



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ

# Das Stoßspektrum von Spinnennetzen

## Masterarbeit

an der Fakultät Maschinenbau

Fachgebiet Biomechatronik

Vorgelegt von:	Volker Tietsch
Geboren am:	15.02.1989 in Naila
Matrikelnummer:	44909
Studiengang:	Maschinenbau
Verantw. Professor der Technischen Universität Ilmenau:	Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. Hartmut Witte
Verantw. Professor der Pontificia Universidad Católica del Perú:	Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Jorge Hernan Alencastre Miranda
Angemeldet am:	01.06.2014

Platzhalter für Aufgabenstellung



---

## Eidesstattliche Erklärung

---

Erklärung nach §12, Absatz 7 der Masterprüfungsordnung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Nutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

---

Volker Tietsch

---

## Kurzfassung

---

Die vorliegende Arbeit präsentiert Grundlagen, Versuchstechniken und neue Erkenntnisse des Systems Spinnennetz. Die bereits vorhandenen Kenntnisse über dieses Vorbild aus der Natur werden erweitert und bemerkenswerte Eigenschaften identifiziert.

Spinnenseide ist ein herausragendes Biopolymer, das herkömmliche synthetische Fasern in einer Reihe von Eigenschaften übertrifft. Der Bionik und Materialforschung ist es ein Anliegen diese Fähigkeiten zu nutzen. Besonders die Fähigkeiten der Seide zur Absorption kinetischer Energien stechen hervor. Neueste Fortschritte in der rekombinanten Herstellung versprechen, diesen Werkstoff in naher Zukunft in großen Mengen synthetisch herstellen zu können.

Zu Beginn wird ein Überblick über die besonderen Eigenschaften von Spinnenseide und -netz, sowie den bisherigen Forschungsstand gegeben. Außerdem werden die notwendigen mathematischen Grundlagen zur Analyse von Schwingungen erarbeitet. Dabei wird außerdem das *Shock Response Spectrum* (SRS) und dessen Berechnungsmethoden erläutert. Anhand verschiedener Quellen wird ein standardisiertes SRS entworfen und in Form eines *Matlab*-Skriptes implementiert.

Für die Versuche werden Netze der Spinnenart *Argiope Argentata* verwendet. Zur Vermessung wird ein Versuchsaufbau entworfen und aufgebaut, um die Netze mit Projektilen in Schwingung zu versetzen. Die resultierenden Schwingungen werden mit Interferometern aufgezeichnet.

Mit einer Reihe von Auswertungsskripten werden die Messungen detailliert analysiert, um Eigenschaften zu identifizieren und zu quantifizieren. Außerdem wird das SRS des Netzes berechnet. Dabei zeigt sich, dass das Netz ein dynamisches System ist, dessen Eigenschaften nur beschränkt durch bisherige, lineare Modelle beschrieben werden können. Insbesondere die Steifigkeit kann als dynamischer Parameter ausgemacht werden. Eine Reihe weiterer Parameter, wie z.B. die Energiedissipation werden quantifiziert.

Im Anschluss wird ein erweitertes Modell entwickelt, das die dynamischen Parameter berücksichtigt. Ein Vergleich mit den Messergebnissen zeigt die sehr gute Übereinstimmung des erweiterten, dynamischen Modells. Um weitere Details der Eigenschaften zu untersuchen, werden außerdem die viskoelastischen Materialeigenschaften in ein dynamisches Materialmodell aufgenommen.

Ergebnis der Arbeit sind neue Kenntnisse über das System Spinnennetz, die die Erwartungen übertreffen. Zum Abschluss wird ein detaillierter Ausblick gegeben, um das Forschungsthema im breitem Umfang fortzusetzen. Die Arbeit präsentiert dazu mehrere Ansätze.

---

## Abstract

---

The work in hand presents basics, experimental techniques and new insights on the system spider web. The knowledge about this natural paragon is enhanced and remarkable properties are identified.

Spider silk is an outstanding bio polymer that shows promising properties and exceeds conventional synthetic silks in many properties by far. It is a long desire of bionic and material science to use these abilities. Especially the capability of the silk to absorb relatively high kinetic energies is outstanding. New progress in the recombinant production is promising to produce it in the near future in great quantities.

First an overview of the special properties of spider silks and the web is given. After that the necessary mathematical basis for the analysis of vibrations is worked out. Under this point the *Shock Response Spectrum* (SRS) and his calculation methods are explained. Based on different sources a standardized SRS is developed and implemented in a *Matlab*-script.

In the experiments webs of the spider specie *Argiope Argentata* are used. For the measurements an experimental setup is developed and put in place to use projectiles to stimulate vibrations of the webs. The resulting vibrations are measured with laser interferometers.

Using developed evaluation scripts the measurements are analysed in detail to identify and quantify properties. In addition the SRS is calculated. It is shown that the web is a dynamic system and the properties can only narrowly be described using previous linear models. Especially the stiffness is determined as a dynamic parameter, that depends on displacement and velocity. A series of additional parameters as for example the energy dissipation are quantified.

Following an extended model is developed, which considers the dynamic parameters. A comparison with the measurements shows the excellent accordance of the extended dynamic model. To investigate other details of the properties the viscoelastic material properties are added to a dynamic material model.

The result of the work is enhanced knowledge about the system spider web, which extends previous expectations.

At the end a detailed outlook is given to continue the research topic in a broad scope. For this several approaches are presented.

---

## Danksagung

---

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Jorge Alencastre Miranda von der PUCP Lima und Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte von der TU Ilmenau für die persönliche Betreuung, fachliche Unterstützung und angenehme Zusammenarbeit.

Für die hilfreichen und fruchtbaren Diskussionen zur Messtechnik danke ich Herrn Ing. Msc. Richard Rivera Campos.

Herrn Univ.-Prof. Dr. Jorge Moreno Ruiz und Herrn Univ.-Prof. Dr. Francisco Rumiche Zapata gilt mein Dank für die Bereitstellung von Messinstrumenten.

An dieser Stelle möchte ich mich auch herzlich bei allen Mitarbeitern, Kommilitonen und Dozenten der TU Ilmenau für die lehrreichen und spannenden Jahre bedanken. Jedem Einzelnen bin ich für die Beiträge, die sie zu meiner Ausbildung und dem erfolgreichen Abschluss meines Studiums geleistet haben, zu Dank verpflichtet.

---

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>x</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>Verzeichnis der verwendeten Symbole</b>	<b>xiv</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xvi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Aufgabenpräzisierung . . . . .	2
<b>2 Die Spinne und ihr Netz</b>	<b>4</b>
2.1 Spinnenseide und Spinnennetz . . . . .	4
2.1.1 Fähigkeiten der Spinnenseide . . . . .	4
2.1.2 Seidenarten . . . . .	5
2.1.3 Geometrie des Spinnennetzes . . . . .	7
2.2 Eigenschaften der Spinnenseide . . . . .	8
2.2.1 Mechanische Kennwerte . . . . .	8
2.2.2 Weitere Werkstoffeigenschaften . . . . .	11
2.3 Synthetische Herstellung . . . . .	12
2.3.1 Chemische Grundlagen . . . . .	12
2.3.2 Technischer Herstellungsprozess . . . . .	15
<b>3 Schwingungen und Stöße</b>	<b>17</b>
3.1 Grundlagen zu Schwingungen und Stößen . . . . .	17
3.1.1 Gedämpfte Schwingungen . . . . .	17
3.1.2 Analyse von Stößen und transienten Schwingungen . . . . .	20
3.2 Das Stoßspektrum . . . . .	22

3.2.1	Grundlagen des SRS . . . . .	22
3.2.2	Berechnungsmethoden des SRS . . . . .	24
3.2.3	Klassen von SRS . . . . .	29
3.2.4	Grenzen des SRS . . . . .	30
3.2.5	Standardisiertes SRS . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Modellberechnungen</b>	<b>34</b>
4.1	Modellbildung . . . . .	34
4.1.1	Das Schwingungsmodell . . . . .	34
4.1.2	Modell des viskoelastischen Spinnenfadens . . . . .	38
4.1.3	Differentialgleichung des Modells . . . . .	40
4.1.4	Linearisierte Differentialgleichung des Modells . . . . .	42
4.2	Berechnung des SRS anhand des linearen Modells . . . . .	43
4.2.1	Parameter der transienten Erregerkraft . . . . .	43
4.2.2	Berechnung der Antwortschwingung und des SRS . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Experimente</b>	<b>50</b>
5.1	Ziele der Experimente . . . . .	50
5.2	Spinnentiere und Netze . . . . .	51
5.3	Theoretisch zulässige Erregerkraft und maximale Auslenkung . . . . .	54
5.4	Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .	56
<b>6</b>	<b>Auswertung und Ergebnisse</b>	<b>59</b>
6.1	Auswertung der Messdaten . . . . .	59
6.1.1	Filtern der Messdaten . . . . .	59
6.1.2	Umrechnung der Messdaten . . . . .	63
6.1.3	Berechnung der Modellparameter . . . . .	64
6.2	Berechnung des Stoßspektrums . . . . .	70
6.3	Vergleich zwischen Modellergebnissen und Messungen . . . . .	72
6.4	Energiedissipation des Netzes . . . . .	76
<b>7</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse und Erweiterung des Modells</b>	<b>81</b>
7.1	Nicht konstante Periodendauer . . . . .	81
7.1.1	Das vollständige Netz . . . . .	81
7.1.2	Die einzelne <i>Dragline</i> -Seide . . . . .	89
7.1.3	Überschwingung der Amplitude . . . . .	92
7.2	Die Interpretation der SRS-Analyse . . . . .	93
7.3	Erweitertes und verbessertes Modell . . . . .	96
7.3.1	Dynamische Parameter . . . . .	96
7.3.2	Dynamisches Modell . . . . .	100
7.3.3	Ergebnisse des dynamischen Modells . . . . .	101
7.4	Zusammenhang zwischen Netzgeometrie und Parametern . . . . .	105
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>107</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	107
8.2	Ausblick . . . . .	110

<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>113</b>
A.1 Thesen . . . . .	118
A.2 Weitere Kennwerte von Spinnenseiden . . . . .	119
A.3 Berechnungsprinzip des SRS . . . . .	121
A.4 Linearer rekursiver Digitalfilter nach Smallwood . . . . .	122
A.5 Versuchsaufbau . . . . .	123
A.6 Auswertung . . . . .	124
A.7 Inhalt der DVD . . . . .	128
A.8 Verwendete Materialien . . . . .	130



---

## Tabellenverzeichnis

---

2.1	Vergleich zwischen natürlichen und synthetischen Fasern (nach [Elices 2005])	10
4.1	Parameter der linearisierten DGL . . . . .	43
5.1	Getestete Werkstoffe für die Netzkonstruktion . . . . .	53
7.1	Berechnete, dynamische Parameter Netz. Nr. 5 . . . . .	101
7.2	Geometrieparameter Netz Nr. 3 und 5 . . . . .	106
A.1	Mechanische Eigenschaften von Spinnenseiden und anderen Materialien (nach [Gosline et al. 1999]) . . . . .	119
A.2	Bruchenergie von Spinnenseiden und anderen Materialien (nach [Lewis 2006])	119
A.3	Abhängigkeit der Materialkennwerte von der Dehnrate (nach [Gosline et al. 1999]) . . . . .	120
A.4	Aminosäurekomposition von Spinnenseiden (nach [Lewis 2006]) . . . . .	120

---

## Abbildungsverzeichnis

---

2.1	Seidenarten der Spinnenart <i>Araneus Diadematus</i> [Slotta 2009] . . . . .	6
2.2	Schema eines asymmetrischen Netzes [Herberstein und Heiling 1999] . . . . .	7
2.3	Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Spinnenseide [Gosline et al. 1999] . . . . .	9
2.4	Belastungsfunktion von <i>Dragline</i> - und <i>Flagelli</i> -Seide [Gosline et al. 1999] . . . . .	11
2.5	SEM-Bild von <i>Dragline</i> -Seide und Haar im Vergleich [Koch 2005] . . . . .	13
2.6	Modell der Strukturanordnung in einem Seidenfilament [Slotta 2009] . . . . .	14
2.7	Synthetische Herstellung von Spinnfasern [Scheibel 2009] . . . . .	15
3.1	Verlauf einer gedämpften Schwingung [Gross et al. 2008] . . . . .	19
3.2	Pyrotechnischer Stoß an einer Raumfähre [Irvine 2012] . . . . .	23
3.3	Stoßspektrum des pyrotechnischen Stoßes [Irvine 2012] . . . . .	24
3.4	Prinzip der Faltung . . . . .	25
3.5	Einfluss unterschiedlicher Datenerfassungsraten [Hollowell und Smith 1996] . . . . .	30
4.1	Schwingungsmodell des Spinnennetzes . . . . .	36
4.2	Prinzip des Kelvin-Voigt-Modells [Lion 2007] . . . . .	39
4.3	Freigeschnittene Kräfte im Modell . . . . .	40
4.4	Modell zur Berechnung der transienten Erregerkraft . . . . .	43
4.5	Ablaufplan des Skriptes <i>faltung.m</i> . . . . .	45
4.6	Antwortschwingung der Modellberechnung mit <i>faltung.m</i> . . . . .	46
4.7	Ablaufplan des Skriptes <i>smallwood.m</i> . . . . .	48
4.8	SRS der Antwortschwingung berechnet mit <i>smallwood.m</i> . . . . .	49
5.1	<i>Argiope Argentata</i> . . . . .	52
5.2	Varianz der Spannungs-Dehnungskurve [Garrido et al. 2002] . . . . .	54
5.3	Technisches Prinzip des Versuchsaufbaus . . . . .	57
6.1	Hochfrequentes Rauschen und Störungen des Lasersignals . . . . .	60
6.2	Ergebnisse unterschiedlicher Filter . . . . .	62

6.3	Automatische Nullstellen- und Maxima-Ermittlung . . . . .	65
6.4	Vektorweise Parameterberechnung im Skript <i>netz_auswerten.m</i> . . . . .	66
6.5	Darstellungsmethoden der Parametervektoren . . . . .	67
6.6	Dämpfung in Abhängigkeit der Periodennummer . . . . .	68
6.7	Dämpfung in Abhängigkeit der relativen Periodenamplitude . . . . .	69
6.8	Dämpfung in Abhängigkeit der max. Periodengeschwindigkeit . . . . .	69
6.9	Unterbrochenes Signal des Interferometers . . . . .	71
6.10	Experimentelles SRS der Netze Nr. 5 und Nr. 7 . . . . .	72
6.11	Vergleich Verschiebung zwischen Modell und Versuch . . . . .	73
6.12	Vergleich Geschwindigkeit zwischen Modell und Versuch . . . . .	74
6.13	Vergleich Beschleunigung zwischen Modell und Versuch . . . . .	74
6.14	Vergleich SRS zwischen Modell und Versuch . . . . .	75
6.15	Elementweise Berechnung der Energiedissipation . . . . .	78
6.16	Energiedissipation des Netzes im Vergleich . . . . .	79
6.17	Logarithmische Energiedissipation des Netzes im Vergleich . . . . .	79
7.1	Änderung der Periodendauer in Abhängigkeit der Periode . . . . .	82
7.2	Elementweise Berechnung der Steifigkeit . . . . .	84
7.3	Analytisch berechnete Steifigkeit in Abhängigkeit der Periode . . . . .	85
7.4	Analytisch berechnete Steifigkeit bei Erhöhung der Verschiebung . . . . .	85
7.5	Extrapolierte Steifigkeit im Elastizitätsbereich . . . . .	86
7.6	Analytisch berechnete Steifigkeit bei starker Streuung der Dämpfung . . . . .	88
7.7	Analytisch berechnete Steifigkeit anhand interpolierter Dämpfung . . . . .	88
7.8	Wiederholmessungen der Periodendauer bei Variation der kinetischen Energie	89
7.9	Periodendauer <i>Dragline</i> -Seide im Vakuum . . . . .	90
7.10	Periodendauer <i>Dragline</i> -Seide in Atmosphäre . . . . .	91
7.11	Überschwingung der Amplitude . . . . .	92
7.12	FFT-Analyse im Vergleich zwischen linearem Modell und Messung . . . . .	94
7.13	Dämpfung in Abh. der maximalen Periodengeschwindigkeit . . . . .	97
7.14	Kontinuierliche Dämpfung in Abh. der effektiven Periodengeschwindigkeit . .	98
7.15	Steifigkeit in Abh. der maximalen Periodenauslenkung . . . . .	99
7.16	Kontinuierliche Steifigkeit in Abh. der effektiven Verschiebung . . . . .	100
7.17	Subsystem zur Berechnung der dynamischen Dämpfung . . . . .	101
7.18	Vergleich zwischen Messergebnis und verbessertem Modell . . . . .	102
7.19	Korrelation Periodendauer zwischen Messung und verbessertem Modell . . .	103
7.20	Energiedissipation des dynamischen Modells . . . . .	104
7.21	Abhängigkeit der Dämpfung verschiedener Netze . . . . .	105
A.1	Prinzip der Entwicklung des SRS [Alexander 2009] . . . . .	121
A.2	Definition von primärem und sekundärem SRS [Lalanne 2009] . . . . .	121
A.3	Technischer Entwurf der Stoßvorrichtung . . . . .	123
A.4	Störungen der Interferometermessung nahe des Umkehrpunktes . . . . .	124
A.5	Kalibrierung des Beschleunigungssensors mit dem Interferometer . . . . .	124
A.6	Verlauf der Periodendauer Netz Nr. 3 . . . . .	125
A.7	Ergebnisse der Wiederholmessungen der Periodendauer von Netz 7 . . . . .	125
A.8	Energiedissipation des Netzes Nr. 3 im Vergleich . . . . .	126

A.9	Dynamische Steifigkeit des Simulationsmodells . . . . .	127
A.10	Dynamische Dämpfung des Simulationsmodells . . . . .	127



## Verzeichnis der verwendeten Symbole

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
$A$	$m^2$	Querschnittsfläche der Radialfäden
$c$	$N/m$	Federrate allgemein
$c_{eq}$	$N/m$	äquivalente Federrate
$c_{Kontakt}$	$N/m$	Kontaktfederrate
$c_{Voigt}$	$N/m$	Federrate Kelvin-Voigt-Modell
$d$	$Ns/m$	Dämpfungskonstante allgemein
$d_{atm}$	$Ns/m$	Anteil der Atmosphäre an der Dämpfung
$d_{eq}$	$Ns/m$	äquivalente Dämpfungskonstante
$d_{Voigt}$	$Ns/m$	Dämpfungskonstante Kelvin-Voigt-Modell
$D$		Dämpfungsgrad
$E$	$N/m^2$	Elastizitätsmodul, allgemein
$E_j$	$J$	Energie allgemein
$\Delta E_j$	$J$	relative Energieänderung
$f(t)$	$N/kg$	transiente Erregerkraft / Masse
$F_{elastisch}$	$N$	max. Kraft der Seide im elastischen Bereich
$F_{Faden}$	$N$	resultierende Kraft des Fadens
$F_{Faden;oben}$	$N$	Fadenkräfte in oberer Netzhälfte
$F_{Faden;unten}$	$N$	Fadenkräfte in unterer Netzhälfte
$F_{max}$	$N$	Amplitude der transienten Erregerkraft
$F_{oben}$	$N$	Summe Vorspannung in oberer Netzhälfte
$F_p$	$N$	theoretische transiente Kontaktkraft
$F_p(s)$		Laplace-Transformation der transienten Erregung
$F_{unten}$	$N$	Summe Vorspannung in unterer Netzhälfte
$h(t)$		Fundamentallösung der DGL
$L$	$m$	Länge der Radialfäden, allgemein
$L_1$	$m$	Länge der Radialfäden in der oberen Netzhälfte
$L_2$	$m$	Länge der Radialfäden in der unteren Netzhälfte
$\Delta L$	$m$	Dehnung der Radialfäden, allgemein
$\dot{\Delta L}$	$m/s$	Dehnrates der Radialfäden, allgemein
$m$	$kg$	Masse allgemein

