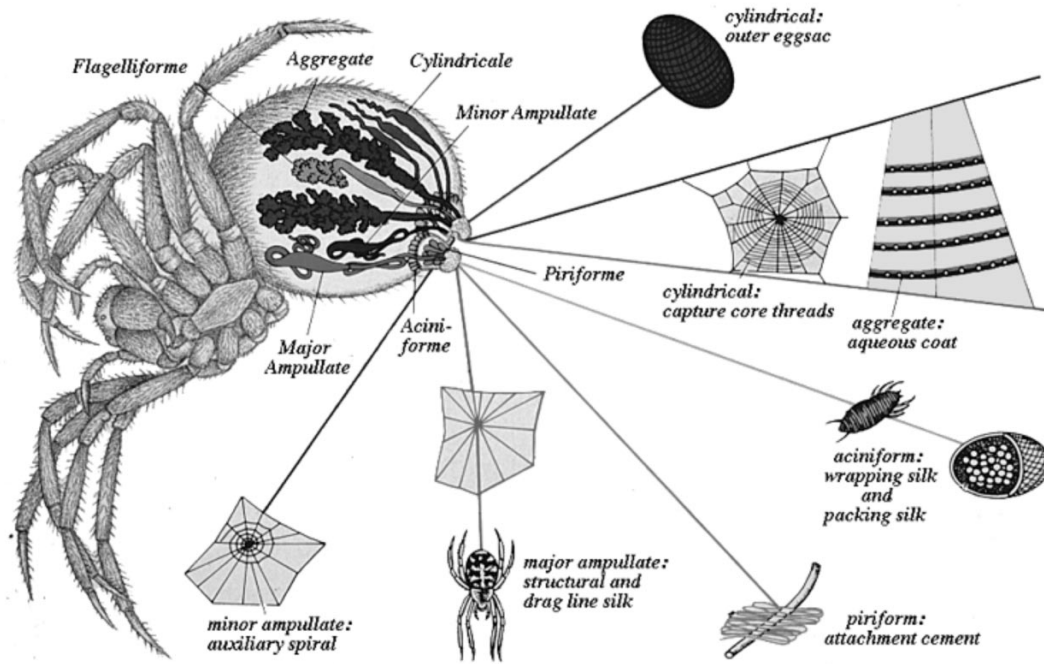
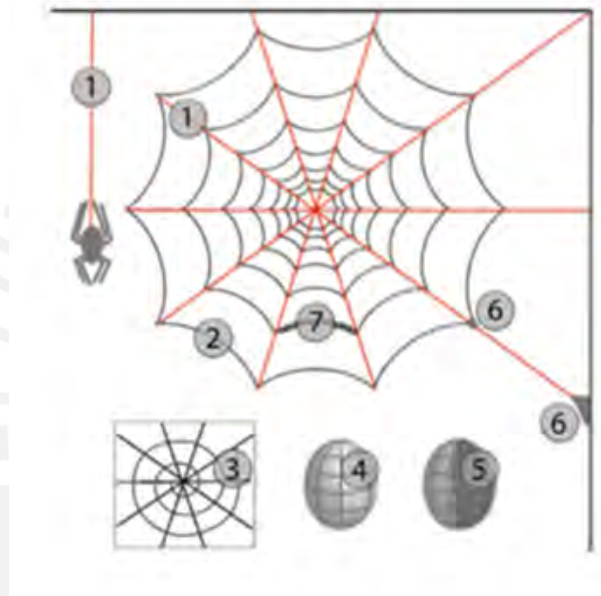


Bild 2.2: Spinnrüsen und Fäden der Gartenkreuzspinne [Vol100]

In Bild 2.3, Bild 2.2 und Tabelle 2.1 sind die verschiedenen Seidentypen und die Klebesubstanz der Gartenkreuzspinne grafisch und tabellarisch dargestellt. Mit der *Dragline*-Seide (1) errichtet die Spinne die Struktur des Netzes. Ferner nutzt sie diesen Seidentyp zum Abseilen. Die spiralförmig angeordneten Fäden (2) sind mit einer Klebesubstanz (7) bedeckt, welche die Beute am Netz anhaften lässt. Mit einer weiteren Drüse (6) produziert die Spinne ein weiteres Klebematerial zur Befestigung der *Dragline*-Seide und der spiralförmigen Fäden. Mit der *Minorampullate*-Seide (3) baut die Spinne bei Baubeginn die ersten Spiralen zur Stabilisierung des Netzes. Die *Tubuliform*-Seide (4) und die *Piriform*-Seide (5) dienen der Umhüllung des Kokons [Slo09].

Tabelle 2.1: Seidenarten der Gartenkreuzspinne und ihre Funktion [Slo09, S.2]

Nummer	Seidenart	Funktion
1	<i>Dragline</i> -Seide	Speichen des Netzes und Abseilfaden
2	<i>Flagelliform</i> -Seide	Fangspirale
3	<i>Minorampullate</i> -Seide(MA)	Hilfsspirale
4	<i>Tubuliform</i> -Seide	äußere Kokonhülle
5	<i>Acini form</i> -Seide	innere Kokonhülle
6	<i>Piriform</i> -Seide	Befestigung/Zement
7	Aggregatdrüse	Klebesubstanz

Bild 2.3: Verwendung und Funktion der Seidenarten der Gartenkreuzspinne *Araneus Diadematus* [Slo09, S.2]

Der interessanteste und am meisten erforschte Seidentyp ist die *Dragline*-Seide oder Sicherungsfaden, welcher besonders gute mechanische Eigenschaften aufweist. Diesen verwendet diese Spinnenart sowohl für die Grundstruktur des Spinnennetzes als auch zum Abseilen. Die Grundstruktur besteht aus Rahmen, Radien und die äußeren Spiralen des Spinnennetzes. Abhängig von der Art, der Masse der Spinne und weiterer Spinnparameter beträgt der Durchmesser dieser Seidenart zwischen  $1\ \mu\text{m}$  und  $20\ \mu\text{m}$ . Die *Flagelliform*-Seide bildet die spiralförmig angordneten Fäden des Spinnennetzes. Beide genannten Seidenarten zeichnen sich durch ihre viskoelastischen Eigenschaften aus [Pap00, S.2-6].

Auch die Spinnenart *Argiope argentata* produziert die *Dragline*-Seide mit ihrer *Major ampulate*-Seide und bildet die Spiralen aus der *Flagelliform*-Seide. Der Durchmesser der *Major ampulate*-Seide beträgt im Mittel  $3,5 \mu\text{m}$  [BY06].

Für das Schwingungsverhalten des Spinnennetzes ist hauptsächlich die *Dragline*-Seide ausschlaggebend. Die Fäden, welche aus der *Dragline*-Seide bestehen, sind in Bild 2.3 rot, Fäden der *Flagelliform*-Seide sind schwarz dargestellt. Da es sich um ein biegeschlaffes Material, handelt müssten die Linien der *Flagelliform*-Seide linienförmig zwischen den Radien verlaufen. Es fehlen die äußeren Spiralen, welche ebenfalls aus der *Dragline*-Seide bestehen. Sie sind Bestandteil der Rahmens. Auf die mechanischen Eigenschaften der *Dragline*-Seide und der *Flagelliform*-Seide wird in Kapitel 2.4 eingegangen.

### 2.3.2 Konstruktion des Spinnennetzes

Für den Bau des Netzes spielen die Augen der Spinnentiere eine untergeordnete Rolle. Viele Radnetzspinnen bauen ihre Fangapparate in der Nacht. Die Leitfäden für den Bau liegen im Spinnennetz selbst. Man nimmt an, dass generierte Winkel, Abstände, Richtungen konstruierter Seiden, Kräfte und Spannungen die bedeutenden Parameter für die Konstruktion des Netzes sind [WB92].

Die Gartenkreuzspinne baut ihr Netz in verschiedenen Phasen. Erst werden Fixierfäden, Rahmen und Radien konstruiert. Die Anzahl der Radien der Gartenkreuzspinne beträgt im Mittel 33 [WB92]. Die Netzspinne zieht die weit vermaschten Hilfsspiralen von innen nach außen. Hierbei ändert sie fast nie die Richtung. In der nächsten Phase des Bauprozesses werden die fein vermaschten Fangspiralen in entgegengesetzter Richtung gebaut. Dabei wird die Hilfsspirale Schritt für Schritt entfernt. Ein kleines Stück dieser bleibt an den Radien, um eine Beschädigung dieser zu vermeiden. Die Fangspirale hat einige Kehrseiten, vor allem am Randbereich [WRP68]. Die Hilfsspirale ist logarithmisch, die Fangspirale arithmetisch [VM85]. Die Asymmetrie des Netzes wird bereits beim Bau der Hilfsspirale generiert [Zsc11]. Der Grund für die nicht symmetrische Konstruktion wird in Kapitel 2.3.3 erläutert.

Die Hilfsspirale hat folgende Funktionen [Zsc93].

- Stabilisierung der Radien
- Erleichterung des Übergangs von einem Radius zum Nächsten
- Funktion des Leitfadens bei der Konstruktion der Fangspiralen

Die Form der Hilfsspirale ist von der Orientierung des Netzes abhängig, die der Fangspirale dagegen nicht. Dies bedeutet, dass die Gravitation die Form der Fangspirale nicht beeinflusst. Die Gartenkreuzspinne hat die Fähigkeit, die Richtung der Fäden wiederzuerkennen [Zsc93].

Auch beeinflussen abiotische Faktoren, wie Wind, Temperatur und Feuchtigkeit, die Geometrie des Spinnennetzes. Unter Einfluss des Windes baut die Gartenkreuzspinne ihr Netz kleiner, vermascht es weiter und spannt die Seidenfäden höher vor. Durch diese Maßnahmen wird das Netz weniger windanfällig und steifer. Eine Abnahme der Feuchtigkeit führt zu kleineren Netzen und eine Minderung der Temperatur zu weniger Fangspiralen mit größeren Abständen [VDK97].

Die Gartenkreuzspinne passt ihr Netz an den verfügbaren Beutetyp an. Sie erkennt Informationen über die Größe der Opfer, welche in diesem Gebiet vorkommen, behält diese Information und passt diese ihrem Fangapparat dementsprechend an. Größere Abstände der Fangspirale ermöglichen es dem Spinnentier mit geringeren Energieaufwand ein größeres Netz zu bauen. Kleine Abstände dagegen wählt die Spinne, wenn vor allem kleine Insekten zu Opfern werden. Somit sichert das Spinnentier, dass die kinetische Energie ihrer Opfer mit einer genügend großen Anzahl an Spinnenfäden abgefangen wird und sie ihr Spinnennetz mit möglichst geringem Energieaufwand herstellt [SV98].

### 2.3.3 Asymmetrie des Spinnennetzes

Die Netze von Spinnen sind in der Regel vertikal positioniert. Das Design des Netzes ist von folgenden Faktoren abhängig,

- Art der Spinne
- Alter und Größe der Spinnenbeine
- den abiotischen Umweltfaktoren und biotischen Faktoren

Die Symmetrie des Spinnennetzes variiert innerhalb einer Spezies und ist unter anderem abhängig von der Länge der Beine [Vol87]. Ein typische Eigenschaft der vertikal positionierten Fangapparate ist, dass der obere Bereich (oberhalb des Netzzentrums) meist kleiner ist und weniger Seide beinhaltet als der untere Teil. Dies führt zu einer Asymmetrie. Der Grad der Asymmetrie verändert sich mit dem Alter des Spinnentiers. Jungtiere konstruieren symmetrischer, wogegen ältere Individuen den oberen Bereich des Spinnennetzes verkleinern. Erprobungen haben ergeben, dass diese Asymmetrie mit dem Eigengewicht des Individuums im Zusammenhang steht. Sowohl eine natürliche als auch eine künstliche Erhöhung des Spinnengewichtes führte zu einer stärker ausgeprägten Asymmetrie [HH99].

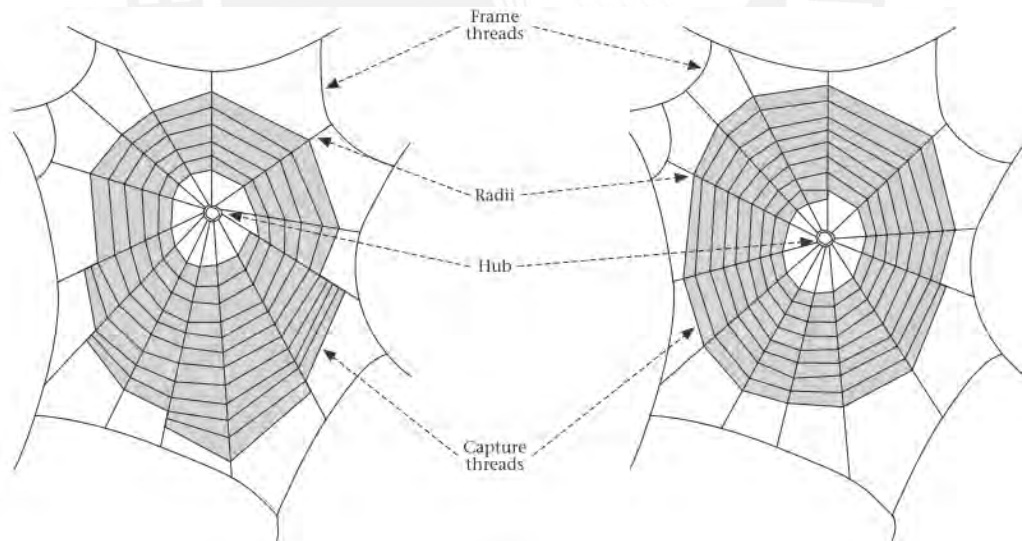


Bild 2.4: Asymmetrie des Spinnennetzes [HH99]

Die Asymmetrie wird in Bild 2.4 verdeutlicht. Links ist ein asymmetrisches und rechts ein symmetrisches Spinnennetz dargestellt.

Experimente haben gezeigt, dass die Gartenkreuzspinne schneller nach unten rennen kann als nach oben. Dies ist auf die Gravitation zurückzuführen. Es wird vermutet, dass die Spinne deswegen das Netzzentrum nach oben verlagert [RV94]. Diese Asymmetrie wird von Biologen damit begründet, dass die Tiere durch die Asymmetrie alle Netzbereiche gleich schnell erreichen können [HH99].

## 2.4 Mechanische Eigenschaften der Spinnenseide

### 2.4.1 *Dragline-* und *Flagelliform-Seide*

Die *Dragline*-Seide und die *Flagelliform*-Seide zeichnen sich durch besondere mechanische Eigenschaften aus. Beide weisen ein hohes Molekulargewicht auf und haben besondere viskoelastische Eigenschaften, was zur Folge hat, dass ein hoher Anteil der kinetischen Energie der Opfer in Wärme umgewandelt wird [Slo09, S.2]. Die mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffes werden mit Hilfe eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms dargestellt, welches mit Zugerprobungen ermittelt wird. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm der *Dragline*-Seide und der *Flagelliform*-Seide der Gartenkreuzspinne ist in Bild 2.5 dargestellt.

Diese Kennlinien unterscheiden sich nicht nur unter den verschiedenen Spinnenarten *bzw* unter den verschiedenen Seidentypen der gleichen Spinnenart, sondern auch durch die gleichen Seidentypen derselben Individuen. Dies ist auf die unterschiedlichen Umgebungsbedingungen zurückzuführen. Erprobungen mit unterschiedlichen Fütterungsbedingungen haben unterschiedliche Kennlinien verursacht. Die Radnetzspinne hat die Fähigkeit durch die Regulation der Fadendicke die maximale Spannung eines Seidenfadens zu beeinflussen [Slo09].



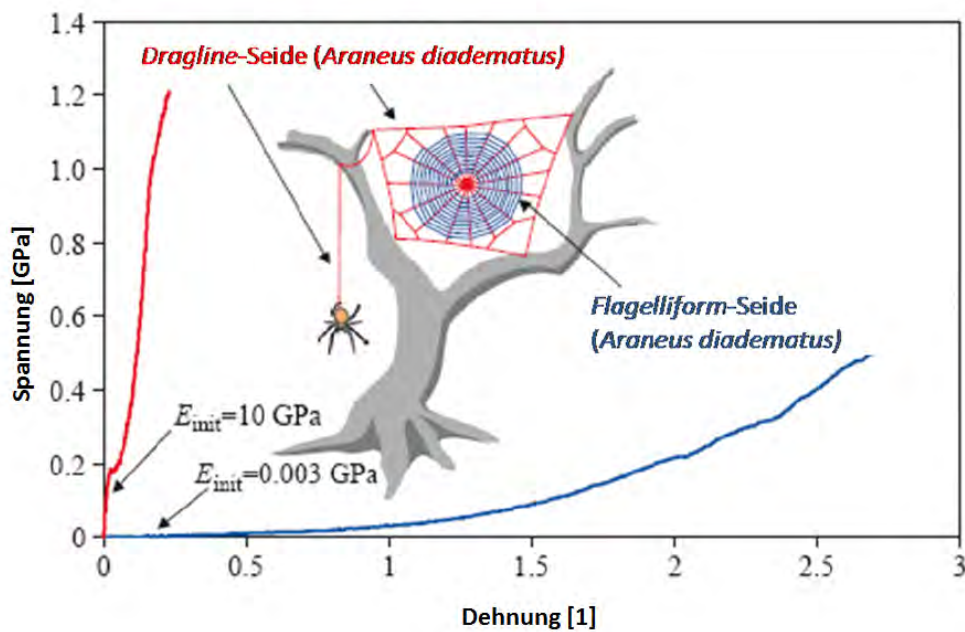


Bild 2.5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der *Dragline*-Seide und die *Flagelliform*-Seide der Gartenkreuzspinne [Slo09, S.7]

Beide Seidentypen weisen zunächst einen Elastizitätsbereich auf, wobei die Elastizitätskonstante der *Dragline*-Seide mit  $10 \text{ GPa}$  deutlich größer ist als die der *Flagelliform*-Seide mit  $0,003 \text{ GPa}$  (Bild 2.5). Auch die Zugfestigkeit der *Dragline*-Seide hat einen deutlich höheren Maximalwert. Die Energie, welche zum Zerreißen und somit zum Versagen eines Seidenfadens notwendig ist, wird durch die Fläche unter dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm beschrieben. Je größer diese, desto höher die Energieaufnahme bis zum Zerreißen. Die Energie, welcher der Seidenfaden bis zum Versagen absorbiert, wird durch die Zähigkeit beschrieben (Tabelle 2.2).

Die mechanischen Eigenschaften der Seidentypen der Spinnenart *Argiope argentata* sind ähnlich. Das Elastizitätsmodul  $E$  der *Dragline*-Seide beträgt etwa  $8 \text{ GPa}$  und der *Flagelliform*-Seide etwa  $0,001 \text{ GPa}$ . Die Dehnungen betragen  $0,2\%$  und  $1,72\%$  [BY06].

Der Seidenfaden der Spinnentiere zeichnet sich durch eine geringe Querschnittsfläche, eine hohe Zugfestigkeit und einer geringen Dichte bei einer gleichzeitig hohen Zähigkeit aus. Neben diesen einzigartigen mechanischen Eigenschaften ist er außerdem umweltfreundlich

und nachhaltig. Tabelle 2.2 vergleicht mechanische Daten natürlicher und synthetischer Werkstoffe.

Die *Dragline*-Seide der Radnetzspinnen ist das zugfesteste und stärkste bekannte Biopolymer. Es weist eine hohe Festigkeit und geringe Dichte bei gleichzeitig hoher Dehnbarkeit auf. Der Maximalwert der Zugfestigkeit ist kleiner als von Hochleistungsstählen (Kevlar oder Karbonfaser). Diese werden für die Übertragung von Zugkräften genutzt. Der Vorteil von Spinnenseide liegt in der hohen Dehnbarkeit. Diese beträgt 27% bei *Dragline*-Seide, 270% bei *Flagelliform*-Seide und bei technischen Werkstoffen nur zwischen 0,8% und 2,7%. Die Dehnbarkeit macht die Spinnenseide deutlich zäher. Somit ist die Bruchenergie drei bis zehn mal höher als die von Kevlar, Karbonfaser oder Stahl. Die *Flagelliform*-Seide ist deutlich dehnbarer als die *Dragline*-Seide. Die beiden Seiden sind an ihre mechanischen Anforderungen angepasst. Die *Dragline*-Seide hat mehr kristalline Anteile, wogegen die *Flagelliform*-Seide mehr amorphe Bereiche aufweist [GGOS99][Pap00].

Tabelle 2.2: Mechanische Daten natürlicher und synthetischer Werkstoffe [Slo09, S.8]

Material	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Zugfestigkeit [GPa]	Steifigkeit [GPa]	Dehnbarkeit [%]	Zähigkeit [MJ/m <sup>3</sup> ]
<i>Dragline</i> -Seide	1,3	1,1	10	27	160
<i>Flagelliform</i> -Seide	1,3	0,5	0,003	270	150
Kokon-Seide	1,3	0,6	7	18	70
Wolle	1,3	0,2	0,5	50	60
Elastin	1,3	0,002	0,001	15	2
Nylon 6.6	1,1	0,95	5	18	80
Kevlar 49	1,4	3,6	130	2,7	50
Karbonfaser	1,8	4	300	1,3	25
Stahl	7,8	1,5	200	0,8	6

#### 2.4.2 Varianz der mechanischen Eigenschaften

Erprobungen haben ergeben, dass die mechanischen Eigenschaften der *Dragline*-Seide mit veränderten Konditionen der Aufbewahrung der Radnetzspinnen variieren. Diese Versuche wurden mit verschiedenen Spinnenarten durchgeführt. Hungerperioden verringern die Bruchdehnung. Die maximale Zugfestigkeit und das Elastizitätsmodul hingegen

bleiben nahezu unverändert. Die Spannung-Dehnung-Kurven hängen unter anderem von der Geschwindigkeit des Melkvorgangs der Spinnen ab. Hier wurde gezeigt, dass eine höhere Abrollgeschwindigkeit der Spinnenseide zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls führt. Auch bei konstanter Melkgeschwindigkeit der Gartenkreuzspinne wurden Unterschiede festgestellt. Das Elastizitätsmodul variierte bei einer Abrollgeschwindigkeit von  $2,0 \frac{cm}{s}$  um den Mittelwert  $6,90 \text{ GPa}$  mit einer Standardabweichung von  $1,22$ . Das bedeutet, dass die mechanischen Eigenschaften der Spinnenseide innerhalb einer Art bei konstanten Aufbewahrungsbedingungen differieren [MSV99].

Bild 2.6 zeigt die Aufnahme von Spannungs-Dehnungs-Kurven der Gartenkreuzspinne verschiedener Individuen, welche den gleichen Bedingungen ausgesetzt waren [MSV99]. Das Elastizitätsmodul ist relativ konstant, wogegen sich die Bruchdehnung mit einem Bereich von  $19\%$  bis  $37\%$  und die maximale Zugfestigkeit mit einem Bereich von  $0,9 \text{ GPa}$  bis  $1,3 \text{ GPa}$  der Individuen stark variiert [MSV99].

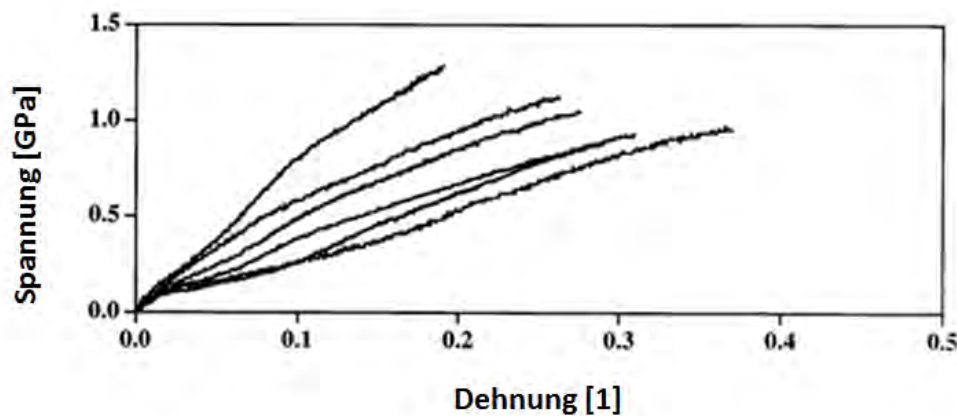


Bild 2.6: Varianz der Spannungs-Dehnungs-Kurven einer Gartenkreuzspinne [MSV99]

## 2.5 Kräfte- und Spannungsverteilung in den Fäden

### 2.5.1 Axiale Kräfte in Radien, Rahmen-, und Fixierfäden

Bild 4.1 zeigt die axialen Vorspannkräfte in den Radien fertiggestellter und vertikal positionierter Spinnennetze. Das links dargestellte Netz wurde von einer Gartenkreuzspinne mit einem Gewicht von  $48 \text{ mg}$  gebaut, das Rechte von der gleichen Spinnenart, allerdings

mit einem Gewicht von  $200\text{ mg}$ . Die gestrichelten Linien stellen den Raum für die Fangspiralen dar. Die Kräfte sind in den Fixierfäden am größten, kleiner in den Rahmenfäden und in den Radien am geringsten. Es wurde ein Abfall der Axialkraft in den Radien von außen nach innen gemessen. Die Anzahl der Radien oberhalb des Netzzentrums ist kleiner als unterhalb. Dies hat zur Folge, dass die Kraftaufnahme pro Radialfaden oberhalb des Zentrums höher ist als unterhalb. Zum Teil überträgt ein Faden oberhalb des Zentrums eine drei- bis viermal so hohe Axialkraft. Das Spinnentier reguliert die Spannung allerdings durch Variation des Fadendurchmessers und Anzahl der Einzelfäden. Die Vorspannkraft nimmt in den Radien mit dem Gewicht der Spinne zu, folglich auch mit dem Alter des Spinnentieres [WB92].

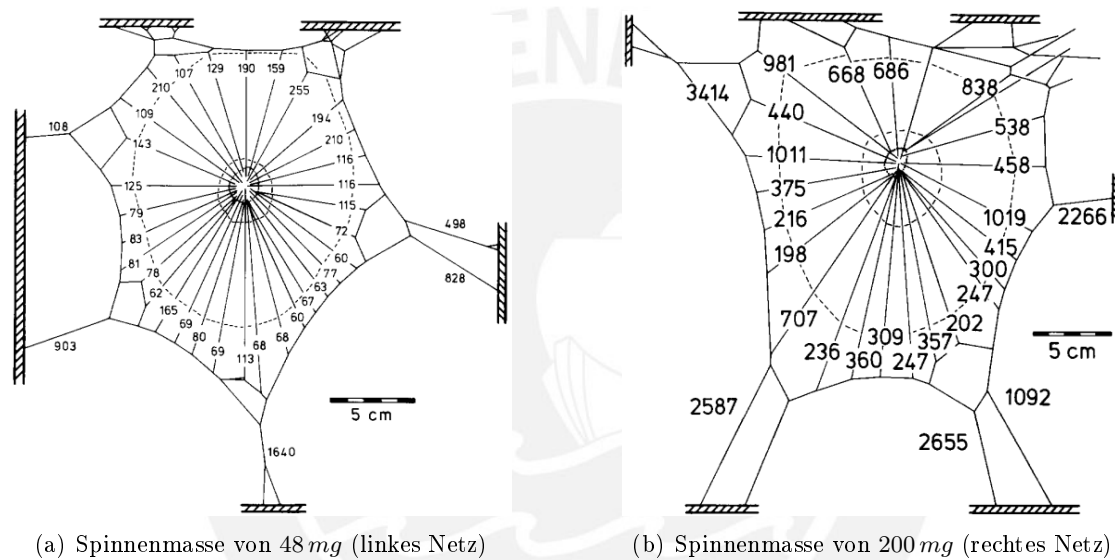


Bild 2.7: Vorspannungskräfte im fertiggestellten Spinnennetz einer Gartenkreuzspinne (Einheit der axialen Vorspannkkräfte:  $\mu\text{N}$ ) [WB92]

### 2.5.2 Spannungsverteilung in den unterschiedlichen Fadentypen

Die Spannung  $\sigma$  in einem Faden definiert sich aus dem Quotient Kraft und Fläche  $\frac{F}{A}$ . Die Spinne hat die Fähigkeit die Fadendicke zu regulieren. Die Durchmesser der Radien differieren zwischen  $2,7\ \mu\text{m}$  und  $3,4\ \mu\text{m}$  und nehmen nach außen hin zu. Sie bestehen aus zwei bis vier Einzelfäden. Die Rahmenfäden werden aus vier bis acht Einzelfäden etwa doppelt so dick hergestellt (Tabelle 2.3) [WB92][Jac71].