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
$m_{\text{projektil}}$	$kg$	Masse des Projektils
$M_{\text{objekt}}$	$kg$	Masse des angestoßenen Objektes
$n_{\text{oben}}$		Anzahl Radialfäden in oberer Netzhälfte
$n_{\text{unten}}$		Anzahl Radialfäden in unterer Netzhälfte
$p(t)$	$N$	transiente Erregerkraft
$Q$		Gütefaktor
$R$	$N$	gesamte Rückstellkraft
<i>Selastisch</i>	$N$	Quotient Kraft-Dehnung im elastischen Bereich
$T$	$s$	Periodendauer, allgemein
$T_d$	$s$	Periodendauer der gedämpften Schwingung
$T_{\text{netz}}$	$s$	Periodendauer der Netzschwingung
$T_p$	$s$	Periodendauer der transienten Erregerkraft
$u$	$m$	Verschiebung aus der Gleichgewichtslage
$u_{\text{max}}$	$m$	maximale Verschiebung aus der Ruhelage
$u_{\text{max,ela}}$	$m$	maximale Verschiebung im Elastizitätsbereich
$\dot{u}$	$m/s$	Geschwindigkeit der Verschiebung
$v_0$	$m/s$	Anfangsgeschwindigkeit
$v_{\text{eff}}$	$m/s$	effektive Geschwindigkeit der jeweiligen Periode
$v_{\text{max}}$	$m/s$	maximale Geschwindigkeit der jeweiligen Periode
$W$	$J$	Arbeit, allgemein
$W_P$	$J$	Energiedissipation einer Periode
$x$	$m$	relative x-Koordinate
$x_{\text{max}}$	$m$	maximale Amplitude der Periode
$x_p(t)$	$m$	Antwortschwingung des Systems
$\dot{x}$	$m/s$	Geschwindigkeit in x-Koordinate
$\ddot{x}$	$m/s^2$	Beschleunigung in x-Koordinate
$\alpha$	$rad$	Phasenwinkel
$\delta$	$s^{-1}$	Abklingkoeffizient
$\epsilon$		Dehnung, allgemein
$\dot{\epsilon}$	$s^{-1}$	Dehnrate, allgemein
$\epsilon_e$		elastische Dehnung
$\epsilon_{in}$		viskose Dehnung
$\epsilon_{\text{elastisch}}$		elastische Dehnung
$\epsilon_{\text{vorspannung}}$		Dehnung in Folge der Vorspannung
$\epsilon_{\text{elastisch}}$		Dehnung in Folge der Auslenkung
$\eta$	$kg/ms$	Viskosität
$\sigma$	$N/m^2$	mechanische Spannung, allgemein
$\omega_0$	$s^{-1}$	Kreisfrequenz der ungedämpften Schwingung
$\omega_d$	$s^{-1}$	Kreisfrequenz der gedämpften Schwingung
$\Theta_1$	$rad$	Auslenkungswinkel obere Netzhälfte
$\Theta_2$	$rad$	Auslenkungswinkel untere Netzhälfte
$\mathcal{L}$		Laplace-Transformationszeichen

---

## Abkürzungsverzeichnis

---



AA-Filter	.....	Anti-Aliasing-Filter
DGL	.....	Differentialgleichung
DOF	.....	Degree of freedom
ES	.....	Energy Spectrum
FFT	.....	Finite Fourier Transformation
FG	.....	Freiheitsgrad
FIR-Filter	.....	Finite Impulse Response Filter
FT	.....	Fourier Transformation
HSRSF	.....	Highest Shock Response Spectrum Frequency
IIR-Filter	.....	Infinite Impulse Response Filter
LAF	.....	Lowest Analysis Frequency
MAF	.....	Maximum Analysis Frequency
MDOF	.....	Multi degree of freedom
PMMA	.....	Polymethylmethacrylat
PUCP	.....	Pontificia Universidad Católica del Perú

REM .....	Rasterelektronenmikroskop
RMS .....	Root Mean Square
RSM .....	Response Spectrum Method
SDOF .....	Single degree of freedom
SEM .....	Scanning Electron Microscope
SRS .....	Shock Response Spectrum



# KAPITEL 1

---

## Einleitung

---

### 1.1 Motivation

A civilization is both developed and limited by the materials at its disposal.

---

*(Sir George Paget Thomson,  
Nobelpreisträger für Physik)*

Wissenschaft und Technik sind seit dem Beginn der Menschheitsgeschichte an die Grenzen von Materialien und Werkstoffen gebunden. Die Entwicklung neuer Werkstoffe und die intensive Weiterentwicklung bereits vorhandener machen oft erst neue technische Anwendungen möglich. In der Bionik arbeitet man dazu bei der Entwicklung neuer Technologien mit Vorbildern aus der Natur. Ziel ist es die Entwicklung von Jahrtausenden der Evolution und der natürlichen Selektion zu nutzen. Ein bedeutendes Vorbild aus der Natur ist die Spinne und ihr Netz. Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Spinnenseide machen sie sehr attraktiv als Biomaterial und Werkstoff.

Spinnennetze zeigen erstaunliche mechanische Eigenschaften in Hinsicht auf spezifische Festigkeit, Dehnbarkeit und Zähigkeit im Bezug auf ihre Masse. Ein Spinnennetz trägt dabei

nicht nur sein Eigengewicht, das Gewicht des Spinnentieres und seiner Beute, sondern widersteht verschiedenen dynamischen Belastungen. Die Dissipation der kinetischen Energie des Beutetieres bei dessen Aufprall auf das Netz und die dynamischen Belastungen bei Winden und sonstigen Umwelteinflüssen zeigen die erstaunlichen Eigenschaften des Spinnennetzes. Diese Bedingungen können verglichen werden mit Belastungen von Stahlseilen an Brücken bei Erdbeben und Orkanen. Eigenschaften welche zeigen, dass die Erforschung der Spinnennetze u.a. auch für Bauingenieure von Bedeutung ist. [Brunetta und Craig 2010]

Wissenschaftliche Fortschritte bringen uns dem Ziel dabei immer näher, die Fähigkeiten, die durch die Evolution optimiert wurden, technisch umsetzen zu können. Insbesondere die synthetische Herstellung von Seidenproteinen der Spinnenfäden bietet die Aussicht, in Zukunft die besonderen Eigenschaften der Spinnennetze für technische Anwendungen in Industrie und Wissenschaft zu nutzen. [Scheibel 2009]

Bei der Erforschung dieser faszinierenden Eigenschaften arbeiten Wissenschaftler verschiedener Fachgebiete zusammen. Das Netz ist Forschungsthema für Biologen, Chemiker, Physiker und Ingenieure aller Fachrichtungen. Unter anderem die besonderen dynamischen Eigenschaften des Netzes sind Gegenstand von Forschungen. Das mögliche Potential von Spinnenfäden ist wie bei allen Neuentwicklungen nur schwer einzuschätzen. Bereits jetzt werden große Forschungsanstrengungen z.B. in den Bereichen Medizin, Pharmazie, Materialforschung und dem Militärssektor unternommen, um die besonderen Eigenschaften im großen Maßstab praktisch anwenden zu können.

Diese Arbeit möchte einen Beitrag auf dem Weg zu einem tieferen Verständnis der dynamischen Eigenschaften der Spinnennetze leisten.

## 1.2 Aufgabenpräzisierung

Das zentrale Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der besonderen Eigenschaften des Spinnennetzes bei Stößen.

Für ein besseres Verständnis der Thematik und der speziellen Besonderheiten auf diesem Gebiet wird als erstes ein Überblick über die Spinnennetze im Allgemeinen und den Stand der Forschung gegeben. Anhand der dargestellten Grundlagen wird es ermöglicht das Potential für zukünftige Anwendungen einzuschätzen und relevante Besonderheiten nachzuvollziehen. Darauf folgend werden die theoretischen Grundlagen von Stößen sowie deren Untersuchung und Auswertung aufgearbeitet. Insbesondere wird detailliert auf das Stoßspektrum eingegangen. Das Stoßspektrum ist eine gängige Methodik zur Analyse der Eigenschaften eines

Systems das Stößen ausgesetzt wird. Die verwendeten Ausdrücke werden definiert, mathematische Grundlagen erläutert und auf Eigenschaften und zu beachtende Besonderheiten eingegangen.

Als nächster Schritt werden die notwendigen Experimente geplant und vorbereitet. Dazu sind die Spinnentiere und die erforderlichen Spinnennetze vorzubereiten. Für eine statistische Aussagekraft der Ergebnisse ist ein entsprechender Stichprobenumfang notwendig. Daher werden mehrere Spinnennetze vorbereitet. Zeitgleich ist die Messtechnik in Betrieb zu nehmen und der Versuchsaufbau zu erstellen. Eine Vorrichtung zur reproduzierbaren Erzeugung der Stöße auf das Spinnennetz ist zu realisieren.

Nach Einarbeitung in die theoretischen Grundlagen der Spinnennetze und der Stoßanalyse sowie den vorbereiteten Experimenten werden die Messungen der Stöße aufgenommen. Zur Untersuchung auftretender Besonderheiten sind Theorien zu entwickeln und Zusatzexperimente durchzuführen.

Als nächster Schritt steht die Auswertung der aufgenommenen Daten und die Berechnung des Stoßspektrums. Hierfür werden Skripte und deren Implementierung erstellt. Insbesondere die zuvor beschriebenen Besonderheiten des Stoßspektrums müssen bei der Auswertung beachtet werden. Die Unsicherheit der Ergebnisse ist bei fehlerhafter Durchführung der Analyse erheblich. [Smith und Hollowell 2014] Die Messdaten ermöglichen zudem die Dissipation der kinetischen Energie zu quantifizieren und die Dämpfung des Netzes zu bestimmen.

Für die Überprüfung der Ergebnisse wird das Schwingungsmodell vorangegangener Arbeiten herangezogen, das in [Miranda 2011] und [Bäumer 2012] entwickelt wurde. Das Modell ist anzupassen und im Rahmen der neugewonnenen Erkenntnisse weiterzuentwickeln. Es wird eine theoretische Berechnung des Stoßspektrums durchgeführt. Ziel ist es einen Vergleich zwischen den Ergebnissen der Experimente und dem theoretischen Modell zu ziehen. Zum Schluss steht eine Diskussion der gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse. Die Besonderheiten der Resultate sind zu erläutern und Schlussfolgerungen aus deren Bedeutung zu ziehen. Des Weiteren sind Empfehlungen für weiterführende Arbeiten und ein Ausblick auf erwartete Ergebnisse zu treffen.

## KAPITEL 2

---

# Die Spinne und ihr Netz

---

## 2.1 Spinnenseide und Spinnennetz

### 2.1.1 Fähigkeiten der Spinnenseide

Das Spinnennetz wird oftmals auf die Funktion eines herkömmlichen Netzes reduziert, ohne seine vielseitigen und erstaunlichen Anwendungen in der Natur zu berücksichtigen. Die weitläufig bekannteste Verwendung des Spinnennetzes ist der Beutefang. Etwa die Hälfte der bekannten Spinnenarten nutzt das Netz zum Fangen seiner Beute. ([Slotta 2009], zitiert nach [Coddington et al. 2004]) Die Spinnenseide findet aber auch andere Verwendungszwecke in der Natur, was im Laufe der Evolution zur spezifischen Entwicklung verschiedener Seidenarten führte. Spinnenseiden haben sich in hunderten Millionen von Jahren der Evolution entwickelt und sich dabei verschiedensten Zwecken perfekt angepasst. [Shultz 1986], [Brunetta und Craig 2010]

Die Fähigkeiten der Spinnenseide sind vielseitig. Dementsprechend umfangreich sind die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten, die erforscht werden. Einige Beispiele aktueller Forschungen zeigen mögliche Anwendungen auf.

Das Einsatzgebiet, das der natürlichen Funktion der Spinnenfaser am nächsten kommt, ist ihre Verwendung als technische Faser. Die Bedeutung und das Produktionsvolumen von faserverstärkten Verbundwerkstoffen wächst stetig. Einerseits weisen die Fasern eine bisher bei synthetisch hergestellten Fasern unerreichte Kombination von Eigenschaften wie Festigkeit, Dehnbarkeit und weiteren Eigenschaften auf. Andererseits bietet bei steigender Nachfrage und wachsenden Rohstoffpreisen die Produktion von Fasern aus nachwachsenden Rohstoffen ökonomische Vorteile.

Im Bereich der Medizin werden die Spinnenseiden unter anderem als mögliche Therapie zur Regeneration von Nerven untersucht. Spinnenseiden eignen sich für diese Verwendung aus mehreren Gründen. Das natürliche Material zeigt eine reduzierte Zytotoxizität, das bedeutet eine geringere Schädigung von Zellen und Gewebe im Vergleich zu anderen Materialien. Darüber hinaus besitzt es eine hohe Biokompatibilität. [Allmeling et al. 2008] Die Spinnenfaser stimuliert das Nervenwachstum und bietet den Nerven Orientierung für das Wachstum.

Weitere Forschungen haben gezeigt, dass die Fasern modifiziert werden können um ihre mechanischen und chemischen Eigenschaften zu modifizieren und somit an besondere Anforderungen anzupassen. Untersuchungen haben bereits die Kompatibilität mit einer Reihe von Nanomaterialien, wie zum Beispiel Goldpartikeln, Pentacen und Kohlenstoffnanoröhren gezeigt. Unter anderem wurde der Einsatz für Dünnschichten und Mikrostrukturen auf Oberflächen bereits erfolgreich untersucht. So ist es möglich elektrisch leitende Fasern herzustellen, die gleichzeitig herausragende mechanische Eigenschaften zeigen. Eine Reihe von Anwendungen in der Mikrosystemtechnik wird somit attraktiv. [Chiao und Chiao 2011], [Bai et al. 2006], [Bai 2006] Die Beschichtung mit magnetischen Nanopartikeln führt dazu, dass die Fasern auf magnetische Felder reagieren, was beispielsweise Anwendung im Audiobereich finden kann. [Hardy und Scheibel 2010]

Im Sicherheits- und Militärbereich können die herausragenden Eigenschaften der Seide zur Energiedissipation angewendet werden. Besonders der Militärbereich arbeitet an der Entwicklung der Spinnenfaser als Material für kugelsichere Westen und weiteren Möglichkeiten zum Schutz vor ballistischen Projektilen.

### 2.1.2 Seidenarten

Spinnen können bis zu sieben verschiedene Seiden für unterschiedliche Zwecke in ihrem Hinterleib herstellen. [Brunetta und Craig 2010] Dazu besitzen Spinnen im Hinterleib unterschiedliche Spinnröhren. Im Allgemeinen wird die Seide nach der Drüse benannt, in der sie produziert wird. Abb. 2.1 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Seidenarten, die

die Spinnenart *Araneus Diadematus* zur Verfügung hat. Die *Dragline*- und *Flagelli*-Seiden zeigen die vielversprechendsten Eigenschaften. Am interessantesten für technische Anwendungen ist wegen ihrer besonderen mechanischen Eigenschaften die *Dragline*-Seide. Sie ist daher der Seidentyp, der am meisten erforscht ist und an deren synthetischen Herstellung am intensivsten gearbeitet wird. Mit der *Dragline*-Seide (1) errichtet die Spinne den Rahmen des Netzes und die Grundstruktur des Netzes mit Radien und äußeren Spiralen. Außerdem nutzt die Spinne diese Seide, um sich abzuseilen. Die *Flagelli*-Seide (2) wiederum dient zur Konstruktion der Spiralen des Netzes. Es wird angenommen, dass diese Seidenart für den Großteil der Dissipation der kinetischen Energie der auftreffenden Beutetiere verantwortlich ist. Grund zu dieser Annahme ist, dass diese Seidenart den größten Anteil an der Fläche des Netzes einnimmt und daher den größten Anteil an der Fluidämpfung verursacht, die bei einer Schwingung in Atmosphäre auftritt.

Zur Verankerung des Netzes und zur Verbindung der Knotenpunkte zwischen den Radien und Spiralen nutzt das Spinnentier die *Piriform*-Seide (6).

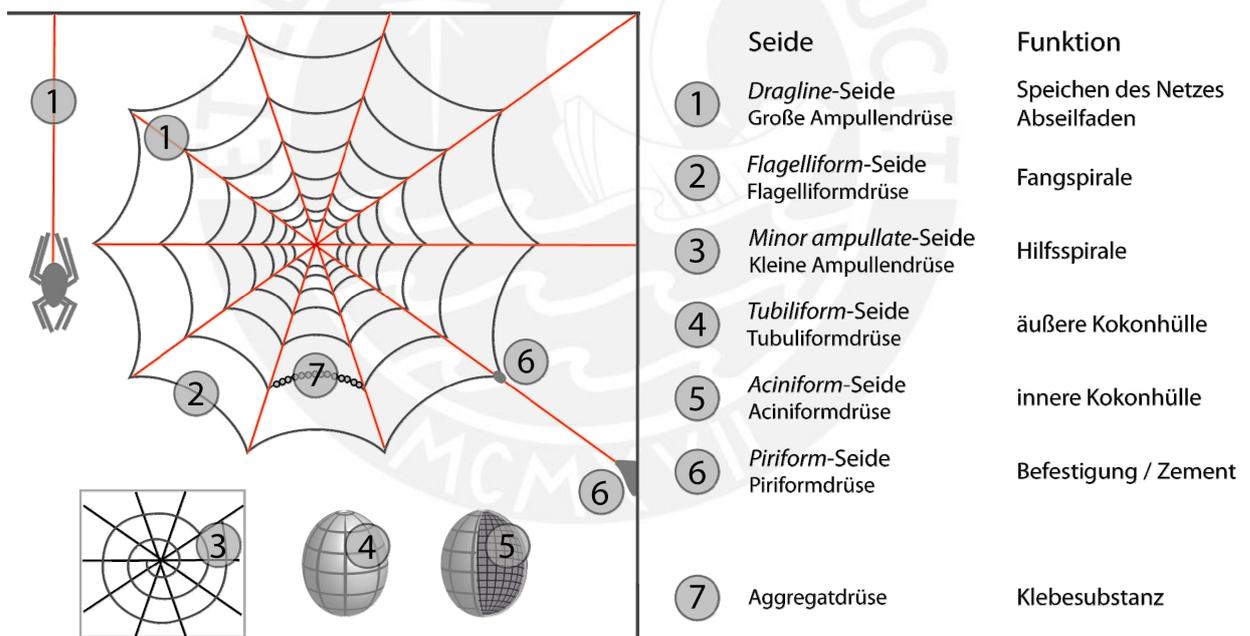


Abb. 2.1: Seidenarten der Spinnenart *Araneus Diadematus* [Slotta 2009]

Die Spiralen sind in der Regel mit einer Klebesubstanz (7) bedeckt, an der nach Auftreffen auf das Netz die Beute haften bleibt. Eine weitere Seidenart ist die *Minor-ampullate*-Seide (3), die als Hilfsspirale beim Bau des Netzes dient. Die *Tubili*- (4) und *Acini*-Seide (5) bilden den Kokon des Tieres.

### 2.1.3 Geometrie des Spinnennetzes

Neben den Materialeigenschaften der Seide bildet die Konstruktion und Geometrie einen wichtigen Bestandteil, um die besonderen Eigenschaften des Netzes zu erreichen. Forschungen von [Wirth und Barth 1992] haben gezeigt, dass die Spinne sich beim Bau an Winkeln, Längen und Richtungen orientiert, sowie an Kräften und Spannungen in den Seiden. Damit wird gezeigt, dass die Geometrie eine wichtige Rolle für den Bau des Netzes bildet und somit zu den Eigenschaften des gesamten Netzes beiträgt. In [Zschokke 2000] deuten Ergebnisse darauf hin, dass das Spinnentier die Struktur des Netzes optimiert, indem es z.B. an Stellen mit größeren Spannungen doppelte Radien anbringt.

Außerdem berücksichtigt die Spinne beim Bau des Netzes bestimmte Umwelteinflüsse, wie zum Beispiel Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Windgeschwindigkeit. Bei höheren Windgeschwindigkeiten sind die errichteten Netze kleiner, die Maschen in größeren Abständen angeordnet und die Fäden stärker vorgespannt. Sinkende Temperaturen führen zur Ausbildung größerer Abstände der Spiralen. Eine niedrigere Luftfeuchtigkeit bewirkt, dass die Netze kleiner konstruiert werden und weniger Spiralen aufweisen. [Vollrath et al. 1997]

Abhängig von verschiedenen Faktoren, wie Spinnenart, äußeren Umwelteinflüssen und dem individuellen Spinnentier variiert die Asymmetrie des Netzes. Die in den Experimenten verwendeten Spinnen der Art *Argiope Argentata* konstruieren Radnetze. Die Netze sind in der Regel vertikal angeordnet. Entgegen der oft idealisierten Vorstellung, sind die meisten Netze asymmetrisch ausgebildet. (siehe Abb. 2.2)

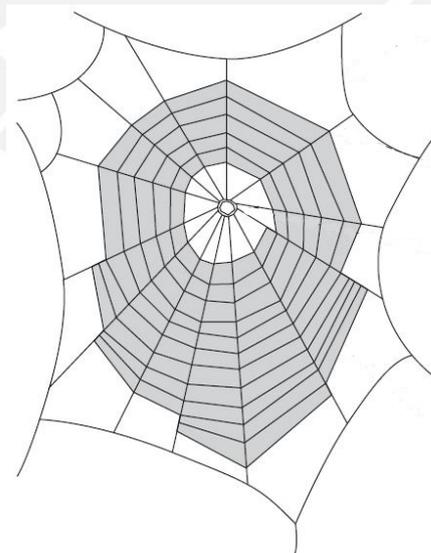


Abb. 2.2: Schema eines asymmetrischen Netzes [Herberstein und Heiling 1999]

Der obere Teil des Netzes ist kleiner und besteht aus weniger Seide, was zu einem asymmetrischen Netz führt. Es wird angenommen, dass die Netze asymmetrisch konstruiert werden, da die Spinne aufgrund der Schwerkraft die Beute im unteren Teil des Netzes schneller erreichen kann. Dies macht den unteren Bereich für den Beutefang wertvoller. Außerdem konstruieren ältere und schwerere Tiere in der Regel Netze mit größerer Asymmetrie. [Herberstein und Heiling 1999]

Die höhere Zugspannung und Hysterese der radial angeordneten *Dragline*-Seide dient nicht nur zur Bildung eines steifen Rahmens für das Gesamtnetz, sondern absorbiert ebenfalls sehr gut den Stoß auftreffender Beute. Die geometrische Gleichmäßigkeit dient wahrscheinlich primär dazu die Aufprallenergie konstant zu verteilen. Da außerdem die Fäden der Spiralen, sog. *Flagelli*-Seide, eine geringere Zugfestigkeit bei jedoch höherer Elastizität aufweisen, ist anzunehmen, dass das Verhältnis von Radialfäden zu Spiralfäden die Fähigkeit des Netzes zur Energieabsorption bestimmt. [Harmer et al. 2011] Einige Forschungen haben erste Versuche unternommen, um zu bestimmen inwieweit die Energieabsorption der auftreffenden Beute von den Materialeigenschaften abhängt, und welchen Einfluss die Geometrie nimmt. Ein Hypothese von [Craig 1987] postuliert, dass große Netze mit dem Potential hohe Energien bei Aufprall zu absorbieren sich auf die Geometrie und die Vorspannungen im Netz stützen. Bei kleinen Netzen, die relativ kleine Energien absorbieren, spielt die Rolle der Eigenschaften einzelner Seidenfäden und deren Anordnung eine übergeordnete Rolle. Sollte diese Annahme zutreffen, ist zu erwarten, dass die Energieabsorption mit Anstieg der Netz- und Spinnengröße nichtlinear ansteigt.

## 2.2 Eigenschaften der Spinnenseide

### 2.2.1 Mechanische Kennwerte

Die Besonderheit der Spinnenseide sind die verschiedenen Eigenschaften, die sie in sich vereint. Spinnenseide ist nicht stärker als eine herkömmliche technische Faser. Es ist die Kombination verschiedener Eigenschaften, besonders der Festigkeit und Dehnbarkeit, die sie zu einem der interessantesten Biomaterialien macht. Ihre Anwendung kann eine Reihe von Vorteilen vereinen, die bisher in der Materialwissenschaft einzigartig ist. [AMSilk 2011]

Wie zuvor beschrieben existieren unterschiedliche Faserarten. In Abb. 2.3 ist das Spannungs-Dehnungs-Diagramm der *Dragline*-Seide (rot) und der *Flagelli*-Seide (blau) dargestellt. Die Kennlinien drücken die speziellen Anforderungen an die Seide aus. Sie zeigen deutliche

Unterschiede in ihren mechanischen Eigenschaften. Die *Dragline*-Seide weist eine hohe Steifigkeit von ca. 10 GPa zu Beginn des Zugversuches auf. Sie dient der Konstruktion des steifen Grundgerüsts des Spinnennetzes. Die *Flagelli*-Seide besitzt zu Beginn der Dehnung eine geringe Steifigkeit von ca. 0,003 GPa. Ihre zulässige Dehnung ist hingegen um ein vielfaches größer. Die *Flagelli*-Seide lässt sich bis zu 270 % strecken. Der Grund dafür ist, dass diese Seidenart dazu dient die kinetische Energie der auftreffenden Beute aufzunehmen. Der nichtlineare Verlauf des Spannungs-Dehnungs-Diagramms kommt durch die unterschiedlichen Bestandteile zustande. Als erstes brechen die relativ schwachen Wasserstoffbrücken in der Seide auf. Daraufhin orientieren sich die *ungeordneten*, amorphen Bereiche. Die unterschiedlichen Kennlinien der Seiden sind dabei abhängig von den Volumenanteilen der amorphen und kristallinen Bereiche, den Größen der ausgebildeten Kristallite und deren Orientierung. [Gosline et al. 1999]

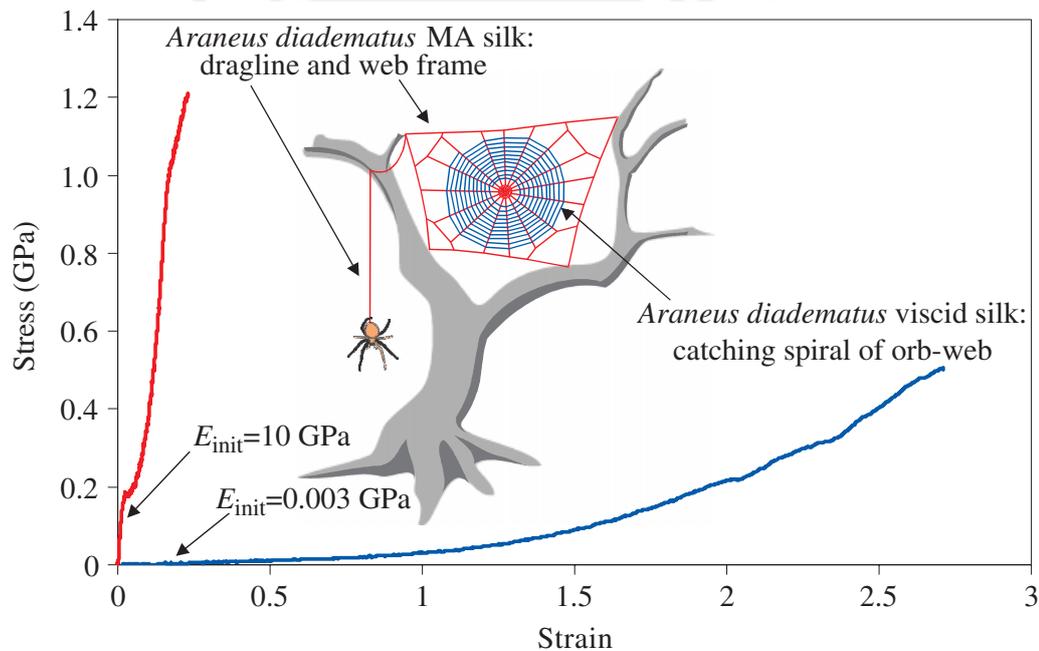


Abb. 2.3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Spinnenseide [Gosline et al. 1999]

In Tab. 2.1 ist ein Vergleich zwischen den mechanischen Eigenschaften zweier *Dragline*-Seiden und einigen synthetischen Fasern sowie Stahl gezogen. In Anhang A.2 sind weitere Vergleichswerte zu finden, unter anderem mit weiteren Biopolymeren. Aus den Kennwerten, die in verschiedenen Quellen gefunden werden können, wird die mögliche Varianz der Kennwerte deutlich. Ähnlich wie bei synthetischen Fasern, wie zum Beispiel Kevlar- oder Glasfasern, sind die mechanischen Eigenschaften stark von den Herstellungsbedingungen und der Handhabung der Fasern abhängig.

Tab. 2.1: Vergleich zwischen natürlichen und synthetischen Fasern (nach [Elices 2005])

Fasertyp	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	E-Modul [GPa]	Streckgrenze [Gpa]	Bruchdehnung [%]	Bruchenergie [MJ/m <sup>3</sup> ]
Spinnenseide (Dragline)					
<i>Argiope trifasciata</i>	1,3	1-10	1,2	30	100
<i>Nephila clavipes</i>	1,3	1-10	1,8	30	130
Seidenraupen-Seide					
<i>Bombyx mori</i>	1,3	5	0,6	12	50
Nylon 6.6	1,1	5	0,9	18	80
Kevlar 49	1,4	130	3,6	3	50
PBO-Faser	1,6	270	5,8	3	70
Stahl	7,8	200	3	2	6

Man kann sagen, dass die *Dragline*-Seide zu den stärksten polymerischen Biomaterialien zählt. Das E-Modul der Seide ist geringer als von Kevlar, anderen Karbonfasern und Stahl. Auch die Zugfestigkeit ist geringer im Vergleich zu diesen Werkstoffen. Eine falsche Interpretation dieser Werte kann dazu führen, dass die Spinnenseide als Faser mit schlechteren mechanischen Eigenschaften eingestuft wird. Bei weiterer Betrachtung kann man erkennen, dass die Seide eine Bruchdehnung von 30 % oder mehr aufweist. Die konventionellen Fasern hingegen versagen bereits bei einer Dehnung von ca. 3 %. Die *Flagelli*-Seiden übertreffen diesen Wert nochmals und liegen bei bis zu ca. 270 % Dehnung. Dies macht Spinnenseide trotz der geringeren Zugfestigkeit widerstandsfähiger, da die Deformationsenergie der Seide durch das Produkt der wirkenden Kraft mit der resultierenden Verformung gebildet wird. Die hohe Dehnrate bedeutet somit eine hohe Deformationsenergie. Ausgedrückt wird dieser Sachverhalt durch die Energiedichte, welche die Fläche unter dem Spannungs-Dehnungsverlauf darstellt. Diese liegt bei Spinnenseiden bei 130  $MJ/m^3$  oder höher (siehe Tab. A.1) und übertrifft somit Synthesefasern im Bezug auf die Energieabsorption. Aufgrund ihrer höheren Bruchdehnung besitzt die *Flagelli*-Seide trotz ihrer niedrigeren Zugfestigkeit in etwa eine vergleichbare Energiedichte wie die *Dragline*-Seide (siehe Abb. 2.4). Mehrere Arbeiten schließen aus ihren Ergebnissen darauf, dass die Seiden im Laufe der Evolution auf ein optimales Gleichgewicht von Festigkeit, Dehnbarkeit und Viskoelastizität selektiert wurden, welches die hohe Belastbarkeit der Fasern erklärt. So wurde in [Denny 1976] bereits 1976 gezeigt, dass die hohe Dehnbarkeit der Seiden nahezu die theoretische, maximale Belastung ermöglicht. Die Dehnbarkeit kompensiert die geringere Festigkeit im Vergleich mit anderen Werkstoffen wie z.B. Kevlar. Trotz der höheren Zugfestigkeit aber einer geringeren Dehnung trägt Kevlar nur ca. 40 % der Last wie es Spinnenseide ermöglicht. Untersuchungen von [Gosline et al. 1999] zeigten ebenfalls eine starke Abhängigkeit der Eigenschaften von der Dehnrate. Mit der Dehnrate steigen das ursprüngliche Elastizitätsmodul und die

Zugfestigkeit an und die Belastbarkeit erreicht extreme Werte von bis zu  $1 \text{ GJ}/\text{m}^3$ .

Die besonderen mechanischen Eigenschaften werden dabei nicht nur in der Faserachse erreicht. In bisher verwendeten technischen Fasern, wie z.B. Kevlar- oder Glasfasern, sind die Eigenschaften quer zur Faserachse sehr schwach. Spinnenseide hingegen kann komprimiert und verknotet werden. Auch einer Torsion mehrfach um die eigene Achse widersteht die Spinnenfaser problemlos.

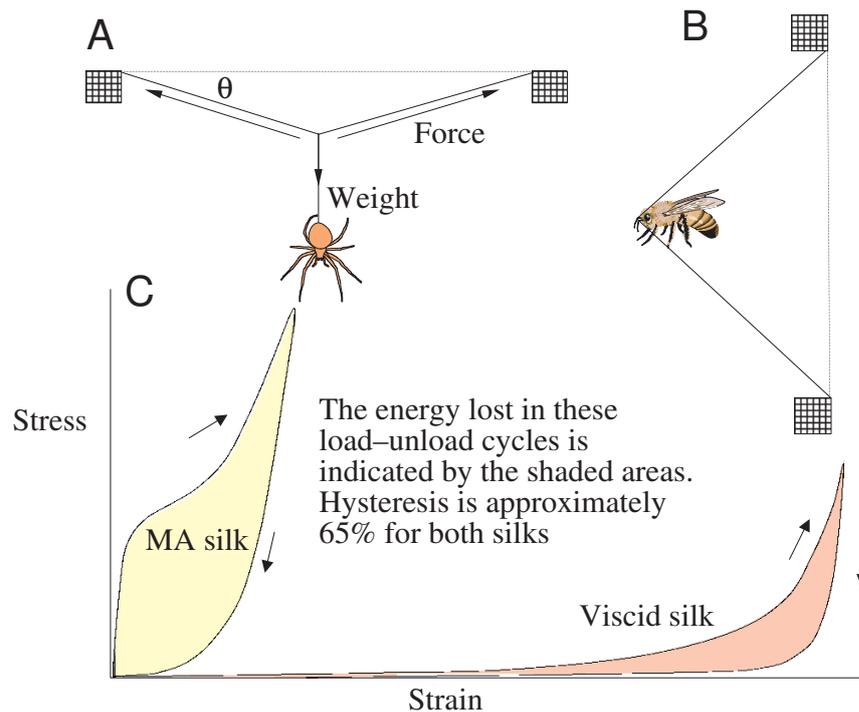


Abb. 2.4: Belastungsfunktion von *Dragline*- und *Flagelli*-Seide [Gosline et al. 1999]

### 2.2.2 Weitere Werkstoffeigenschaften

Die Spinnenseide kann rheologisch als viskoelastisches Material dargestellt werden. Die Besonderheit von viskoelastischen Materialien ist, dass ihre Eigenschaften stark mit der Dehnung variieren und abhängig von der Geschwindigkeit des Verzerrungsprozesses sind. Der Verlauf der Belastung und Entlastung ist nicht identisch, sondern zeigt eine Hysterese. Bei unendlicher Verlangsamung der Dehnung gehen die Materialgleichungen der Viskoelastizität in Materialgleichungen der Elastizität über. [Lion 2007] In Kap. 2.2.1 ist bereits erwähnt worden, dass die mechanischen Kennwerte der Seide mit zunehmender Geschwindigkeit der Dehnung erheblich zunehmen. Einige Beispiele von Kennwerten bei Messungen unter verschiedenen Dehnraten sind in Anhang A.2 zu finden.

Als weitere positive Eigenschaft kann die niedrige Glastemperatur der Spinnenseide genannt werden. Spinnenseide wird erst unterhalb von ca.  $-60\text{ °C}$  spröde und liegt somit viel niedriger als bei den meisten anderen Polymeren. Die Spinnenseiden sind somit bei niedrigeren Temperaturen verwendbar und widerstehen Stößen bei niedrigen Temperaturen. Dies folgt aus dem “Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip” der Polymerchemie, welches besagt, dass Polymere mit niedriger Glastemperatur ebenfalls die Fähigkeit zur Kompensation plötzlich auftretender, dynamischer Belastungen besitzen. [Koch 2005]

Eine andere Besonderheit der Spinnenseide ist der große Einfluss den Wasser auf die Eigenschaft der Seide nimmt. In Wasser oder bei hoher Luftfeuchtigkeit ( $>90\%$ ) schrumpft die *Dragline*-Seide um etwa 40-50 % und die mechanischen Eigenschaften ändern sich. Die Steifigkeit fällt um ca. den Faktor drei. Dieses Verhalten wird Superkontraktion genannt. Bisher ist wenig bekannt über die Auswirkungen dieser Eigenschaft im kompletten Netz, da die Seidenfäden eingespannt sind. Die Seide kann nicht schrumpfen. Hypothesen gehen davon aus, dass die Superkontraktion des gespannten Netzes zu einer Erhöhung der Steifigkeit der Seidenfäden führt und die Hysterese und viskoelastischen Eigenschaften ändert. [Gosline et al. 1999] Diese Theorie konnte inzwischen empirisch unterstützt werden. Mit dem Einsatz der Brillouin-Streuung ist es möglich mechanische Eigenschaften einzelner Fasern des Netzes zerstörungs- und kontaktfrei zu messen. Es ist möglich die Steifigkeitskoeffizienten im Netz zu ermitteln. Untersuchungen von [Koski et al. 2013] deuten darauf hin, dass die Hypothese zutrifft, dass mit der Superkontraktion die Steifigkeit des Netzes zunimmt. Die Ergebnisse deuten ebenfalls darauf hin, dass die Spinne durch Spannen der Faser und Einstellen des Wasseranteils die Elastizität der Faser beeinflusst.

In [Vehoff et al. 2007] wurde die Hysterese bei Zugversuchen der *Dragline*-Seide der Spinnenart *Nephila senegalensis* gemessen. Der Energieverlust in den Zugversuchen betrug im Mittel 68 %. Bei Wiederholung der Messungen zeigt sich nur noch ein Energieverlust von ca. 37,1 %. Das bedeutet, dass sich die Faser mit jedem Zyklus leicht dauerhaft verformt, sich die Länge im entspannten Zustand vergrößert und höhere Kräfte notwendig sind, um die Faser stärker zu dehnen als im Zyklus zuvor.

## 2.3 Synthetische Herstellung

### 2.3.1 Chemische Grundlagen

Spinnenseiden sind semikristalline Biopolymere, hergestellt aus hochkomplexen Molekülen. Die Primärstruktur der verschiedenen Seiden ergibt sich aus Proteinen und besitzt einen

hohen Anteil an Aminosäuren, unter anderem Alanin und Glycin, mit einer spezifischen, mikroskopischen Struktur. [Vollrath 2000] Die unterschiedlichen Seiden zeigen verschiedene Motive der Proteinlösung. Die Motive wiederum bilden verschiedene räumliche Anordnungen, welche als Sekundärstruktur bezeichnet werden. Die Gestalt der Sekundärstruktur erklärt die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Seidenarten. Die Proteinlösung wird durch einen Spinnkanal geleitet. Im Spinnkanal wird der pH-Wert der Lösung reguliert und das Protein von Wasser getrennt. [Scheibel 2009] Die Änderungen finden zunächst in einer flüssig-flüssig Phase statt. Daraufhin folgt die flüssig-fest Phase der Proteine und es bildet sich der vorläufige Spinnfaden. Als letzter Schritt wird im Spinnkanal der Faden herausgezogen und ein kleiner Teil des darin gelösten Wassers verdunstet. [Heim et al. 2009] Es wurde gezeigt, dass sowohl die mechanische Spannung des Fadens als auch der pH-Wert einen bedeutenden Einfluss auf die Ausrichtung der Polymere nehmen und somit entscheidend sind, um die besonderen Eigenschaften der Spinnenseide zu erreichen.

Der Faden wird an der Spinnenwarze herausgezogen. Die Umwandlung der Seidenproteine zu einem festen Faden ist kein Extrusionsprozess, sondern abhängig von Zugkräften. Die Zug- und Scherkräfte führen im Spinnkanal zu einer Ausrichtung und Strukturumwandlung der Seidenproteine. Im Detail konnte der Spinnprozess aber bisher nicht eindeutig entschlüsselt werden. Wie bei bekannten synthetischen Fasern, z.B. Aramide, ist die Ausrichtung der Moleküle ausschlaggebend für die besonderen Eigenschaften der Faser. [Kaplan 2002] Die Bildung des Fadens und die Ausrichtung der Sekundärstruktur ist ein komplexer Prozess. Die gesponnenen Fäden besitzen einen Durchmesser von 1 – 20  $\mu\text{m}$  (siehe Abb. 2.5).