Durch die Zunahme der Querschnittsfläche der Radienfäden von innen nach außen ist das Spannungsverhältnis kleiner als das Kraftverhältnis. Es wurden keine Angaben zur Anzahl der Einzelfäden der Fixierfäden gefunden. Die Durchmesser der Fangspirale sind am kleinsten.

Tabelle 2.3: Durchmesser und Einzelfadenanzahl der verschiedenen Seidentypen der Gartenkreuzspinne [WB92]

<b>Fadentyp</b>	<b>Durchmesser</b> [ $\mu\text{m}$ ]	<b>Anzahl der Einzelfäden</b>
Radien	2,7 – 3,4	2 – 4
Rahmenfäden	4,7 – 7,5	4 – 8
Fixierfäden	2,7	keine Angabe gefunden
Fangspirale	1,7 – 2,7	keine Angabe gefunden

In Tabelle 2.3 fehlt die Angabe der Hilfsspirale. Es wurden keine Informationen bezüglich Durchmesser und Anzahl der Einzelfäden gefunden. Diese Hilfsspirale überträgt deutlich höhere Kräfte als die Fangspirale. In der Bauphase, in welcher die Hilfsspirale fertiggestellt ist, die Fangspirale nicht, ist demnach der Kraftabfall in den Radien deutlich höher. Die hohen Kräfte in der Hilfsspirale bestätigen die Theorie, dass diese der Stabilisierung der Radien dienen und die Funktion eines Haltefadens inne haben [Ebe81]. Die hohe Dehnbarkeit der Fangspiralen gegenüber den Radien führt zu relativ kleinen Kräften in den zahlreichen Spiralen [WB92].

Unterschiedliche Fadentypen übertragen unterschiedlich hohe Zugkräfte. Bei den Radien nimmt die axiale Kraft nach außen zu. Die unterschiedlich hohen zu übertragenden Zugkräfte kompensiert die Spinne zum einen durch die Regulierung der Durchmesser und zum anderen durch Zu- oder Abnahme der Anzahl der Einzelfäden. Folge ist, dass die Spannungsverhältnisse nicht so hohe Werte annehmen wie die Zugkraftverhältnisse.

## 3 Schwingungen

### 3.1 Hinführung Schwingungen

Für die Erstellung dieses Kapitels wurde nachfolgende Literatur verwendet. Basis für die Aufstellung des Schwingungsmodells des Spinnennetzes sind die Erkenntnisse aus der Doktorarbeit von Herrn Jorge Alencastre Miranda [Mir][Rao03][Tho83][Tim74][GHSW08].

Zustandsgrößen unterliegen häufig regelmäßigen zeitlichen Schwankungen. Diese Vorgänge nennt man Schwingungen. Beispiele sind der elektrische Stromkreis oder der Wellengang eines Sees. Wiederholt sich der Verlauf einer Größe, spricht man von einer periodischen Schwingung. Sonderfall einer periodischen Schwingung ist eine harmonische Schwingung. Besondere Eigenschaft einer harmonischen Schwingung ist ihr sinusförmiger Verlauf.

Jedes mechanische System, welches eine Masse und eine Elastizität hat, kann vibrieren. Eine Vibration ist ein periodischer Austausch von Energie. Die Masse nimmt kinetische Energie und die Feder potentielle Energie auf.

Es gibt drei Möglichkeiten für die Klassifizierung von Schwingungen. Zum einen werden sie durch den Freiheitsgrad beschrieben. Die meisten technischen Systeme werden so idealisiert, dass sie mit dem Freiheitsgrad von eins, also mit einem Parameter, charakterisiert werden können. Zudem ist eine Einteilung nach dem Differentialgleichungstyp möglich. Man spricht von linearen oder nichtlinearen Schwingungen. Letztes Klassifizierungsmerkmal ist die Existenz von äußeren Kräften oder Momenten. Die Unterteilung erfolgt in freie und erzwungene Schwingungen.

In folgenden Kapitel werden freie Schwingungen und erzwungene Schwingungen erläutert. Zuletzt erfolgt die Beschreibung des Schwingungsmodells für das Spinnennetz.

### 3.2 Freie Schwingungen

Im Folgenden wird die freie Schwingung eines gedämpften Systems beschrieben. Es ist eine lineare Schwingung mit einem Freiheitsgrad von eins. Bei realen Systemen nehmen die Amplituden aufgrund von Reibungs- und Dämpfungskräften mit der Zeit ab.

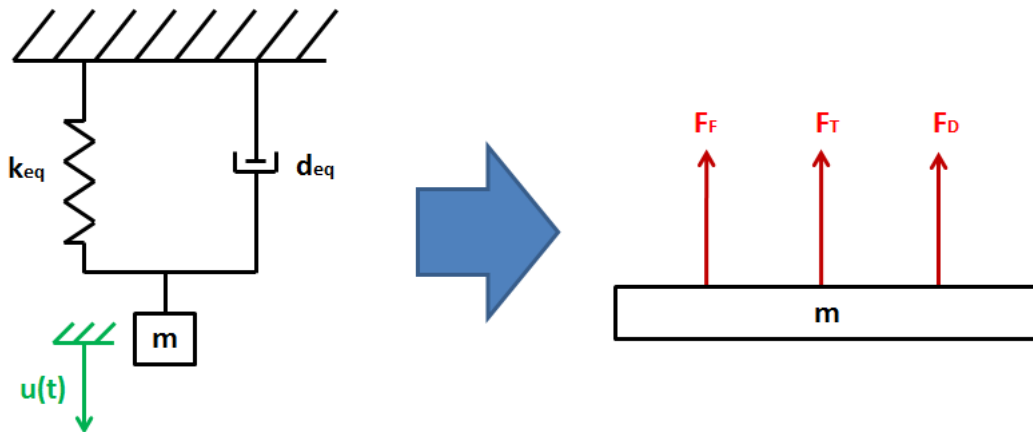


Bild 3.1: Aufbau und Freikörperbild einer freien Schwingung

In folgender Auflistung werden die Komponenten des in Bild 3.1 dargestellten Systems näher erläutert (Gleichung 3.1) [Rao03, S.20-S.37].

- Die Verschiebung der Masse  $m$  erfolgt in eine Richtung. Das System hat einen Freiheitsgrad von eins. Die Masse  $m$  speichert kinetische Energie.
- Die Feder wird durch die Federkonstante  $k_{eq}$  beschrieben. Sie speichert potentielle Energie. Die Masse der Feder wird vernachlässigt. Die Rückstellkraft der Feder ist proportional zur Verschiebung  $u$ .
- Der Dämpfer wird durch den Dämpfungskoeffizient  $d_{eq}$  charakterisiert. Diese Einheit wandelt kinetische Energie in eine dissipative Energieform um wie zum Beispiel Wärme oder Geräusche. Die dissipative Kraft ist der Bewegungsrichtung der Masse entgegengerichtet. Sie ist proportional zur relativen Geschwindigkeit zwischen den beiden Enden des Dämpfungselements. Durch einen Dämpfer wird dem System Energie entnommen. Auch ohne dämpfende Eigenschaften ( $d_{eq} = 0$ ) ist das System oszillierfähig.

Die Beschreibung des Systems (Bild 3.1) erfolgt durch die Gleichung 3.1. Zur Anregung eines Systems zu einer freien Schwingung muss diesem mindestens eine Anfangsbedingung in Form einer Geschwindigkeit  $\dot{u}(t=0)$  oder einer Verschiebung  $u(t=0)$  aufgezwungen werden.

$$\underbrace{m \cdot \ddot{u}}_{F_T} + \underbrace{d_{eq} \cdot \dot{u}}_{F_D} + \underbrace{k_{eq} \cdot u}_{F_F} = 0 \quad (3.1)$$

Für Gleichung 3.1 kann geschrieben werden.

$$\ddot{u} + 2 \cdot \delta \cdot \dot{u} + \omega_0^2 \cdot u = 0 \quad (3.2)$$

Hierbei ist  $\delta$  der Dämpfungsfaktor beziehungsweise die Abklingkonstante und  $\omega_0$  die Eigenkreisfrequenz des Systems. Für diese beiden Parameter gilt.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m}} \quad \text{und} \quad 2 \cdot \delta = \frac{d_{eq}}{m} \quad (3.3)$$

Bei Anregung des Spinnennetzes durch eine der genannten Anfangsbedingungen, schwingt dieses um seine Gleichgewichtslage. Die Lösung der Differentialgleichung 3.1 lautet.

$$u(t) = e^{(-\delta \cdot t)} \cdot C \cdot \cos(\omega_D \cdot t + \phi) \quad (3.4)$$

Die Frequenz  $\omega_D$  ist die Frequenz, mit welcher das System schwingt. Diese ist nicht identisch mit der Eigenfrequenz  $\omega_0$ .

$$\omega_D = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (3.5)$$

Die Lösung der Differentialgleichung 3.4 ist ein Produkt, bei welchem  $C$  eine Konstante ist, die Exponentialfunktion den Rückgang der Amplitude und die Kosinusfunktion die Oszillation beschreibt (Bild 3.2). Die Konstante  $C$  und die Phasenverschiebung  $\phi$  werden durch die Anfangsbedingungen bestimmt. Die Werte für die Erstellung des folgenden Diagramms wurden willkürlich gewählt.



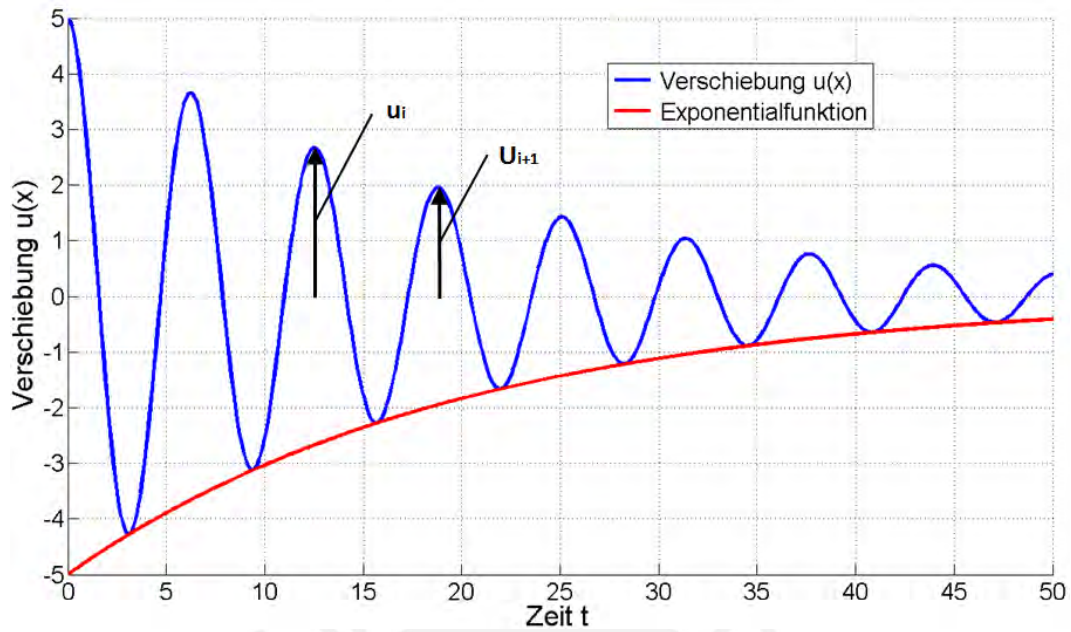


Bild 3.2: Diagramm: Freie Schwingung

Zur Ermittlung der Dämpfungseigenschaften eines Systemes werden am Verlauf der Verschiebung einer freien Schwingung zwei Hochpunkte abgelesen. Mit Hilfe des Logarithmischen Dekrements wird die Dämpfung berechnet.

$$\ln \frac{u_i}{u_{i+1}} = \delta \cdot T_D \quad (3.6)$$

$$T_D = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_D} \quad (3.7)$$

Der Parameter  $T_D$  ist die Dauer für den Durchlauf einer gedämpften Schwingungsperiode.

### 3.3 Erzwungene Schwingungen

#### 3.3.1 Krafterregung

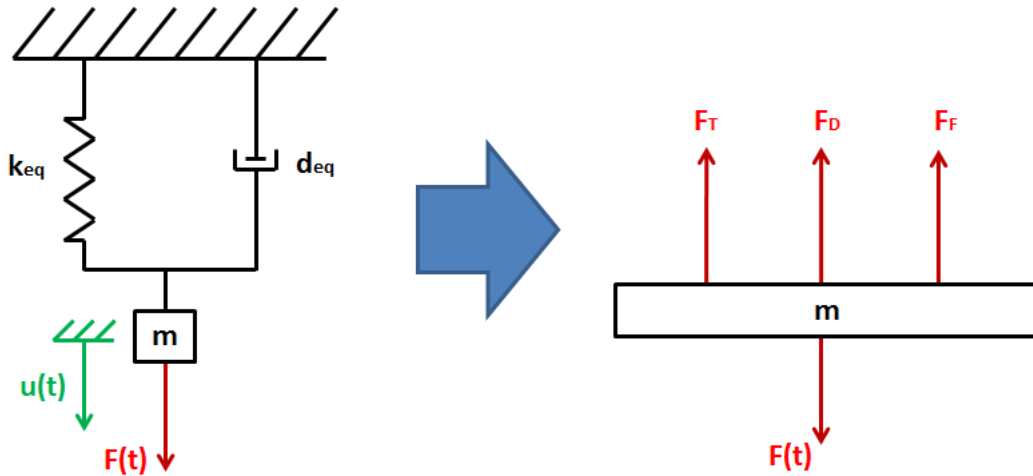


Bild 3.3: Erzwungene Schwingung durch Krafterregung

Das in Bild 3.3 dargestellte System wird durch eine harmonisch veränderliche Kraft  $F(t)$  angeregt. Die Differentialgleichung 3.8 ist zweiten Grades und linear zur Verschiebung  $u$ . Durch Freischneiden der Masse  $m$  erhält man das Freikörperbild (Bild 3.3, rechte Darstellung) und durch Aufstellen des Kräftegleichgewichtes erhält man die Differentialgleichung mit dem Freiheitsgrad von eins (Gleichung 3.8). Trägheitskraft  $F_T$ , Dämpferkraft  $F_D$  und Federkraft  $F_F$  wirken der Erregerkraft  $F(t)$  entgegen.

$$\underbrace{m \cdot \ddot{u}}_{F_T} + \underbrace{d_{eq} \cdot \dot{u}}_{F_D} + \underbrace{k \cdot u}_{F_F} = F(t) \quad (3.8)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung besteht aus dem homogenen und dem partikulären Anteil. Der wichtige Teil der Lösung ist der partikuläre Anteil, da der homogene Anteil im praktischen Betrieb nach dem Einschwingvorgang verschwindet. Es wird folgende partikuläre Lösung angenommen, wobei  $U$  die Amplitude der Kraftantwort und  $\phi$  die Phasenverschiebung der Oszillation gegenüber der Erregerkreisfrequenz  $\omega$  ist.

$$f(t) = U \cdot \sin(\omega \cdot t - \phi) \quad (3.9)$$

Die Lösung der Differentialgleichung für die Amplitude der Kraftantwort  $U$  (Gleichung 3.10) sowie für die Phasenverschiebung  $\phi$  (Gleichung 3.11) lautet. Der homogene Teil wird vernachlässigt.

$$U = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m \cdot \omega^2)^2 + (d_{eq} \cdot \omega)^2}} \quad (3.10)$$

$$\phi = \arctan \left( \frac{d_{eq} \cdot \omega}{k_{eq} - m \cdot \omega^2} \right) \quad (3.11)$$

Bild 3.4 zeigt die Verstärkungsfunktion  $\frac{U}{F_0}$  für verschiedene Dämpfungen in Abhängigkeit des Frequenzverhältnisses ( $\eta = \frac{\omega}{\omega_0}$ ). Für die Erstellung dieses Diagramms wurden die Werte für die Variablen willkürlich gewählt. Bei Anregung mit einer kleinen Erregerfrequenz ( $0 < \omega < 0,3 \cdot \omega_0$ ) ist die in das Gestell übertragene Kraft nahezu identisch mit den Erregerkraftamplituden  $F_0$ . Eine Erhöhung des Frequenzverhältnisses  $\eta$  führt zu einer Vergrößerung der Kraftantwortamplitude  $U$ . Ein Verhältnis von nahezu eins ruft eine maximale Kraftantwort hervor (Resonanzfall). Im Frequenzverhältnissbereich oberhalb des Wertes eins nimmt die Verstärkung ab. Je höher der Dämpfungsfaktor  $d_{eq}$  und somit die Lehrsche Dämpfung  $D$ , desto geringer die Verstärkung und somit die in das Gestell übertragene Kraft. Die Lehrsche Dämpfung definiert sich wie folgt.

$$D = \frac{d_{eq}}{2 \cdot m \cdot \omega_0} \quad (3.12)$$

In der praktischen Anwendung sind sowohl Feder als auch Dämpfer nicht linear. In den meisten Fällen können sie im Arbeitsbereich linearisiert werden. Die Beschreibung und die mathematische Lösung eines Systems mit nichtlinearen Eigenschaften ist deutlich aufwendiger [Tho83, S.48-51].

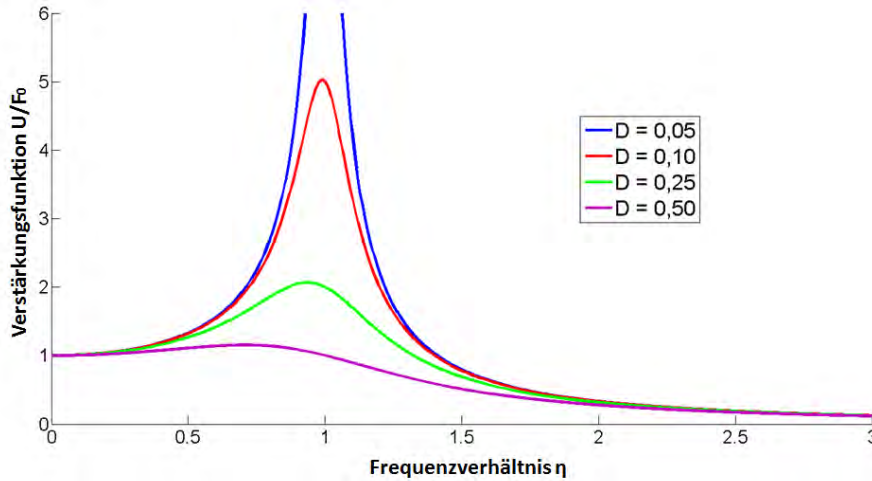


Bild 3.4: Diagramm: Verstärkungsfunktion für verschiedene Dämpfungen in Abhängigkeit des Frequenzverhältnisses

### 3.3.2 Fußerregung

Zur Eigenfrequenzermittlung des Spinnennetzes wird der Rahmen durch eine Fußerregung  $y(t)$  angeregt. Die schwingende Masse wird über ein sich harmonisch schwingendes Gestell  $y(t)$ , welches mit der Masse über eine Feder und einem Dämpfer verbunden ist, angeregt (Bild 3.5). Messgröße für die Erprobungen sind die Verschiebung der Fußerregung  $y(t)$  und die Verschiebung der Masse  $u$ .

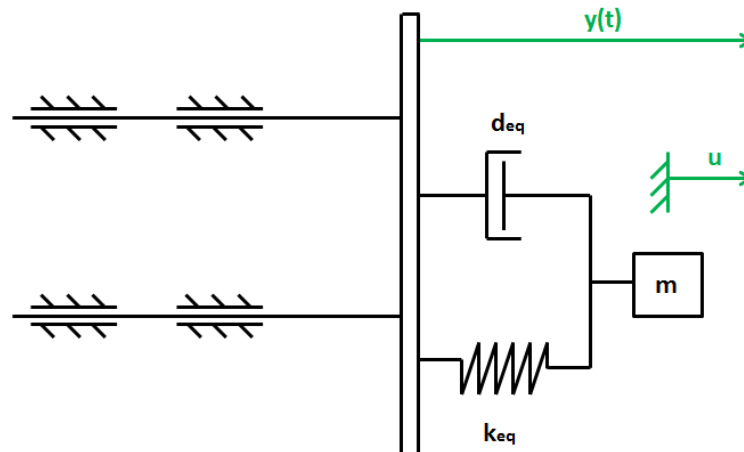


Bild 3.5: Erzwungene Schwingung durch Wegeinprägung

Folgende Differentialgleichung beschreibt das System.

$$F_T + F_D + F_F = 0 \quad (3.13)$$

Die Federkraft ist proportional zur Relativlage zwischen den Koordinaten  $y(t)$  und  $u$ , die Dämpferkraft zur Relativgeschwindigkeit der beiden Koordinaten. Somit folgt.

$$m \cdot \ddot{u} + d_{eq} \cdot \underbrace{(\dot{u} - \dot{y}(t))}_{\dot{z}} + k_{eq} \cdot \underbrace{(u - y(t))}_z = 0 \quad (3.14)$$

Durch Substitution der Differenz  $u - y(t)$  durch den Parameter  $z$  ergibt sich.

$$m \cdot \ddot{z} + d_{eq} \cdot \dot{z} + k_{eq} \cdot z = -m \cdot \ddot{y}(t) \quad (3.15)$$

Die Differentialgleichung 3.15 wird nach dem identischen mathematischen Verfahren aufgelöst, wie Gleichung 3.8. Das System wird durch eine harmonische Gestellbewegung  $y(t)$  angeregt.

$$y(t) = Y_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3.16)$$

$Y_0$  ist die Amplitude der Anregung und  $\omega$  die Erregerfrequenz des Gestelles. Es gilt für die zweite Ableitung nach der Zeit  $t$ .

$$\ddot{y}(t) = -Y_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3.17)$$

Die Lösung der Differentialgleichung 3.15 erfolgt mit folgendem Ansatz.

$$z = Z \cdot \sin(\omega \cdot t - \phi) \quad (3.18)$$

Die Lösung lautet.

$$Z = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot Y_0}{\sqrt{(k - m \cdot \omega^2)^2 + (d_{eq} \cdot \omega)^2}} \quad (3.19)$$

$$\tan \phi = \frac{d_{eq} \cdot \omega}{k_{eq} - m \cdot \omega^2} \quad (3.20)$$

In Bild 3.6 ist die relative Wegverstärkung in Abhängigkeit vom Frequenzverhältnis aufgetragen. Wird die Basis (Bild 3.5) mit einer sehr geringen Erregerfrequenz ( $0 < \omega < 0,3 \cdot \omega_D$ ) angeregt, so ist die relative Verschiebung zwischen der Masse  $m$  und dem Gestell Null. Dies bedeutet, dass sich die Masse  $m$  mit dem Gestell mitbewegt. Die Antwortamplitude  $Z$  wird maximal bei Erregung mit der Resonanzfrequenz  $\omega_D$ . Für hohe Frequenzverhältnisse ( $\eta > 3$ ) entspricht die Amplitude der Wegeinprägung  $Y_0$  der Amplitude der Relativbewegung  $Z$ .

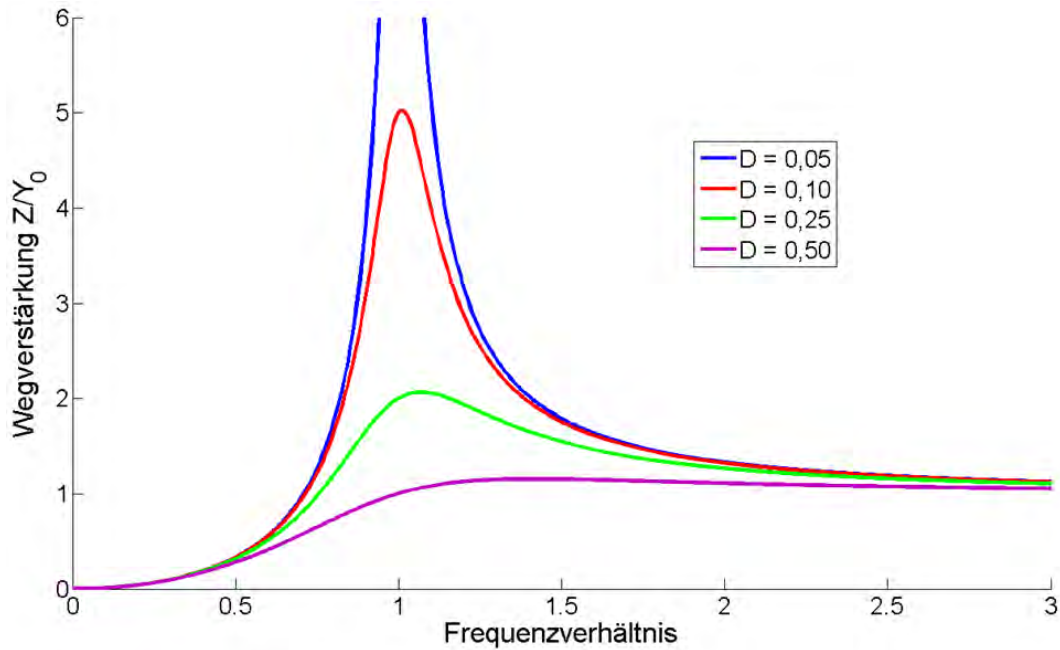


Bild 3.6: Diagramm: relative Wegverstärkung  $\frac{Z}{Y_0}$  für verschiedene Dämpfungen in Abhängigkeit des Frequenzverhältnisses

Um nun die absolute Verschiebung der Masse  $m$  zu bestimmen, wird das System rücktransformiert. Die Wegeinprägung  $y(t)$  kann auch wie folgt geschrieben werden. Es ergibt sich für das Verhältnis aus Ausgangsamplitude  $U$  und Eingangsamplitude  $Y_0$ .

$$\left| \frac{U}{Y_0} \right| = \sqrt{\frac{k^2 + (\omega \cdot d_{eq})^2}{(k - m \cdot \omega^2)^2 + (d_{eq} \cdot \omega)^2}} \quad (3.21)$$

Der in Gleichung 3.21 dargestellte Term wird bei Anregung mit der Resonanzfrequenz  $\omega_D$  maximal.