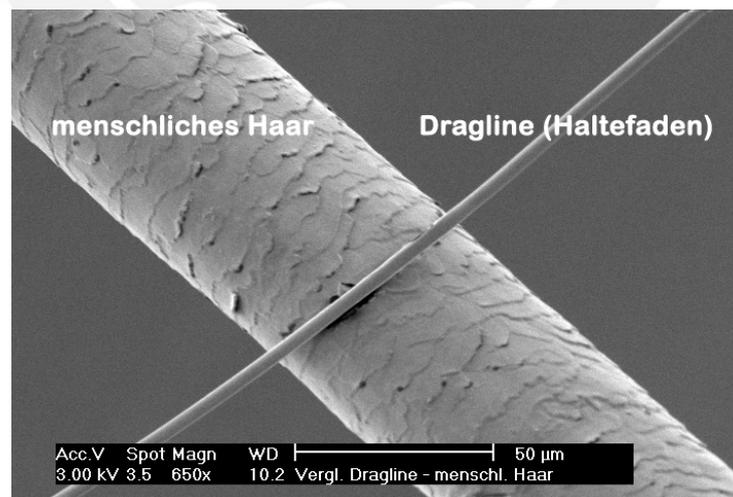


Abb. 2.5: SEM-Bild von *Dragline*-Seide und Haar im Vergleich [Koch 2005]

Die Fasern bestehen aus einer elastischen Matrix mit anisotropen Einschlüssen von gestapelten  $\beta$ -Faltblattstrukturen. Diese  $\beta$ -Faltblätter sind in Richtung der Faserachse in kristalliner

Struktur ausgerichtet. Die Kristalle existieren in zwei unterschiedlichen Größen von 2-3  $nm$  bzw. 70-500  $nm$  und sind in eine amorphe Matrix eingebunden. Die amorphen Bereiche verleihen der Seide seine Elastizität, während die  $\beta$ -faltblattreichen Kristalle die hohe Stabilität bewirken. (siehe Abb. 2.6)

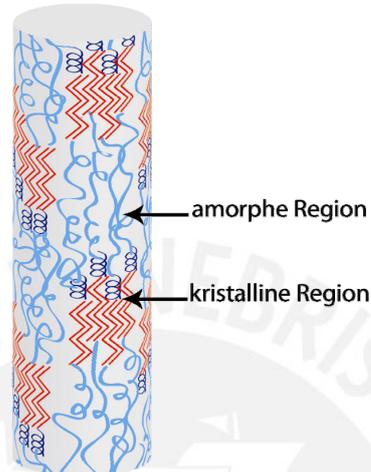


Abb. 2.6: Modell der Strukturordnung in einem Seidenfilament [Slotta 2009]

Die Spinnenseide kann als natürlicher Verbundwerkstoff betrachtet werden. Der Kern besteht aus zwei Proteintypen, die abhängig sind von der Spinnenart und zum größten Teil aus Glycin, Alanin und Prolin bestehen. Dieser Kern ist daraufhin ummantelt von einer Schicht aus *Spidroin*-Proteinen, einer Schicht von Glykoproteinen und zuletzt einer Schicht von Lipiden. [Hardy und Scheibel 2010]

### 2.3.2 Technischer Herstellungsprozess

Die Herstellung der Spinnenseide im großen Maße ist in Spinnenfarmen nicht möglich. Ein großer Teil der bekannten Spinnenarten sind Kannibalen. Die Einzeltierhaltung und der aufwendige Prozess den Tieren die Seide zu entnehmen ist zu kostspielig. Außerdem produzieren Spinnen in Gefangenschaft eine Seide von minderer Qualität. [Wißler 2009] Daher wird die biotechnologische Herstellung der Spinnenseide getestet. Die Seidenproteine werden in einem rekombinanten Prozess hergestellt. In Abb. 2.7 ist ein Herstellungsprozess synthetischer Spinnenseide illustriert.

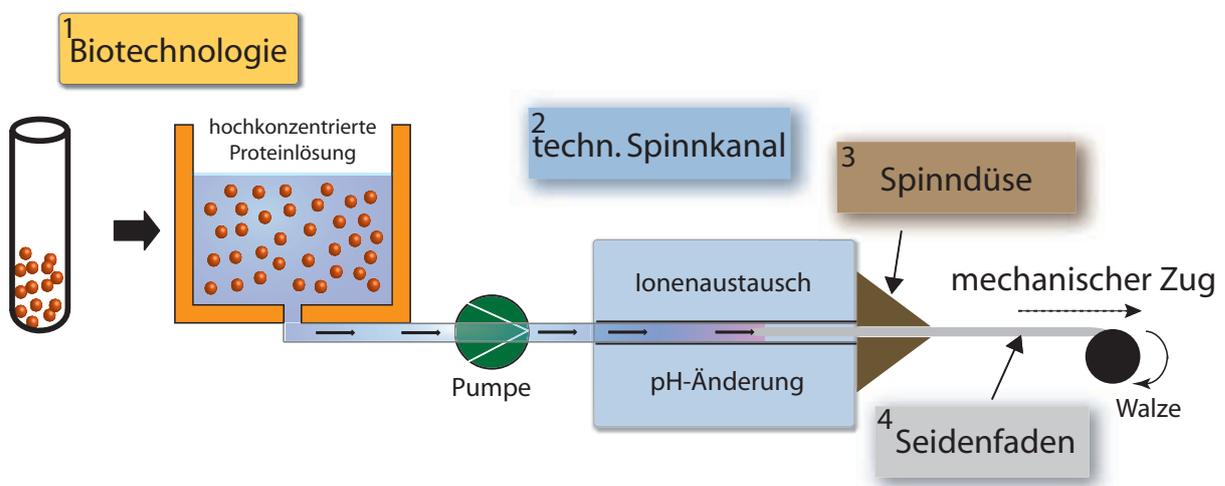


Abb. 2.7: Synthetische Herstellung von Spinnfasern [Scheibel 2009]

Die Gene, die in den Spinndrüsen die Proteine codieren, werden dazu sequenziert. Um sie in andere Organismen exprimieren zu können, müssen die Gene modifiziert werden. Mit diesen synthetischen Genen ist eine rekombinante Herstellung der Proteinlösung z.B. in Bakterienstämmen möglich. Weitere Forschungen produzieren rekombinante Proteine, die in Säugetier-Zellen hergestellt wurden. In der synthetischen Herstellung erreichen die Peptidketten jedoch nicht die Länge des Vorbildes aus der Natur. Dies ist ein weiterer Grund warum die Seiden nicht die Eigenschaften der Originale erreichen. [Thieman und Palladino 2013, S.59ff.], [Cabrele 2014] Zum Schluss muss aus der Proteinlösung der Seidenfaden hergestellt werden. Das ist bisher noch nicht zufriedenstellend gelungen. Beim Spinnen des Fadens werden die besonderen Strukturen der Proteine gebildet, welche die besonderen Eigenschaften der Spinnenseide zur Folge haben. Daher erreichen synthetische Spinnfasern bisher nur teilweise die Eigenschaften ihrer natürlichen Vorbilder. Intensive Forschungen in der Biotechnologie und der synthetischen Herstellung können den Durchbruch der Spinnenseide als Hochleistungsfaser bedeuten.

Durch die biotechnologische Herstellung der Proteine wird eine hochkonzentrierte Proteinlösung (1) produziert. Eine Pumpe befördert die Lösung in einen technischen Spinnkanal (2), in dem der natürliche Spinnprozess nachgebildet wird. Durch einen Ionenaustausch wird der pH-Wert reguliert und gleichzeitig das Protein von Wasser getrennt, das sogenannte *Aussalzen*. Das bionische Spinnverfahren versucht den natürlichen Prozess nachzubilden. Durch Kopplung eines Zugmechanismus wird der Spinnfaden aus der Spinndüse (3) gezogen und somit eine Dehnströmung verursacht, welche die Seidenproteine ausrichtet. Der Spinnprozess ist ein extrem komplexer Vorgang der zudem noch von Umweltbedingungen, wie Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Spinnengeschwindigkeit abhängig ist.

Die Vorteile der synthetischen Biofaser nach dem Vorbild der Spinnenseide sind zahlreich. Die erfolgreiche industrielle Herstellung wird ein Material zur Verfügung stellen, das folgende Vorteile vereint:

- hohe Festigkeit
- hohe Dehnbarkeit
- geringe Dichte
- niedriger Energieaufwand bei der Herstellung
- vollständig biologisch abbaubar
- ökologischer Rohstoff

Einige Nachteile der Spinnenseide sind:

- Wasserempfindlichkeit
- Unbeständigkeit bei hohen Temperaturen
- Alterungsprozess

Die Spinnenseide stellt einen umweltfreundlicheren Werkstoff dar als bisherige Kunstfasern. Die Spinnenfasern werden unter leichten Säurebedingungen bei moderaten Temperaturen hergestellt. Bisherige Kunstfasern werden dagegen bei hohen Temperaturen und weniger umweltfreundlichen Bedingungen hergestellt.

Trotz intensiver Forschungsarbeiten konnten die Materialeigenschaften der natürlichen Spinnenseide noch nicht in der synthetischen Herstellung erreicht werden. [Bai 2006, S.6] Wie vorangegangen erläutert, ist die synthetische Herstellung bisher noch begrenzt bei der rekombinanten Züchtung der Proteinlösung und dem technischen Spinnen der Faser.

## KAPITEL 3

---

# Schwingungen und Stöße

---

## 3.1 Grundlagen zu Schwingungen und Stößen

Das nachfolgende Kapitel gibt einen Überblick über die physikalischen und mathematischen Grundlagen, deren Kenntnis in weiteren Kapiteln notwendig ist. Es wird zunächst auf die Theorie einer gedämpften Schwingung eingegangen. Daraufhin folgen die Definitionen und Berechnungen zur Beschreibung und Simulation erzwungener Schwingungen durch transiente Anregungen. Am Ende steht eine ausführliche Erläuterung des Shock Response Spectrums (SRS) und seiner Berechnungsmethoden.

### 3.1.1 Gedämpfte Schwingungen

In der Natur kommen ungedämpfte Schwingungen nicht vor. Freie Schwingungen werden durch Reibungs- und Dämpfungskräfte verringert. Über die Reib- bzw. Dämpfungskräfte wird Energie dissipiert und in andere Energieformen, wie z.B. Wärme, umgesetzt. Allgemein wird eine freie Schwingung mit viskoser Dämpfung beschrieben über die homogene Differentialgleichung 2. Ordnung in Form von:

$$m \ddot{x} + d \dot{x} + c x = 0 \quad (3.1)$$

Die folgende Darstellung orientiert sich an [Bottega 2006], [Harris 1995] und [Gross et al. 2008].

Mit Einführung der Abkürzungen für den Abklingkoeffizient  $\delta$  und der Eigenfrequenz der ungedämpften Schwingung  $\omega_0$

$$2\delta = \frac{d}{m}, \quad \omega_0^2 = \frac{c}{m} \quad (3.2)$$

erhalten wir die Differentialgleichung in Form von:

$$\ddot{x} + 2\delta \dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (3.3)$$

Mithilfe eines Exponentialansatzes und der Definition des Dämpfungsgrads  $D = \frac{\delta}{\omega_0}$  lässt sich die Differentialgleichung für schwache Dämpfungen ( $D < 1$ ) lösen mit:

$$x(t) = C e^{-\delta t} \cos(\omega_d t - \alpha) \quad (3.4)$$

wobei die Kreisfrequenz  $\omega_d$  der gedämpften Schwingung definiert ist mit:

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - D^2} \quad (3.5)$$

Es wird deutlich, dass die Kreisfrequenz  $\omega_d$  der gedämpften Schwingung kleiner ist als die Kreisfrequenz  $\omega_0$  der ungedämpften Schwingung. Die Schwingungsdauer  $T_d$  ist daher größer. In Abb. 3.1 ist der prinzipielle Verlauf einer freien gedämpften Schwingung mit den beschreibenden Größen dargestellt.

Die Periodendauer der gedämpften freien Schwingung beträgt  $T_d = 2\pi/\omega_d$ . Der Verlauf der Amplituden wird von der einhüllenden Funktion  $\pm C e^{-\delta t}$  dargestellt. Über den Zusammenhang zweier aufeinanderfolgender Schwingungsamplituden lässt sich das logarithmische Dekrement freier Schwingungen berechnen:

$$\ln\left(\frac{x(t)}{x(t + T_d)}\right) = \delta T_d \quad (3.6)$$

Umstellen der Gleichung mit Gl.(3.5) und der Definition des Dämpfungsgrads liefert:

$$\ln\left(\frac{x(t)}{x(t + T_d)}\right) = 2\pi \frac{D}{\sqrt{1 - D^2}} \quad (3.7)$$

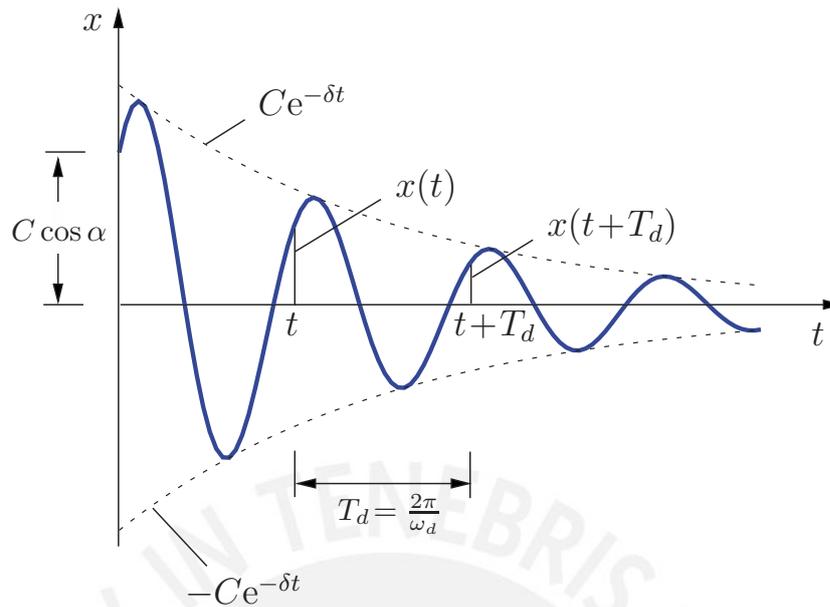


Abb. 3.1: Verlauf einer gedämpften Schwingung [Gross et al. 2008]

Aus den Messungen der gedämpften Schwingung lässt sich somit das Lehrsche Dämpfungsmaß bestimmen. Bei bekannter Eigenfrequenz  $\omega_0$  lässt sich aus dem Dämpfungsgrad der Abklingkoeffizient  $\delta$  bzw. die Dämpfungskonstante  $d$  berechnen.

$$\delta = D \omega_0 \tag{3.8}$$

Zur Quantifizierung der Dämpfung bzw. des Energieverlustes ist die Beschreibung über den Gütefaktor  $Q$  eine weitere Möglichkeit, die verwendet wird. Der Gütefaktor  $Q$  ist umgekehrt proportional zum Energieverlust pro Periode der Schwingung. Für kleine Energieverluste kann man schreiben:

$$\frac{dE_J}{E_J} = -\frac{d}{m} \Delta t \tag{3.9}$$

Daraus folgt die Definition des Gütefaktors:

$$Q := 2\pi \frac{E_J}{|\Delta E_J|} = 2\pi \frac{m}{dT_d} \tag{3.10}$$

### 3.1.2 Analyse von Stößen und transienten Schwingungen

Ein Stoß wird in [ISO 2009] definiert als plötzliche Änderung von Kraft, Position, Geschwindigkeit oder Beschleunigung, die eine transiente Störung des Systems verursacht. Durch den Stoß werden dynamische Spannungen in der Struktur verursacht, die abhängig sind von den Eigenschaften des Stoßes (Amplitude, Dauer und Form) und den dynamischen Eigenschaften der Struktur (wie Resonanzfrequenz und Dämpfung). Die Schwere des Stoßes kann eingeschätzt werden, indem die resultierenden Spannungen in der Struktur berechnet werden.

Der Stoß kann generell auf zweierlei Arten das Bauteil beschädigen:

- die zulässige mechanische Spannung im Bauteil wird überschritten. Es wird eine plastische Verformung oder ein Bruch des Bauteils verursacht.
- der Stoß wird mehrmals wiederholt, was zu einer Ermüdung (Fatigue) des Bauteils führt. Das hat zur Folge, dass Stöße unterhalb der zulässigen statischen Spannung zur plastischen Verformung oder zum Ausfall des Bauteils führen.

Die Analyse und Bewertung von Stößen, insbesondere von transienten Schwingungen, ist wichtig um das Schadenspotential von Stößen zu bewerten, Testparameter festzulegen und Konstruktionen während der Entwicklung zu optimieren.

Dabei ist die ursprüngliche Funktion für eine direkte Verwendung zur Analyse zu komplex. Die Beschleunigungs-Zeit-Funktion wird daher in ein Spektrum umgerechnet, was die Analyse vereinfacht und einen aussagekräftigen Vergleich mit anderen Stößen und Schwingungen zulässt.

Transiente Schwingungen, d.h. vorübergehende Schwingungen, oder konkrete Einschwingvorgänge impulsartig angeregter Systeme, können grundlegend auf zwei Arten analysiert werden. [Himmelblau et al. 1994, Kap. 5.5] Die erste Möglichkeit ist eine direkte Beschreibung der vorübergehenden Schwingung im Frequenzbereich. Dazu kann für deterministische Transienten ein lineares Spektrum oder für zufällige Transienten ein Energiespektrum verwendet werden. Die zweite Möglichkeit besteht in einer Beschreibung des Schadenspotentials der Transienten. Dazu wird eine Funktion in Abhängigkeit von Eigenfrequenzen einer Reihe von Systemen mit einem Freiheitsgrad (engl. Single degree of freedom - SDOF) mithilfe des SRS erstellt.

Die erste beschriebene Möglichkeit zur Analyse ist die Fourier-Transformation des gemessenen Signals, die besonders für periodische Schwingungen Anwendung findet. Sie kann dargestellt werden als eine Summe von harmonischen Komponenten mit unterschiedlichen Frequenzen. Die Auswertung ist sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich möglich. Dazu

wird ein Finite Fourier Transformations-Algorithmus (FFT) verwendet. Das Fourierspektrum beinhaltet alle Informationen des ursprünglichen Signals, d.h. das ursprüngliche Signal kann aus dem Fourierspektrum rücktransformiert werden. Das Fourierspektrum wird allerdings in der Regel nicht für die Entwicklung von Spezifikationen oder den Vergleich von Stößen in Feld- oder Labortests verwendet. Die Möglichkeit einer direkten Transformation des Eingangs-Ausgangs-Verhältnisses machen es jedoch besonders interessant für die Steuerung von Schwingungstests. [Lalanne 2009] Demzufolge kann gezeigt werden, dass das Fourierspektrum der Systemantwort  $R(\Omega)$  das Produkt des Fourierspektrums der Anregung  $\ddot{X}(\Omega)$  und der Transformationsfunktion  $H(\Omega)$  ist.

$$R(\Omega) = H(\Omega) \ddot{X}(\Omega) \quad (3.11)$$

Die Transformationsfunktion des Systems kann mit dem Zusammenhang zwischen dem Eingangs- und Ausgangssignals des Systems ermittelt werden:

$$H(f) = \frac{\ddot{Y}(f)}{\ddot{X}(f)} \quad (3.12)$$

Mithilfe der ermittelten Transformationsfunktion des gesamten Versuchsaufbaus kann somit die elektrische Ansteuerung des Schwingungstests geregelt werden, um einen gewünschten Beschleunigungsverlauf zu erzielen.

Das Energiespektrum (ES) ist eine weitere Möglichkeit zur Analyse von transienten Schwingungen im Zeitbereich und beschreibt die Energie in Abhängigkeit der Frequenz. Diese Möglichkeit der Auswertung lässt sich auch für zufällige, nicht harmonische Schwingungen anwenden. Es ist definiert als :

$$ES = \int_{t_0}^{t_1} [FT(f)]^2 df \quad (3.13)$$

wobei  $FT(f)$  die Amplitude der Fouriertransformation des Signals ist. Mit dieser Analyse-methode ist es beispielsweise möglich die Frequenz zu bestimmen, unter welcher das Signal einen bestimmten Anteil der Gesamtenergie besitzt.

Bei beiden Methoden, also dem Fourierspektrum und dem Energiespektrum, ist in der Analyse nicht zu erkennen welchen Effekt eine Änderung der Amplitude des Spektrums bei einer gegebenen Frequenz hat. Des Weiteren geben diese Methoden keine Aussage über die Auswirkungen des Stoßes auf das System, und es sind nicht alle dynamischen Eigenschaften

zu Beginn der Entwicklungsphase eines Systems bekannt. Gesucht ist also eine Möglichkeit, um den Stoß auf eine Struktur in einer Form zu analysieren, die es uns ermöglicht, das Schadenspotential direkt zu erkennen und Rückschlüsse auf die Entwicklung zu treffen. Das Stoßspektrum (engl. shock response spectrum - SRS) ermöglicht eine solche Analyse.

## 3.2 Das Stoßspektrum

### 3.2.1 Grundlagen des SRS

Die Schwere eines Stoßes kann bewertet werden, indem die auftretenden Spannungen im Bauteil berechnet und mit den zulässigen Spannungen des Werkstoffes verglichen werden. Dies ist die herkömmliche Methode zur Dimensionierung von Konstruktionen. Ein Problem besteht jedoch bei der Bewertung mehrerer aufeinanderfolgender Stöße, wie sie unter realen Bedingungen oder Testbedingungen auftreten. Dazu wird ein generelles Modell benötigt, dessen Ergebnisse auf eine beliebige Struktur übertragen werden können. Hierfür wurde die grundlegende Idee des SRS erstmals von Dr. Maurice Biot in seiner Doktorarbeit im Jahr 1932 vorgestellt. [Biot 1932]

Nach [ISO 2007] wird das SRS definiert als maximale Antwort einer Reihe von Systemen mit einem Freiheitsgrad auf eine Stoßanregung. Im Modell des SRS wird diese Reihe von linearen Systemen mit einem Freiheitsgrad und unterschiedlichen Eigenfrequenzen durch die zu charakterisierende Stoßanregung in Schwingungen versetzt und die maximale Beschleunigung jedes einzelnen Systems gemessen bzw. berechnet. Das SRS ist eine Testmethode zur Bestimmung der Reaktion von Strukturen, wie z.B. Gebäuden und Geräten, auf bestimmte Schwingungen mit unterschiedlichen Frequenzen. Es berechnet die maximale Antwort von SDOF-Systemen mit unterschiedlichen Eigenfrequenzen und stellt die maximale Beschleunigungen der SDOF-Systeme als Funktion der Eigenfrequenz dar. Um die Antwort unseres Systems auf die Anregung zu bestimmen, ist somit nur die Eigenfrequenz unseres Systems als bekannter Parameter notwendig. [Paz 1980, Kap. 8]

Die Methode kann sowohl theoretisch-analytisch als auch experimentell angewendet werden. Typische Anwendungsfelder für das SRS sind Auswirkungen von Erdbeben an Gebäuden, Explosionen und Schwingungen an Militär- und Raumfahrttausrüstung und elektronische Geräte. Das SRS wird in vielen technischen Normen zum Bau von Gebäuden und Maschinen verwendet.

Die Form des SRS ist bedingt durch unterschiedliche Eingangssignale, denen der Einmassenschwinger ausgesetzt wird. Im Falle von Stößen ist es also abhängig von der Form und

Dauer des Stoßes. Weitere Eigenschaften, die mit dem SRS untersucht werden, sind die Positionen an denen Massen angebracht werden sollten, um das dynamische Schadenspotential zu minimieren. Die Resultate können für die dynamische Auslegung während der Entwicklung genutzt werden oder für die Qualitätsprüfung nach der Fertigung. Das SRS berechnet die maximale Antwort des Systems über einem Frequenzspektrum, in dem die tatsächliche Lage der Eigenfrequenz vermutet wird. Für die Prüfung wird das System einer Erregerschwingung ausgesetzt, die alle zu prüfenden Frequenzen und Amplituden enthält. [Brandt 2011]

Reale Systeme müssen aber in der Regel durch das Aufstellen eines Modells mit mehreren Freiheitsgraden (Multi degrees of freedom - MDOF) genauer beschrieben werden. Falls das System linear beschrieben werden kann, ist es möglich, die maximale dynamische Antwort mit einem Verfahren abzuschätzen das sich *Moden-Superposition* nennt. Dieses Verfahren wird in [Alexander 2009] näher erläutert.

In der Luft- und Raumfahrt wird dieses Verfahren angewendet, um zu ermitteln ob die Instrumente bzw. die Ausrüstung Schaden beim Flug nehmen oder die auftretenden Stöße überstehen werden. Insbesondere bei den pyrotechnischen Stößen beim Start der Raumfähren und während des Betriebs müssen die Geräte einer Reihe von Stößen widerstehen. Besonders bei Raketenstarts werden hochfrequente Schwingungen mit großen Amplituden erzeugt. Eine solche resultierende Schwingung ist in Abb. 3.2 gezeigt.

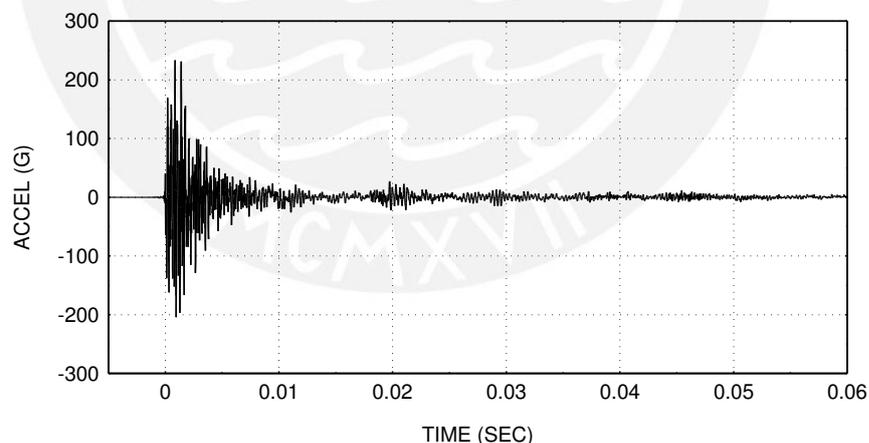


Abb. 3.2: Pyrotechnischer Stoß an einer Raumfähre [Irvine 2012]

Das Beispiel wurde während eines Entwicklungstest an einer Raumfähre gemessen. Diese Stoßenergien bieten besonders für elektronische Komponenten ein hohes Schadenspotential. Anders als beispielsweise Stöße bei Transportvorgängen können diese komplexen Schwingungen nicht durch eine mathematische Funktion im Zeitbereich ausgedrückt werden. Die Analyse mit dem SRS bietet daher eine übersichtliche und verständliche Methode, um das

Schadenspotential von Stößen zu bewerten und um Testparameter für Geräte festzulegen. Das zugehörige SRS zur transienten Schwingung in Abb. 3.2 ist in Abb. 3.3 gezeigt. Es ist gängig in einigen Fällen das SRS im positiven und negativen Spektrum anzutragen, um die Gültigkeit der Messung zu zeigen. Im Idealfall sind beide Kurven annähernd identisch. [Irvine 2012]

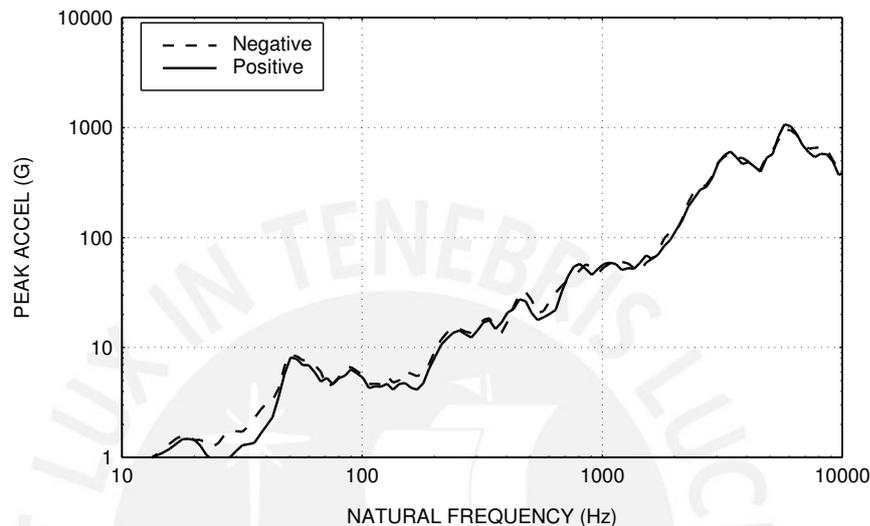


Abb. 3.3: Stoßspektrum des pyrotechnischen Stoßes [Irvine 2012]

### 3.2.2 Berechnungsmethoden des SRS

Für die Berechnung der Antwort eines Systems auf eine beliebige Erregung und somit zur Berechnung des SRS können verschiedene mathematische Methoden verwendet werden. Einige dieser Methoden sind [Rao 2011, Kap.4]:

- Faltungsintegral / Duhamel Integral
- Laplace-Transformation
- Fourier-Transformation
- Numerische Integration der Bewegungsgleichung
- Interpolation der Erregung und numerisches Verfahren

Die verbreitetsten Berechnungen sind Faltungsintegral, Fourier-Transformation und Laplace-Transformation. Die Ergebnisse der Lösungen sind äquivalent. Im nachfolgenden Teil werden die drei Methoden kurz dargestellt. Die Methoden werden anhand eines linearen, viskos gedämpften SDOF-Systems mit einer allgemeinen, zeitabhängigen, mechanischen Anre-

gung  $p(t)$  erläutert. Das System kann beschrieben werden durch die folgende Differentialgleichung:

$$m \ddot{x}(t) + d \dot{x}(t) + c x(t) = p(t) \quad (3.14)$$

Die Anfangsbedingungen für das System lauten:

$$x(t=0) = 0, \quad \dot{x}(t=0) = 0$$

Auf die Auswertung der gemessenen Daten und die implementierten Algorithmen zur Berechnung des SRS anhand der transienten Schwingung wird in Kap. 4.2 eingegangen.

### Faltungsintegral / Duhamel-Integral

Die Faltung ermöglicht es das Ausgangssignal eines Systems zu bestimmen, wenn die Übertragungsfunktion des Systems und das Eingangssignals bekannt sind. Die Faltung ergibt eine dritte Funktion, die die Antwort des Systems beschreibt. In Abb. 3.4 ist das Prinzip der Faltung dargestellt. (siehe [Blatter 2006, S.149ff]) Die Faltung wird allgemein beschrieben mit

$$x(t) = p(t) * h(t) \quad (3.15)$$

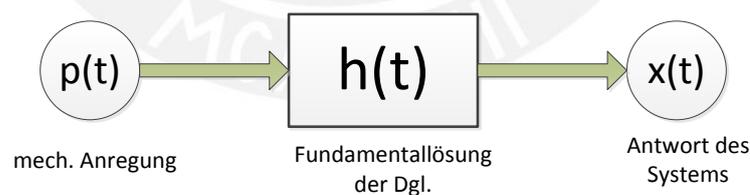


Abb. 3.4: Prinzip der Faltung

Die Operation ist definiert durch das Integral der beiden Funktionen, nachdem eine der beiden transponiert und zeitlich verschoben wurde:

$$(p * h)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (3.16)$$

Die folgende Darstellung der Lösung orientiert sich u.a. an [Harris 1995, Kap. 8.5] Nach Division durch die Masse  $m$  erhält man für die Differentialgleichung:

$$\ddot{x}(t) + \frac{d}{m} \dot{x}(t) + \frac{c}{m} x(t) = \frac{p(t)}{m} \quad (3.17)$$

wobei für die Erregerkraft  $p(t)$  gilt:

$$\frac{p(t)}{m} = f(t) \quad (3.18)$$

Mithilfe der Anfangsbedingungen lässt sich eine Fundamentallösung der Differentialgleichung bestimmen:

$$h(t) = \begin{cases} \frac{1}{\omega_d} e^{-D\omega_0 t} \sin(\omega_d t), & t > 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

Für eine Anregung zum Zeitpunkt  $t = \tau$  folgt die Antwort:

$$h(t - \tau) = \frac{1}{\omega_d} e^{-D\omega_0(t-\tau)} \sin[\omega_d(t - \tau)] \quad (3.20)$$

Die Antwort des Systems  $h(t - \tau)$  bildet zusammen mit der Anregung  $f(t)$  das Duhamel Integral:

$$x_p(t) = \int_0^t [f(\tau) h(t - \tau)] d\tau \quad (3.21)$$

$$x_p(t) = \frac{1}{\omega_d} \int_0^t [f(\tau) e^{-D\omega_0(t-\tau)} \sin[\omega_d(t - \tau)]] d\tau \quad (3.22)$$

Mit Hilfe des Faltungsintegrals lässt sich die Antwort des Systems auf eine beliebige zeitliche Erregung berechnen. Die zweifache Ableitung nach der Zeit ermittelt die Beschleunigung des Systems. Die Antwortschwingung wird für jede Eigenfrequenz berechnet und die maximale Beschleunigung bestimmt. Man erhält zu jeder Eigenfrequenz eine maximale Beschleunigung. Trägt man die maximalen Beschleunigungen über den Eigenfrequenzen an, erhält man das SRS.

### Fourier-Transformation

Im Falle einer periodischen Erregung  $p(t)$  mit der Periode  $\tau = 2\pi/\omega$  kann man die Erregung als Fourierreihe entwickeln:

$$p(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^{\infty} a_j \cos(j\omega t) + \sum_{j=1}^{\infty} b_j \sin(j\omega t) \quad (3.23)$$

mit

$$a_j = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} p(t) \cos(j\omega t) dt, \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (3.24)$$

$$b_j = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} p(t) \sin(j\omega t) dt, \quad j = 1, 2, \dots \quad (3.25)$$

Die Differentialgleichung kann somit geschrieben werden:

$$m\ddot{x}(t) + d\dot{x}(t) + cx(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^{\infty} a_j \cos(j\omega t) + \sum_{j=1}^{\infty} b_j \sin(j\omega t) \quad (3.26)$$

Die Fourierreihe ist eine Reihe harmonischer Funktionen. Mithilfe des Superpositionsprinzips lässt sich bestimmen, dass die Lösung von Gl.(3.26) die Summe der folgenden Lösungen ist.

$$m\ddot{x}(t) + d\dot{x}(t) + cx(t) = \frac{a_0}{2} \quad (3.27)$$

$$m\ddot{x}(t) + d\dot{x}(t) + cx(t) = a_j \cos(j\omega t) \quad (3.28)$$

$$m\ddot{x}(t) + d\dot{x}(t) + cx(t) = b_j \sin(j\omega t) \quad (3.29)$$

Die Gesamtlösung  $x_p(t)$  ist die Summe der Lösungen der Gleichungen (3.27), (3.28) und (3.29).

### Laplace-Transformation

Die Laplace-Transformation stellt eine wirkungsvolle Möglichkeit zur Lösung von linearen Differentialgleichungen dar. Außerdem ermöglicht sie die Lösung von partiellen Differentialgleichungen. Aufgrund der vielseitigen Möglichkeiten der Laplace-Transformation findet sie Anwendung in vielen Bereichen der Ingenieurwissenschaften. Sie ist allgemein definiert mit:

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (3.30)$$

Um die Laplace-Transformation der Differentialgleichung durchführen zu können, stellen wir Gl.(3.14) in die allgemeine Form um:

$$\frac{\ddot{x}}{\omega_0^2} + \frac{2D}{\omega_0} \dot{x} + x = \frac{p(t)}{m\omega_0^2} \quad (3.31)$$

Mit der komplexen Variablen  $s$  können wir die Gleichung in den Bildbereich transformieren:

$$F(s) = \frac{(s + 2D\omega_0)x_0 + v_0 + F_p(s)}{s^2 + 2D\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (3.32)$$

Mithilfe der Anfangsbedingungen

$$x_0 = 0, \quad v_0 = 0$$

erhalten wir:

$$F(s) = \frac{F_p(s)}{s^2 + 2D\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (3.33)$$

Die inverse Laplace-Transformation in den Zeitbereich liefert das Ergebnis:

$$x(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{F_p(s)}{s^2 + 2D\omega_0 s + \omega_0^2} \right] \quad (3.34)$$

Zu beachten ist, dass hier die allgemeine Lösung berechnet wurde. Die vollständige Lösung bzw. inverse Laplace-Transformation ist abhängig von der Anregung. Die Transformation

ist abhängig von  $F_p(s)$ . Für komplette Lösungen mit spezifischen Anregungen wird auf Beispiele in der Literatur verwiesen. [Harris 1995, Kap. 8.52], [Bottega 2006, Kap. 5]

### 3.2.3 Klassen von SRS

In der Analyse wird das SRS durch eine Reihe von Eigenschaften spezifiziert, wodurch es näher beschrieben werden kann. In den meisten Fällen wird das SRS der Beschleunigung im raumfesten Bezugssystem ausgewertet. In diesem Fall findet die Anregung des Systems durch eine Beschleunigung der Basis oder eine direkte Kraft auf die Masse des SDOF-Systems statt. Die Antwort des Systems wird durch Messung der absoluten Beschleunigung der Masse ermittelt. Diese Auswertung stellt die herkömmlichste und einfachste Form dar, da die absolute Beschleunigung einfach mit Spezifikationen verglichen werden kann.

Bei Anregung der Schwingung über das Gestell kann das SRS der relativen Verschiebung im Bezug auf das Gestell berechnet werden.

Innerhalb dieser zwei Kategorien kann das SRS auf mehrere verschiedene Arten definiert werden. Eine gängige Möglichkeit ist in Abhängigkeit der größten Antwort des Systems bei einer gegebenen Frequenz [Lalanne 2009, Kap. 2.3]:

- Primäres positives SRS (Primary positive SRS)  
Maximale positive Antwort des Systems während des Stoßes
- Primäres negatives SRS (Primary negative SRS)  
Maximale negative Antwort des Systems während des Stoßes
- Sekundäres positives SRS (Secondary positive SRS)  
Maximale positive Antwort des Systems nach dem Stoß
- Sekundäres negatives SRS (Secondary negative SRS)  
Maximale negative Antwort des Systems nach dem Stoß
- Maximales positives SRS (Maximum positive SRS)  
Maximale positive Antwort des Systems ohne Bezug auf die Dauer des Stoßes
- Maximales negatives SRS (Maximum negative SRS)  
Maximale negative Antwort des Systems ohne Bezug auf die Dauer des Stoßes
- Maximax SRS (Maximax SRS)  
Maximale absolute Antwort des Systems ohne Bezug auf die Dauer des Stoßes

Ein grafisches Schema über die unterschiedlichen Arten von SRS ist in Anhang A.3 zu finden. Die primäre Auswertung ist laut [MIL-STD-810G, Method 516.6] das *Maximax*-SRS. Außerdem ist die Auswertung der Pseudo-Geschwindigkeit (pseudo-velocity response spectrum) eine weitere gängige Möglichkeit zur Auswertung. Dabei wird die Pseudo-Geschwindigkeit zusammen mit der maximalen Pseudo-Verschiebung (pseudo-displacement) und der Maximalbeschleunigung im raumfesten Bezugssystem über der Eigenfrequenz als Abszisse auf einem *tripartite*-Plot (Vier-Koordinaten-Papier) logarithmisch angetragen.

### 3.2.4 Grenzen des SRS

In der Praxis ist eine exakte Berechnung des SRS nicht möglich. Das zuvor beschriebene Modell einer Reihe von linearen SDOF-Systemen mit unterschiedlichen Eigenfrequenzen, das dem SRS zu Grunde liegt, kann tatsächlich in der Praxis nicht erreicht werden. Das ermittelte SRS stellt somit nur eine Annäherung an das tatsächliche SRS dar. Die Ursachen dafür liegen in verschiedenen Abschnitten bei der Bestimmung des SRS. Eine theoretische Bandbreite über den gesamten Frequenzbereich wird an beiden Enden begrenzt. Durch die AC-Kopplung wird das untere Ende des Frequenzbereiches begrenzt (Lowest Analysis Frequency - LAF). Das obere Ende der Frequenzbandbreite (Maximum Analysis Frequency - MAF) wird durch den AA-Filter begrenzt. [Hollowell und Smith 1996] Jenseits der Frequenzbandbreite, die von der LAF und der MAF definiert werden, unterscheiden sich die Ergebnisse stark in Abhängigkeit der Datenerfassungsrate, wie in Abb. 3.5 beispielhaft demonstriert.