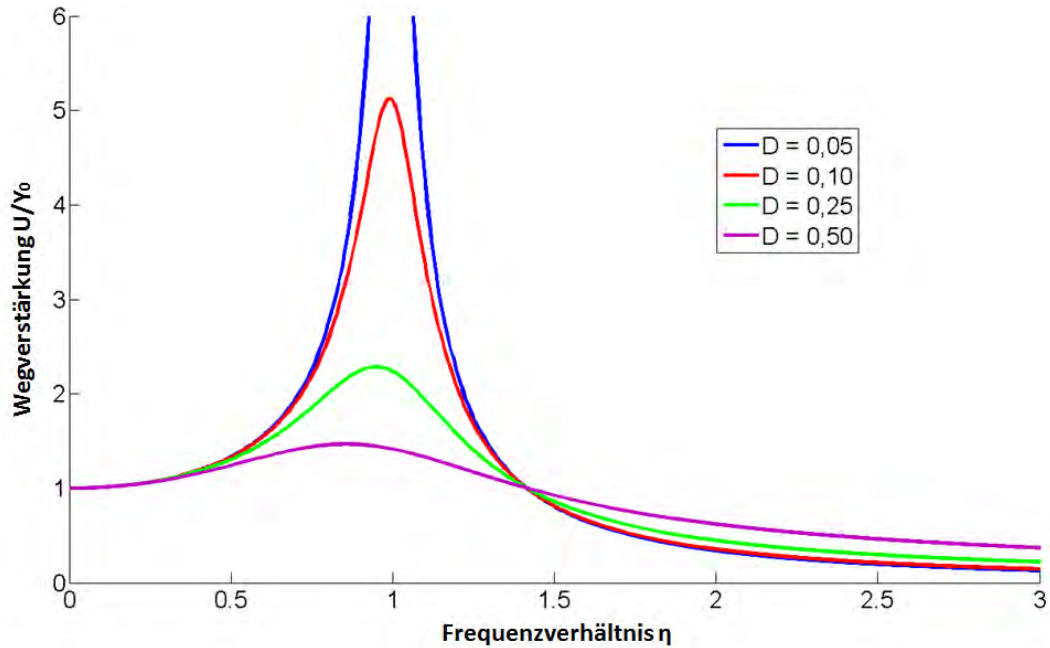


Bild 3.7: Diagramm: absolute Wegverstärkung  $\frac{U}{Y_0}$  für verschiedene Dämpfungen in Abhängigkeit des Frequenzverhältnisses

Das Bild 3.7 zeigt die Verstärkungsfunktion der absoluten Amplitude der Masse  $U$  gegenüber der absoluten Amplitude der Anregung  $Y_0$ . Wird das System mit einer Frequenz  $\omega$  erregt, welche deutlich kleiner ist wie seine Eigenfrequenz  $\omega_0$ , so ist die Amplitude der Antwort  $U$  identisch. Im Bereich von einer sehr kleinen Erregerfrequenz  $\omega$  bis zum  $\sqrt{2}$ -fachen der Eigenfrequenz des Systems ist die Antwortamplitude  $U$  höher als die Eingangsamplitude  $Y_0$ . Die Ausgangsamplitude  $U$  wird maximal, wenn das System mit seiner Resonanzfrequenz  $\omega_D$  oszilliert wird. Dieser Maximalwert ist umso kleiner, je größer der Dämpfungskoeffizient des Systems ist. Hat der Dämpfungskoeffizient den Wert Null, so wird die Amplitude der Antwort  $U$  theoretisch unendlich groß. In diesem Fall sind Eigenfrequenz  $\omega_0$  und Resonanzfrequenz  $\omega_D$  identisch. Wird das System mit einer Frequenz angeregt, welche einen größeren Wert hat als das  $\sqrt{2}$ -fache der Eigenfrequenz  $\omega_0$ , ist die Größe der Amplitude der Antwort  $U$  kleiner als die des Eingangs  $Y_0$ .

### 3.4 Schwingungsmodell des Spinnennetzes

#### 3.4.1 Modellbildung

Bild 3.8 zeigt das Spinnennetz und sein abstrahiertes Modell. Die kreisförmig gezeichneten Spiralen (grün dargestellt) sind biegeschlaff und bilden deshalb eigentlich Linien zwischen den Radien. Die Radien (schwarz dargestellt) sind im Randbereich in einem Spinnennetz mit den Rahmenfäden verbunden, welche die Verbindung zum Gestell bilden.

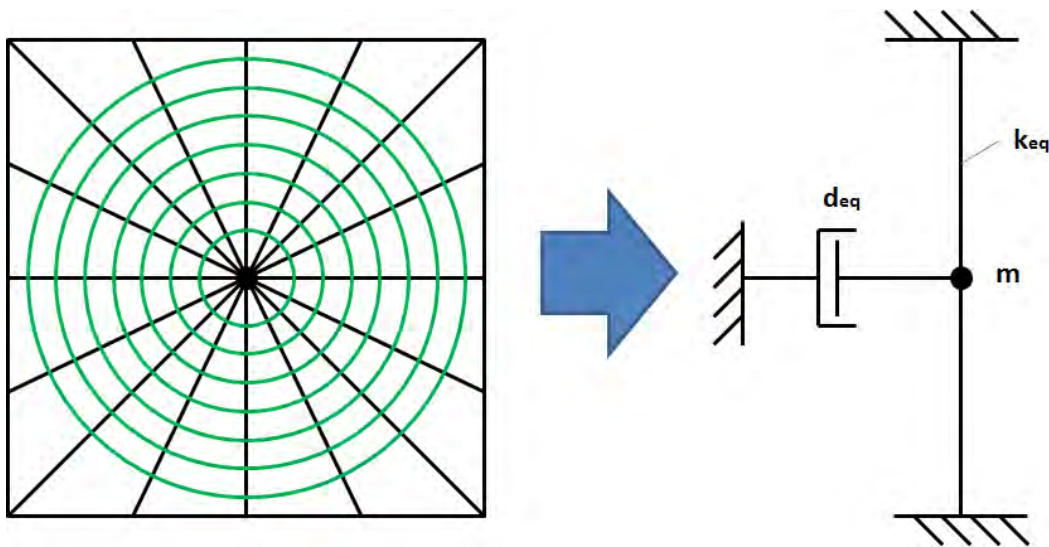


Bild 3.8: Spinnennetz und abstrahiertes Modell

Um aus dem Spinnennetz ein abstrahiertes Modell zu generieren, wurden folgende Annahmen getroffen:

- Das Spinnennetz ist annähernd symmetrisch.
- Die Radien haben eine konstantes Elastizitätsmodul  $E$ , eine konstante Querschnittsfläche  $A$  und sind in dem selben Betrag vorgespannt.
- Das Elastizitätsmodul  $E$  der Radien ist deutlich höher als das der Spiralen. Es erfolgt keine Aufnahme der Spiralen ins abstrahierte Modell.
- Die Masse des Netzes ist gegenüber der Masse des Spinnentiers vernachlässigbar.



Das Bild 3.9 zeigt eine freie nichtlineare Schwingung. Die Schwingung ist frei, da keine äußeren Kräfte oder Momente auf das System einwirken. Die Differentialgleichung wird homogen.

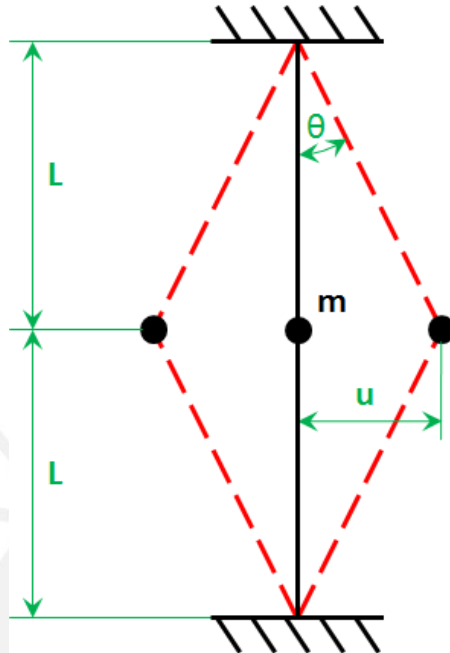


Bild 3.9: System mit nichtlinearen Eigenschaften [Tim74, S.145f]

Die Masse  $m$ , deren Gewichtskraft vernachlässigt wird, ist in der Mitte des Fadens, welcher eine Fadenlänge von zwei Längeneinheiten  $2 \cdot L$  hat, dargestellt. In diesem Zustand ist der Faden bereits vorgespannt ( $F_{vor}$  in Gleichung 3.22). Die Querschnittsfläche  $A$  der Seide und das Elastizitätsmodul  $E$  des Fadens sind konstant. Eine horizontale Verschiebung der Masse  $m$  um einen Betrag  $u$  erzeugt eine zusätzliche axiale Kraft  $F_{zus}$  im Faden. Es wird eine Rückstellkraft generiert, welche die Masse in seine Ausgangslage zurückführen will (Bild 3.10). Es wird ein biegeschlaffes Material angenommen. Somit entsteht bei horizontaler Verschiebung kein Rückstellmoment im Bereich der Fixierpunkte.

### 3.4.2 Aufstellen der Differentialgleichung

Die axiale Gesamtkraft  $F_{axial}$  errechnet sich aus der Summe folgender Kraftkomponenten.

- der Vorspannkraft  $F_{vor}$
- der zusätzlich durch die Verschiebung  $u$  hervorgerufene Kraft  $F_{zus}$

$$F_{axial} = F_{vor} + F_{zus} = F_{vor} + \frac{E \cdot A}{L} \cdot \Delta \quad (3.22)$$

Eine horizontale Verschiebung  $u$  der Masse  $m$  führt zu einer Verlängerung des Fadens um den Betrag  $\Delta$ .

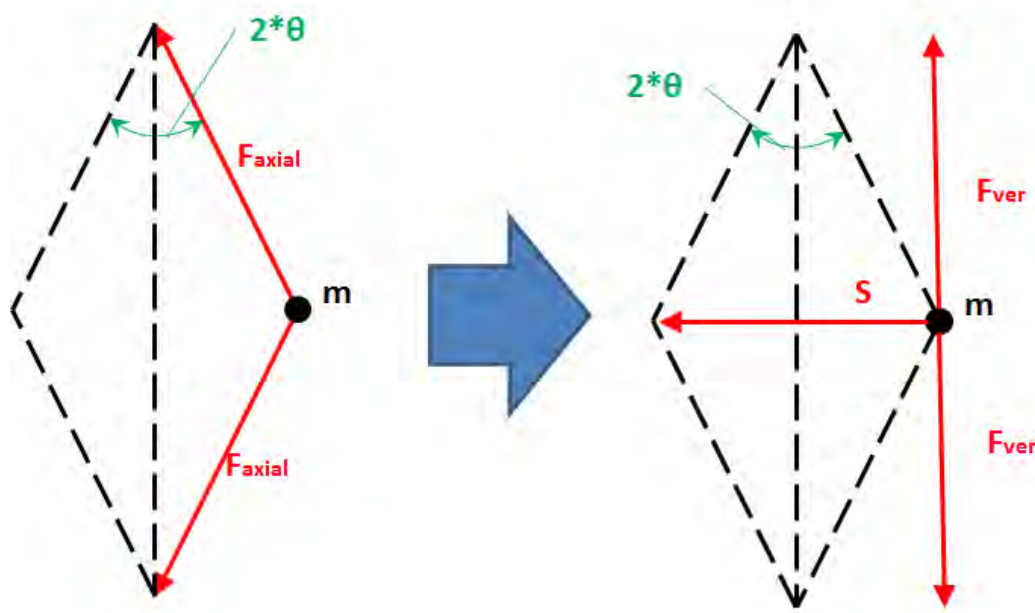


Bild 3.10: Freikörperbild der Masse bei horizontaler Auslenkung

Für die horizontale Rückstellkraft  $S$  ergibt sich nach Bild 3.10.

$$S = \left( F_{vor} + \frac{E \cdot A}{L} \cdot \Delta \right) \cdot 2 \cdot \sin \theta \quad (3.23)$$

Durch Einsetzen in Gleichung 3.8 ergibt sich folgende Differentialgleichung.

$$m \cdot \ddot{u} + d_{eq} \cdot \dot{u} + \left( F_{vor} + \frac{E \cdot A}{L} \cdot \Delta \right) \cdot 2 \cdot \sin \theta = 0 \quad (3.24)$$

Aus Bild 3.9 ergeben sich folgende zwei geometrische Bedingungen.

$$\Delta = \sqrt{L^2 + u^2} - L \quad (3.25)$$

$$\sin \theta = \frac{u}{\sqrt{L^2 + u^2}} \quad (3.26)$$

Durch Einsetzen ergibt sich für die Differentialgleichung 3.24.

$$m \cdot \ddot{u} + d_{eq} \cdot \dot{u} + \left[ F_{vor} + \frac{E \cdot A}{L} \cdot \left( \sqrt{L^2 + u^2} - L \right) \right] \cdot 2 \cdot \frac{u}{\sqrt{L^2 + u^2}} = 0 \quad (3.27)$$

Die Gleichung 3.27 ist nicht linear, da die Rückstellkraft nicht proportional zur Verschiebung  $u$  ist.

### 3.4.3 Linearisierung

In Kapitel 3.4.2 wurde bereits die nichtlineare Differentialgleichung hergeleitet, mit welcher ein Schwingungsmodell des Spinnennetzes erzeugt wird. Die Gleichung 3.27 wird linearisiert. Die Verlängerung des Fadens  $\Delta$  wird durch Gleichung 3.28 angenähert und für kleine Winkel gilt die Näherung 3.29 [Mir]. Es handelt sich um ein geometrisch nicht lineares System [Tim74].

$$\Delta \approx \frac{u^2}{2 \cdot L} \quad (3.28)$$

$$\sin \theta \approx \frac{u}{L} \quad (3.29)$$

Mit den beiden Näherungen aus den Gleichungen 3.28 und 3.29 ergibt sich die angenäherte Differentialgleichung 3.30 aus Gleichung 3.24.

$$m \cdot \ddot{u} + d_{eq} \cdot \dot{u} + \left( \frac{2 \cdot F_{vor}}{L} \right) \cdot u + A \cdot E \cdot \left( \frac{u}{L} \right)^3 = 0 \quad (3.30)$$

Die Differentialgleichung ist nun kubisch, also weiterhin nichtlinear. Der Quotient  $\frac{u}{L}$  ist klein, da die horizontale Verschiebung  $u$  gegenüber der Länge  $L$  sehr klein ist. Ferner nehmen wir an, dass das Produkt aus dem Elastizitätsmodul  $E$  und der Querschnittsfläche

$A$  kleiner ist als die Vorspannkraft  $F_{vor}$ . Somit gilt [Tim74].

$$A \cdot E \cdot \left(\frac{u}{L}\right)^3 \approx 0 \quad (3.31)$$

Somit gilt für die Differentialgleichung 3.30. Die Differentialgleichung ist physikalisch linear.

$$m \cdot \ddot{u} + d_{eq} \cdot \dot{u} + \left(\frac{2 \cdot F_{vor}}{L}\right) \cdot u = 0 \quad (3.32)$$

Die Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  ist.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot F_{vor}}{L \cdot m}} \quad (3.33)$$

#### 3.4.4 Vereinfachtes Schwingungsmodell des Spinnennetzes

Die durch die Linearisierung vereinfachte Differentialgleichung des Spinnennetzes (Gleichung 3.32) ist nur von der äquivalenten Vorspannkraft abhängig. Das Modell ist unabhängig von den Materialeigenschaften der Spinnenseide.

Das abstrahierte Modell wird durch folgende Parameter beschrieben.

- Masse  $m$
- Steifigkeit  $k_{eq}$ , beschrieben durch die Größe des Spinnennetzes  $2 \cdot L$  und die äquivalente Vorspannung des Netzes  $F_{vor}$
- Äquivalenter Dämpfungskoeffizient  $d_{eq}$

Wir setzen im Folgenden den Begriff Vorspannung mit dem Begriff Vorspannkraft gleich. Die äquivalente Vorspannung wird ebenfalls in der Einheit Newton angegeben.

Ferner können nach Gleichung 3.33 folgende Aussagen über die Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  mit dem erstellten Modell des Spinnennetzes getroffen werden.

- Die Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  des Spinnennetzes ist proportional zur Quadratwurzel der Vorspannkraft  $F_{vor}$  des Spinnennetzes.
- Die Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  des Spinnennetzes ist indirekt proportional zur Quadratwurzel von Masse  $m$  und Länge  $L$ .
- Die Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  des Spinnennetzes ist materialunabhängig.

Die Vorspannkraft  $F_{vor}$  ist eine äquivalente Größe. Nach Kenntnis des Autors gibt es derzeit keine Modelle zur Berechnung der äquivalenten Vorspannkraft. Mit den Schwingungserprobungen wurde zunächst die Eigenkreisfrequenz ermittelt und aus dieser wurde die äquivalente Vorspannkraft ermittelt werden.

## 3.5 Zusammensetzung des Dämpfungskoeffizienten

### 3.5.1 Dämpfungsarten

Durch die Dämpfung wird kinetische Energie des Systems in eine andere Energieform, zum Beispiel Wärme oder Geräusche, umgewandelt. Der Grad der Abnahme der Amplitude einer freien Schwingung wird durch den Dämpfungskoeffizienten bestimmt. Ist dieser Null, so schwingt das System mit konstanter Amplitude. Die drei wichtigsten Dämpfungstypen in mechanischen Systemen sind [Mir].

- Interne Dämpfung
- Strukturdämpfung
- Fluiddämpfung

Die interne Dämpfung wird durch die Materialeigenschaften des Systems bestimmt. Ursache sind die mikrostrukturellen Bewegungen der Moleküle. Strukturdämpfung verursacht Reibung in den Kontakt- und Schnittstellen. Dieser Typ ist von der Struktur des Systems abhängig. Oft ist es schwer ein analytisches Modell zu entwickeln, welches diese Dämpfungsform zufriedenstellend beschreibt. Die Fluiddämpfung entsteht, wenn sich ein Körper in einem Fluidmittel, wie zum Beispiel Luft oder Öl, bewegt. Die Dämpfungskraft

wirkt der Bewegungsrichtung entgegen. Sie ist abhängig von der größten Querschnittsfläche senkrecht zur Bewegungsrichtung des Körpers, dessen Form und dem Fluid, in welchem sich der Gegenstand fortbewegt [Mir].

### 3.5.2 Äquivalente Dämpfung und die Dämpfungskonstante des Spinnennetzes

In realen Systemen liegt meistens eine komplexe Kombination aus den genannten Dämpfungsformen vor. Deshalb wird in Erprobungen oft ein äquivalenter Dämpfungskoeffizient bestimmt. Bild 3.11 zeigt die wichtigsten Dämpfungstypen des Spinnennetzes. Die Spiralen des fertiggestellten Netzes sind kreisförmig dargestellt. Da es sich um ein biegeschlaffes Material handelt, müssten diese linienförmig dargestellt werden.

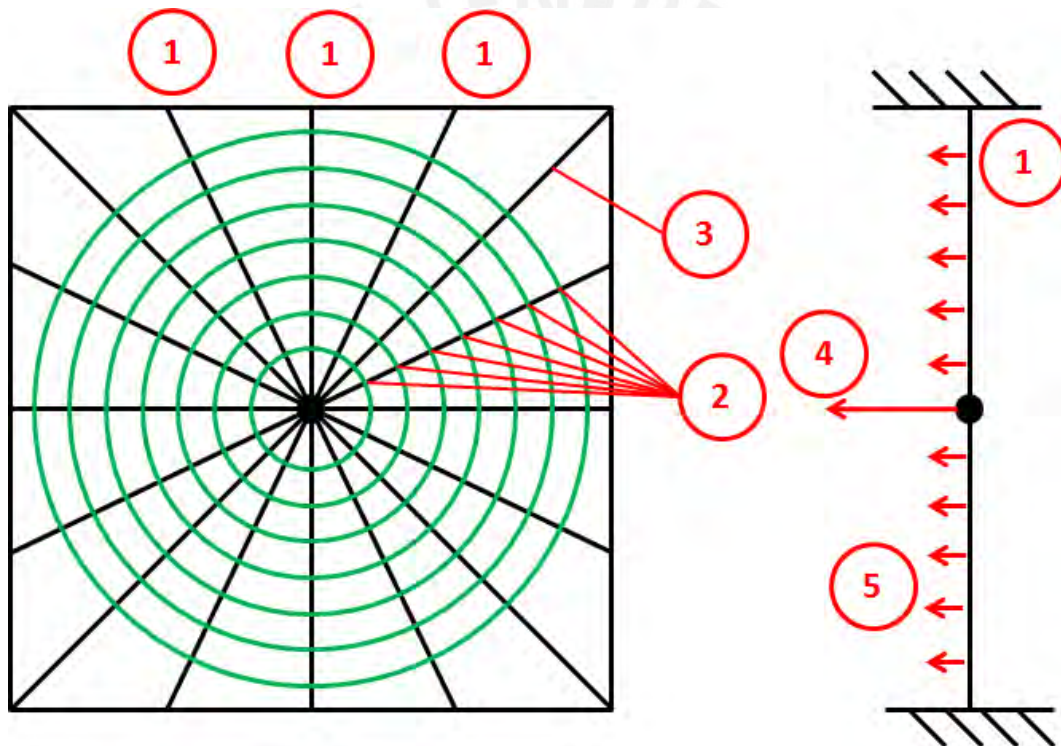


Bild 3.11: Dämpfungstypen des Spinnennetzes

In Tabelle 3.1 sind die wichtigsten Dämpfungsformen des Spinnennetzes tabellarisch aufgeführt. Die Relativbewegung zwischen Gestell und Radien (1) führt zu einer Verbiegung der Radien an der Kontaktstelle. Die Relativbewegung zwischen Radien und Spiralen (2) verursacht eine Verbiegung der Radien und eine Verdrehung der Spiralen um ihre

Längsachse. Der Autor nimmt an, dass die Strukturdämpfung aufgrund der biegeschlafenen Materialeigenschaft vernachlässigbar klein ist. Die Relativbewegung innerhalb des Materials (3) durch intra- und intermolekulare Bewegungen dämpft das System zusätzlich. Diese Relativbewegung ist vor allem auf die Verlängerung der Fäden  $\Delta$  durch die Verschiebung  $u$  der Masse zurückzuführen. Schwingt die Masse  $m$ , so muss diese Luft verdrängen. Dies verursacht ebenfalls eine dämpfende Kraft (4). Das gleiche gilt für die Seidenfäden.

Tabelle 3.1: Dämpfungstypen des Spinnennetzes

Nummer	Dämpfungstyp	Beschreibung
1	Strukturdämpfung	Verbiegung zwischen Gestell und Radien
2	Strukturdämpfung	Relativbewegung zwischen Radien und Spiralen
3	interne Dämpfung	Relativbewegung innerhalb des Materials
4	Fluiddämpfung	Luftwiderstand durch Bewegung der Masse
5	Fluiddämpfung	Luftwiderstand durch Bewegung der Seidenfäden

Inwieweit die verschiedenen Dämpfungsformen die Schwingung des Spinnennetzes beeinflussen wurde zum Teil schon untersucht. Vier Seidenfäden wurden, wie Bild 3.12 zeigt, eingespannt. Zudem wurde die Masse mit einem konstanten Impuls angeregt, so dass diese frei schwingt. Diese Erprobungen wurden zum einen im Vakuum, bei einem Umgebungsdruck von einem Millibar und zum anderen bei einem Umgebungsdruck von etwa einem Bar durchgeführt. Im Vakuum betrug die Abklingdauer etwa 120 Sekunden, wogegen bei einem Umgebungsdruck von etwa einem Bar die Abklingdauer nur 25 Sekunden andauerte. Dies bedeutet, dass der Luftwiderstand der zentralen Masse und der Seidenfäden ausschlaggebend ist für den Dämpfungskoeffizienten und somit für die Dämpfungseigenschaften des Spinnennetzes [Mir].

Es muss berücksichtigt werden, dass bei diesen Erprobungen vier Fäden eingespannt waren. Der Autor nimmt an, dass die Verwendung einer vollständigen Geometrie das Dämpfungsverhalten verändern wird. Durch die erhöhte Anzahl der Seidenfäden ist mit einer Zunahme der Fluiddämpfung und der internen Dämpfung auszugehen.

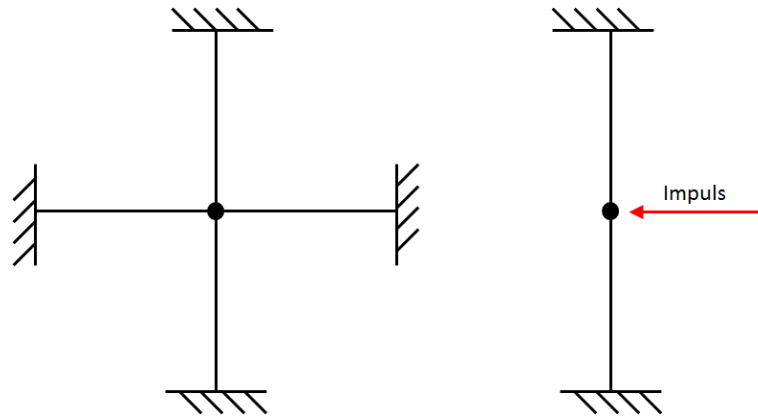


Bild 3.12: Versuchsaufbau bezüglich der durchgeführten Dämpfungserprobungen



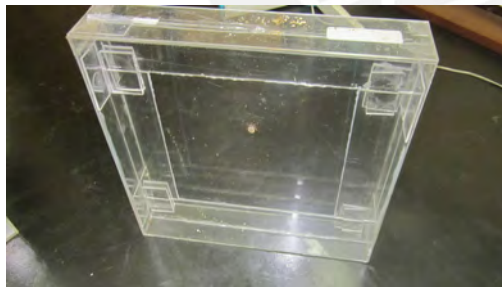


## 4 Erprobungen

### 4.1 Materialien

#### 4.1.1 Beschaffung und Aufbewahrung der Spinnentiere

Spinnen der Art *Argiope argentata* unterschiedlichen Alters wurden gefangen. Fangort waren verschiedene Orte im Naturreservat *Pantanos de Villa* im Stadtteil *Chorillos* in Lima. Die Spinnentiere wurden an unterschiedlichen Tagen eingefangen, jedoch alle im Zeitraum von März 2012 bis April 2012 zur Nachmittagszeit. Sie wurden unter nahezu konstanten Bedingungen in quaderförmigen Boxen gehalten (Bild 4.1(a)). Die Abmaße eines Aufbewahrungsbehälters betragen  $400 \times 400 \times 70 \text{ mm}$ , die Temperatur zwischen  $20^\circ\text{C}$  und  $28^\circ\text{C}$  und die Luftfeuchtigkeit zwischen 75 % und 85 %. Die Luftfeuchtigkeit sorgt für eine ausreichende Feuchte der Netze, so dass die Spinnentiere nicht verdursten. Die Tiere wurden zunächst alle zwei Tage mit einer Larve des Großen Schwarzkäfers *Zophobas morio* gefüttert. Vor dem Bau eines Netzes hat jedes Spinnentier mindestens drei Fütterungen zu sich genommen.



(a) Box zur Aufbewahrung der Spinne



(b) Nahrungsaufnahme

Bild 4.1: Bilder zu Spinnen und Aufbewahrung

Im Laufe der Erprobungen wurde eine Gewichtszunahme der Spinnentiere durch den genannten Fütterungszyklus festgestellt. Deswegen wurde die Hungerperiode auf eine

Woche erhöht. Dadurch wurde das Spinnengewicht nahezu konstant gehalten.

Die Spinnenart *Argiope argentata* nimmt Nahrung auf, wenn sie sich in einem fertiggestellten Spinnennetz befindet. In der Aufbewahrungsbox befindet sich jeweils ein Rahmen, in welchem das Spinnentier das Netz konstruiert. Sie positioniert sich im Netzzentrum und erkennt über die Vibrationen den Fang eines Opfers. Sie bewegt sich zur Nahrung, injiziert das Gift, verpackt das Opfer und trägt es zum Netzzentrum 4.1(b). Dort beginnt die Nahrungszunahme.

#### 4.1.2 Konstruktion und Vorbereitung der Spinnennetze

Hat ein Spinnentier in einem erbauten Spinnennetz drei Fütterungsvorgänge zu sich genommen, so wurde sie zum Bau eines neuen Netzes in einen leeren Rahmen gesetzt. Für die Experimente zur Ermittlung des Vorhandenseins eines Eigenfrequenzbereichs wurden zu den bereits vorhandenen gleichseitigen Rahmen der Größe  $300 \times 300 \text{ mm}$  weitere Rahmen der Größe  $250 \times 250 \text{ mm}$  und  $200 \times 200 \text{ mm}$  konstruiert. Anfangs waren Rahmen kleinerer Größe geplant, um einen möglichen Effekt der Netzgeometrie besser erkennen zu können. Spinnennetze mit den Rahmengrößen  $100 \times 100 \text{ mm}$  und  $150 \times 150 \text{ mm}$  wurden von den Spinnentieren konstruiert, konnten aufgrund von Unregelmäßigkeiten der Netze aber nicht für die Versuche verwendet werden. Der Grundwerkstoff der Aufbewahrungsbehälter und der Rahmen ist Plexiglas. Die Aufbringung von Klebstoff mit einer Heißklebepistole an der Rahmeninnenseite ermöglicht dem Spinnentier die Befestigung des Netzes an der Rahmeninnenseite (Sollbefestigungsstelle der Spinnennetze). Tabelle 4.1 zeigt die verwendeten Rahmengrößen mit den zugehörigen Längenparamtern  $L$ .

Tabelle 4.1: Rahmengrößen mit zugehörigen Längenparamtern

Rahmengröße	Längenparamter $L$ [mm]
$200 \times 200 \text{ mm}$	100
$250 \times 250 \text{ mm}$	125
$300 \times 300 \text{ mm}$	150

Sowohl die Konstruktion der Spinnennetze als auch die Durchführung der Erprobungen erfolgt in vertikaler Position und in gleicher Orientierung.