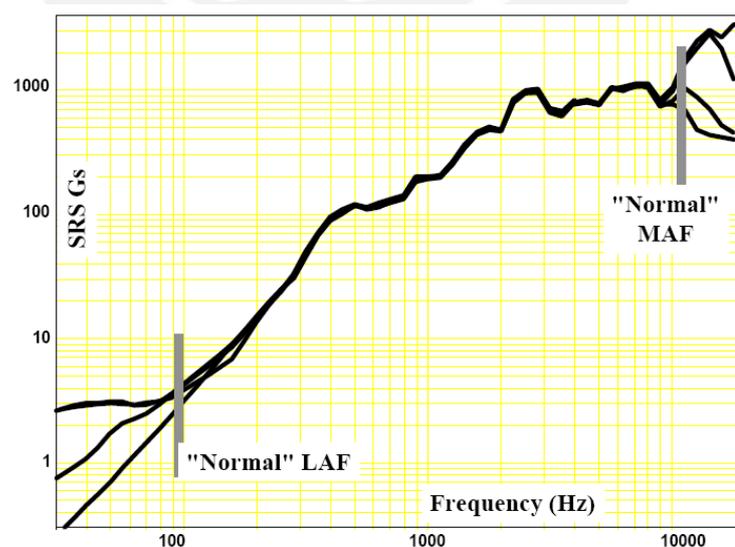


Abb. 3.5: Einfluss unterschiedlicher Datenerfassungsraten [Hollowell und Smith 1996]

Für die mathematischen Berechnungen kann das Modell vereinfacht werden. Das SRS wird für ungedämpfte Antworten aufgestellt. Bei der Verwendung von ungedämpften Antworten werden aber damit die wirksame Masse und das Schadenspotential erheblich überschätzt. Es wird daher für die Berechnung des SRS ein konstanter Dämpfungsfaktor angenommen. Dabei besitzen alle SDOF-Systeme im SRS den gleichen Dämpfungsfaktor, welcher häufig direkt im SRS-Diagramm angegeben wird. Anhand des Beispiels in Abb. 3.5 eines SRS lässt sich auch der Nutzen des SRS für die Entwicklung und Konstruktion erläutern. Bei einer Eigenfrequenz von 1000 Hz hat ein montiertes Gerät die maximale Beschleunigung von 100 g. Das Maximum mit dem das Bauteil belastet wird kann nun auf 10 g reduziert werden, indem die Eigenfrequenz des montierten Gerätes auf 200 Hz verschoben wird, beispielsweise indem das Bauteil mit isolierenden Kunststoffbuchsen montiert wird.

Nachteil des SRS ist zum ersten, dass das Ursprungssignal nicht rücktransformiert werden kann. Das bedeutet die Informationen über die Gestalt des Stoßes gehen bei der Transformation verloren. Außerdem können zwei unterschiedliche Stöße bzw. Anregungen bei der Auswertung ein nahezu gleiches SRS zeigen. Die Abbildung durch das SRS ist somit surjektiv, jedoch nicht injektiv. Da die Eigenmoden der Strukturen sich unterscheiden können, können die Stöße trotz gleichem SRS unterschiedliche Schadenspotentiale haben. So kann ein Stoß relativ schwachen Schaden verursachen im Vergleich zu einem weiteren Stoß mit ähnlichem SRS, welcher aber einen Frequenzanteil nahe der Eigenfrequenz der Struktur hat und die Schwingung anregt. [Jonsson 2012]

Kritisch bei SRS-Tests ist außerdem, dass Ergebnisse in verschiedenen Laboren große Diskrepanzen zeigen können. Bereits der Einsatz verschiedener Algorithmen zur Auswertung oder deren falsche Programmierung führt zu erheblichen Unterschieden.

Verschiedene Generationen von Hard- und Software, unterschiedliche Antialiasing-Filter (AA-Filter), die AC-Kopplung und die Algorithmen zur Auswertung beeinflussen teilweise sehr stark die Ergebnisse. Zur Zeit gibt es keine einheitliche Vorgehensweise, z.B. eine Norm, für die Ausführung von SRS-Analysen. Es haben sich im Laufe der Nutzung Empfehlungen verschiedener Verbände und Firmen ergeben, die mit dem SRS arbeiten. Vor allem US-amerikanische Normen sind verbreitet, da das SRS-Verfahren dort ein sehr gängiges Verfahren in der Militär- und Raumfahrttechnik ist.

### 3.2.5 Standardisiertes SRS

Die Analyse von Stößen, aufgenommen von verschiedenen Instrumenten und ausgewertet durch verschiedene Algorithmen, kann unterschiedliche Resultate liefern. Es konnte gezeigt werden, dass das SRS des gleichen Systems, das in verschiedenen Laboren ermittelt wird,

Differenzen von bis zu 100 % zeigen kann. Im Zeitbereich können die Differenzen der ausgewerteten Daten noch größer sein. [Smith und Hollowell 2014] Des Weiteren werden für die Analyse unterschiedlicher Schwingungen verschiedene Systeme zur Messung und Auswertung des SRS verwendet, beispielsweise für Pyroshocks in der Raumfahrt oder in der Akustik. Unterschiedliche Systeme, die sich beispielsweise in der Abtastrate oder den Einstellungen für die Filter unterscheiden, liefern bei der Auswertung des gleichen Datensatzes unterschiedliche SRS. Für vergleichbare Ergebnisse und eine *Standardisierung* des SRS können eine Reihe von Empfehlungen in Fachbeiträgen gefunden werden.

Als Abtastrate und für die Filterung der digitalen Daten werden in [Himmelblau et al. 1994] Empfehlungen gegeben, die erfahrungsgemäß genauere Ergebnisse bei der Auswertung der Messdaten liefern. Die Einstellungen sind abhängig von der Bandbreite des gewünschten SRS bzw. der höchsten SRS-Frequenz (Highest Shock Response Spectrum Frequency - HRSRF):

- Abtastrate von min. dem 10-fachen der HRSRF
- Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 0,001-fachen der HRSRF
- Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von min. 20 Hz oder dem mindestens 1,5-fachen der HRSRF

Für die Bestimmung des SRS ist unter anderem die Bestimmung der Maxima notwendig. Für eine direkte Analyse sind zehn oder mehr Messpunkte pro Schwingungszyklus notwendig um eine Genauigkeit von min. 10 % zu erreichen. Sind weniger Messpunkte vorhanden wird eine kubische Interpolation der Kennlinie empfohlen, um Ergebnisse mit zufriedenstellender Genauigkeit zu erzielen. Für die Analyse gibt es eine Reihe von weiteren Analyse- und Interpolationsempfehlungen in Abhängigkeit von der Anwendung. Diese sind entsprechend der eigenen Anwendung zu wählen.

Des Weiteren ist erwähnenswert, dass die größten Differenzen des SRS am oberen Ende der Frequenzbandbreite zu finden und von unterschiedlichen Filteroptionen stark abhängig sind.

Weitere Standardparameter für das SRS, mit besonderer Gültigkeit für die Luft- und Raumfahrt, werden in [Irvine 2012] geschildert. Bei der Untersuchung der Systeme wird in der Regel ein konstanter Gütefaktor von  $Q = 10$  angenommen bei gleichzeitig unterschiedlichen Eigenfrequenzen. Daher kann die Berechnung für eine Reihe von SDOF-Systemen unterschiedlicher Eigenfrequenzen durchgeführt werden. Für die Berechnung kann eine willkürliche Reihe von Eigenfrequenzen verwendet werden. Ein typisches Schema in der Industrie ist eine proportionale Bandbreite von 1/6 Oktave, d.h. dass jede aufeinanderfolgende

Eigenfrequenz das  $2^{1/6}$ -vielfache der Vorherigen ist. Die Bandbreite steigt also mit zunehmender Eigenfrequenz.

Eine gängige Testfunktion für das SRS ist eine Anregung mit einer Halb-Sinus-Funktion. [Tuma und Kocí 2009]

Als Algorithmus für die numerische Lösung der Differentialgleichung zweiter Ordnung wird am häufigsten der Algorithmus von D.O. Smallwood [Smallwood 1981] verwendet. Weitere bekannte Lösungsalgorithmen sind der Kelly-Richman-Algorithmus [Kelly und Richman 1969] und der Lösungsalgorithmus von F.W. Cox. [F.W.Cox 1983]



## KAPITEL 4

---

# Modellberechnungen

---

## 4.1 Modellbildung

### 4.1.1 Das Schwingungsmodell

Das Netz ist ein gedämpftes System, in dem ein Austausch von Energie mit der Umwelt mittels atmosphärischer Dämpfung und anderer Mittel, wie intermolekularer Bewegung, stattfindet. Außerdem ist das Netz aufgrund der Geometrie und nichtlinearer Materialeigenschaften der Spinnenseide ein nichtlineares System.

Das Schwingungsmodell des Spinnennetzes welches weiterentwickelt wird, wurde in vorausgegangenen Arbeiten vorgestellt und in vielen Bereichen bereits validiert. Es baut auf den Arbeiten von [Wirth und Barth 1992], [Miranda 2011], [Barboza 2010], [Bottega 2006], [Bäumer 2012] und Weiteren auf.

Für die Modellbildung wird Schritt für Schritt das Modell entwickelt und die Bewegungsgleichung gefunden. Zur Modellbildung und Aufstellung der Bewegungsgleichung wird in folgenden Schritten vorgegangen.

1. Auswahl des zu beschreibenden Systems
2. Systemelemente identifizieren (Masse, Feder, Dämpfung)

3. Ein- und Ausgänge definieren
4. Verschiebung der Masse in Richtung der positiven Koordinatenachse
5. Freischneiden des Systems
6. Aufstellen der Bewegungsgleichung
7. Wiederholen der Schritte 4, 5 und 6 für jede Masse

Das System das beschrieben wird, ist das konstruierte Spinnennetz. Bei der Beschreibung des Systems werden Umwelteinflüsse, wie z.B. die Dämpfung an der Atmosphäre, berücksichtigt. In [Miranda 2011] wurde die Dämpfung von einzelnen *Dragline*-Seiden in der Atmosphäre und im Vakuum untersucht. Dabei wurde an Einzelfäden bereits eine relativ starker Dämpfungsanteil der Atmosphäre festgestellt. Bei der Modellbildung ist somit der Einfluss der Atmosphäre zu berücksichtigen, um die realen Verhältnisse ausreichend nachbilden zu können.

Die Steifigkeit des Rahmens an dem das Netz befestigt ist, ist um ein Vielfaches größer als die des Netzes. Es wird angenommen, dass die Reaktionen des Rahmens vernachlässigbar klein sind und keinen weiteren Einfluss auf das Netz nehmen. Somit wird der Rahmen als gestellfest idealisiert.

Die Systemelemente des Modells werden nachfolgend identifiziert.

Massen im System sind die Eigenmasse der Spinnenseide und des Spinnentieres. Mit Seidendurchmessern der *Dragline*-Seide von im Mittel  $2,40 \cdot 10^{-6} \text{ m}$  (vgl. [Miranda 2011][S.90]) und einer Dichte von Spinnenseide von  $1,097 \text{ g/cm}^3$ , ist die Masse des Netzes relativ gering im Vergleich zu der des Spinnentieres. Die Dichte der Spinnenseide wurde in einer Forschungsarbeit mithilfe der Kennwerte Bruchenergie/Masse und Bruchenergie/Volumen ermittelt. [Wei 2014]

Mit diesen Kennwerten kann die Masse eines Netzes mit einem Netzdurchmesser von  $300 \text{ mm}$  abgeschätzt werden. Bei einer Annahme von 25 Radian und 30 Spiralen, die in symmetrischen Abständen angeordnet sind, beträgt die gesamte Masse des Netzes ca.  $0,11 \text{ mg}$ . In der vorausgegangenen Arbeit von [Bäumer 2012] betragen die Massen der Spinnentiere im Mittel  $348 \text{ mg}$ . Es wird deutlich, dass die Masse des Netzes um ein Vielfaches geringer ist. Die Netzmasse wird daher in der Modellbildung vernachlässigt.

Die Federelemente des Netzes sind die Elastizität der Spinnenseide und die Vorspannung unter der die Radian stehen.

Eine Dämpfung des Systems kann an unterschiedlichen Stellen identifiziert werden. In [Bäumer 2012] werden drei Typen von Dämpfungen des Netzes klassifiziert.

- interne Dämpfung durch intermolekulare Reibungen der Moleküle

- Strukturdämpfung durch Relativbewegungen zwischen Radien, Spiralen und Gestell
- Fluiddämpfung durch Luftwiderstand bei Bewegung

Die Beschreibung dieser unterschiedlichsten Dämpfungsanteile und deren einzelne Quantifizierung ist komplex und die detaillierte Untersuchung der einzelnen Dämpfungsanteile in der Atmosphäre nicht möglich. Der Anteil der atmosphärischen Dämpfung ist um ein Vielfaches größer als die Eigendämpfung der Spinnenseide. Somit überlagert die atmosphärische Dämpfung bei den Messungen alle anderen Dämpfungsanteile. Für eine detaillierte Untersuchung der Dämpfung des Materials sind Messungen im Vakuum notwendig. Es wird daher eine äquivalente Dämpfungskonstante eingeführt, die die Summe aller Dämpfungsanteile beschreibt.

In Abb. 4.1 ist das Modell dargestellt, das für die nachfolgenden Berechnungen und Diskussionen erstellt wurde.

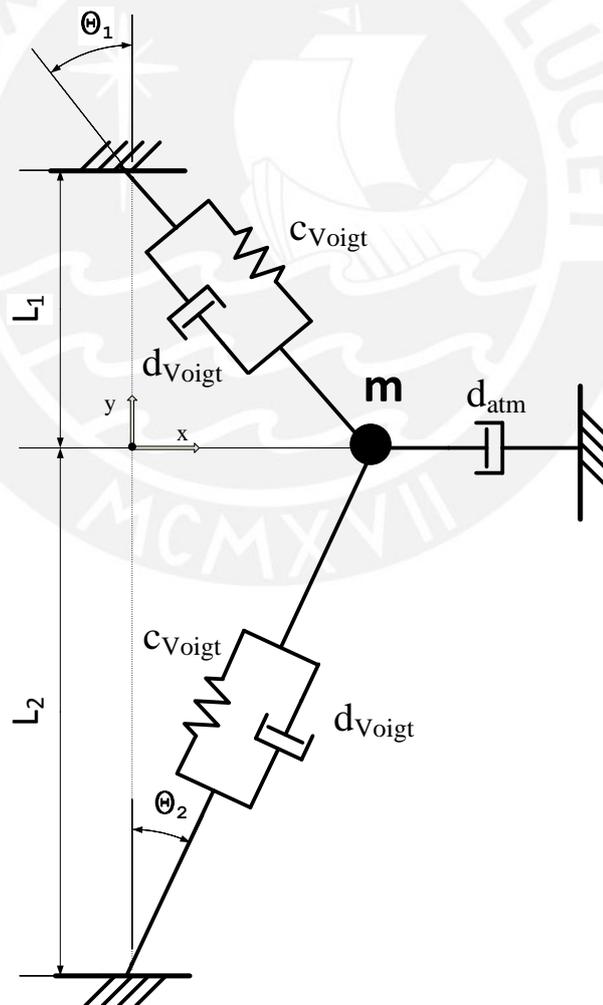


Abb. 4.1: Schwingungsmodell des Spinnennetzes

Schwingungen bzw. Systeme können mit der Anzahl der Freiheitsgrade (engl. degree of freedom - DOF) klassifiziert werden. Freiheitsgrade sind die Anzahl unabhängiger Koordinaten, die benötigt werden um die Bewegung eines Systems eindeutig zu definieren.

Das Modell wird als SDOF-Modell ( $FG=1$ ) abstrahiert. Aufgrund der Elastizität der Spinnenseide und Inhomogenitäten in der Geometrie des Netzes besitzt das natürliche Vorbild einen hohen Freiheitsgrad. Für die Modellbildung hat sich jedoch gezeigt, dass die Abstraktion des Netzes in ein Modell mit einem Freiheitsgrad zulässig ist, um die dynamischen Eigenschaften mit zufriedenstellender Genauigkeit zu analysieren. [Miranda 2011], [Bäumer 2012]

Bei der Erstellung des abstrahierten Modells sind eine Reihe von Annahmen und Besonderheiten zu nennen, um das Modell zu erläutern. Wie bereits erwähnt, sind die Radien des Netzes vorgespannt. Messungen zu den Vorspannkräften der Radien wurden in [Wirth und Barth 1992] durchgeführt. Die Messungen zu den Vorspannkräften wurden an Netzen von Gartenkreuzspinnen durchgeführt. Die Messungen in [Bäumer 2012] zeigen jedoch, dass der Vergleich der Vorspannkräfte mit den Netzen der verwendeten Spinnenart *Argiope Argentata* zulässig ist. Die dortigen Ergebnisse zeigten, dass die theoretischen Berechnungen der Eigenfrequenzen der Netze mithilfe der Parameter für die Vorspannung und die experimentellen Messungen eine gute Übereinstimmung aufweisen. In der Kräftebilanz sind die Vorspannkräfte in der oberen Hälfte des Netzes größer, da das Eigengewicht des Spinnentieres ausgeglichen werden muss. Die Differenz zwischen der Vorspannkraft der Radien der unteren Netzhälfte und der oberen Netzhälfte beträgt daher in etwa die Masse des Spinnentieres.

Das Material der Spinnenseide wird als biegeschlaff angenommen. Eine Verschiebung in  $x$ -Koordinate verursacht daher kein Rückstellmoment in den Einspannungen. Die Verschiebung in  $x$  führt zu einer Kraftkomponente in  $x$  entgegen der Verschiebung, welche die Masse in seine Gleichgewichtslage im Koordinatenursprung zurückführt.

Es handelt sich um eine erzwungene Schwingung, die durch eine inhomogene Differentialgleichung beschrieben wird. Die Schwingung wird über die transiente Erregerkraft  $p(t)$  angeregt.

Noch einmal kurz zusammengefasst, sind die wichtigsten Annahmen für die Modellbildung [Miranda 2011]:

- Die Masse des Netzes im Vergleich zur Masse des Spinnentieres ist vernachlässigbar klein
- Das Elastizitätsmodul  $E$  und die Querschnittsfläche der Radien sind konstant

- Das Elastizitätsmodul der Radien ist deutlich größer als das der Spiralen. Die Spiralen sind nicht im Modell berücksichtigt
- Reaktionen des Rahmens sind vernachlässigbar und die Befestigung des Netzes wird als gestellfest angenommen

Das verwendete Modell berücksichtigt folgende Faktoren:

- Radien des Netzes (*Dragline*-Seide)
- Masse des Spinnentieres
- Vorspannkraft der Spinnenseide
- Asymmetrie des Netzes
- äquivalente Dämpfung des Netzes (Atmosphäre, Werkstoff)
- viskoelastischen Materialeigenschaften der Spinnenseide

Anhand der oben beschriebenen Modellierung liegt ein vollständiges Modell zur Beschreibung des Netzes vor. Mithilfe des Modells können die Kennwerte und dynamischen Eigenschaften des Netzes berechnet werden.

#### 4.1.2 Modell des viskoelastischen Spinnenfadens

Die viskoelastische Eigenschaft der *Dragline*-Seide wird im Modell mit dem Kelvin-Voigt-Modell beschrieben. [Miranda 2011] Es ist aber zu berücksichtigen, dass die realen Materialeigenschaften nicht vollständig durch dieses Modell beschrieben werden können, sondern es nur annähern können. Durch geeignete Anordnung und Erhöhung der Anzahl der Elemente ergeben sich höherwertige Materialmodelle. Dazu können Schaltungen bestehend aus Maxwell- und Kelvin-Voigt-Modellen entwickelt werden. Je höher die Summe der einzelnen Schaltungselemente ist, desto genauer kann das Materialverhalten modelliert werden. Mit diesen Schaltungen können die tatsächlichen Materialverhalten in spezifischen Zeitbereichen detaillierter nachgebildet werden. (vgl. [Lion 2007]) Für die Modellbildung wird zunächst das einfache Kelvin-Voigt-Modell verwendet (siehe Abb. 4.2).

Das Modell beschreibt die Gesamtdehnung  $\epsilon$  mit den beiden Anteilen der elastischen Dehnung  $\epsilon_e$  und der viskosen Dehnung  $\epsilon_{in}$ . Das Maxwell-Modell bildet eine Reihenschaltung der beiden Elastizitätsanteile, das Kelvin-Voigt-Modell eine Parallelschaltung.

Aufgrund der Parallelschaltung im Kelvin-Voigt-Modell gilt  $\epsilon = \epsilon_e = \epsilon_{in}$ . Für die elastische

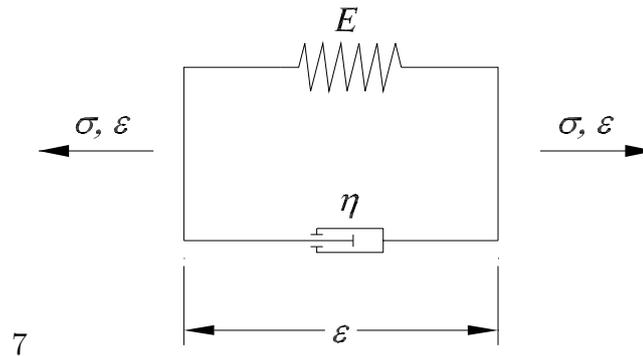


Abb. 4.2: Prinzip des Kelvin-Voigt-Modells [Lion 2007]

Dehnung gilt  $\epsilon_e = \frac{\sigma_e}{E}$  und für das viskose Dämpfungselement  $\dot{\epsilon}_{in} = \frac{\sigma_{in}}{\eta}$ . Das Kräftegleichgewicht im Kelvin-Voigt-Modell bildet sich somit mit:

$$\sigma = E \epsilon + \eta \dot{\epsilon} \quad (4.1)$$

Mit den Zusammenhängen  $\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$ ,  $d\epsilon/dt = \frac{d\Delta L/dt}{L}$  und  $\sigma = \frac{F}{A}$  erhalten wir aus Gl. (4.1) für die Kraft, die im Faden wirkt (*Fadenkraft*):

$$F_{Faden} = \frac{E(u, \dot{u}) A}{L} \Delta L + \frac{\eta(u, \dot{u}) A}{L} \dot{\Delta L} \quad (4.2)$$

Es wird darauf hingewiesen, dass die Materialkennwerte abhängig sind von der Verschiebung aus der Gleichgewichtslage und der Geschwindigkeit der Verschiebung, wie in Kap. 2.2.1 erläutert. Kennwerte wie das Elastizitätsmodul und die Viskoelastizität sind also keine konstanten Faktoren in dieser Gleichung. Sie sind abhängig von der Dehnung und der Dehnrates. Aufgrund des sehr geringen Querschnitts  $A$  und kleinen Verschiebungen  $\Delta L$  der Seidenfäden, wird es als zulässig angenommen, den Kennlinienverlauf als linear zu approximieren, oder die Kraftkomponente der Seidenfäden gänzlich zu vernachlässigen.