Die Box ist einseitig geöffnet. Die Einbringung des Rahmens schließt die Box zu allen Seiten, was eine Flucht der Spinnentiere unmöglich macht. Für den Bau eines Netzes benötigt diese Netzspinne einen Tag bis zwei Tage. Nach Fertigstellung des Fangapparates wird das Spinnentier dem Netz entnommen und ihr Gewicht gemessen. Bei der Entnahme wurde darauf geachtet, dass das Spinnennetz nicht beschädigt und der Sicherungsfaden, mit welchem das Tier mit dem Netz verbunden ist, sich nicht auf die klebrigen Spiralen legt. Zur Gewichtsmessung wird zuerst das Gewicht einer leeren Tupperbox bestimmt. Nach Einbringung der Netzspinne erfolgt eine erneute Messung. Die Differenz der gemessenen Gewichte entspricht der Spinnenmasse.

Die Beurteilung der Netze bestand unter anderem aus der Bewertung der Asymmetrie. Der Abstand von der Rahmenoberkante bis zum Netzzentrum ist Beurteilungskriterium. Es wurde die Anzahl der Radien oberhalb und unterhalb des Netzes gezählt. Ferner wurde darauf geachtet, dass die Rahmenfäden nur mit der Innenseite des Rahmens verbunden sind. War dies nicht der Fall, wurde das Netz nicht für Schwingungsversuche genutzt. Zur Durchführung der Schwingungsversuche wurde die Masse des Spinnentiers durch eine äquivalente Masse ersetzt. Zwei kreisförmige Styroporplättchen mit einem Durchmesser von etwa  $30\text{ mm}$  wurden jeweils von den beiden Netzseiten mit einer Heißklebepistole miteinander verklebt. Die Aufbringung des Klebstoffs erfolgt mit einer kreisförmigen Bewegung im Randbereich der Plättchen. Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass der Klebstoff sich mit den zum Netzzentrum verlaufenden Radien verbindet. Das Gewicht von zwei verklebten Styroporplättchen beträgt etwa  $250\text{ mg}$ . Die Gewichte der *Argiope argentata* nach der Fertigstellung der Netze betrug  $80\text{ mg}$  bis  $525\text{ mg}$ . Eine zusätzliche Beschwerung der Styroporplättchen mit Knetmasse kompensiert ein höheres Spinnengewicht. Nach den Erprobungen wurden die exakten Gewichte der äquivalenten Massen gemessen (Tabelle 4.2).

Insgesamt wurden fünf Individuen für die Erstellung von insgesamt zehn Netzen verwendet (Tabelle 4.2). Die Spinnentiere mit der Nummer eins und vier haben Spinnennetze aller verwendeten Größen konstruiert. Am Beispiel des Spinnentiers mit der Nummer eins ist die Zunahme des Gewichtes zu erkennen. Nach dem Bau des ersten Netzes mit einer Größe von  $200\text{ mm}$  hatte diese ein Gewicht von  $370\text{ mg}$ , nach dem zweiten Netz ein Gewicht von  $525\text{ mg}$ . Dies entspricht einer Zunahme von über 40 % gegenüber dem ersten

Spinnennetz. Deswegen wurden die Hungerperioden erhöht. Daraufhin ist das Spinnengewicht von diesem Individuum nahezu konstant geblieben.

Tabelle 4.2: Daten der Versuchsnetze, Massen und Versuchsspinnentiere

Netznummer [1]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Längenparameter $L$ [mm]	100	125	150	150	125	100	100	125	150	150
Spinnennummer [1]	1	2	3	1	1	3	4	4	4	5
Spinnenmasse $m_{Sp}$ [mg]	370	430	385	525	510	420	245	265	250	80
Äquivalente Masse [mg]	330	340	300	425	370	405	190	200	245	155

## 4.2 Berechnung der maximal zulässigen Verschiebung

Der Elastizitätsbereich der Dragline-Seide befindet sich in einem Kraftbereich von  $0\text{ N}$  bis  $0,016\text{ N}$  und einem Verformungsbereich von  $0\%$  bis  $2\%$  [Mir]. Aus bisher durchgeführten Schwingungsversuchen ist bekannt, dass der Ausschlag  $u$  maximal  $1\text{ cm}$  beträgt [Bau11]. Die Steigung  $k$  der Gerade im Elastizitätsbereich beschreibt die Kraft, welche für eine bestimmte Deformation notwendig ist.

$$k = \frac{0,016\text{ N}}{0,02} = 0,8\text{ N} \quad (4.1)$$

Die Vorspannkraft in den Radien wird mit  $1000\ \mu\text{N}$  [WB92] angenommen. Die Deformation hervorgerufen durch die Vorspannkraft beträgt.

$$\epsilon_1 = \frac{1000\ \mu\text{N}}{0,8\text{ N}} = 1,25 \cdot 10^{-3} = 0,125\% \quad (4.2)$$

Der minimale Längenparameter  $L$  beträgt  $200\text{ mm}$ . Die zusätzliche Verlängerung  $\Delta_{max}$  berechnet sich nach Gleichung 3.25

$$\Delta_{max} = \sqrt{L_{min}^2 + u_{max}^2} - L_{min} = \left(\sqrt{10^2 + 1^2} - 10\right)\text{ cm} = 0,499\text{ mm} \quad (4.3)$$

Dies ruft folgende zusätzliche Deformation hervor.

$$\epsilon_2 = \frac{0,499}{100} = 4,99 \cdot 10^{-3} = 0,499\% \quad (4.4)$$

Die Gesamtdeformation wird somit maximal  $0,512\%$  (Gleichung 4.2 und Gleichung 4.4). Die Obergrenze des Elastizitätsbereichs beträgt  $2\%$ . Die Durchführung der Erprobungen

im Elastizitätsbereich ist sichergestellt.

### 4.3 Versuchsaufbau

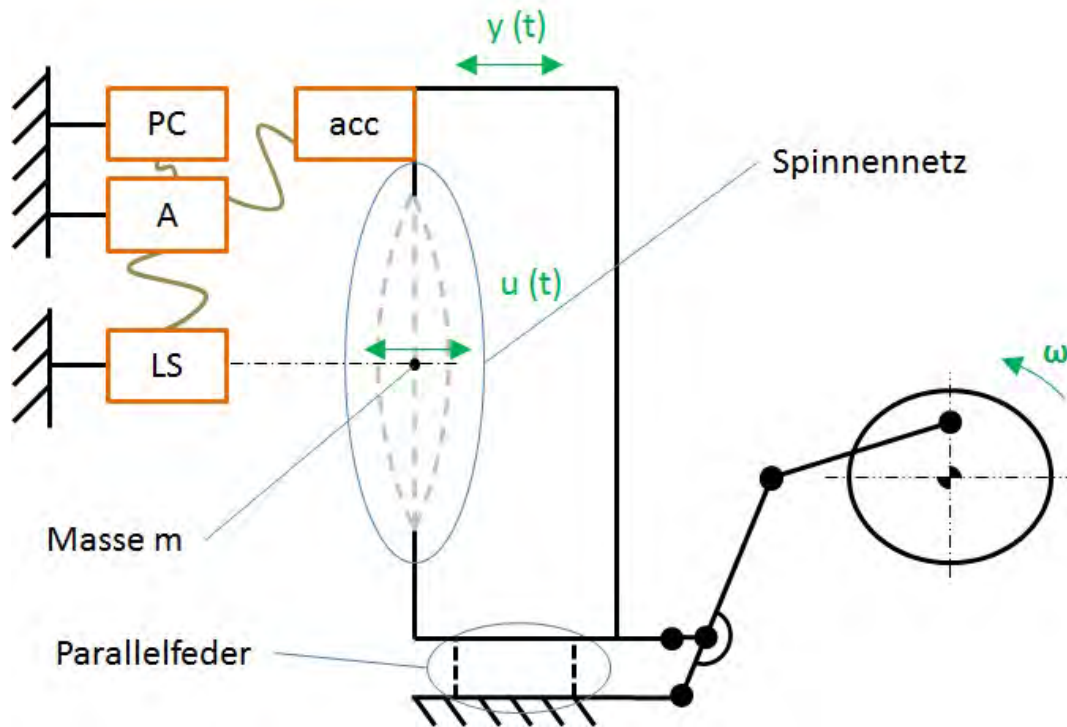


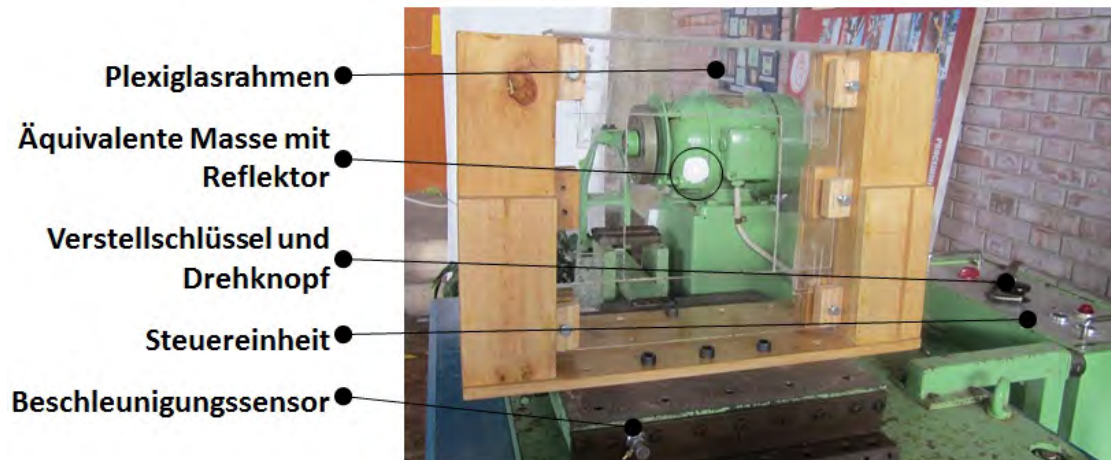
Bild 4.2: Versuchsaufbau

Bild 4.2 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau. Ein Motor lässt den beweglichen Teil des Rütteltisches über den dargestellten Mechanismus nahezu harmonisch vibrieren. Die mit dem Motor verbundene Koppel bestimmt die Bewegung der Schwinge. Eine weitere Koppel verbindet die Schwinge mit dem Rütteltisch. Die Erregerfrequenz  $\omega$  wird mit einem Drehknopf gesteuert. Dieser Drehknopf wird bei der Versuchsdurchführung manuell mit Hilfe eines Verstellschlüssels gedreht (Bild 4.3(b)). Der Hebel ermöglicht eine langsamere zeitliche Erregerfrequenzveränderung  $\dot{f}$ . Die Erregerfrequenz kann mit einer Genauigkeit von  $\pm 1 \text{ Hz}$  an einer Anzeige des Rütteltisches abgelesen werden. Der bewegliche Teil ist über eine Parallelfeder mit dem Gestell gelagert. Die Erregeramplitude beträgt  $2 \text{ mm}$ . Der Plexiglasrahmen mit dem Spinnennetz und der äquivalenten Masse wird zunächst von oben in den Holzrahmen geschoben. Die Sechskantschrauben (silber dargestellt in

Bild 4.3(b)) drücken den Plexiglasrahmen an den Holzrahmen, so dass diese beiden Teile fest miteinander verbunden sind. Weitere Schraubverbindungen unterdrücken die Relativbewegung zwischen Holzrahmen und Montierplatte. Der Beschleunigungssensor (*acc*) nimmt die Bewegung des Rütteltisches auf, der Lasersensor (*LS*) die Bewegung der äquivalenten Masse. Der Laser wird vor einer Messung auf den Reflektor ausgerichtet. Beide Sensoren sind mit einem Analysator (*A*) verbunden, welcher mit dem Computer (*PC*) verbunden ist. Der Lasersensor (*LS*), der Analysator (*A*) und der Computer (*PC*) sind ferner mit einer Stromquelle verbunden, welche in Bild 4.2 nicht dargestellt ist.



(a) Vorderansicht



(b) Seitliche Ansicht

Bild 4.3: Bilder des Versuchsaufbaus

## 4.4 Versuchsdurchführung

Zunächst war zur Ermittlung der Eigenfrequenz ein Ablaufschema geplant. Die Erregerfrequenz wird von  $0\text{ Hz}$  auf etwa  $10\text{ Hz}$  hochgefahren, kurz gehalten und wieder heruntergefahren. Dieses Bewegungsprofil ist in Bild 4.4 grün dargestellt. In diesem Frequenzbereich wurde bei allen Spinnennetzen ein Amplitudenanstieg und -abfall erkannt. Der Zeitraum des Hoch- bzw Herunterfahrens betrug 15 Sekunden bis 25 Sekunden. Die manuelle Steuerung erlaubte keine Erhöhung des Hoch- bzw Herunterfahrzeitraums.

Aufgrund von Unregelmäßigkeiten wurden zusätzliche Erprobungen mit den Spinnennetzen mit den Netznummer sieben bis neun durchgeführt. Es werden folgende drei Versuchsmethodiken ( $VM$ ) angewandt.

- $VM\ 1$ : Die Erregerfrequenz wird so langsam, wie mit der Übersetzung durch den Verstell Schlüssel möglich, erhöht. Es wurde kein *Slip*–*Stick*-Effekt festgestellt. Die zeitliche Erregerfrequenzveränderung wird als nahezu konstant angenommen. Die Erregerfrequenz wurde sieben bis elf mal erhöht und erniedrigt.
- $VM\ 2$ : Diese  $VM$  war anfangs nicht geplant. Die zeitliche Erregerfrequenzveränderung ist gegenüber der  $VM\ 1$  erhöht. Die Zeit für das Hoch- bzw Herunterfahren auf die Halteerregerfrequenz von  $10\text{ Hz}$  wird herabgesetzt. Bei dieser  $VM$  wurde die Erregerfrequenz einmalig erhöht und erniedrigt. Grund für die Einführung dieser  $VM$  sind Unregelmäßigkeiten, welche in der Auswertung erläutert werden.
- $VM\ 3$ : Auch die  $VM\ 3$  war anfangs ungeplant. Es handelt sich um die Durchführung einer freien Schwingung. Um die äquivalente Masse frei schwingen zu lassen, wurde diese mit einem Impuls mit dem Finger angestoßen. Dieser Impuls führte zu einer Anfangsamplitude von etwa einem Zentimeter. Hierbei führt der Rütteltisch keine Bewegung aus ( $\omega = 0\text{ Hz}$ ).

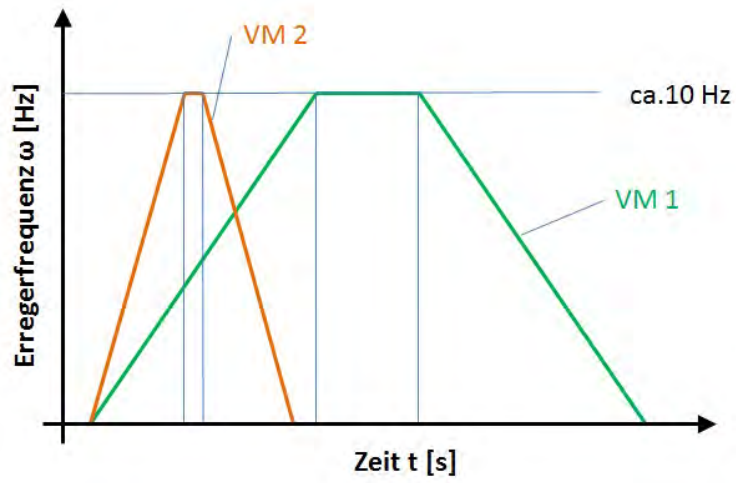


Bild 4.4: Bewegungsprofile





## 5 Auswertung

### 5.1 Evaluierung und Anpassung des Schwingungsmodells mit vorliegenden Versuchsergebnissen

#### 5.1.1 Berechnung der äquivalenten Vorspannung des Spinnennetzes

Es werden die Messwerte, welche im Rahmen des Artikels *Forces in the spider orb web* erläutert worden sind, genutzt [WB92]. Bild 4.1 zeigt die Vorspannkraft in einem fertiggestellten Spinnennetz der Gartenkreuzspinne. Das linke Netz wurde von einem Spinnentier mit einem Gewicht von  $48\text{ mg}$  erbaut, das Rechte von einem Individuum mit einem Gesamtgewicht von  $200\text{ mg}$ . In den Tabellen des folgenden Kapitels werden diese beiden Netze mit linkes Netz und rechtes Netz bezeichnet (Bild 2.7(a) und Bild 2.7(b)).

Bild 5.1 zeigt die Vorgehensweise zur Berechnung der äquivalenten Vorspannkraft. Die Modellierungsschritte sind nummeriert. In Modellierungsphase eins sind zunächst nur die Radien dargestellt. Die Vorspannkraft der Radien ist deutlich höher als die der Spiralen, weshalb die Spiralen axiale Kräfte vernachlässigbarer Größe aufnehmen. Das Netz befindet sich im Gleichgewicht und zwei gegenüberliegende Radien sind etwa gleich vorgespannt (Modellierungsphase zwei). Aufgrund des Kräftegleichgewichts ist dies nur bei dem horizontal eingespannten Spinnenfaden möglich. Die Gewichtskraft der Spinnenmasse im Zentrum führt zu einer ungleichen Verteilung der Vorspannkraft in den anderen Fäden, sprich die Kraft im Faden oberhalb des Netzzentrums ist im Falle eines ideal symmetrischen Netzes größer als im Unteren. Die Information, dass die Masse des Spinnentiers höhere Axialkräfte in den Seidenfäden in der oberen Netzhälfte verursacht wurde dem genannten Artikel entnommen [WB92]. Jedes Seidenpaar (zwei sich gegenüberliegende Radien) hat eine Steifigkeit, alle zusammen fungieren wie eine Parallelschaltung. Durch Addition erhält man die Gesamtsteifigkeit. Durch Bildung der Summe aller Vorspannkraft oberhalb des Netzzentrums (siehe grün dargestellte Seidenfäden in Model-

lierungsschritt drei) und unterhalb des Zentrums (dunkelblau) erhält man die obere und die unter Vorspannkraft ( $F_{oben}$  und  $F_{unten}$ ). Da sich die Masse im Kräftegleichgewicht befindet, muss die resultierende Vektorsumme der Kräfte, welche auf die Masse wirken, Null ergeben. Wirkende Kräfte sind die beiden Vorspannkraften und die Gewichtskraft der Masse. Somit entspricht die obere Vorspannkraft  $F_{oben}$  der Summe aus der unteren Vorspannkraft  $F_{unten}$  und der Gewichtskraft ( $F_G = m \cdot g$ ) der Masse (Modellierungsphase vier und fünf).

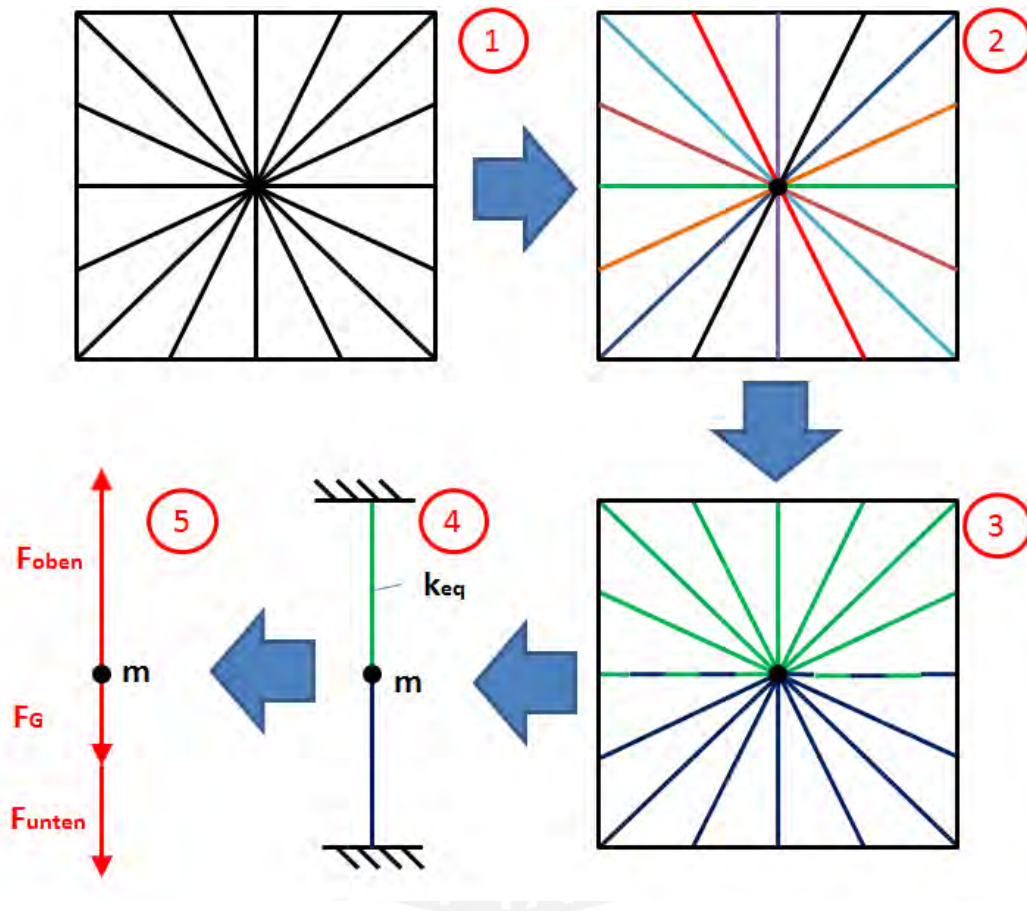


Bild 5.1: Modell zur Berechnung der äquivalenten Vorspannung

Zuerst erfolgt die Bildung der Summe der Kräfte oberhalb des Netzzentrums im Uhrzeigersinn von 09:00 Uhr bis 03:00 Uhr, anschließend unterhalb des Zentrums im Uhrzeigersinn von 03:00 Uhr bis 09:00 Uhr. Die Sortierung der Vorspannkraften in die obere und untere Netzhälfte ist in Tabelle 5.1 dargestellt. Beim linken Netz, bei welchem das Maß der Vorspannkraft für jeden Radius angegeben ist, entspricht die Differenz zwischen obe-

rer und unterer Netzhälfte, wie zu erwarten, etwa der Gewichtskraft der Radnetzspinne. Eine Masse von  $48\text{ mg}$  entspricht einer Gewichtskraft von  $470\text{ }\mu\text{N}$ , eine Masse von  $200\text{ mg}$  einer Gewichtskraft von  $1962\text{ }\mu\text{N}$ . In der oberen Netzhälfte des in Bild 2.7(b) dargestellten Spinnennetzes fehlen Angaben. Die Summe wird deshalb in Klammern dargestellt. Bei den Untersuchungen im Rahmen des Artikels *Forces in the spider orb web* handelte es sich um eine qualitative Aussage, ob es einen Zusammenhang zwischen Spinnenmasse und Vorspannkraft des Netzes gibt [WB92]. Eine lückenlose Angabe der Kräfte war nicht notwendig. Um die tatsächliche Vorspannkraft in der oberen Netzhälfte zu erhalten, wird zur Vorspannkraft der unteren Netzhälfte, welche vollständig ist, die Gewichtskraft des Spinnentiers von  $1962\text{ }\mu\text{N}$  hinzuaddiert. Dies ergibt eine Vorspannkraft für die obere Netzhälfte von  $7582\text{ }\mu\text{N}$ .

Es ist zu erkennen, dass die Masse eine Auswirkung auf die Vorspannkräfte hat. Diese sind in der oberen Netzhälfte deutlich höher.

Tabelle 5.1: Sortierung der Vorspannkräfte in  $\mu\text{N}$  in obere und untere Netzhälfte

linkes Netz (Bild 2.7(a))		rechtes Netz (Bild 2.7(b))	
obere Netzhälfte	untere Netzhälfte	obere Netzhälfte	untere Netzhälfte
125, 143, 109, 210, 107, 129, 190, 159, 255, 194, 210, 116, 116	115, 72, 60, 77, 63, 67, 60, 68, 68, 113, 69, 80, 69, 165, 62, 78, 81, 83, 79	1011, 440, 981, 668 686, 838, 538, 458, weitere Angaben fehlen	1019, 415, 300, 247, 202, 357, 247, 309, 360, 236, 707, 198, 216, 375
<b>Summe</b>			
2063	1529	(5620)	5188
<b>korrigierte Vorspannkräfte</b>			
$F_{oben}$ 2063	$F_{unten}$ 1529	$F_{oben}$ 7582	$F_{unten}$ 5188

### 5.1.2 Modellbildung mit Berücksichtigung der Gewichtskraft

Bild 5.2 zeigt die wirkenden Kräfte bei horizontaler Auslenkung des Systems um den Betrag  $u$ . In der linken Darstellung ist das Freikörperbild der Masse  $m$  dargestellt, in der rechten der resultierende Kräfteplan. Nehmen wir an, dass die Materialeigenschaften die Rückstellkraft tatsächlich nicht beeinflussen, so kann die vertikale Verschiebung vernachlässigt werden. An der Masse  $m$  wirken die obere Vorspannkraft  $F_{oben}$ , die untere Vorspannkraft  $F_{unten}$  und die Gewichtskraft  $F_G$  des Spinnentiers. Es ergibt sich eine

Rückstellkraft  $F_R$ , welche die Masse zurück in ihr Gleichgewicht bringen will und welche die Steifigkeit  $k_{eq}$  und somit die Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  charakterisiert.

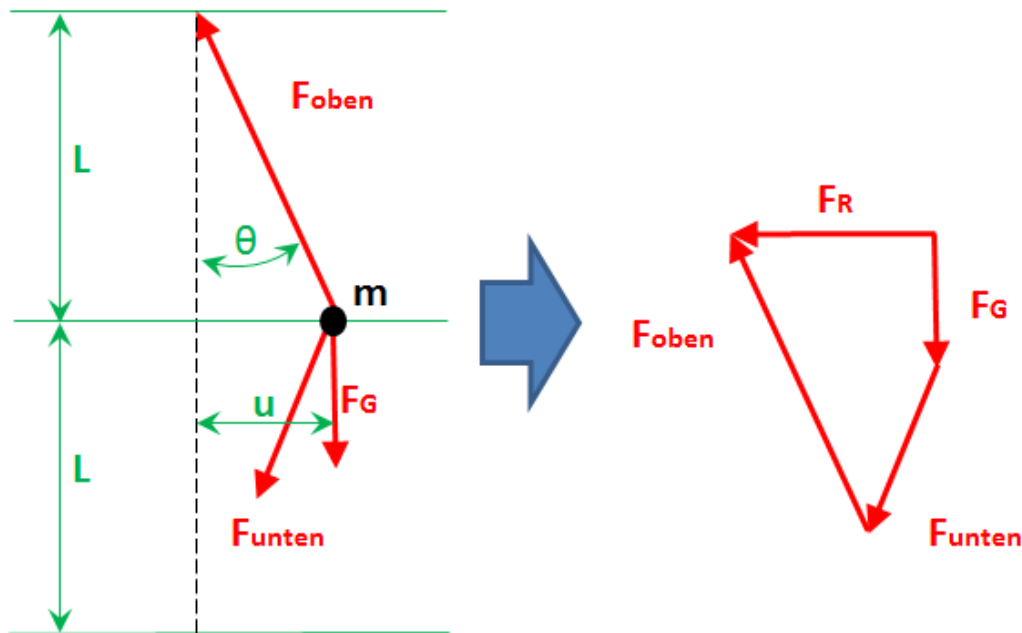


Bild 5.2: Modell zur Berechnung der Rückstellkraft

Aus den geometrischen Beziehungen berechnet sich die Rückstellkraft  $F_R$  (siehe Bild 5.2).

$$F_R = (F_{oben} + F_{unten}) \cdot \sin \theta \quad (5.1)$$

Nach der entsprechenden Herleitung aus Kapitel 3.4 ergibt sich für die Eigenkreisfrequenz unter Berücksichtigung der Gewichtskraft.

$$\omega_{0G} = \sqrt{\frac{F_{oben} + F_{unten}}{L \cdot m}} \quad (5.2)$$

Tabelle 5.2 zeigt die errechneten Eigenfrequenzen  $f_{0G}$  für die beiden Spinnennetze unter Berücksichtigung der Gewichtskraft.

Tabelle 5.2: Berechnung der Eigenfrequenz  $f_{0G}$ 

	linkes Netz (Bild 2.7(a))	rechtes Netz (Bild 2.7(b))
$k_{eq} [\frac{N}{m}]$	$2,39 \cdot 10^{-2}$	$8,51 \cdot 10^{-2}$
$\omega_{0G} [\frac{1}{s}]$	22,3	20,6
$f_{0G} [Hz]$	3,55	3,28

Die Eigenfrequenzen, berechnet auf Basis vorheriger wissenschaftlicher Arbeiten und des erstellten Modells zur Berechnung der äquivalenten Vorspannkraft, stimmen mit den Eigenfrequenzen, welche in vorherigen Erprobungen ermittelt worden sind, überein [Bau11]. Zu erwähnen ist, dass die Berechnung der äquivalenten Vorspannkraft mit Daten eines Spinnennetzes der Gartenkreuzspinne kalkuliert wurde. Die Experimente hingegen wurden mit einem Netz der Spinnenart *Argiope Argentata* durchgeführt. Die Massen beider Spinnentiere und die Größen der Spinnennetze sind annähernd identisch, was einen Vergleich zulässt.

Die Eigenfrequenzen, berechnet mit dem Modell, sind sehr ähnlich, obwohl die Massen mit  $48\text{ mg}$  und  $200\text{ mg}$  sehr verschieden sind. Das Individuum mit einem Gewicht von  $200\text{ mg}$  spannt sein Spinnennetz allerdings zirca vier mal so hoch vor. Die Eigenfrequenzen beider Netze sind etwa konstant.

### 5.1.3 Modellbildung mit Berücksichtigung der Gewichtskraft und der Asymmetrie

Analog zu dem in Kapitel 5.1.2 vorgestellten Modell wird ein Modell erstellt, welches die Asymmetrie berücksichtigt. Angenommen wird wieder eine reine horizontale Verschiebung  $u$ . Der Abstand von der oberen Begrenzung des Rahmens zum Netzzentrum  $L_1$  ist kleiner als der Längenparameter  $L$ , da die Webnetzspinne ihr Netzzentrum nach oben verlegt. Aus Bild 5.3 folgen zwei geometrische Beziehungen, welche angenähert werden (Bedingung der Näherung:  $L_1 \gg u$  bzw  $L_2 \gg u$ ).

$$\sin \alpha = \frac{u}{\sqrt{L_1^2 + u^2}} \approx \frac{u}{L_1} \quad \text{und} \quad \sin \beta = \frac{u}{\sqrt{L_2^2 + u^2}} \approx \frac{u}{L_2} \quad (5.3)$$

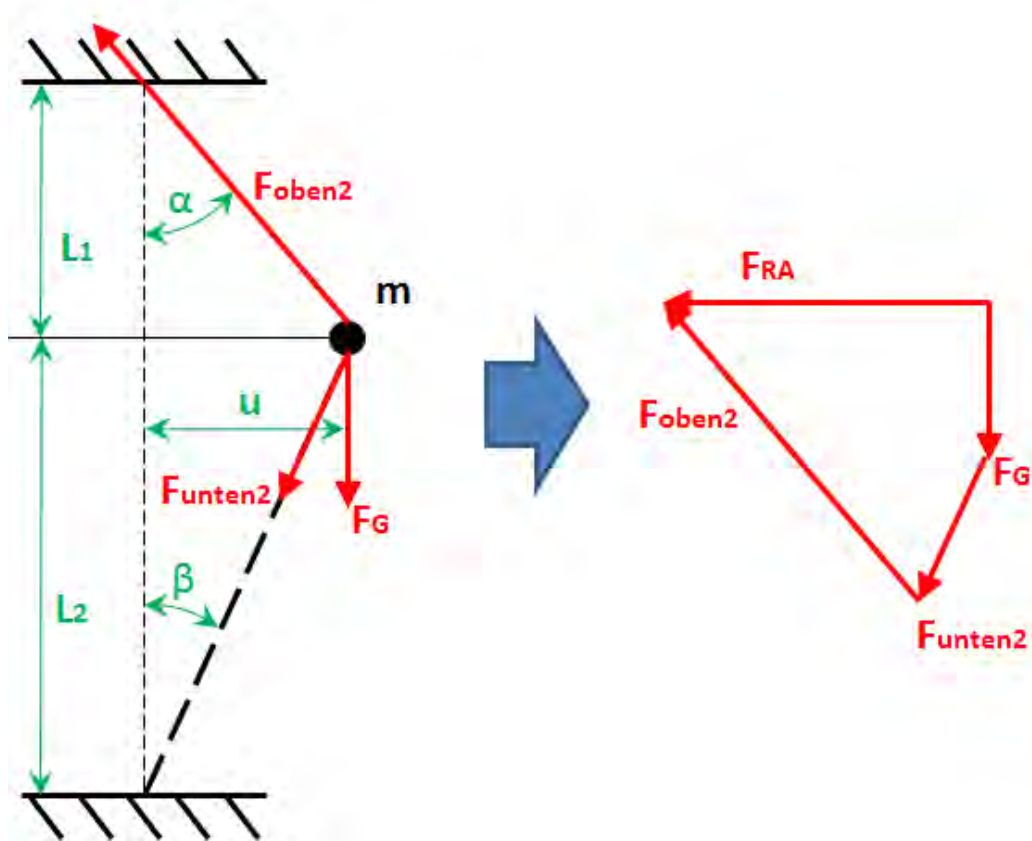


Bild 5.3: Modell zur Berechnung der Rückstellkraft mit Berücksichtigung der Gewichtskraft und der Asymmetrie

Es ergibt sich für die Rückstellkraft  $F_{RA}$  unter Berücksichtigung der Asymmetrie.

$$F_{RA} \approx F_{oben2} \cdot \frac{u}{L_1} + F_{unten2} \cdot \frac{u}{L_2} \quad (5.4)$$

Es ergibt sich für die Eigenkreisfrequenz  $\omega_{0A}$  unter Berücksichtigung der Asymmetrie.

$$\omega_{0A} = \sqrt{\frac{1}{m} \cdot \left( \frac{F_{oben2}}{L_1} + \frac{F_{unten2}}{L_2} \right)} \quad (5.5)$$

Für die Längen  $L_1$  und  $L_2$  wurden folgende Werte aus Bild 2.7(a) und Bild 2.7(b) entnommen (Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Längen  $L_1$  und  $L_2$  zur Berechnung der Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Asymmetrie

	linkes Netz	rechtes Netz
$L_1 [m]$	0,10	0,09
$L_2 [m]$	0,20	0,21

Tabelle 5.4: Berechnung der Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Asymmetrie

	linkes Netz (Bild 2.7(a))	rechtes Netz (Bild 2.7(b))
$k_{eq} [\frac{N}{m}]$	$2,83 \cdot 10^{-2}$	$1,09 \cdot 10^{-1}$
$\omega_{0A} [\frac{1}{s}]$	24,3	23,3
$f_{0A} [Hz]$	3,86	3,71

Durch die Berücksichtigung der Asymmetrie nimmt die Steifigkeit  $k_{eq}$  zu und die Eigenkreisfrequenz  $\omega_{0A}$  somit auch.

## 5.2 Messdatenauswertung

### 5.2.1 Gemessene Daten, Filterung und Datenverarbeitung

#### Messgrößen und manuelle Manipulation der Daten

Zur Ermittlung der Eigenfrequenz  $f_0$  und der Resonanzfrequenz  $f_D$  wurden zwei Messgrößen erfasst. Bei den Netzen mit den Nummer eins bis drei wurden folgende zwei Größen aufgenommen (Messdatenauswertung eins).

- Geschwindigkeit der Masse  $\dot{u}(t)$  (Ausgabe der Daten in geschwindigkeitsproportionaler Spannung [V])
- Beschleunigung des Tisches  $\ddot{y}(t)$  (Ausgabe der Beschleunigungswerte [ $\frac{mm}{s^2}$ ])

Bei den Netznummern vier bis zehn wurden jeweils die Verschiebung  $u(t)$  und  $y(t)$  aufgenommen (Messdatenauswertung zwei). Zunächst ist die Vorgehensweise der Messdatenauswertung identisch. Mit dem Messprogramm der Firma Brühl und Kjaer werden die Daten in Form von Text-Dateien exportiert. Beim Export ist eine Abtastfrequenz anzugeben. Die Wahl einer hohen Abtastrate führt zu einem kleinen numerischen Fehler, allerdings zu großen Datenmengen. Wir wählen eine Abtastrate von  $256 Hz$ , was zu einer

Datengröße der exportierten Text-Dateien von zirca 600 KB führt. Die darauf folgende manuelle Bearbeitung der Textdateien beinhaltet folgende Arbeitsschritte.

- Öffnen der Textdatei
- Löschen des Kopfes und der nichtdefinierten Zeilen am Ende der Text-Datei (Ermöglichung der Einlesung in das Programm MatLab)
- Abspeichern der Text-Datei unter dem Dateinamen „*acc.txt*“ bzw „*Laser.txt*“ (Anzahl der Zeilen der beiden Dateien ist identisch)

Nach diesem Vorgang unterscheiden sich die Vorgehensweisen zwischen der Messdatenauswertung eins und der Messdatenauswertung zwei. Im Folgenden wird nur auf die Messdatenauswertung eins eingegangen, da es sich hierbei aufgrund der Anwendung von einem zusätzlichen Filter um die komplexere Auswertung handelt. Im Anhang befindet sich für beide Messdatenauswertungen eine Anleitung. Zuerst wird ein Archiv erstellt, welches die Text-Dateien „*acc.txt*“, „*Laser.txt*“, sowie die MatLab-Dateien mit den jeweiligen Programmen und Unterprogrammen enthält. Im Programm MatLab wird das entsprechende Verzeichnis als Arbeitsverzeichnis aufgerufen. Die Daten werden numerisch ausgewertet. In allen dargestellten Grafiken sind die einzelnen Punkte durch Linien verbunden.

### Programm *Pro1*

Über den Befehl „*Pro1*“ werden folgende Unterprogramme bzw Befehle aufgerufen, welche der Reihe nach abgearbeitet werden.

- **„Einlesen“:** Es werden die Daten des Beschleunigungssensors in Matrix A und des Lasersensors in Matrix B eingelesen. Die erste Spalte beinhaltet die Nummerierung der Zeile, die Zweite den entsprechenden Zeitwert in Sekunden und die Dritte den Wert des Laser- bzw Beschleunigungssensors.
- **„Filterung“:** Die Signale des Beschleunigungssensors und des Lasersensors werden gefiltert und jeweils in die vierte Spalte der Matrix A und B geschrieben.
- **„Erregerfrequenz“:** Dieses Unterprogramm ermittelt die Erregerfrequenz über die Hoch- und Tiefpunkte der Daten des Beschleunigungssensors und schreibt diese in Spalte sechs der Matrix A.



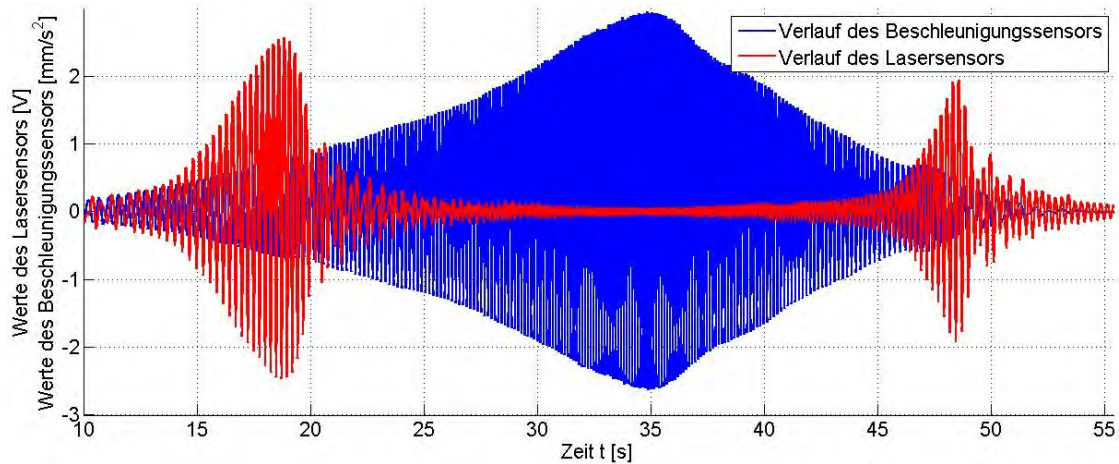
- **„Mittelwertfilter“**: Ein Mittelwertfilter glättet die diskreten Erregerfrequenzwerte des Beschleunigungssensors und schreibt diese in Spalte sieben der Matrix A.
- **„Erregerfrequenz2“**: Dieses Unterprogramm ermittelt die Erregerfrequenz über die Hoch- und Tiefpunkte der Daten des Lasersensors und schreibt diese in Spalte sechs der Matrix B.
- **„Mittelwertfilter2“**: Ein Mittelwertfilter glättet die diskreten Erregerfrequenzwerte des Lasersensors und schreibt diese in Spalte sieben der Matrix B.
- **„plot(A(:,7))“**: Über den Befehl „plot“ werden die Erregerfrequenzwerte des Beschleunigungssensors geplottet.

Im Folgenden werden die Unterprogramme genauer erläutert.

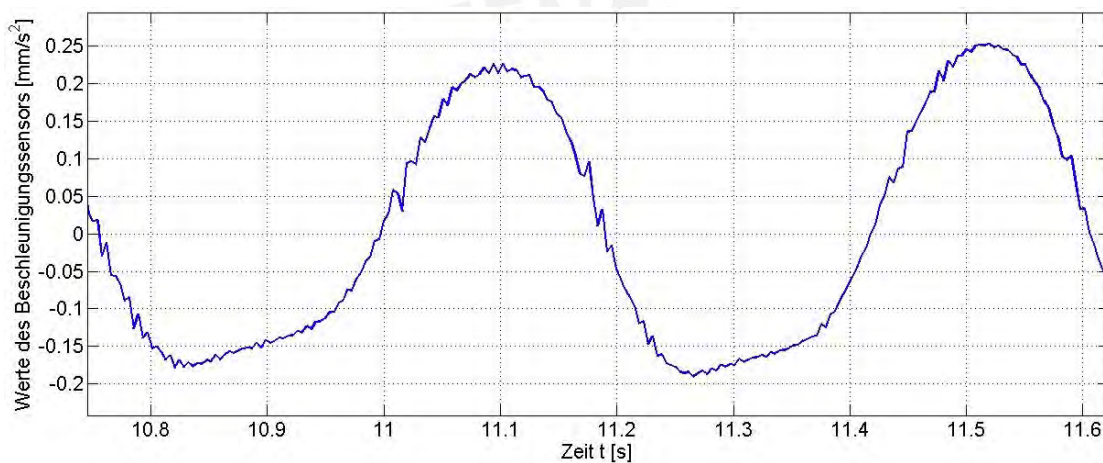
### Filterung

Bild 5.4(a) zeigt den generellen Verlauf der Sensoren über einen Zeitraum von 45 Sekunden. Die Beschleunigungswerte nehmen bis zum Zeitpunkt von etwa 35 Sekunden zu und danach wieder ab. Da die Kurve die Hin- und Herbewegung zwischen zwei Punkten, welche einen konstanten Abstand haben, beschreibt, bedeuten hohe Beschleunigungswerte auch eine hohe Frequenz.

Die zur Geschwindigkeit proportionalen Werte der äquivalenten Masse sind rot dargestellt (Bild 5.4(a)). Diese Daten werden in Volt ausgegeben. Zu erkennen sind zwei Maximalwerte im Amplitudenverlauf. Hier erfolgt die Anregung des Spinnennetzes mit der Eigenfrequenz  $f_0$ . Die Geschwindigkeitsamplituden werden maximal bei Anregung mit der Eigenfrequenz  $f_0$ , die Verschiebungsamplituden bei Anregung mit der Resonanzfrequenz  $f_D$ . In Bild 5.4(b) ist eine Detailansicht des Zeitraum von 10,8 Sekunden bis 11,6 Sekunden dargestellt. Zu erkennen sind Störungen. Mit Hilfe der Hoch- und Tiefpunkte sollen aus diesem Signal die Periodendauer und die Erregerfrequenz berechnet werden. Durch die hochfrequenten Störungen wird eine höhere Anzahl detektiert. Deswegen muss das Signal gefiltert werden. Das gleiche gilt für das Signal des Lasers. Hier ist ebenfalls die Ermittlung der Hoch- und Tiefpunkte notwendig, da eine Auswertung der Amplituden notwendig ist.



(a) Verlauf der Daten des Beschleunigungs- und Lasersensors



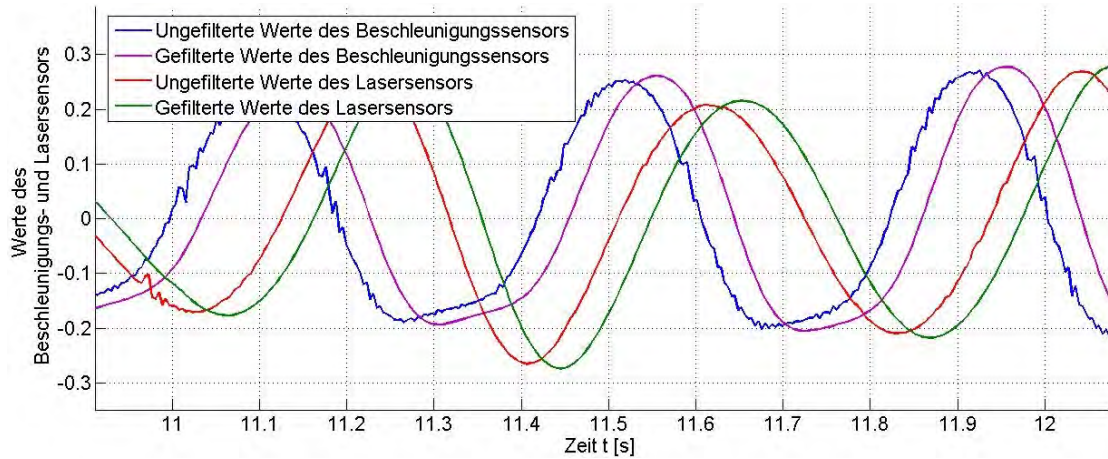
(b) Detail mit Störungen (Beschleunigungssensor)

Bild 5.4: Werteverlauf der beiden Sensoren

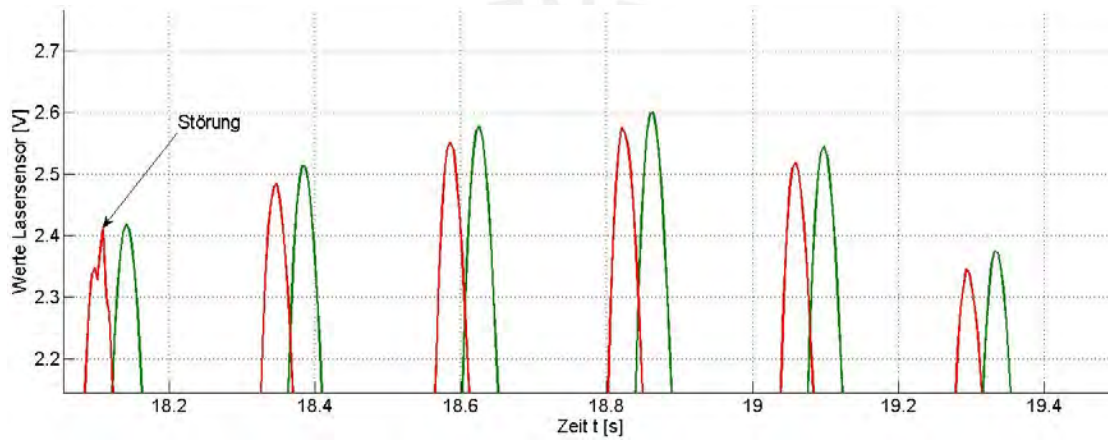
Die Störungen der Datenreihen sind hochfrequent. Es wird ein Tiefpassfilter benötigt. Digitalfilter unterteilt man in zwei große Klassen, nämlich in die Klasse der rekursiven *bzw IIR*-Filter und in die Klasse der nichtrekursiven *bzw FIR*-Filter. Die Entscheidung einen *FIR*- oder einen *IIR*-Filter zu verwenden ist sehr komplex. Wir wählen deswegen zunächst willkürlich den erst genannten und überprüfen, ob dieser für unsere Anwendung geeignet ist. Der Nachteil dieses Filters ist, dass die Zeitverzögerung meist relativ groß ist. Um diesen Effekt zu unterbinden gibt es zwei Möglichkeiten. Man lässt den Filter zweimal, also einmal vorwärts und einmal rückwärts über das Signal laufen oder wir lassen den *FIR*-Filter mit den identischen Parametern über beide Signale lau-

fen und überprüfen, ob die Phasenverschiebung identisch ist. Die Funktionswerte des Beschleunigungssensors werden den richtigen Funktionswerten des Lasersensors zugeordnet. Der Autor hat sich für die zweite Variante entschieden, da auf diese Weise nur zwei Filterungen notwendig sind. Dadurch werden die Signale weniger verfälscht. Die exakten Daten des verwendeten Filters sind dem Anhang zu entnehmen. Die Parameter wurden durch Ausprobieren so gewählt, dass das Rauschen vollständig unterdrückt wird und die Amplituden des Lasers nicht signifikant verändert werden. Eine nichtsignifikante Veränderung bedeutet in diesem Fall, dass die maximalen Amplituden des ungefilterten und des gefilterten Signals wieder an den richtigen Stellen detektiert werden (Bild 5.5(b)) [Skr05][Cam10].

Das Unterprogramm *Filterung* filtert die Dateien und schreibt die gefilterten Daten in die Spalte vier der Matrix A bzw Matrix B. Bild 5.5(a) zeigt den Verlauf der gefilterten und ungefilterten Werte der beiden Sensoren. Da es sich um eine qualitative Darstellung handelt, wurden die Funktionswerte ohne Einheit angegeben. Zu erkennen ist, dass die Störungen eliminiert werden und die Filterung einen Phasenversatz verursacht. Bild 5.5(b) stellt die Hochpunkte der Schwingung in dem Zeitraum dar, in welchem die Amplituden maximal werden. Die grüne Kurve ist ungefiltert, die blaue gefiltert. Zu erkennen ist, dass das Maxima der gefilterten Kurve identisch ist mit dem Maxima der ungefilterten Kurve. Dies bedeutet, dass die Maximalamplitude in folgender Auswertung wieder der richtigen Erregerfrequenz  $f$  zugeordnet wird. Auch hier ist der Phasenversatz zu erkennen.



(a) Gefilterte und Ungefilterte Werte von Laser- und Beschleunigungssensor



(b) Amplitudenverlauf des Laserdaten

Bild 5.5: Verläufe der Daten über die Zeit

Es ist sicherzustellen, dass der Phasenversatz beider Filter konstant ist. Bild 5.5(a) stellt den Phasenversatz beider Signale dar. Es ist zu erkennen, dass beide Signale etwa die gleiche Zeitverzögerung haben. Ferner wurde durch das Ablesen der Nullstellendurchläufe die durch die Filterung erzeugten Phasenversätze berechnet. Hierzu wurden die Nullstellendurchläufe in vier Zeitintervallen abgelesen (Anhang) und in Tabelle 5.5 eingetragen. Die Zoomfunktion ermöglicht eine sehr genaue Ablesung und ist exakter als eine numerische Auswertung.

Es wurden folgende vier extreme Zeitintervalle gewählt, bei denen beispielsweise die Amplituden des Lasers maximal und des Beschleunigungssensors minimal sind. An diesen Stellen ist davon auszugehen, dass die Phasenverschiebungen differieren.

- Nummer 1: Zum Zeitpunkt von etwa 14 s, zu Beginn eines Versuchsdurchlaufs
- Nummer 2: Zum Zeitpunkt von etwa 18 s, Amplitude des Lasers maximal
- Nummer 3: Zum Zeitpunkt von etwa 27 s, Abnahme der Antwortamplitude des Lasers
- Nummer 4: Zum Zeitpunkt von etwa 35 s, Erregerfrequenz  $\omega$  maximal

Tabelle 5.5: Phasenverschiebung des Beschleunigungs- und Lasersensors durch Filterung

Nummer [1]	S1 [s]	S2 [s]	S3 [s]	S4 [s]	S5 [s]	S6 [s]
1	14,140	14,085	14,178	14,123	0,038	0,038
2	17,550	17,544	17,587	17,582	0,037	0,038
3	27,778	27,820	27,816	27,858	0,038	0,038
4	34,913	34,888	34,950	34,925	0,037	0,037

S1: Nullstellendurchlauf des ungefilterten Beschleunigungssensorsignals  
 S2: Nullstellendurchlauf des ungefilterten Lasersensorsignals  
 S3: Nullstellendurchlauf des gefilterten Beschleunigungssensorsignals  
 S4: Nullstellendurchlauf des gefilterten Lasersensorsignals  
 S5: Phasenverschiebung des Beschleunigungssensors  
 S6: Phasenverschiebung des Lasersensors

Tabelle 5.5 zeigt, dass die Phasenverschiebungen nahezu identisch sind. Sie schwanken zwischen 0,037 s und 0,038 s. Nehmen wir eine Phasenverschiebungsdifferenz von 0,002 ms an. Der bei den Erprobungen interessante Frequenzbereich liegt zwischen 2 Hz und 6 Hz. Die Abweichung der Frequenz wird maximal, wenn diese minimal ist.

$$T_D = \frac{1}{f_D} = \frac{1}{2 \text{ Hz}} = 0,5 \text{ s} \quad \Rightarrow \quad T_{D^*} = 0,5 \text{ s} + 0,002 \text{ s} = 0,502 \text{ s} \quad (5.6)$$

$$f_{D^*} = \frac{1}{0,502 \text{ s}} = 1,992 \text{ Hz} \quad \Rightarrow \quad \epsilon_{Filter} = \frac{f_D - f_{D^*}}{f_D} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,004 \quad (5.7)$$

Diese Abweichung hat einen Fehler von 0,4% zur Folge. In der folgenden Messfehlerauswertung wird das Vorhandensein deutlich höherer prozentualer Messfehler aufgezeigt, so dass der Fehler verursacht durch den *FIR*-Filter vernachlässigt werden kann.

Den *FIR*-Filter bewertet der Autor somit als ausreichend für unsere Anwendung. Die Überprüfung eines *IRR*-Filters ist nicht notwendig.

### Erregerfrequenz

Das Unterprogramm *Erregerfrequenz* berechnet über die Hoch- und Tiefpunkte der Daten des Beschleunigungssensors (Bild 5.4(a)) erst die Periodendauer und mit dieser die Erregerfrequenz  $f_E$ . Die Quantifizierung verursacht eine Treppenfunktion mit diskreten Werten (Bild 5.6 und Bild 5.7).

### Mittelwertfilter

Dieses Unterprogramm glättet die Treppenfunktion. Bild 5.6 stellt die diskrete Funktion (blau), verursacht durch das Unterprogramm *Erregerfrequenz* und die geglättete Funktion nach Anwendung des Mittelwertfilters (grün), dar. Zu Beginn und am Ende der Messung sind sehr hohe Werte erkennbar. Dies ist auf das Rauschen des Beschleunigungssensors zurückzuführen. Das Unterprogramm *Erregerfrequenz* detektiert eine deutlich höhere Anzahl an Hoch- und Tiefpunkten. Dadurch wird die Periodendauer verkürzt und die Erregerfrequenz nimmt zum Teil sehr hohe Werte an. In einem später folgenden Programm werden diese zwei Bereiche gelöscht.