Die Parameter des Kelvin-Voigt-Modells werden ersetzt durch:

$$c_{Voigt} = \frac{E(u, \dot{u}) A}{L} \quad \text{und} \quad d_{Voigt} = \frac{\eta(u, \dot{u}) A}{L} \quad (4.3)$$

Die Fadenkraft lässt sich somit schreiben als:

$$F_{Faden} = c_{Voigt}(u, \dot{u}) \Delta L + d_{Voigt}(u, \dot{u}) \dot{\Delta L} \quad (4.4)$$

### 4.1.3 Differentialgleichung des Modells

Zum Aufstellen der vollständigen Differentialgleichung wird die Masse des Modells freigeschnitten und die Kräfte in Richtung des einzelnen Freiheitsgrades werden aufsummiert. Die Kräfte, die an der Masse  $m$  angreifen, sind in Abb. 4.3 dargestellt.

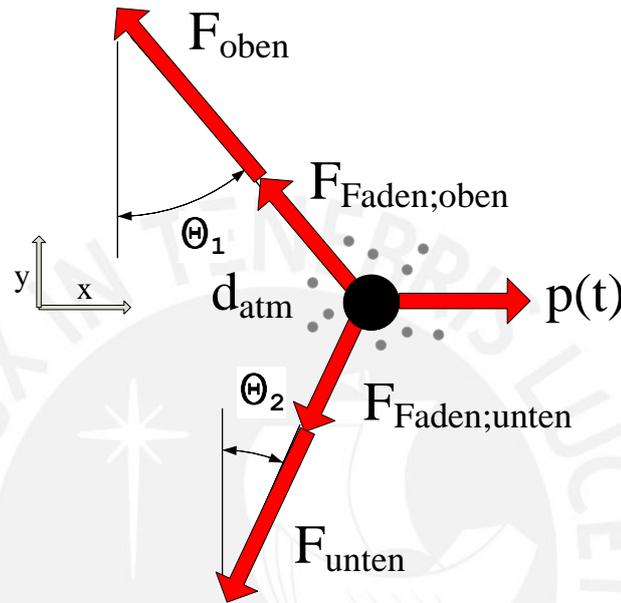


Abb. 4.3: Freigeschnittene Kräfte im Modell

Es folgt die Bewegungsgleichung des Massenpunktes mit:

$$m \ddot{u} = -R(u, \dot{u}) + p(t) \quad (4.5)$$

Die gesamte Rückstellkraft  $R$  wird mit folgender Gleichung gebildet. Die einzelnen Fadenskräfte der Radianen werden multipliziert mit der Anzahl der Radianen  $n_{oben}$  in der oberen Hälfte und  $n_{unten}$  in der unteren Hälfte des Netzes. Sie bilden die Kräfte  $F_{Faden;oben}$  bzw.  $F_{Faden;unten}$

$$\begin{aligned} n_{oben} (c_{Voigt} \Delta L_1 + d_{Voigt} \dot{\Delta L}_1) &= F_{Faden;oben} \\ n_{unten} (c_{Voigt} \Delta L_2 + d_{Voigt} \dot{\Delta L}_2) &= F_{Faden;unten} \end{aligned}$$

Die Rückstellkraft  $R$  lässt sich schreiben mit:

$$R = (F_{oben} + F_{Faden;oben}) \sin(\Theta_1) + (F_{unten} + F_{Faden;unten}) \sin(\Theta_2) + d_{atm} \dot{u} \quad (4.6)$$

Aus Abb. 4.1 lassen sich die folgenden geometrischen Zusammenhänge ableiten:

$$\sin(\Theta_1) = \frac{u}{\sqrt{L_1^2 + u^2}} \quad \text{und} \quad \sin(\Theta_2) = \frac{u}{\sqrt{L_2^2 + u^2}} \quad (4.7)$$

$$\Delta L_1 = \sqrt{L_1^2 + u^2} - L_1 \quad \text{und} \quad \Delta L_2 = \sqrt{L_2^2 + u^2} - L_2 \quad (4.8)$$

Durch Einsetzen der Gl.(4.6) für die Rückstellkraft  $R$  in die Bewegungsgleichung (4.5), zusammen mit den geometrischen Beziehungen der Gleichungen (4.7) und (4.8) und unter Berücksichtigung der Anregungskraft  $p(t)$ , kann folgende DGL ermittelt werden.

$$\begin{aligned}
 & m \ddot{u} + d_{eq} \dot{u} \\
 & + \left[ [F_{oben} + n_{oben} c_{Voigt} (\sqrt{L_1^2 + u^2} - L_1)] \frac{1}{\sqrt{L_1^2 + u^2}} \right. \\
 & \left. + [F_{unten} + n_{unten} c_{Voigt} (\sqrt{L_2^2 + u^2} - L_2)] \frac{1}{\sqrt{L_2^2 + u^2}} \right] u \\
 & = p(t)
 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Die gesamte Dämpfung aller beteiligten Elemente wird, wie zuvor erläutert, zusammengefasst im Gesamtdämpfungsfaktor  $d_{eq}$ .

Es handelt sich um eine gewöhnliche Differentialgleichung, da die Gleichung nur von einer Variablen abhängig ist ( $u$ ). Des Weiteren kann die DGL als inhomogen und nichtlinear charakterisiert werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt in der vollständigen Beschreibung des Modells ist die Dämpfung. Versuche haben bereits gezeigt, dass die aerodynamische Dämpfung einen großen Anteil der Absorption kinetischer Energie einnimmt. Dazu wurden Ergebnisse von Modellen des Netzes mit experimentellen Messungen verglichen. Die Hysterese der radialen Fäden ist nicht ausreichend, um für die gesamte Dämpfung verantwortlich zu sein. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Spiralfäden die Dämpfung um einen Faktor von ca. zwei erhöhen. Da die kleinen Dehnungen der Spiralfäden bei diesen Experimenten nahezu elastisch waren, trug ihre Hysterese nicht zur Dämpfung bei. Das zeigt den starken Einfluss der aerodynamischen Dämpfung, die an den Fäden wirkt. [Lin et al. 1995] Untersuchungen von [Miranda 2011] haben unter anderem das dynamische Verhalten der Spinnenfäden im Vakuum mit Verhältnissen unter Atmosphäre verglichen. Auch dabei wurde der hohe Einfluss der Atmosphäre auf die Dämpfungseigenschaften deutlich.

#### 4.1.4 Linearisierte Differentialgleichung des Modells

Für lineare Systeme gibt es eine Reihe von Lösungsmöglichkeiten, da das Superpositionsprinzip bei linearen Differentialgleichungen anwendbar ist. Bei kleinen Schwingungsamplituden können nichtlineare Systeme, bei gültiger Linearisation der Differentialgleichung, als linear betrachtet werden. Nichtlinearitäten müssen bei großen Schwingungsamplituden beachtet werden. Im Falle von nichtlinearen Systemen sind einzigartige Besonderheiten zu beachten. Für die Linearisierung wird die Annahme getroffen, dass für kleine Auslenkungen des Netzes und somit kleine Winkel gilt:

$$\sin(\Theta_1) = \frac{u}{L_1} \quad \text{und} \quad \sin(\Theta_2) = \frac{u}{L_2} \quad (4.10)$$

Die Dehnung der Spinnenseide wird angenähert mit:

$$\Delta L_1 = \frac{u^2}{2L_1} \quad \text{bzw.} \quad \Delta L_2 = \frac{u^2}{2L_2} \quad (4.11)$$

Die DGL des Modells ergibt sich mit:

$$m \ddot{u} + d_{eq} \dot{u} + \left( F_{oben} \frac{1}{L_1} + F_{unten} \frac{1}{L_2} + n_{oben} c_{Voigt} \frac{u^2}{2L_1^2} + n_{unten} c_{Voigt} \frac{u^2}{2L_2^2} \right) u = p(t) \quad (4.12)$$

Der Quotient  $\frac{u}{L}$  kann als klein betrachtet werden, da die Verschiebung  $u$  im Vergleich zu den Längen  $L_1$  und  $L_2$  relativ klein ist. Durch die Potenz wird der Quotient noch kleiner. Außerdem sind die Rückstellkräfte des Materials, die durch das Kelvin-Voigt-Modell modelliert werden, im Vergleich zu den Vorspannkräften marginal. Es wird daher angenähert:

$$n_{oben} c_{Voigt} \frac{u^3}{2L_1^2} \approx 0 \quad \text{und} \quad n_{unten} c_{Voigt} \frac{u^3}{2L_2^2} \approx 0$$

Die linearisierte und vereinfachte DGL zur analytischen Berechnung lautet somit:

$$m \ddot{u} + d_{eq} \dot{u} + \underbrace{\left( F_{oben} \frac{1}{L_1} + F_{unten} \frac{1}{L_2} \right)}_{=c_{eq}} u = p(t) \quad (4.13)$$

Die Gleichung setzt sich aus den Parametern in Tab. 4.1 zusammen.

Tab. 4.1: Parameter der linearisierten DGL

DGL-Parameter	Bedeutung
$m$	Masse des Spinnentieres bzw. der Ersatzmasse
$d_{eq}$	äquivalente Gesamtdämpfung des Netzes
$c_{eq}$	äquivalente Federrate des Netzes
$p(t)$	transiente Erregerkraft

## 4.2 Berechnung des SRS anhand des linearen Modells

### 4.2.1 Parameter der transienten Erregerkraft

Eine gängige Methode zur Berechnung des Aufschlags eines Projektils auf eine Struktur ist ein Feder-Masse-Modell. Für die detaillierte Analyse von Aufschlägen auf Verbundwerkstoffe wird das Modell oft um weitere Parameter, wie z.B. die Membransteifigkeit des Laminats, erweitert. Das Modell besteht aus zwei Massen, die über eine Kontaktsteifigkeit verbunden sind. In Abb. 4.4 ist das Modell zur Berechnung der transienten Erregerkraft dargestellt.

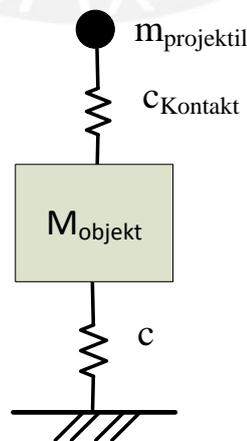


Abb. 4.4: Modell zur Berechnung der transienten Erregerkraft

Für die beiden Massen ergeben sich die Bewegungsgleichungen mit:

$$m_{\text{projektil}} \ddot{x}_1 + F_p = 0 \quad (4.14)$$

$$M_{\text{objekt}} \ddot{x}_2 + c x_2 - F_p = 0 \quad (4.15)$$

Für die Modellberechnung wird angenommen, dass die Kontaktsteifigkeit hoch ist, da die Verformung der Massen vernachlässigbar ist. Somit kann angenommen werden, dass  $x_1 = x_2 = x$  gilt.

Die Gleichungen (4.14) und (4.15) lassen sich somit zusammenfassen zu:

$$(m_{\text{projektil}} + M_{\text{objekt}}) \ddot{x} + c x = 0 \quad (4.16)$$

Mit der allgemeinen Lösung der homogenen Differentialgleichung und den Anfangsbedingungen  $x(0) = 0$  und  $\dot{x}(0) = v_0$  bestimmt sich die Verschiebung zu:

$$x(t) = v_0 \sqrt{\frac{m_{\text{projektil}} + M_{\text{objekt}}}{c}} \sin\left(\sqrt{\frac{c}{m_{\text{projektil}} + M_{\text{objekt}}}} t\right) \quad (4.17)$$

Die Anregung des Systems mit der Erregerkraft  $p(t)$  kann beschrieben werden mit:

$$p(t) = c x(t) = c v_0 \sqrt{\frac{m_{\text{projektil}} + M_{\text{objekt}}}{c}} \sin\left(\sqrt{\frac{c}{m_{\text{projektil}} + M_{\text{objekt}}}} t\right) \quad (4.18)$$

Die beiden Parameter zur Beschreibung der Anregung sind die Amplitude  $F_{\text{max}}$  und die Dauer der Anregung, die über die Periodendauer  $T_p$  beschrieben wird. Sie werden berechnet mit:

$$F_{\text{max}} = c v_0 \sqrt{\frac{m_{\text{projektil}} + M_{\text{objekt}}}{c}} \quad (4.19)$$

$$T_p = 2\pi \sqrt{\frac{m_{\text{projektil}} + M_{\text{objekt}}}{c}} \quad (4.20)$$

### 4.2.2 Berechnung der Antwortschwingung und des SRS

Wie in Kap. 3.2.1 beschrieben, stehen mehrere Methoden zur Verfügung, um aus der DGL des Modells die Antwortschwingung zu berechnen. Die verbreitetste Methode, die in den Quellen gefunden wurde und die auch hier verwendet werden soll, ist das Duhamel-Integral. Für die Lösung der DGL wird die linearisierte DGL verwendet, die in Kap. 4.1.4 entwickelt wurde. Anhand dieser Gleichung wird das SRS des Modells berechnet. (siehe Kap. 3.2.2) Für die Berechnung der Antwort des Modells auf die transiente Anregung wurde die Berechnung in Matlab realisiert. Die Berechnung wird in zwei Skripten durchgeführt. Das Skript *faltung.m* (siehe Abb. 4.5) berechnet die Antwortschwingung des Systems über die Berechnung des Faltungsintegrals. (siehe Kap. 3.2.2)

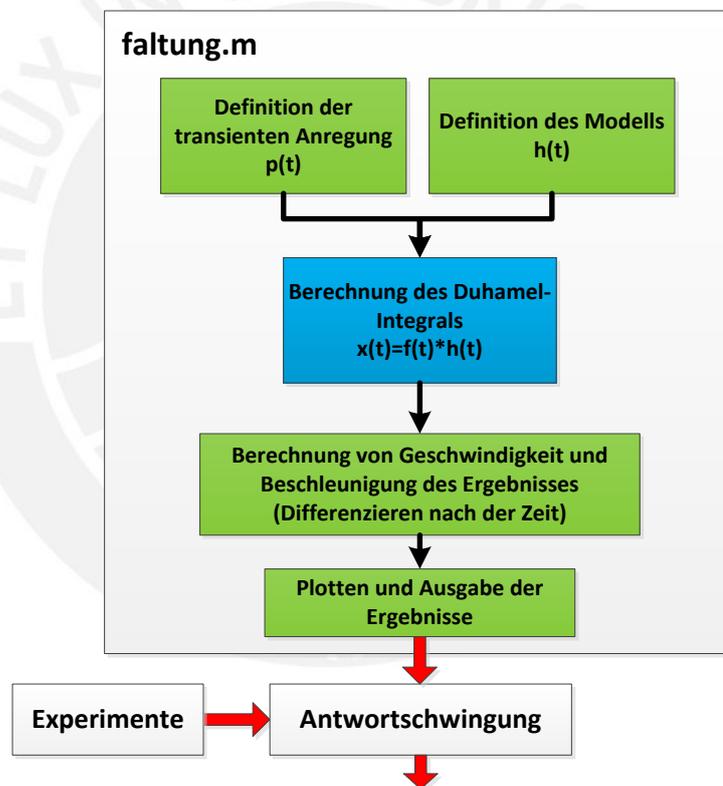


Abb. 4.5: Ablaufplan des Skriptes *faltung.m*

Es werden zuerst die Parameter der transienten Anregung  $p(t)$ , wie Form und Amplitude, definiert. Außerdem werden die Parameter der gedämpften Schwingung  $h(t)$  eingestellt. Für die Parameter des linearen Modells werden Mittelwerte verwendet, die in den Versuchen ermittelt wurden. Daraufhin wird aus der transienten Anregung und der Fundamentallösung das Duhamel-Integral berechnet. Das Programm Matlab besitzt dazu die Funktion  $conv(x,y)$ . Das Ergebnis des Duhamel-Integrals ist die Funktion der Verschiebung  $x_p(t)$ .

Nach der zeitlichen Differentiation gibt das Skript die Geschwindigkeits- und Beschleunigungskennlinie der Schwingung als Ergebnis aus.

In Abb. 4.6 ist ein Beispiel der Modellberechnung des Skriptes *faltung.m* dargestellt.

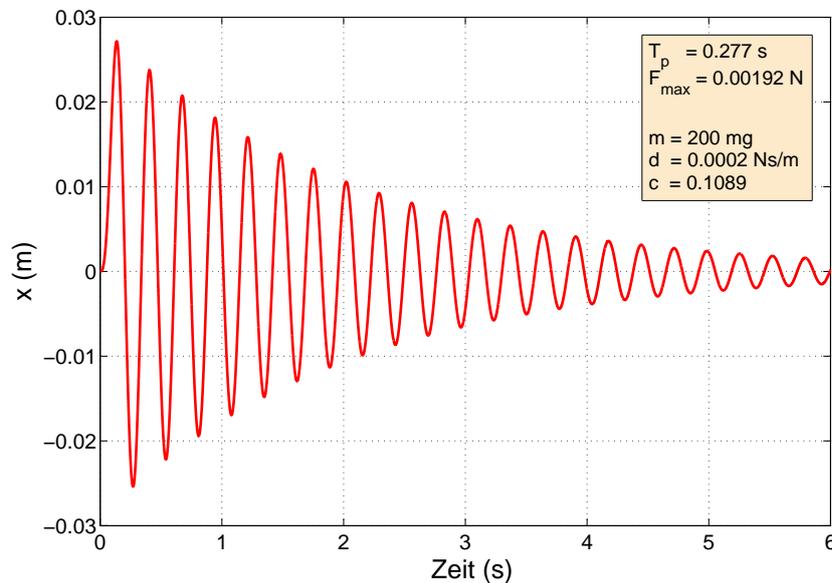


Abb. 4.6: Antwortschwingung der Modellberechnung mit *faltung.m*

Die Methode zur Berechnung der Antwortschwingung des Systems auf die transiente Erregerkraft  $p(t)$  kann in dieser Form jedoch nicht angewendet werden, um das SRS zu berechnen. Reale Stöße können meist nicht durch eine mathematische Funktion beschrieben werden. Auch die Antwortschwingung des Modells bzw. der realen Messdaten der Netze kann nicht durch eine einfache mathematische Funktion beschrieben werden. Daher ist die Lösung der Differentialgleichung zweiter Ordnung durch eine analytische Integration oder Transformation nicht möglich, bzw. erfordert zumindest die Unterstützung von Software-Programmen. In der Regel wird daher ein numerischer Algorithmus verwendet, um die Antwort der SDOF-Systeme zu berechnen und somit das SRS. Dazu wurden eine Reihe von Algorithmen im Laufe der Zeit entwickelt, welche zum Teil unterschiedliche Ergebnisse liefern. Die häufigsten Methoden zur Berechnung des SRS aus der Antwortschwingung sind:

- Direkte numerische Integration des Duhamel-Integrals
- Rekursive Integration des Duhamel Integrals
- Faltungs-Filter für das SDOF-System (FIR-Filter)
- Rekursive Filter (IIR-Filter)

Für die direkte numerische Berechnung wird Gl.(3.22) für die numerische Integration umgeschrieben, indem die kontinuierliche Variable  $f(t)$  durch  $f_i = f(i\Delta t)$  ersetzt und die Gleichung summiert wird. Das Integral wird als Reihe entwickelt.