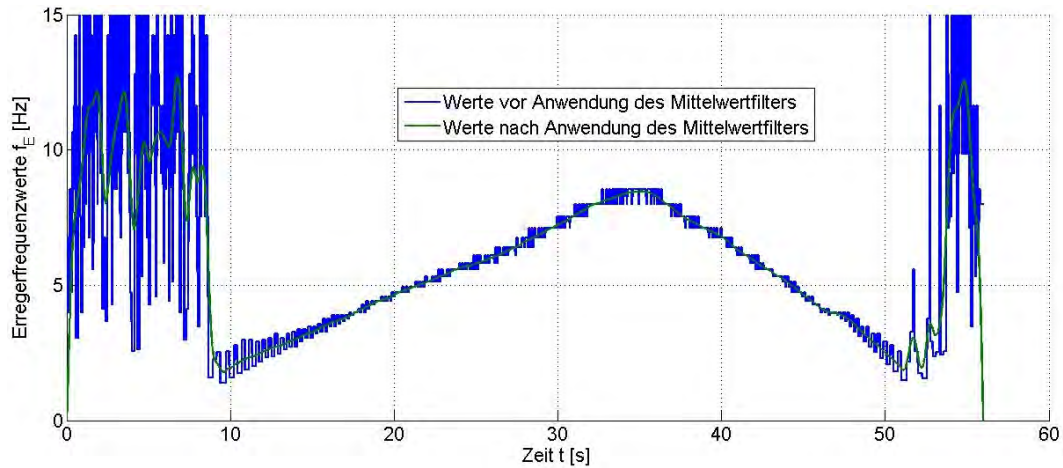


Bild 5.6: Erregerfrequenzwerte vor und nach Anwendung des Mittelwertfilters

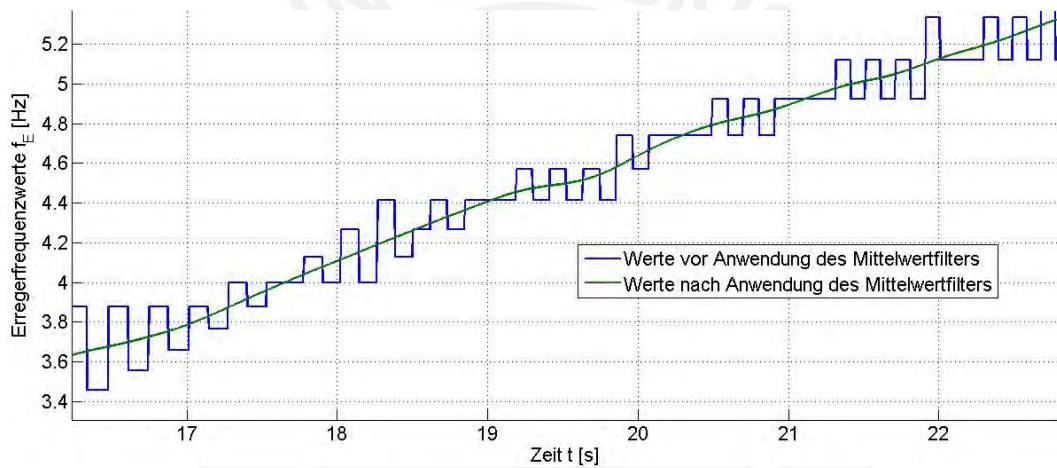
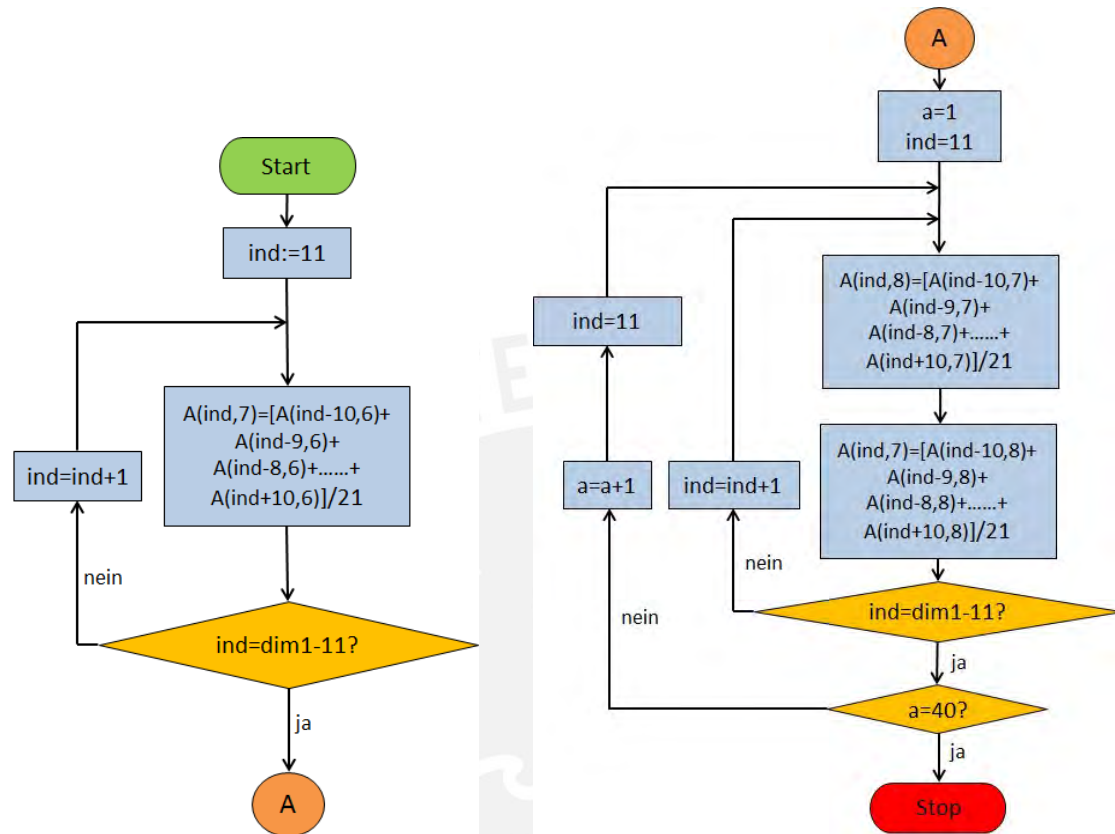


Bild 5.7: Detailansicht der Erregerfrequenzwerte vor und nach Anwendung des Mittelwertfilters

Der zunächst treppenförmige Verlauf der Erregerfrequenz ist auf die diskreten Werte der Zeitpunkte zurückzuführen. Durch eine vorherigere Auslesung der Daten mit einer höheren Abtastrate könnte dieser Effekt verringert werden, hätte allerdings höhere Datenmengen zur Folge. Durch den Mittelwertfilter wird der Effekt der Quantifizierung gemindert. Eine Mehrfachanwendung von Mittelwertfiltern ist möglich und in dem hier vorliegenden Fall notwendig. Wird der Filter nicht oft genug angewandt, so ist nach wie vor eine geglättete Treppenfunktion zu erkennen und somit ein An- und Absteigen der Werte, was nicht dem tatsächlichen Werteverlauf der Erregerfrequenz entspricht. Wird

der Filter zu oft angewandt, so würde eine zeitliche Änderung der Erregerfrequenzveränderung nicht mehr wahrgenommen werden. Die Durchlaufanzahl von 81 wurde als sinnvoll erachtet [Ses08].



(a) Teil 1: Erster Durchlauf des Mittelwertfilters

(b) Teil 2: 80-maliger Durchlauf des Mittelwertfilters

Bild 5.8: Programmablaufplan des Unterprogramms *Mittelwertfilter* [Nor66]

Bild 5.8 stellt den Programmablaufplan des Programmes *Mittelwertfilter* dar. Das Programm wendet den Filter zunächst einmal an und schreibt die gefilterten Daten in Spalte sieben. Danach werden die Daten abwechselnd in Spalte acht und Spalte sieben übertragen. Über eine Schleife wird dieser Vorgang 40 mal ausgeführt. Insgesamt wird der Mittelwertfilter somit 81 mal angewandt. Nach Ansicht des Autors ist die Treppenfunktion nach der Anwendung des Filters zufriedenstellend geglättet (Bild 5.7). Der Mittelwertfilter muss allerdings in der folgenden Fehlerbetrachtung berücksichtigt werden.



## Erregerfrequenz2

Dieses Programm ist identisch mit dem Programm *Erregerfrequenz*. Der Unterschied ist, dass die Frequenzwerte über die Lasersensordaten (Matrix B) berechnet werden. Deswegen wird nicht ausführlicher auf dieses Unterprogramm eingegangen. Ziel der Ermittlung der Frequenz der Laserdaten war der Abgleich mit der Frequenz der Beschleunigungssensordaten. Die Frequenzdaten sind nahezu identisch. Jedoch sind die Frequenzdaten des Lasers in Teilbereichen gestört, weshalb für die Erregerfrequenzberechnung die Daten des Beschleunigungssensors für die Auswertung verwendet werden.

## Mittelwertfilter2

Dieses Programm entspricht dem Programm *Mittelwertfilter*, jedoch für die Laserdaten (Matrix B).

## Plotten und manuelle Parameterfestlegung

Zuletzt generiert das Programm *Pro1* einen Plot. Der Bediener legt zwei Parameter fest, zum Abschneiden der verrauschten Bereiche. Diese zwei Parameter beschreiben die Grenzen der auswertbaren Daten. In Bild 5.9 befinden sich diese beiden Parameter etwa bei dem Wert von 2500 und 13000. Die Werte entsprechen der Zeilennummer der Matrix A. Die Abspeicherung des unteren Wertes erfolgt unter der Variable *OG*, der Obere unter dem Parameter *UG*.

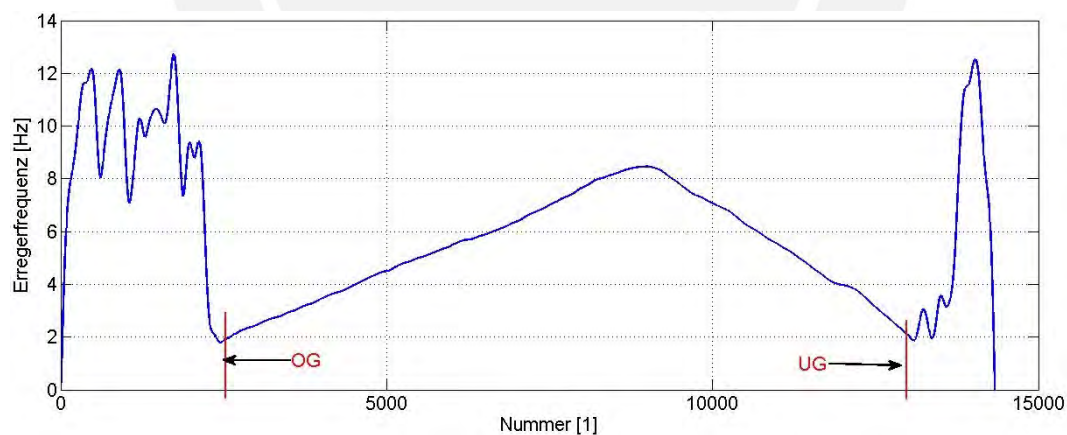


Bild 5.9: Abschneiden der verrauschten Bereiche

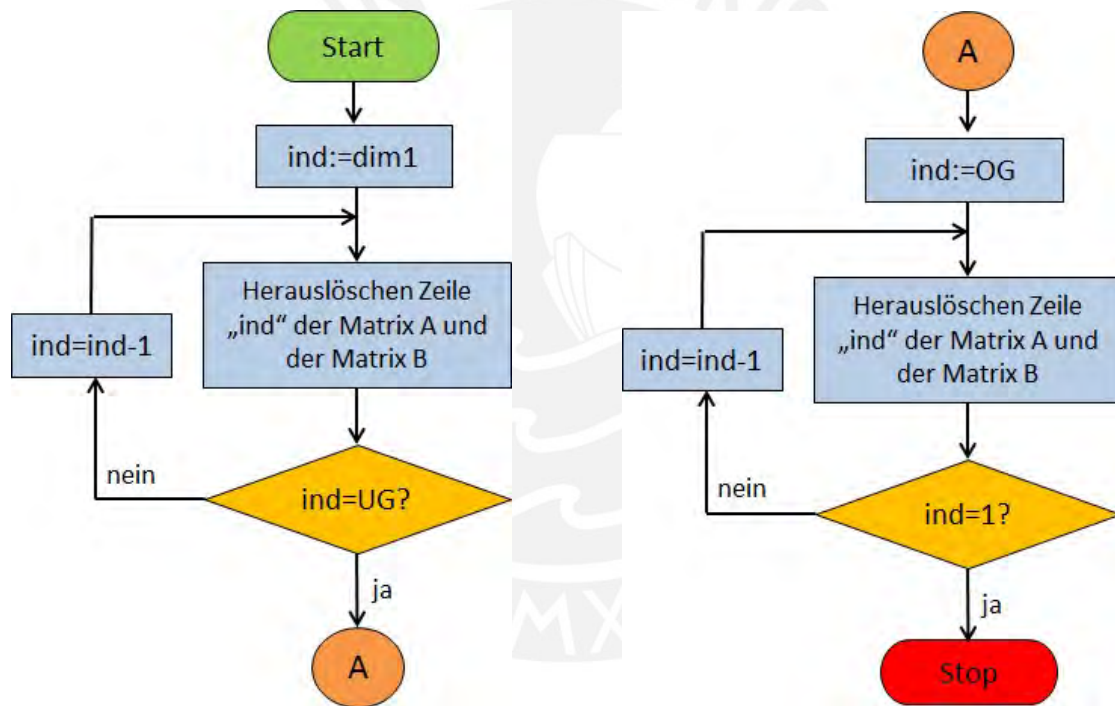
## Programm *Pro2*

Das Programm *Pro2* ruft wie das Programm *Pro1* Unterprogramme auf.

- „Löschen“: Löschen der rauschbehafteten Bereiche
- „Maximas“: Ermittlung der Hoch- und Tiefpunkte (Amplituden) der Laserdaten
- „Faktorisierung“: Umrechnen der Laserdaten

### Löschen

Bild 5.10 zeigt dem Programmablaufplan des Unterprogrammes *Löschen*. Es löscht die Zeilen oberhalb des Parameter *UG* und unterhalb des Parameter *OG* aus den Matrixen A und B. Dadurch werden beide Matrixen reduziert.



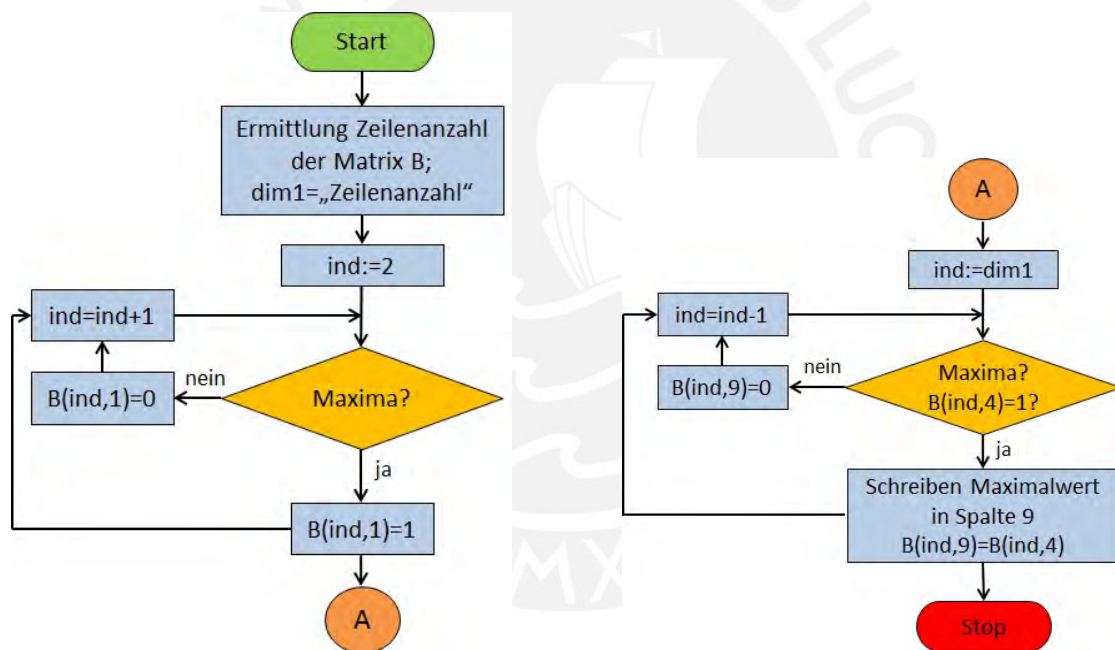
(a) Teil 1: Löschen des oberen unbrauchbaren Bereichs

(b) Teil 2: Löschen des unteren unbrauchbaren Bereichs

Bild 5.10: Programmablaufplan des Unterprogramms *Löschen* [Nor66]

## Maximas

Bild 5.11 stellt den Programmablaufplan des Unterprogrammes *Maximas* dar. Zuerst wird die Variable *dim1* erneut ermittelt, da sich die Zeilenanzahl der Matrixen A und B durch das Löschen der unbrauchbaren Bereiche reduziert hat. Im Folgenden werden über eine Schleife die Maximas der gefilterten Werte in Spalte vier ermittelt. Liegt ein Maxima vor, so wird in die Spalte eins der entsprechenden Zeile eine eins geschrieben sonst eine Null (Bild 5.11(a)). Im zweiten Teil des Unterprogrammes (Bild 5.11(b)) werden die Maximalwerte in die Spalte neun übertragen. Liegt kein Maxima vor, wird der Wert in der Spalte neun Null gesetzt. Dadurch können die Hochpunkte in der generierten Grafik vom Benutzer eindeutig einem Zeilenwert zugeordnet werden.



(a) Teil 1: Setzen der Steuerspalte (Spalte eins) gleich eins, wenn Maxima in dieser Zeile vorliegt

(b) Teil 2: Übertragen der Maximalwerte in Spalte neun

Bild 5.11: Programmablaufplan des Unterprogramms *Maximas* [Nor66]

## Faktorisierung

Die Daten des Lasers liegen in der Einheit Volt vor. Deshalb müssen diese umgerechnet werden. Die Amplituden werden über eine Schleife von Spalte neun in Spalte zehn übertragen. Die Wegamplituden sind maximal, wenn das System mit seiner Resonanzfrequenz  $f_E$  angeregt wird.

$$\dot{U} = U_{\text{Laser}} * 125 \frac{\text{mm}}{\text{s}} / \text{V} \quad \Rightarrow \quad U = \frac{\dot{U}}{2 \cdot \pi \cdot f_E} \quad (5.8)$$

### 5.2.2 Ergebnisausgabe

Folgende Daten werden für die weitere manuelle Bearbeitung genutzt.

- Spalte neun des Matrix B (Laserdaten): Geschwindigkeitsproportionale Amplituden [V]
- Spalte zehn der Matrix B (Laserdaten): Wegamplituden [mm]
- Spalte sieben der Matrix A (Daten des Beschleunigungssensors): Erregerfrequenzwerte [Hz]

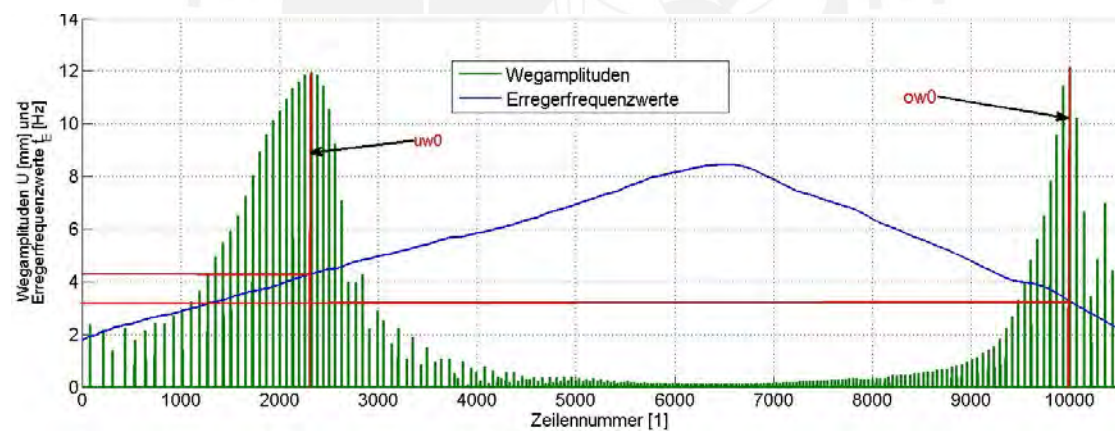


Bild 5.12: Erregerfrequenzwerte und Wegamplituden

Bild 5.12 stellt die Vorgehensweise zur Ermittlung der Resonanzfrequenz  $f_D$  bzw Eigenfrequenz  $f_0$  dar. Hier sind die Wegamplituden  $U$  dargestellt. Diese werden bei Erregung mit der Resonanzfrequenz maximal. Mit Hilfe der Zoomfunktion wird die exakte Zeilennummer abgelesen und unter der Variable  $uw0$  bzw  $ow0$  abgespeichert. Bei Ermittlung

der Eigenfrequenz werden die geschwindigkeitproportionalen Amplituden geplottet und die Zeilennummern der Maximalamplituden werden unter den Variablen  $uw$  und  $ow$  abgespeichert. Die Programme  $EF$  und  $EF0$  liefern die numerisch exakten Frequenzwerte. Diese Programme werden nicht explizit vorgestellt. Man erhält für jede Messung zwei Resonanzfrequenzen und zwei Eigenfrequenzen, jeweils eine für das Hochfahren der Erregerfrequenz und eine für das Herunterfahren.

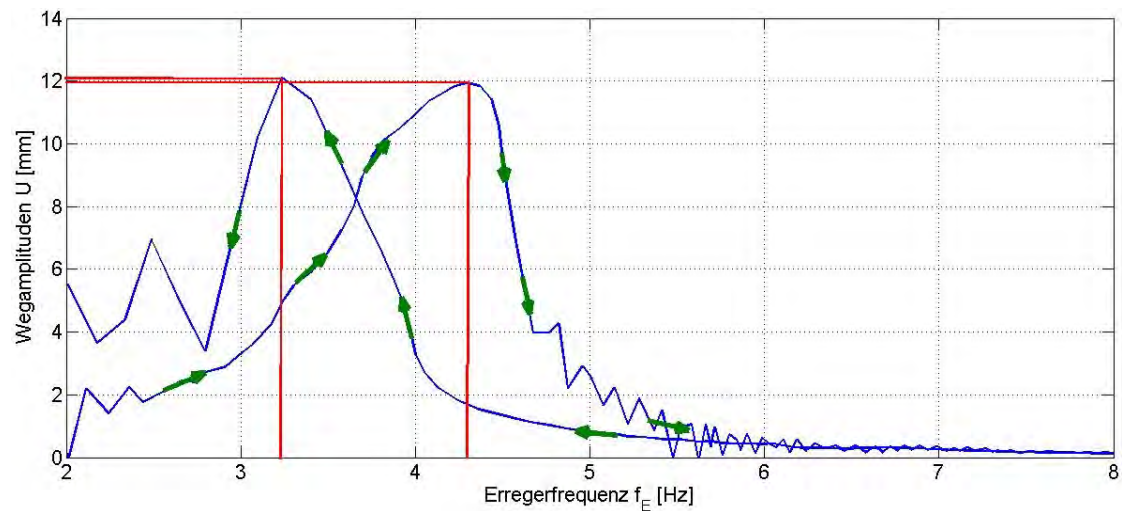


Bild 5.13: Abweichung der Erregerfrequenzwerte

In Bild 5.13 ist bereits zu erkennen, dass die Amplituden für das Herunter- und das Hochfahren ihre Maximalwerte bei unterschiedlichen Erregerfrequenzen annehmen. Die Differenz beträgt konstant etwa ein Hertz. Dies ist bei allen durchgeführten Erprobungen der Netze mit den Nummern eins bis sechs festgestellt worden. Deswegen wurden in den folgenden Experimenten mit den Spinnennetzen (Nummer sieben bis neun) zusätzliche Versuche durchgeführt. Zum einen wurde die zeitliche Änderung der Erregerfrequenz erhöht  $\dot{f}_E$  (Versuchsmethodik  $VM 2$ ) und zum anderen wurde das Spinnennetz einer freien Schwingung ausgesetzt ( $VM 3$ ).

### 5.2.3 Messfehler verursacht durch Versuchsdurchführung

#### Vorüberlegungen zur Messfehlerauswertung

Die in Kapitel 5.2.2 beschriebene Differenz der Resonanzfrequenzen fordert eine sehr hohe Toleranzangabe der ermittelten Erregerfrequenzen. Deswegen wird versucht, dieses Verhalten genauer zu beschreiben, um die Toleranzen im weiteren Verlauf dieser Arbeit verkleinern zu können.

Tabelle 5.6: Gemessene Eigen- und Resonanzfrequenzwerte eines Spinnennetzes (Nummer sieben): alle Angaben in  $Hz$

Eigenfrequenz $f_0$		Resonanzfrequenz $f_D$	
$\dot{f}_E > 0$	$\dot{f}_E < 0$	$\dot{f}_E > 0$	$\dot{f}_E < 0$
6,66	5,53	6,60	5,53
6,75	5,29	6,56	5,29
6,74	5,40	6,63	5,40
6,68	5,44	6,60	5,44
6,72	5,54	6,62	5,54
6,62	5,49	6,52	5,49
6,65	5,45	6,48	5,45
6,69	5,47	6,58	5,47
6,52	5,47	6,37	5,47
6,64	5,21	6,57	5,21
Mittelwertbildung			
6,67	5,43	6,55	5,43

Tabelle 5.6 zeigt die gemessenen Resonanzfrequenzen und Eigenfrequenzen des Spinnennetzes mit der Nummer sieben für das Hoch- und das Herunterfahren der Eigenfrequenz (positive bzw negative zeitliche Erregerfrequenzveränderung  $\dot{f}_E$ ). Die Erregerfrequenz wurde zehn mal hoch- und heruntergefahren. An beiden Frequenzarten ( $f_0$  und  $f_D$ ) ist zu erkennen, dass bei negativer zeitlicher Erregerfrequenzveränderung die Werte der ermittelten Eigen- bzw Resonanzfrequenzen etwa ein Hertz unterhalb der Werte liegen, welche bei positiver zeitlicher Erregerfrequenzveränderung ermittelt werden. Nimmt man nur die Werte der positiven zeitlichen Erregerfrequenzveränderung zur Ermittlung der Eigen- bzw Resonanzfrequenz, so stellt man fest, dass die ermittelten Eigenfrequenzen in Bereichen liegen, welche eine Weite von  $\pm 0,15 Hz$  aufweisen. Somit ist davon auszugehen, dass die zeitliche Veränderung der Erregerfrequenz Hoch- bzw Herunterfahren relativ konstant ist. Für dieses Beispiel schwanken die Werte um den Mittelwert von

6,67 Hz in einem Bereich von 6,52 Hz bis 6,75 Hz. Bei allen anderen Erprobungsnetzen wurde ein ähnliches Abweichungsverhalten festgestellt. Die Werte schwanken um den Mittelwert mit einer Bereichsweite von zirka  $\pm 0,15$  Hz.

### Betrachtung der Fehler verursacht durch Versuchsdurchführung

Bild 5.14 zeigt die Wegamplituden  $U$  in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz  $f_E$  für eine schnelle und eine langsame zeitliche Erregerfrequenzveränderung  $\dot{f}_E$  des Spinnennetzes mit der Nummer sieben. Bei einer schnelleren Erregerfrequenzveränderung (VM 2) ist für das Hochfahren eine Erhöhung der gemessenen Resonanzfrequenz festzustellen, für das Herunterfahren eine Verringerung. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Werte der maximalen Wegamplituden bei einer schnellen Erregerfrequenzveränderung kleinere Werte annehmen. Dieses Verhalten wurde bei allen Spinnennetzen festgestellt, bei welchen die Erprobungen mit erhöhter Erregerfrequenzerhöhung durchgeführt wurden. Es wird vermutet, dass dieser Effekt auf die Trägheit des schwingenden Systems zurückzuführen ist. Eine sprunghafte Änderung der Erregerfrequenz von 1 Hz auf 2 Hz hat zur Folge, dass sich das System nicht sofort anpasst, also seine Amplitude nicht unmittelbar ändert. Diesen Effekt bezeichnet man als Einschwingvorgang. Dies würde bedeuten, dass die gemessene Resonanzfrequenz bei diesem Versuchsprozedere von der zeitlichen Änderung der Erregerfrequenz abhängig ist. Eine betragsliche Erhöhung der zeitlichen Erregerfrequenzveränderung führt somit zu einer höheren Abweichung von der tatsächlichen Resonanzfrequenz des Systems.

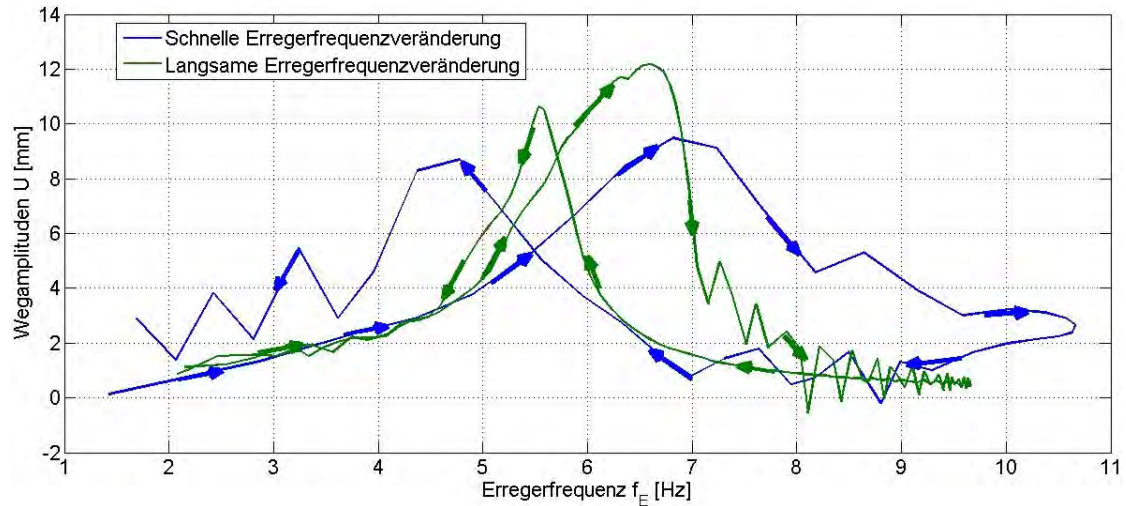


Bild 5.14: Wegamplituden für verschiedene zeitliche Erregerfrequenzveränderungen

Bild 5.15 stellt den Verlauf einer freien Schwingung des Netzes mit der Nummer sieben dar. Auch hier wurde die Resonanzfrequenz ermittelt. Die beiden Zeitwerte  $t_1$  und  $t_2$  wurden numerisch ausgegeben. Der Parameter  $N$  ist die Anzahl der Durchläufe zwischen den beiden Zeitwerten.

$$T_D = \frac{t_2 - t_1}{N} = \frac{27,39 \text{ s} - 24,75 \text{ s}}{14} \approx 0,1886 \text{ s} \quad \Rightarrow \quad f_D = \frac{1}{T_D} \approx 5,30 \text{ Hz} \quad (5.9)$$



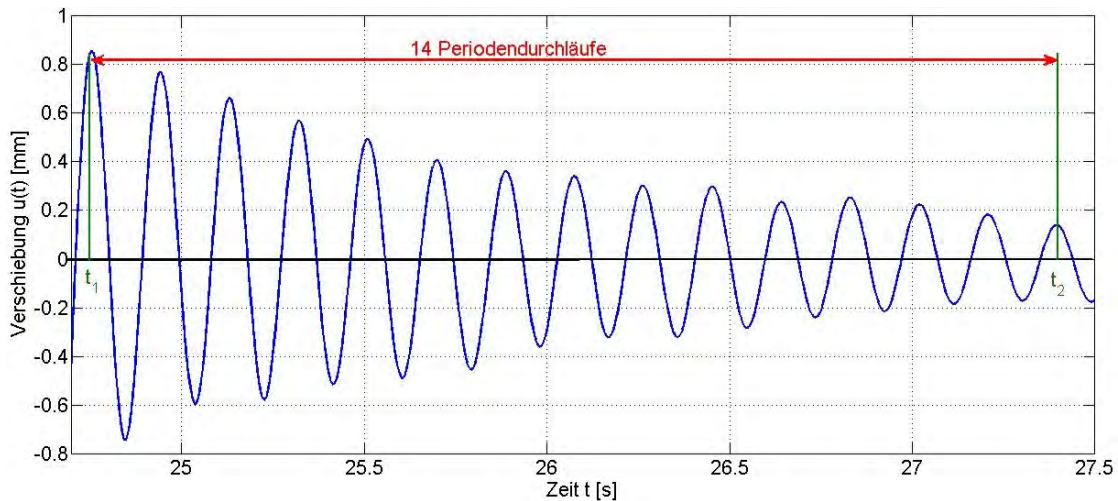


Bild 5.15: Verlauf der freien Schwingung des Spinnennetzes mit der Nummer sieben

Die Ermittlung der Resonanzfrequenz über den Verlauf einer freien Schwingung, als auch mit einer erhöhten Erregerfrequenzveränderung wurden mit den Netznummer sieben bis neun durchgeführt.

Tabelle 5.7: Mittelwerte der Resonanzfrequenzen für die Netze sieben bis neun: alle Angaben in  $Hz$

Gemittelte Resonanzfrequenzen $f_D$						
	Netznummer sieben		Netznummer acht		Netznummer neun	
	$\dot{f} > 0$	$\dot{f} < 0$	$\dot{f} > 0$	$\dot{f} < 0$	$\dot{f} > 0$	$\dot{f} < 0$
VM 1	5,43	6,55	5,45	6,23	4,06	4,96
VM 2	4,78	6,81	4,59	6,86	3,52	5,68
VM 3	5,30		5,55		4,31	

Tabelle 5.7 beinhaltet die gemittelten Eigenfrequenzwerte für die verschiedenen Versuchsdurchführungsarten für das Hoch- ( $\dot{f} > 0$ ) bzw Herunterfahren ( $\dot{f} < 0$ ) der Erregerfrequenz. Eine erhöhte Erregerfrequenzerhöhung führt zu einer weiteren Abwanderung der Frequenzwerte von der tatsächlichen Eigen- bzw Resonanzfrequenz. Die über die freie Schwingung gemessenen Resonanzfrequenzen sind immer in dem Bereich der Versuchsmethodik zwei (VM 2), jedoch nicht immer im Bereich der VM 1. Ein Vergleich der Grenzfrequenzen von der erhöhten Erregerfrequenzerhöhung mit denen der freien Schwingung ergibt, dass die Resonanzfrequenzen (ermittelt durch VM 3) immer im unteren Bereich liegen.

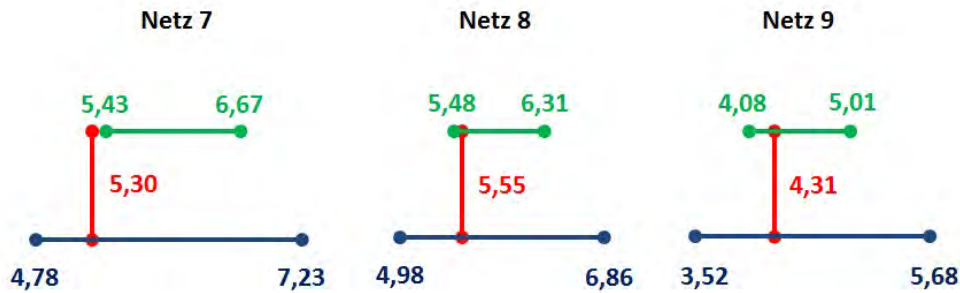


Bild 5.16: Abweichungen verursacht durch die Versuchsdurchführung

Das Bild 5.16 stellt grafisch die Abweichungen dar. Sie werden durch die Versuchsdurchführung verursacht. Der grüne horizontale Balken verdeutlicht den Bereich der Werte für die VM 1. Eine Erhöhung der Erregerfrequenzveränderung  $\dot{f}$  führt durch das zusätzliche Abwandern zu einem größeren Bereich (blaue horizontale Linie). Die rote vertikale Linie zeigt die gemessenen Eigenfrequenzwerte ermittelt aus der freien Schwingung. Die niedrigen Werte dieser VM 3 werden wie folgt begründet.

Die kleinen Werte der Resonanzfrequenz ermittelt über die freie Schwingung sind darauf zurückzuführen, dass der Anregungsprozess für eine reine translatorische Bewegung ungenügend ist. Die Plättchen wurden mit einem Fingerstoß angestoßen. Dieser Stoß regt die äquivalente Masse vermutlich nicht nur zu einer translatorischen Bewegung an, sondern führt zu einer Überlagerung aus einer Translation und einer Rotation, was zu einer Senkung der Resonanzfrequenz der Translation, welche der Lasersensor aufnimmt, führt.

Wir bilden die Erregerfrequenz unserer Systeme im Folgenden wie folgt. Für alle Netze liegen mindestens sieben Versuchsabläufe der üblichen Erregerfrequenzveränderung vor (VM 1). Wir bilden aus allen gemessenen Eigenfrequenzen (für  $\dot{f} < 0$  und  $\dot{f} > 0$ ) den Mittelwert. Diesen versehen wir mit einer Toleranz von  $\pm 0,2 \text{ Hz}$ . Aufgrund der zusätzlich durchgeführten Erprobungen (VM 2 und VM 3) ist davon auszugehen, dass der Betrag der zeitlichen Erregerfrequenzveränderung für das Hoch- und das Herunterfahren annähernd identisch ist und die gemessenen Resonanzfrequenzen symmetrisch abweichen.

## 5.2.4 Zusammenfassung Messfehler

### Sensorik

Der Lasersensor hat eine Genauigkeit von  $\pm 20\text{ mV}$  sowohl für eine Verschiebung als auch für eine Geschwindigkeit [Ome]. Für die Aufnahme der Geschwindigkeit schwankt die Spannung zwischen  $0\text{ V}$  und  $2,5\text{ V}$ . Eine Abweichung von  $40\text{ mV}$  führt zu einer Abweichung von  $1,6\%$ . Mit den Laserdaten werden die Amplituden des Schwingvorgangs gemessen. Die gemessene Maximalamplitude hat gegenüber dem nächsten Hochpunkt stets einen deutlich höheren prozentualen Unterschied als  $1,6\%$ , so dass das Maximum an der richtigen Stelle detektiert wird.

Der Werte des Beschleunigungssensors werden durch den *FIR*-Filter verändert. Die Berechnung der Erregerfrequenz erfolgt mit den Hoch- und Tiefpunkten der gefilterten Daten. Bild 5.5(a) zeigt die ungefilterten und gefilterten Werte. Das Rauschen des ungefilterten Beschleunigungssensorssignals ist höher als die vom Hersteller angegebene Genauigkeit des Beschleunigungssensors von  $0,6\%$  [(Hr09)]. Die Erregerfrequenz wird über die Zeit zwischen zwei Hochpunkten bestimmt. Es wird vermutet, dass die zeitdiskrete Abtastung die berechnete Eigenfrequenz deutlich höher verfälscht als die Werte des Beschleunigungssensors. Würde dies nicht der Fall sein, würde der Mittelwertfilter den Fehler kompensieren. Die Toleranz, welche die zeitdiskrete Abtastung und die Anwendung des Mittelwertfilters berücksichtigt, wird in folgendem Kapitel erläutert.

### Numerik

Der *FIR*-Filter wurde bereits bei der Beschreibung überprüft. Er verschiebt den Verlauf entlang der Zeitachse und führt zu einer Amplitudenveränderung. Die Anwendung des *FIR*-Filters wurde bereits überprüft und sein Fehler kann vernachlässigt werden.

Die anschließende Ermittlung der Erregerfrequenz erfolgt über die Hoch- und Tiefpunkte des Beschleunigungssensors (Unterprogramm *Erregerfrequenz* und Unterprogramm *Mittelwertfilter*). Die Werte werden quantifiziert und gemittelt. Für dieses numerische Prozedere kalkuliert der Autor eine Toleranz von  $\pm 0,1\text{ Hz}$ .

Die folgende analytische Berechnung ist eindeutig. Es können keine weiteren Messfehler generiert werden.

## Berechnung des Gesamtmessfehler

Wir berechnen den Gesamtmessfehler aus der Summe aus den Messfehlern der Numerik und dem Messfehler, welcher durch die Versuchsdurchführung verursacht wird. Als Toleranz für die ermittelten Eigenfrequenzen wird zunächst  $\pm 0,3 \text{ Hz}$  angegeben.

## 5.3 Auswertung der Eigenfrequenzen

### 5.3.1 Korrektur der Massen und Anpassung der Toleranzen

Die bei den Erprobungen verwendeten Massen  $m_{aqui}$  entsprechen nicht den tatsächlichen Spinnentiermassen  $m_{Sp}$  nach dem Netzbau. Beide Größen sind gemessen worden. Wir korrigieren die gemessenen Eigenfrequenzwerte mit dem bekannten Zusammenhang.

$$\omega_{0,gem} \cdot \sqrt{m_{aqui}} = \omega_0 \cdot \sqrt{m_{Sp}} \quad \Rightarrow \quad \omega_0 = \omega_{0,gem} \cdot \sqrt{\frac{m_{aqui}}{m_{Sp}}} \quad (5.10)$$

Die gemessenen Eigenfrequenzen werden auf diese Weise angepasst (Gleichung 5.10). Auch werden die Toleranzangaben den Massenverhältnissen angepasst. Das Toleranzmaß hierfür berechnet sich wie folgt.

$$Tol_1 = \pm 0,3 \text{ Hz} \cdot \sqrt{\frac{m_{aqui}}{m_{Sp}}} \quad (5.11)$$

Die Äquivalenzmasse  $m_{aqui}$  und die gemessene Masse des Spinnentiers  $m_{Sp}$  wurden mit einer Toleranz von  $\pm 2 \text{ mg}$  gewogen. Diese muss zusätzlich berücksichtigt werden. Dieses Toleranzmaß wird maximal, wenn die äquivalente Masse maximal und die Masse des Spinnentiers minimal ist.

$$Tol_2 = f_{0,gem} \cdot \sqrt{\frac{m_{aqui} + 2 \text{ mg}}{m_{Sp} - 2 \text{ mg}}} - f_{0,gem} \cdot \sqrt{\frac{m_{aqui}}{m_{Sp}}} \quad (5.12)$$

Das Toleranzmaß  $Tol$  wird mit einer plus-minus Toleranz angegeben. Die Gesamttoleranz ist die Summe aus den beiden Toleranzen.

$$Tol = Tol_1 + Tol_2 \quad (5.13)$$

Die korrigierten Erregerfrequenzen  $f_0$  sind in Tabelle 5.8 dargestellt. Die ursprünglichen gemittelten Eigenfrequenzwerte werden in der Tabelle 5.10 mit  $f_{0,gem}$  bezeichnet.

Tabelle 5.8: Eigenfrequenzen aller Netze mit Anpassung der Massendifferenz

$NN$ [1]	$f_{0,gem}$ [Hz]	$m_{Sp}$ [mg]	$m_{aqui}$ [mg]	$f_0$ [Hz]	$Tol$ [Hz]
1	3,78	370	330	3,57	$\pm 0,304$
2	4,99	430	340	4,44	$\pm 0,290$
3	4,13	385	300	3,65	$\pm 0,286$
4	4,21	525	425	3,79	$\pm 0,286$
5	4,44	510	370	3,78	$\pm 0,273$
6	4,80	420	405	4,71	$\pm 0,318$
7	6,05	245	190	5,33	$\pm 0,314$
8	5,90	265	200	5,13	$\pm 0,306$
9	4,55	250	245	4,50	$\pm 0,334$
10	4,91	80,0	155	6,83	$\pm 0,549$

$NN$ : Netznummer

### 5.3.2 Bewertung der Länge und Einführung längenunabhängiger Eigenfrequenz

Da das Spinnentier die Rahmenfäden über die gesamte Seitenlänge der Rahmen verteilt, entspricht der Geometrieparameter  $L$  nicht dem tatsächlichen Längenwert. Die tatsächlich für die Berechnung zu nutzende Länge liegt zwischen dem in Bild 5.17 dargestellten Längenparametern  $2 \cdot L$  und  $2 \cdot D$ . Wir korrigieren die Länge und führen eine korrigierte Länge  $L_k$  ein, welche der Mittelwert aus den Abständen  $L$  und  $D$  ist.

$$L_k = \frac{D + L}{2} = \frac{\sqrt{L^2 + L^2} + L}{2} \quad (5.14)$$

Tabelle 5.9 zeigt die korrigierten Längenmaße.

Tabelle 5.9: Korrigierter Längenparameter  $L_k$

Rahmen	Längenparameter $L$ [mm]	Korrigierter Längenparameter $L_k$ [mm]
200x200 mm	100	121
250x250 mm	125	151
300x300 mm	150	181

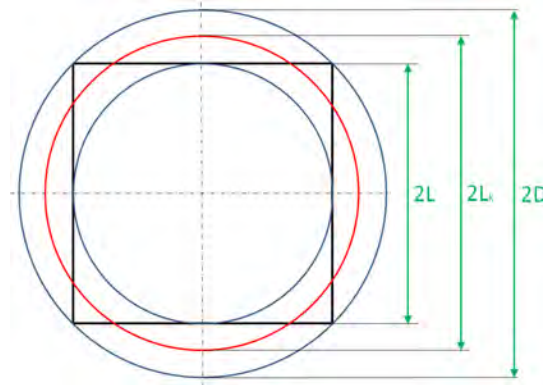


Bild 5.17: Korrektur des ursprünglichen Geometrieparameters L

Der Parameter  $L_k$ , welcher die Geometrie bzw Größe des Spinnennetzes beschreibt, ist schwer in die Auswertung einzubeziehen. Ferner mussten die Rahmengrößen angepasst werden, da die erbauten Spinnennetze mit einem Längenmaß  $L$  von  $50\text{ mm}$  nicht für Schwingungserprobungen geeignet waren. Die Asymmetrie war deutlich zu groß und die Netze wurden meist nicht fertiggestellt. Deswegen wurden Schwingungsversuche mit den Rahmengrößen von  $200 \times 200\text{ mm}$  bis  $300 \times 300\text{ mm}$  durchgeführt. Nach den theoretischen Kenntnissen ist die Eigenfrequenz indirekt proportional zur Wurzel der Länge. Somit ruft eine Änderung des höchsten Geometrieparameters  $L_k$  von  $181\text{ mm}$  auf den Kleinsten von  $120\text{ mm}$  nur eine Änderung der Eigenfrequenz  $f_0$  von circa  $23\%$  hervor. Um qualitative Aussagen zu treffen, ob der Geometrieparameter auch einen Einfluss auf die Eigenfrequenz hat, sind höhere Rahmengrößendifferenzen erforderlich. Deswegen wird im Folgenden eine zweite Eigenfrequenz berechnet, welche annimmt, dass das Spinnentier die Geometrie nicht berücksichtigt. Wir korrigieren die berechneten Eigenfrequenzen  $f_0$  (Tabelle 5.10) und berechnen die Eigenfrequenzen  $f_{0,gen}$ , welche auf die Rahmengröße von  $250\text{ mm}$  genormt ist. Es gilt folgende Beziehung.

$$f_{0,gen} \cdot \sqrt{L_{gen}} = f_0 \cdot \sqrt{L_k} \quad f_{0,gen} = f_0 \cdot \sqrt{\frac{L_k}{L_{gen}}} \quad (5.15)$$

Es wird für Folgearbeiten empfohlen, Spinnennetze mit größeren Rahmengrößen von den Spinnentieren erbauen zu lassen. Im Folgenden wird die Fehlerrechnung und Toleranzrechnung nicht mehr fortgeführt. Die aus den Erprobungen ermittelten Eigenfrequenzen  $f_0$  wurden mit ihrer Toleranz angegeben.

### 5.3.3 Berechnung der äquivalenten Vorspannkraft

Zur Berechnung der äquivalenten Vorspannkraft  $F_{vor}$  verwenden wir das in Kapitel 3.4.3 erstellte Schwingungsmodell von Herrn Jorge Alencastre Miranda. Die Berechnung der äquivalenten Vorspannkraft mit den in dieser Arbeit erstellten Modellen hätte die Generierung von zwei Vorspannkraften zur Folge. Um qualitative Aussagen bezüglich eines Zusammenhangs zwischen Vorspannkraft und Masse des Spinnentiers  $m_{Sp}$  zu treffen, ist die Berechnung der äquivalenten Vorspannung mit dem ursprünglichen Schwingungsmodell ausreichend. Wir lösen die Gleichung 3.33 nach der äquivalenten Vorspannkraft  $F_{vor}$  auf und ersetzen den Längenparameter  $L$  durch den korrigierten Längenparameter  $L_k$ .

$$F_{vor} = 2 \cdot L_k \cdot m_{Sp} \cdot (\pi \cdot f_0)^2 \quad (5.16)$$

Analog hierzu berechnen wir die äquivalente Vorspannkraft  $F_{vor,gen}$  unter der Annahme, dass die Spinne die Geometrie des Netzes nicht berücksichtigt.

$$F_{vor,gen} = 2 \cdot L_k \cdot m_{Sp} \cdot (\pi \cdot f_{0,gen})^2 \quad (5.17)$$

Tabelle 5.10: Berechnung der äquivalenten Vorspannkraft  $F_{vor,gen}$

$NN$ [1]	$m_{Sp}$ [mg]	$f_0$ [Hz]	$f_{0,gen}$ [Hz]	$L_k$ [mm]	$F_{vor}$ [N]	$F_{vor,gen}$ [N]
1	370	3,57	3,19	121	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$8,99 \cdot 10^{-3}$
2	430	4,44	4,44	151	$2,52 \cdot 10^{-2}$	$2,52 \cdot 10^{-2}$
3	385	3,65	3,99	181	$1,83 \cdot 10^{-2}$	$2,19 \cdot 10^{-2}$
4	525	3,78	4,15	181	$2,69 \cdot 10^{-2}$	$3,23 \cdot 10^{-2}$
5	510	3,78	3,78	151	$2,17 \cdot 10^{-2}$	$2,17 \cdot 10^{-2}$
6	420	4,71	4,22	121	$2,22 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$
7	245	5,33	4,77	121	$1,66 \cdot 10^{-2}$	$1,33 \cdot 10^{-2}$
8	265	5,12	5,13	151	$2,07 \cdot 10^{-2}$	$2,07 \cdot 10^{-2}$
9	250	4,50	4,93	181	$1,81 \cdot 10^{-2}$	$2,18 \cdot 10^{-2}$
10	80,0	6,83	7,49	181	$1,34 \cdot 10^{-2}$	$1,60 \cdot 10^{-2}$

Bild 5.18 zeigt die positive Korrelation zwischen Spinnentiermasse  $m_{Sp}$  und der äquivalenten Vorspannkraft  $F_{vor}$ . Dies bedeutet, dass ein Spinnentier der Art *Argiope argentata* die äquivalente Vorspannung ihres Spinnennetzes erhöht, wenn sie ein höheres Eigengewicht hat (Bild 5.18). Wir berechnen die Ausgleichsgerade nach der linearen Korrelation

(Gleichung 5.18) [MP92].

$$\tilde{F}_{vor}(m_{Sp}) = a + b \cdot m_{Sp} \tag{5.18}$$

Der Parameter  $a$  ist der Y-Achsenabschnitt, der Parameter  $b$  die Steigung der Korrelationsgerade.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (F_{vor,i} - \bar{F}_{vor})(m_{Sp,i} - \bar{m}_{Sp})}{\sum_{i=1}^n (m_{Sp,i} - \bar{m}_{Sp})} \tag{5.19}$$

$$a = \bar{F}_{vor} + b \cdot \bar{m}_{Sp} \tag{5.20}$$

Das gleiche Prozedere gilt für die genormte Vorspannkraft. Die beiden Korrelationsgeraden sind in Bild ?? eingezeichnet.

Tabelle 5.11: Berechnung der Parameter  $a$  und  $b$  für die Korrelationsgeraden für den Zusammenhang zwischen der Spinnentiermasse und der äquivalenten Vorspannkraft

	$b \left[ \frac{\mu N}{mg} \right]$	$a \left[ \mu N \right]$	$\tilde{F} (50 mg) \left[ \mu N \right]$	$\tilde{F} (500 mg) \left[ \mu N \right]$
$\tilde{F}_{vor}$	24,04	11074	12277	23095
$\tilde{F}_{vor,gen}$	23,98	11630	12829	23619

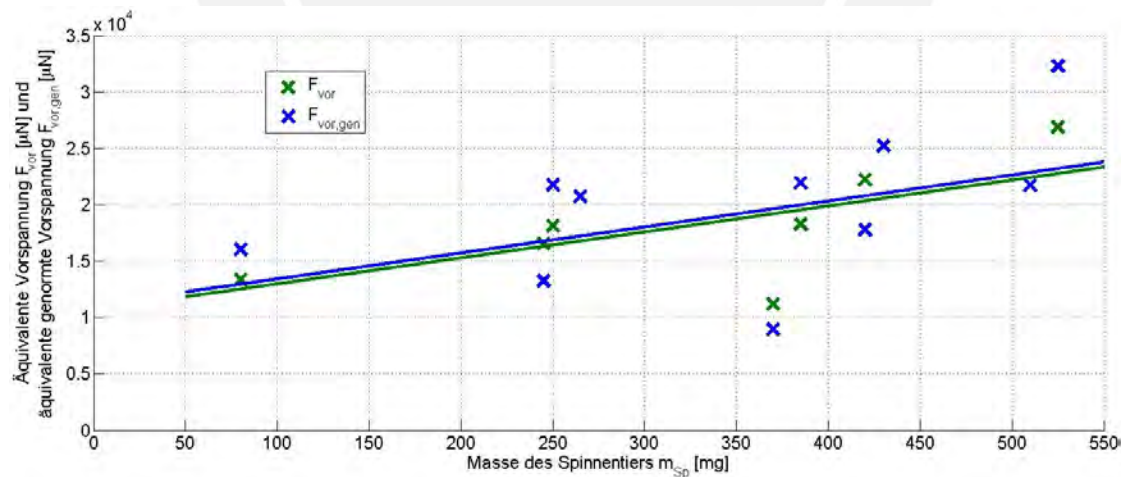


Bild 5.18: Darstellung der positiven Korrelation zwischen der Spinnenmasse und der äquivalenten Vorspannkraft bzw der genormten äquivalenten Vorspannkraft



In Bild 5.19 ist zu erkennen, dass die Vorspannung mit der Spinnentiermasse zunimmt. Bei einer Erhöhung der Spinnentiermasse von  $50\text{ mg}$  auf  $550\text{ mg}$  steigt die Korrelationsgerade von zirca  $25000\text{ }\mu\text{N}$  auf zirca  $49000\text{ }\mu\text{N}$  zu.

Eine Bewertung der genormten Vorspannkraft wird nicht durchgeführt, da die genormte Vorspannkraft über die genormten Eigenfrequenzen ermittelt wird. Die Korrelationsgerade der genormten Vorspannkraft bietet somit keine hinreichende Signifikanz für eine Interpretation.

### 5.3.4 Zusammenhang zwischen der Spinnentiermasse und der Eigenfrequenz

Die Korrelation zwischen der Spinnentiermasse und der Eigenfrequenz wird analog nach den Gleichungen 5.18, 5.19 und 5.20 für die Eigenfrequenz berechnet.

Tabelle 5.12: Berechnung der Parameter  $a$  und  $b$  für die Korrelationsgeraden für den Zusammenhang zwischen der Spinnentiermasse und der Eigenfrequenz

	$b\left[\frac{\text{Hz}}{\text{mg}}\right]$	$a\text{ [Hz]}$	$\tilde{f}\text{ (50 mg) [Hz]}$	$\tilde{f}\text{ (500 mg) [Hz]}$
$\tilde{f}_0$	$-2,46 \cdot 10^{-3}$	5,63	5,51	4,40
$\tilde{f}_{0,gen}$	$-6,89 \cdot 10^{-3}$	7,01	6,60	3,56

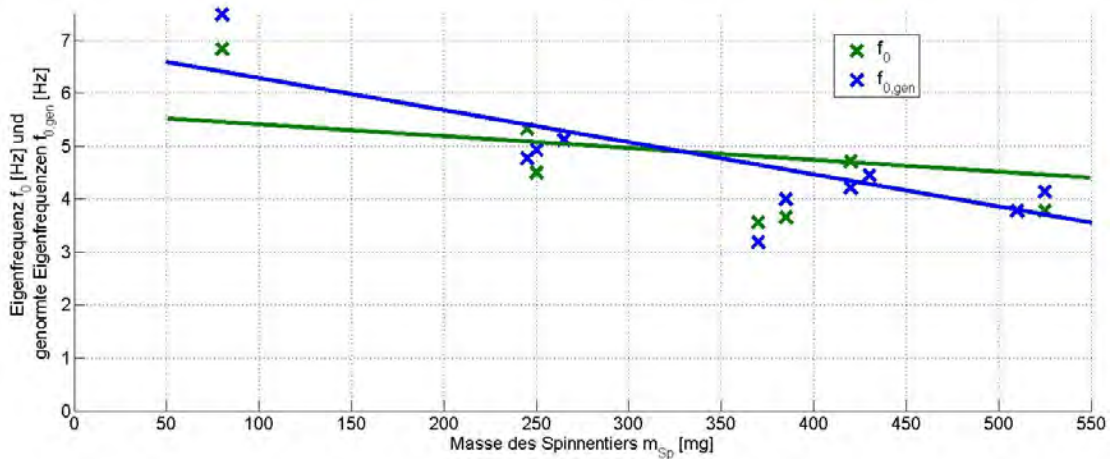


Bild 5.19: Darstellung der negativen Korrelation zwischen der Spinnenmasse  $m_{Sp}$  und der Eigenfrequenz  $f_0$  bzw der genormten Eigenfrequenz  $f_{0,gen}$

Hier ergibt sich eine fallende Korrelationsgerade. Die Eigenfrequenz nimmt mit erhöhter Spinnenmasse ab. Normen wir die Eigenfrequenzen auf die Rahmengröße von  $250 \times 250 \text{ mm}$ , so ergibt sich eine Gerade mit einer betragslich höheren Steigung. Dies würde bedeuten, dass die Spinnentiere die Geometrie (Länge des Netzes) indirekt über die Eigenfrequenz als Konstruktionsparameter mit einbeziehen. Diese Steigungsänderung ist allerdings kritisch zu hinterfragen, da die Anzahl der Werte gering ist (Anzahl der Spinnennetze). Die Veränderung der Steigung ist vor allem auf das Netz mit der Spinnenmasse von  $80,0 \text{ mg}$  zurückzuführen, da dieses den höchsten Einfluss auf die Steigung hat. Die Normung auf die kleinere Netzgröße von  $250 \times 250 \text{ mm}$  erhöht die Eigenfrequenz des Netzes mit der Nummer zehn und die betragsliche Steigung der genormten Ausgleichsgerade. Wir normen deshalb die Eigenfrequenzen auch auf die anderen Netzgrößen mit und ohne Betrachtung des Spinnennetzes mit der Nummer zehn und berechnen die zugehörigen Steigungen  $b$ .

Tabelle 5.13: Berechnung der Steigungen  $b$  bei Normung auf die verschiedenen Längen mit und ohne Berücksichtigung des Spinnennetzes mit der Nummer 10

	$b \left[ \frac{\text{Hz}}{\text{mg}} \right]$	$b_{200} \left[ \frac{\text{Hz}}{\text{mg}} \right]$	$b_{250} \left[ \frac{\text{Hz}}{\text{mg}} \right]$	$b_{300} \left[ \frac{\text{Hz}}{\text{mg}} \right]$
$\tilde{f}_0$ und $\tilde{f}_{0,gen}$	Mit Berücksichtigung des Netzes mit der Nummer zehn			
	$-2,46 \cdot 10^{-3}$	$-3,16 \cdot 10^{-3}$	$-6,89 \cdot 10^{-3}$	$-2,58 \cdot 10^{-3}$
$\tilde{f}_0$ und $\tilde{f}_{0,gen}$	Ohne Berücksichtigung des Netzes mit der Nummer zehn			
	$-4,20 \cdot 10^{-3}$	$-3,79 \cdot 10^{-3}$	$-3,50 \cdot 10^{-3}$	$3,09 \cdot 10^{-3}$

Berücksichtigen wir das Spinnennetz mit der Netznummer zehn, so nimmt die Steigung der Ausgleichsgerade betragslich immer zu. Bei Normung auf die Netzlänge  $L$  von  $150 \text{ mm}$  ist die Steigungsänderung am geringsten, da sich hier die Eigenfrequenz des Netzes mit der Nummer zehn bei Normung nicht verändert. Lassen wir das Netz mit der Nummer zehn unbeberücksichtigt, nehmen die Steigungen betragslich ab. Wir können mit den ermittelten Daten demzufolge nicht eindeutig sagen, ob die Netzspinne die Geometrie, also die Länge als indirekten Konstruktionsparameter einbezieht.

### 5.3.5 Bewertung der Hypothese auf Basis der durchgeführten Erprobungen

Die gemessenen Eigenfrequenzen liegen nicht alle im Frequenzbereich von  $3\text{ Hz}$  bis  $5\text{ Hz}$ . Die Gleichung für die Eigenfrequenz lautet.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot F_{vor}}{L_k \cdot m_{Sp}}} \quad (5.21)$$

Hat das Spinnentier ein höheres Gewicht, so spannt sie zwar ihr Netz höher vor, nicht aber in dem Maße, dass der Quotient aus äquivalenten Vorspannkraft  $F_{vor}$  und der Spinnentiermasse  $m_{Sp}$  konstant bleibt. Deshalb nimmt die Eigenfrequenz des Spinnennetzes mit zunehmender Spinnenmasse ab. Vor allem das Spinnennetz mit der Nummer zehn fällt mit circa  $7\text{ Hz}$  aus dem vermuteten Bereich. Dies ist auf die kleine Spinnentiermasse zurückzuführen. Eine kleine Masse führt zu einer höheren Frequenz.

Aufgrund der folgenden drei Bedingungen ist jedoch davon auszugehen, dass die Spinnennetze der Spinnenart *Argiope argentata* im niederfrequenten Bereich liegen.

- Existenz eines Massenbereiches aufgrund von biologischen Gründen
- Kein Bau von überdimensionalen oder geometrisch sehr kleinen Spinnennetzen
- Existenz eines Vorspannbereichs, da Kontrolle der Vorspannung durch Netzspinne begrenzt

## 5.4 Geometrische Auswertung der Spinnennetze

### 5.4.1 Untersuchte Parameter

Im Kapitel 2.3.3 wurde die Asymmetrie und die höhere Anzahl der Seidenfäden unterhalb des Netzzentrums vorgestellt. Diese Untersuchungen bezogen sich auf die Spinnenart Gartenkreuzspinne *Araneus diadematus*. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Erprobungen mit der Art *Argiope Argentata* durchgeführt und die Spinnennetze wurden bezüglich ihrer Geometrie untersucht.

### 5.4.2 Asymmetrie

Der Parameter  $p$  beschreibt die Asymmetrie. Je höher dieser, umso größer die Abweichung von der idealen Spinnennetzsymmetrie.

$$p = \frac{L - \bar{a}}{L} \tag{5.22}$$

Tabelle 5.14: Asymmetrie des Spinnennetzes der Spinnenart *Argiope Argentata*

Netzgrößen $L$ [mm]	100	125	150
Abstände $a$ [mm]	75, 80, 65	65, 80, 95	85, 125, 80, 90
Gemittelte Abstände $\bar{a}$ [mm]	73	80	95
PA $p$ [%]	63, 60, 68	74, 68, 62	72, 58, 73, 70
Gemittelte PA $\bar{p}$ [%]	64	68	68
Spinnentiermassen $m_{Sp}$ [mg]	370, 420, 245	430, 510, 265	385, 525, 250, 80
PA: Prozentuale Asymmetrie			

Tabelle 5.14 zeigt die gemessenen Werte der unterschiedlichen Netzgrößen. Die Abstände  $a$ , welche die Distanz zwischen oberer Rahmenkante und Netzzentrum angeben, sind alle kleiner als die Hälfte ihrer Netzgrößen. Dies bedeutet, dass die Netzzentren der Spinnenart *Argiope Argentata* der oberen Kante des Rahmens näher sind als der unteren. Die prozentuale Asymmetrie einer Rahmengröße ist etwa konstant. Bild 5.20 zeigt die prozentuale Asymmetrie  $p$  in Abhängigkeit von der Spinnenmasse  $m_{Sp}$ . Es ist keine Korrelation zu erkennen.

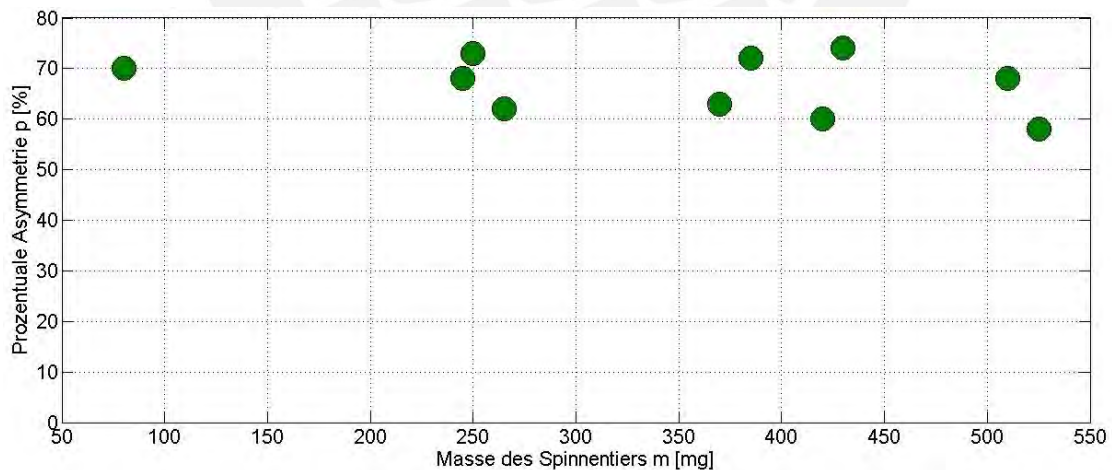


Bild 5.20: Prozentuale Asymmetrie in Abhängigkeit von der Masse der Spinnentiere

### 5.4.3 Verteilung der Radien

Auch hier bestätigen sich die Regelmäßigkeiten, welche bereits bei der Gartenkreuzspinne *Araneus diadematus* erkannt wurden. Tabelle 5.15 zeigt Anzahl der Radien oberhalb des Netzzentrums ( $O$ ) und die Anzahl der Radien unterhalb des Netzzentrums ( $U$ ) für die verschiedenen Netzgrößen. Bitte beachten Sie in der Tabelle, dass ein Komma zwei Zahlenwerte trennt. Bei den zehn vermessenen Netzen waren bei acht von zehn Spinnennetzen die Anzahl unterhalb höher als oberhalb. Bei der gemittelten Radienverteilung ( $GRV$ ) ist bei allen Radienanzahlen zu erkennen, dass das Spinnentier unterhalb des Zentrums mehr Radien verbaut.

Tabelle 5.15: Verteilung der Radien

$L$ [mm]	100		125		150	
	$O$	$U$	$O$	$U$	$O$	$U$
$RV$ [1]	8, 10, 8	9, 11, 13	9, 9, 12	13, 11, 15	11, 8, 13, 12	10, 11, 14, 13
$GRV$ [1]	9	11	10	13	11	12

$RV$ : Radienverteilung  
 $O$ : Anzahl der Radien oberhalb des Netzzentrums  
 $U$ : Anzahl der Radien unterhalb des Netzzentrums  
 $GRV$ : Gemittelte Radienverteilung

## 6 Schluss

### 6.1 Zusammenfassung

Die Seidentypen der Netzspinne sind optimal an die entsprechende Funktion angepasst. Bei der Konstruktion des Spinnennetzes verwendet die Netzspinne Abstände, Richtungen, Kräfte und Spannungen. Zur Kompensation der Kräfte- und Spannungsverteilung passt sie die Struktur des Netzes, die Durchmesser von Seideneinzelfäden oder die Anzahl der Seidenfäden an. Außerdem besitzt die Netzspinne einen ausgeprägten Vibrationssinn. Diese Fähigkeiten ließen die Vermutung aufkommen, dass die Eigenfrequenz des Spinnennetzes ein weiterer Konstruktionsparameter für den Netzbau ist. Dies bedeutet, dass die Geometrie des Netzes, die Masse der Netzspinne und die äquivalente Vorspannkraft indirekte Konstruktionsparameter sind. Mit den durchgeführten Experimenten konnte diese Hypothese nicht bewertet werden.

Durch das Verwenden von Informationen über die Axialkräfte in den Räden, durch die Erstellung eines Modelles zur Berechnung der äquivalenten Vorspannkraft und mit dem Schwingungsmodell des Spinnennetzes von Herrn Jorge Alencastre Miranda konnte die Eigenfrequenz erstmalig ohne die Durchführung von Schwingungsversuchen ermittelt werden. Die verwendeten Axialkräfte zur Berechnung der äquivalenten Vorspannkraft beziehen sich auf ein Spinnennetz der Spinnenart Gartenkreuzspinne *Araneus diadematus*. Sowohl die *Argiope Argentata* als auch *Araneus diadematus* sind Echte Webnetzspinnen. Die Größen der Massen der beiden Spinnenarten sind etwa identisch. Somit ist davon auszugehen, dass beide ihre Netze ähnlich auslegen. Die Werte der berechneten Eigenfrequenzen sind im Einklang mit den Werten, welche sowohl in vorherigen Arbeiten als auch in dieser Masterarbeit aus Schwingungsversuchen mit Spinnennetzen der Spinnenart *Argiope Argentata* ermittelt worden sind. Dies bestätigt die Annahmen, welche dem Schwingungsmodell zu Grunde liegen.

Das bestehende Schwingungsmodell wurde unter Berücksichtigung der Gewichtskraft des Spinnentieres berichtigt und unter Beachtung der Asymmetrie erweitert. Durch die Erweiterung wird die Steifigkeit und die Eigenfrequenz des Netzes um einen kleinen Betrag erhöht. Der Einfluss der Asymmetrie ist gering.

Die im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten Experimente zur Ermittlung der Eigenfrequenz von Spinnennetzen haben gezeigt, dass bei einer erzwungenen Schwingung die zeitliche Veränderung der Erregerfrequenz Einfluss auf den gemessene Eigenfrequenzwert hat. Je höher die zeitliche Veränderung der Erregerfrequenz, umso höher die Abweichung der gemessenen Eigenfrequenz von der tatsächlichen Eigenfrequenz des Spinnennetzes. Dies führte zur Notwendigkeit den ermittelten Eigenfrequenzen mit einem hohen Toleranzwert zu versehen.

Ferner wurde gezeigt, dass die Netzspinne *Argiope Argentata* ihre äquivalente Vorspannung bei einem höheren Wert ihres Eigengewichtes zwar erhöht, jedoch nicht in dem Maß, um die Eigenfrequenz konstant zu halten. Aufgrund von in der Arbeit aufgezeigten Bedingungen ist jedoch davon auszugehen, dass die Frequenzen von Spinnennetzen im niederfrequenten Bereich liegen.

Bei der geometrischen Auswertung der Spinnennetze erstellt durch die Spinnenart *Argiope Argentata* wurde eine Asymmetrie festgestellt, jedoch konnte im Gegensatz zu vorherigen Veröffentlichungen bezüglich der Gartenkreuzspinne kein Zusammenhang zwischen der Spinnenmasse und der Asymmetrie erkannt werden.

## 6.2 Ausblick

Um das Schwingungsmodell des Spinnennetzes zu erweitern, ist zu empfehlen, die Materialeigenschaften in das Modell aufzunehmen. Hierzu müsste die Struktur des Spinnennetzes genauer analysiert werden. Ein quantitativer Nachweis des Materialeinflusses auf das Schwingungsverhalten ist sinnvoll. Die Aufnahme der Materialeigenschaften würde die Komplexität des Schwingungsmodells erhöhen, da die Differentialgleichung nichtlinear wird und zusätzliche Effekte, wie zum Beispiel die Hysterese eventuell beachtet werden müssten.

Bezüglich der Materialeigenschaften könnte auch der Effekt der Superkontraktion untersucht werden. Eine Bewässerung des Spinnennetzes müsste demnach zu einer Erhöhung der Steifigkeit und somit auch zu einer höheren Eigenfrequenz der Spinnennetze führen.

Zur weiteren Analyse der Eigenfrequenz von Spinnennetzen und der Geometrieparameter wird empfohlen, Experimente mit größeren Netzabmaßen zu verwenden. Ferner ist es sinnvoll den derzeitigen Versuchsaufbau zur Ermittlung der Eigenfrequenz zu optimieren. Durch einen Mechanismus mit einer entsprechenden Feinfühligkeit oder einer Steuerung kann die zeitliche Änderung der Erregerfrequenz herabgesetzt werden. Durch eine Steuerung könnte der Einfluss des Bedieners eliminiert werden. Dadurch werden die Eigenfrequenzen exakter bestimmt.



# Abkürzungs- und Größenverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
<b>Lateinisch</b>		
$A$	Querschnittsfläche	$m^2$
$a$	Parameter der Ausgleichsgerade/Abstand	
$b$	Parameter der Ausgleichsgerade	
$C$	Verschiebungskonstante/Wegkonstante	m
$D$	Lehrsche Dämpfung	1
$d_{eq}$	Äquivalente Dämpfungskonstante	$Nsm^{-1}$
$E$	Elastizitätsmodul	$Nm^{-2}$
$F$	Erregerkraft	N
$f$	Kraftantwort	N
$f$ und $f_E$	Erregerfrequenz	Hz
$F_0$	Amplitude Krafterregung	N
$f_0$	Eigenfrequenz	Hz
$F_D$	Dämpferkraft	N
$f_D$	Resonanzfrequenz	Hz
$F_F$	Federkraft	N
$F_G$	Gewichtskraft	kg
$F_T$	Trägheitskraft	N
$f_{0G}$	Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Gewichtskraft	Hz
$F_{axial}$	Axiale Gesamtkraft des Seidenfadens	N
$F_{oben2}$	Obere Vorspannkraft bei Auslenkung unter Berücksichtigung der Asymmetrie	N
$F_{oben}$	Obere Vorspannkraft bei Auslenkung	N
$F_{RA}$	Rückstellkraft unter Berücksichtigung der Asymmetrie	N

Symbol	Beschreibung	Einheit
$F_{unten2}$	Obere Vorspannkraft bei Auslenkung unter Berücksichtigung der Asymmetrie	N
$F_{unten}$	Untere Vorspannkraft bei Auslenkung	N
$F_{ver}$	Vertikale Kraftkomponente	N
$F_{vor,gen}$	Genormte Vorspannkraft	N
$F_{VOR1}$	Untere Vorspannkraft	N
$F_{VOR2}$	Obere Vorspannkraft	N
$F_{vor}$	Vorspannkraft	N
$F_{zus}$	Durch Verschiebung zusätzlich erzeugte Kraft	N
$k$	Steifigkeit	Nm <sup>-1</sup>
$k_{eq}$	Äquivalente Federsteifigkeit	Nm <sup>-1</sup>
$L$	Längenparameter	m
$L_k$	Korrigierter Längenparameter	m
$L_1$	Längenparameter	m
$L_2$	Längenparameter	m
$m$	Masse	kg
$m_{aqui}$	Äquivalente Masse	kg
$m_{Sp}$	Masse des Spinnentiers	kg
$S$	Horizontale Rückstellkraft	N
$t$	Zeit	s
$T_D$	Periodendauer für ein gedämpftes Schwingungssystem	s
$U$	Amplitude der Kraftantwort	N
$u$	Verschiebung/Weg	m
$y$	Verschiebung/Weg	m
$z$	Verschiebung/Weg	m
<b>Griechisch</b>		
$\alpha$	Winkelparameter	°
$\beta$	Winkelparameter	°
$\Delta$	Längenänderung eines Fadens	m
$\delta$	Dämpfungsfaktor oder Abklingkoeffizient	$\frac{1}{s}$
$\epsilon$	Deformation	1
$\eta$	Frequenzverhältnis	1

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\omega$ und $\omega_E$	Erregerkreisfrequenz	$s^{-1}$
$\omega_0$	Eigenkreisfrequenz	$s^{-1}$
$\omega_D$	Resonanzkreisfrequenz	$s^{-1}$
$\omega_{0,gem}$	Gemessene Eigenkreisfrequenz	$s^{-1}$
$\omega_{0A}$	Eigenkreisfrequenz unter Berücksichtigung der Asymmetrie	$\frac{1}{s}$
$\omega_{0G}$	Eigenkreisfrequenz unter Berücksichtigung der Gewichtskraft	$\frac{1}{s}$
$\phi$	Phasenverschiebung	°
$\sigma$	Spannung	$Nm^{-2}$
$\theta$	Winkelparameter	°
$f_{0,gem}$	Gemessene Eigenfrequenz	$s^{-1}$
$f_{0A}$	Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Asymmetrie	Hz
$Tol$	Toleranzwert	Hz
<b>Abkürzungen</b>		
<i>A</i>	Analysator	
<i>acc</i>	Beschleunigungssensor	
<i>bzw</i>	Beziehungsweise	
<i>FIR – Filter</i>	<i>Finite impulse response</i> Filter	
<i>IRR – Filter</i>	<i>Infinite impulse response</i> Filter	
<i>LS</i>	Lasersensor	
<i>PC</i>	Computer	
<i>VM</i>	Versuchsmethodik	

## Literaturverzeichnis

- [Bar01] BARTH, Friedrich G.: *Sinne und Verhalten aus dem Leben einer Spinne*. Springer: Berlin, 2001
- [Bau11] BAUTISTA, Carlos Augusto O.: *Estudio dinámico del sistema araña-tele de araña en condiciones de resonancia*, Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú, Ingeniería Mecánica, Diplomarbeit, 2011
- [BY06] BLACKLEDGE, Todd A. ; Y.HAYASHI, Cheryl: Silken toolkits: biomechanics of silk fibers spun by the orb web spider *Argiope Argentata* (Fabricius 1775). In: *The Journal of Experimental Biology* 209 (2006), S. 2452–2461
- [Cam10] CAMPOS, Richard Alberto R.: *Implementacion de la espectrometria de retardo de tiempo en el desarrollo de una aplicacion para la extraccion de la respuesta de frecuencia de altavoces, utilizando un analizador pulse controlado con MATLAB*, Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Física aplicada, Diplomarbeit, 2010
- [Ebe81] EBERHARD, William G.: Construction behavior and the distribution of tension in orb webs. In: *Bulletin of the British Arachnological Society* 5 (1981), S. 189–204
- [GGOS99] GOSLINE, J. M. ; GUARETTE, P. A. ; ORTLEPP, C. S. ; SAVAGE, K. M.: THE MECHANICAL DESIGN OF SPIDER SILKS: FROM FIBROIN SEQUENCE TO MECHANICAL FUNCTION. In: *The Journal of Experimental Biology* 202 (1999), S. 3295–3303
- [GHSW08] GROSS, Dietmar ; HAUGER, Werner ; SCHRÖDER, Jörg ; WALL, Wolfgang A.: *Technische Mechanik: Band 3: Kinetik*. 10. Auflage. Springer: Berlin, 2008
- [Han12] HANSEL, Franz J.: *Die Kleine Frage: Wie reißfest ist ein Faden aus Spinnenseide?* Internet. <http://www.>

- wdr5.de/sendungen/leonardo/s/d/22.12.2011-16.05/b/die-kleine-anfrage-wie-reissfest-ist-ein-faden-aus-spinnenseide.html. Version: 2012. – Sendung vom 22.12.2011, 16:05 bis 17:00 Uhr
- [HH99] HERBERSTEIN, M. E. ; HEILING, A. M.: Asymmetry in spider orb webs: a result of physical constraints? In: *Animal Behaviour* 58 (1999), S. 1241–1246
- [Hof93] HOFFMANN, Anita: *El maravilloso mundo de los arácnidos*. Fondo de Cultura Económica: México, 1993
- [(Hr09] (HRSG.), Brühl & K.: *Product Catalogue*. Internet. [http://bruel.ru/UserFiles/File/accelerometers\\_bk.pdf](http://bruel.ru/UserFiles/File/accelerometers_bk.pdf). Version: January 2009
- [Jac71] JACKSON, RR: Fine structure of thread connections in the orb web of *Araneus diadematus*. In: *Psyche* 78 (1971), S. 12–31
- [Mir] MIRANDA, Jorge A.: *Determinación de las propiedades dinámicas de una estructura hecha de seda de araña MA*. – inédito tesis doctoral
- [MP92] MONTGOMERY, Douglas C. ; PECK, Elizabeth A.: *Introduction to Linear Regression Analysis*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992
- [MSV99] MADSEN, Bo ; SHAO, Zheng Z. ; VOLLRATH, Fritz: Variability in the mechanical properties of spider silks on three levels: interspecific, intraspecific and intraindividual. In: *Biological Macromolecules* 24 (1999), S. 301–306
- [Nor66] *Norm DIN 66001. Sinnbilder für Datenfluss- und Programmablaufpläne*. September 1966
- [Ome] OMETRON LTD. (Hrsg.): *Ometron, User Manual, VQ-500-D*. Hertfordshire, AL5 5BZ, United Kingdom: Ometron Ltd.
- [Pap00] PAPKE, Mirjam D.: *Isolierung, Identifizierung und Synthese von Signalstoffen aus Spinnen*, Universitaet Hamburg, Fachbereich Chemie, Diss., 2000
- [Rao03] RAO, Singiresu S. ; MIAMA, University of (Hrsg.): *Mechanical Vibrations*. Fourth Edition, Pearson Prentice Hall, New York, 2003
- [RV94] RHISIART, Alu ap ; VOLLRATH, Fritz: Design features of the orb web of the spider, *Araneus diadematus*. In: *Behavioral Ecology* 5 (1994), S. 280–287

- [Ses08] SESSLER, Matthias: *Einführung Digitaltechnik*. Skript der Dualen Hochschule Mosbach für das WS 2008, 2008
- [Skr05] SKRIPT: *FIR- und IIR-Filterentwurf*. Departement Technik, Informatik und Naturwissenschaften der Züricher Hochschule Winterthur, 2005
- [Slo09] SLOTTA, Ute K.: *Charakterisierung von Assemblierungsformen rekombinanter Spinnenseidenproteine*, Technische Universität München, Fakultät für Chemie, Diss., 2009
- [SV98] SCHNEIDER, Jutta M. ; VOLLRATH, Fritz: The effect of prey type on the geometry of the capture web of *Araneus diadematus*. In: *Naturwissenschaften* 85 (1998), S. 391–394
- [Tho83] THOMSON, William T.: *Teoria de vibraciones*. Madrid: Prentice, 1983
- [Tim74] TIMOSHENKO, Stephen: *Vibration problems in engineering*. Fourth Edition, John Wiley and Sons: New York, 1974
- [VDK97] VOLLRATH, Fritz ; DOWNES, Mike ; KRACKOW, Sven: Design Variability in Web Geometry on an Orb-Weaving Spider. In: *Physiology and Behaviour* 62 (1997), S. 735–743
- [VM85] VOLLRATH, F. ; MOHREN, W.: Spiral geometry in the garden spider's orb web. In: *Naturwissenschaften* 72 (1985), S. 666–667
- [Vol87] VOLLRATH, Fritz: Altered geometry of webs in spiders with regenerated legs. In: *Nature* 328 (1987), S. 247–248
- [Vol00] VOLLRATH, Fritz: Strength and structure of spider's silks. In: *Molecular Biotechnology* 74 (2000), S. 67–83
- [WB92] WIRTH, Eckhard ; BARTH, Friedrich G.: Forces in the spider orb web. In: *Journal of Comparative Physiology A* 171 (1992), S. 359–371
- [WRP68] WITT, Peter N. ; REED, Charles F. ; PEAKALL, David B.: *A spider's web: problems in regulatory biology*. Springer: Heidelberg, 1968
- [Zsc93] ZSCHOKKE, Samuel: The influence of the auxiliary spiral on the capture spiral in *Araneus diadematus* Clerck (Araneidae). In: *Bulletin of the British Arachnological Society* 9 (6) (1993), S. 169–173

- [Zsc11] ZSCHOKKE, Samuel: Spiral and web asymmetry in the orb webs of *Araneus diadematus*. In: *The Journal of Arachnology* 39 (2011), S. 358–362