Die numerische Integration ist jedoch nicht sehr genau, da das stetige Signal durch eine Reihe von Rechtecken der Breite  $\Delta t$  ersetzt wird. Der Fehler dieser Berechnung wird vernachlässigbar klein, sobald die Abtastrate für  $\Delta t$  ausreichend größer ist als die größte Frequenzkomponente des Signals. Dies führt aber zu einer Erhöhung der Rechenzeit.

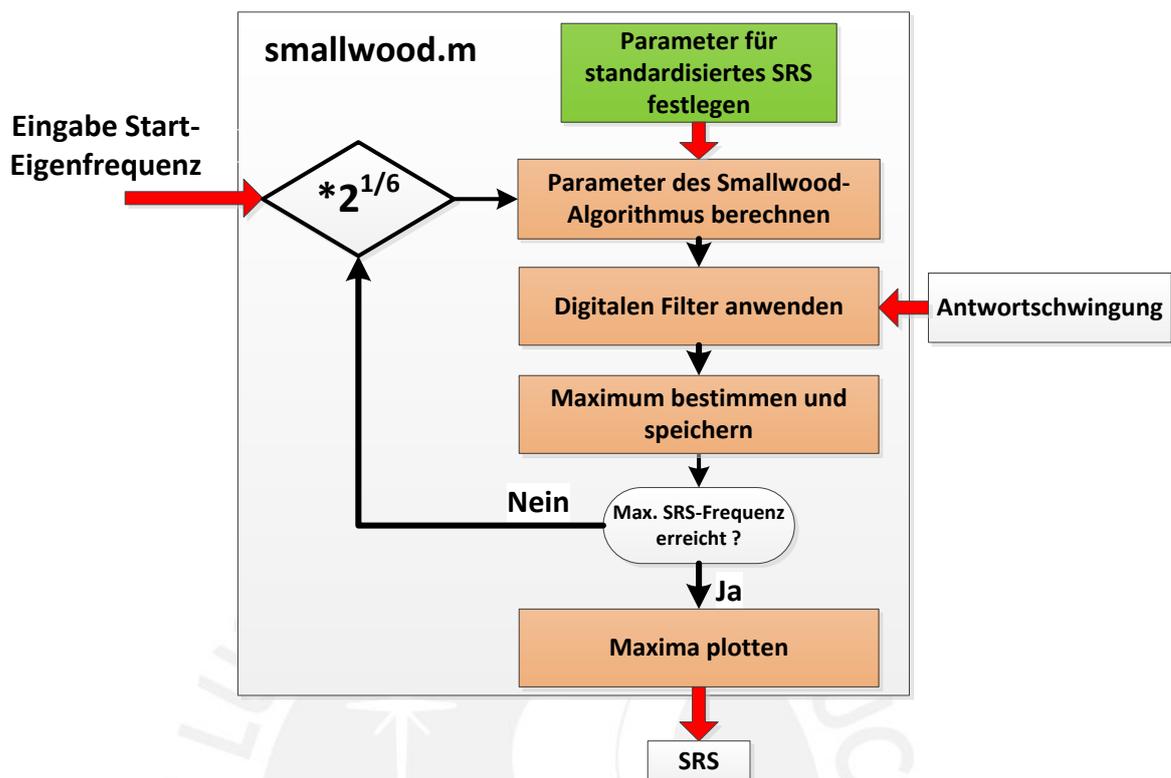
Ähnlich funktioniert die rekursive Integration. Dabei wird die relative Verschiebung und Geschwindigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t_1$  als neuer Eingangswert für die Berechnung der Systemantwort genutzt. Wird das Duhamel-Integral also über einen bestimmten Zeitraum mit ausreichender Genauigkeit integriert, können die erzielten Werte als neue Startwerte für die Fortsetzung der Lösungsiteration genutzt werden.

Die bevorzugte Methode in heutigen Anwendungen zur Berechnung des SRS ist jedoch die Verwendung von digitalen Filtern. Digitale Filter können allgemein beschrieben werden als ein Prozess der eine Funktion in Abhängigkeit der Zeit manipuliert und diese in bestimmter Weise verändert. Es gibt eine Reihe von Charakterisierungen digitaler Filter. Da in der Theorie des SRS für die Reihe von SDOF-Systemen von einem linearem Verhalten ausgegangen wird und es sich um gedämpfte Systeme handelt, verwendet man für die Berechnung einen linearen rekursiven Filter. (Infinite Impulse Response - IIR-Filter) Der nicht-rekursive Filter (Finite Impulse Response Filter - FIR-Filter) realisiert die Summe des Faltungs-Integrals direkt. Während der FIR-Filter jedoch nur die aktuellen und vorangegangenen Eingangswerte verwendet, nutzt der IIR-Filter außerdem vorherige Ausgangswerte der Berechnung. Da es sich um ein gedämpftes System handelt, müsste für den FIR-Filter eine hohe Anzahl an Filterparametern verwendet werden. Daher ist ein IIR-Filter für die Anwendung der SRS-Berechnung effektiver. [Schlichthärle 2011]

Der am häufigsten verwendete rekursive digitale Filter zur Berechnung des SRS ist der Smallwood-Algorithmus. [Smallwood 1981] Die Parameter des Algorithmus sind im Anhang A.4 angegeben. Der Filter wurde im Matlab-File *smallwood.m* implementiert und wird dort für die Berechnung des SRS eingesetzt.(siehe Abb. 4.7)

Die Auswertung der experimentellen Messdaten erfolgt ebenfalls mit dem Matlab-Skript *smallwood.m*.(siehe Kap. 6) Damit kann bei der Auswertung ausgeschlossen werden, dass Differenzen zwischen den Ergebnissen des Modells und der experimentellen Messungen durch unterschiedliche Auswertungsalgorithmen verursacht werden.

Im Skript werden die Parameter für ein standardisiertes SRS verwendet, dass in Kap. 3.2.5 entwickelt wurde. Beginnend bei einer frei wählbaren Startfrequenz werden die Parameter des Smallwood-Algorithmus berechnet und die Messdaten bzw. Berechnungsergebnisse des

Abb. 4.7: Ablaufplan des Skriptes *smallwood.m*

Modells mit diesen Parametern gefiltert. Mit den Kennwerten wird der digitale Filter eingestellt, der auf die Messdaten bzw. die Ergebnisse der Modellberechnung angewendet wird. Ergebnis ist die theoretische Beschleunigungskennlinie des SDOF-Modells des SRS. Das Maximum wird bestimmt und mit der zugehörigen Eigenfrequenz gespeichert. Die Eigenfrequenz zur Berechnung der Smallwood-Parameter wird erhöht und die Schleife wiederholt. Die Schleife wird beendet, sobald die maximale Eigenfrequenz (HSRSF) des SRS erreicht wurde. Als endgültiges Ergebnis werden die maximalen Beschleunigungen über den zugehörigen Eigenfrequenzen geplottet und ergeben so das gesuchte SRS. Die Modellparameter werden anhand der Experimente ermittelt.

Das mithilfe des Skriptes *smallwood.m* berechnete SRS der Antwortschwingung in Abb. 4.6 ist in Abb. 4.8 zu sehen.

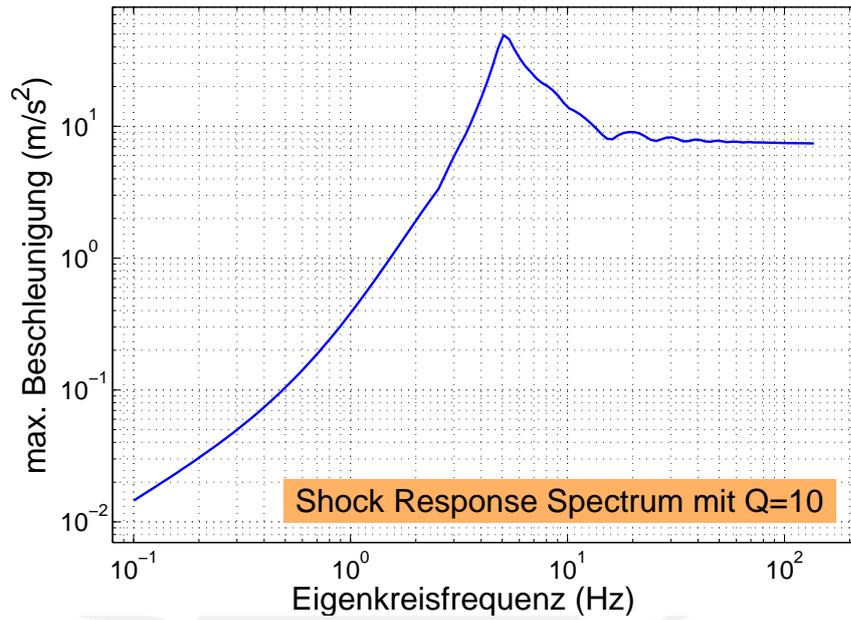
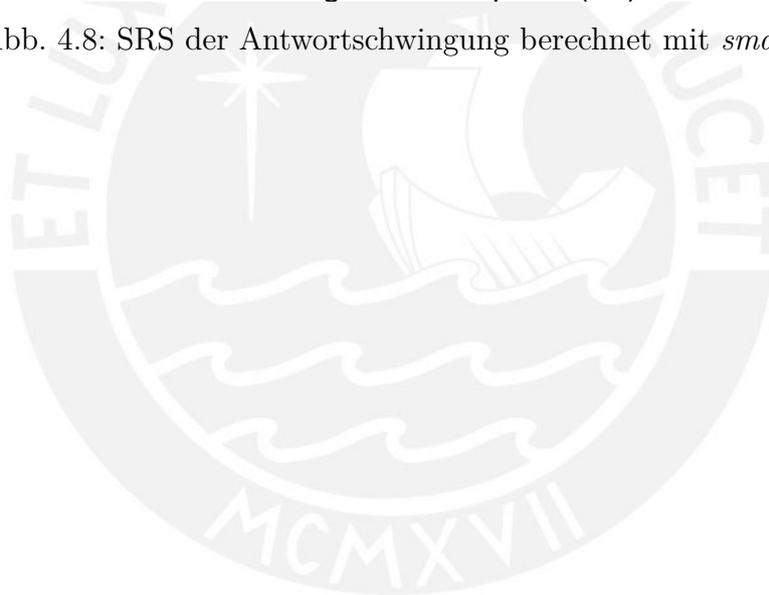


Abb. 4.8: SRS der Antwortschwingung berechnet mit *smallwood.m*



## KAPITEL 5

---

# Experimente

---

## 5.1 Ziele der Experimente

Die gewünschten Untersuchungspunkte der Messungen sind:

- Experimentelle Messung der Schwingungsantwort zur Berechnung des SRS
- Quantifizierung der Modellparameter
- Quantifizierung der Energiedissipation des gesamten Netzes
- Identifikation von Besonderheiten des dynamischen Verhaltens

Zentrales Ziel der Experimente ist die Messung des SRS. Aus den Messergebnissen kann ein Vergleich mit den theoretischen Berechnungen gezogen werden. Dazu werden die Netze durch einen Stoß angeregt und das SRS berechnet.

Für eine theoretische Berechnung anhand des erstellten Modells ist es erforderlich den Dämpfungsparameter  $d_{eq}$  zu ermitteln. In dieser Arbeit wird zum ersten mal die Dämpfung des vollständigen Netzes ermittelt. In vorherigen Arbeiten von [Barboza 2010] und [Miranda 2011] wurden die dynamischen Eigenschaften und die Dämpfung einzelner *Dragline*-Seiden ermittelt. Die Messungen an vollständigen Netzen erfordern einen höheren experimentellen Aufwand, zeigen aber zusätzlich auf, welchen Einfluss die charakteristische Geometrie des

Netzes und die Spiralen der *Flagelli*-Seide nehmen. Des Weiteren wird deutlich werden, inwieweit das erstellte Modell das Netz beschreibt, obwohl es die Spiralen des Netzes vernachlässigt. Somit wird das Modell bestätigt werden oder eine notwendige Erweiterung des Modells aufgezeigt.

Aus den ermittelten Parametern der Antwortschwingung und der Dämpfung lässt sich in einem dritten Schritt die Energiedissipation des Netzes beschreiben. Die Energiedissipation kann in Abhängigkeit der Periode quantifiziert und ein Vergleich zwischen Modell und Messung gezogen werden. Besonderheiten können somit genau lokalisiert werden. Messungen an einzelnen Fäden haben bereits Werte geliefert. Messungen von [Barboza 2010] an einzelnen *Dragline*-Seiden der Spinnenart *Argiope Argentata* zeigten eine Energiedissipation von 65,6 % in der ersten Periode der Schwingung nach dem Stoß. Bei Wiederholmessungen an einzelnen Seidenfäden von [Vehoff et al. 2007] zeigte sich zudem, dass die Energiedissipation abnimmt, da die Spinnenfasern nicht vollständig elastisch sind und die Hysterese abnimmt. Genauere quantifizierte Zusammenhänge zur zeitlichen Abhängigkeit von Hysterese und Energiedissipation sind nicht bekannt.

Zum Schluss kann aus allen aufgenommenen Daten und ermittelten Parametern ggf. ein Zusammenhang zwischen Netzgröße und Energiedissipation extrapoliert werden.

## 5.2 Spinnentiere und Netze

Für den Umgang mit den Spinnentieren und Netzen wird auf die Dokumentation in Arbeiten von [Barboza 2010], [Bautista 2011], [Miranda 2011] und [Bäumer 2012] zugegriffen.

Die Versuche werden an Netzen der Spinnenart *Argiope Argentata* durchgeführt. Diese Spinnenart zählt zur Familie der *Echten Radnetzspinnen* (Araneidae). Im ausgewachsenen Stadium besitzen sie inkl. ihrer Beine etwa maximale Maße von 50 mm Länge und 10 mm Breite. Die Spinnen wurden im Naturreservat *Pantanos de Villa* in den südlichen Außenbezirken Limas während der Monate Juli, August und September gesammelt. In den Bildern von Abb. 5.1 sind Spinnenexemplare in ihren Netzen dargestellt. Abb. 5.1(a) zeigt ein Tier in seinem natürlichen Habitat vor der Einsammlung. In Abb. 5.1(b) ist ein Exemplar in seinem Netz zu sehen, dass es in einem Versuchsrahmen konstruiert hat.

Für die Experimente wurden Aufbewahrungskästen mit den Maßen von ca. 400 mm x 400 mm angefertigt, in denen die Spinnen gehalten werden. In die Kästen können Rahmen mit unterschiedlich großen Innenöffnungen eingeschoben werden. Die Rahmen besitzen Öffnungen mit einem quadratischen Querschnitt.

(a) *Argiope Argentata* in ihrem natürlichen Habitat(b) *Argiope Argentata* im NetzrahmenAbb. 5.1: *Argiope Argentata*

Die Rahmen wurden zunächst aus Stahlblech mit einer Blechdicke von 1,5 mm gefertigt, um eine zum Netz relativ hohe Steifigkeit zu erhalten. Bei ersten Versuchen mit den Spinnentieren zeigte sich jedoch, dass die Tiere beim Netzbau in den Kästen die Metallrahmen meiden und die Netze nicht in die zu bevorzugende Richtung spinnen. Stattdessen versuchen die Tiere die Netze quer an den Holzrahmen zu spinnen. Die Geometrie des Metallrahmens sollte den Tieren für den Bau geeigneter erscheinen. Da diese aber dennoch versuchen die Netze entgegen der vorteilhafteren Geometrie des Rahmens zu konstruieren, wird angenommen, dass dies durch die verwendeten Materialien verursacht wird.

Bereits in Untersuchungen von [Wirth und Barth 1992] wird von den Schwierigkeiten berichtet, die man bei den Experimenten mit den unterschiedlichen Materialien hatte. Abhängig von der Dimension und unter erheblicher Zeitdauer konnten nur einige Spinnentiere unterschiedlicher Arten beobachtet werden, die ihr Netz in einen Versuchsaufbau aus Glasstangen errichteten. Ein Versuchsaufbau aus Messingstangen wurde von nahezu allen Tieren zum Netzbau abgelehnt.

Die Rahmen wurden daraufhin aus Holzplatten mit einer Dicke von 4 mm gefertigt. Die Tiere konstruierten keinerlei Netze, nicht an den gewünschten Positionen oder falls doch, völlig unregelmäßige Netze. Es ist daher anzunehmen, dass nicht nur der Werkstoff des Rahmens, sondern auch der Kasten in denen die Spinnen sich befinden, einen Einfluss auf die Netzkonstruktion nimmt. Im Laufe der Arbeit wurden eine Reihe von Werkstoffkombinationen der Kästen und Rahmen mit den Spinnentieren erprobt. Die erprobten Kombinationen sind in Tab. 5.1 aufgelistet.

Tab. 5.1: Getestete Werkstoffe für die Netzkonstruktion

Kasten	Netzrahmen	Rahmendicke [mm]
Holz/PMMA	Stahlblech	1,5
Holz/PMMA	Holz	4
PMMA	Holz	4
Holz/Glas	PMMA	2,5
PMMA	PMMA	2,5

Zufriedenstellende Ergebnisse konnten nur mit der letzten aufgelisteten Werkstoffkombination erreicht werden. In dieser Lösung besteht der Kasten aus Polymethylmethacrylat (PMMA). Die Klebstoffverbindungen sind an der Außenseite angebracht. Damit schließen die Seiten im Inneren glatt aneinander ab. Die Rahmen in denen die Spinnennetze konstruiert werden sind ebenfalls aus PMMA gefertigt und es ist auf eine möglichst saubere Verbindung geachtet. Nur an der Innenseite des Rahmens, an den Sollbefestigungsstellen des Netzes, ist eine Schicht Schmelzklebstoff aufgetragen. Aufgrund der glatten und harten Oberfläche des PMMA können die Spinnen sich kaum auf der Oberfläche festhalten. Die Stellen mit dem Schmelzklebstoff bieten somit eine Präferenz zur Netzkonstruktion.

Vor dem Bau des gemessenen Netzes hat jede Spinne mindestens zwei Fütterungen des Großen Schwarzkäfers *Zophobas morio* zu sich genommen. Nach den Fütterungen wird die Spinne in einen Rahmen ohne Netz gesetzt und konstruiert innerhalb von ein bis zwei Tagen ein Netz. Wenn das Netz vollständig im Rahmen konstruiert ist, wird die Spinne aus dem Netz entfernt und es steht ein Netz für eine Versuchsreihe zur Verfügung. Das Gewicht der Spinne wird für spätere Berechnungen gemessen. Falls das Netz zu unregelmäßig, nicht vollständig oder nur teilweise im Rahmen konstruiert ist, wird das Netz entfernt und die Spinne beginnt mit einer neuen Konstruktion. Die Kriterien zu Symmetrie, Größe und Vollständigkeit des Netzes werden anhand von Erfahrungswerten aus vorherigen Messungen bewertet. Ist die Geometrie des Netzes zu unregelmäßig konstruiert oder das Netz nicht ausreichend ausgebildet, verursacht der Stoß zu große Querschwingung des Reflektors und die Schwingung kann vom Interferometer nicht gemessen werden bzw. verursacht große Störungen des Signals.

### 5.3 Theoretisch zulässige Erregerkraft und maximale Auslenkung

In den Experimenten wird die Erregerkraft in Stufen erhöht. Daraus werden Zusammenhänge zwischen der Erregerkraft, der Energiedissipation und der Netzgröße gezogen. Daher ist eine Abschätzung notwendig, welche theoretische maximale Erregerkraft zulässig ist, und welche maximale Verschiebung des Netzes bei den Versuchen erreicht werden darf. Die Schwingungsversuche können nur als aussagekräftig betrachtet werden, wenn das Netz im elastischen Bereich schwingt. Überschreitet das Netz den elastischen Bereich ist die resultierende Schwingung nicht mehr symmetrisch und die Vorspannkkräfte der Radialfäden werden reduziert. Die Ergebnisse für die berechnete Steifigkeit und weitere Netzparameter wären somit ungültig.

Messungen der Spannungs-Dehnungs-Kurve der *Dragline*-Seide der Spinnenart *Argiope Argentata* von [Miranda 2011][S.93] ergaben, dass der Elastizitätsbereich der Seide im Bereich einer Dehnung von bis zu 2% bei einer Kraft von ca. 0,016 N liegt. Es wird an dieser Stelle nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Spannungs-Dehnungskurve von Spinnenseide eine Differenz zwischen einzelnen Individuen der gleichen Spinnenart zeigt. Auch bei der Wiederholmessung mehrerer Proben produziert von dem gleichen Individuum, wie die Messungen von [Garrido et al. 2002] in Abb. 5.2 zeigen, treten Differenzen auf. Dieser Sachverhalt konnte auch bei eigenen Messungen von verschiedenen Seidenproben des gleichen Individuums gezeigt werden.

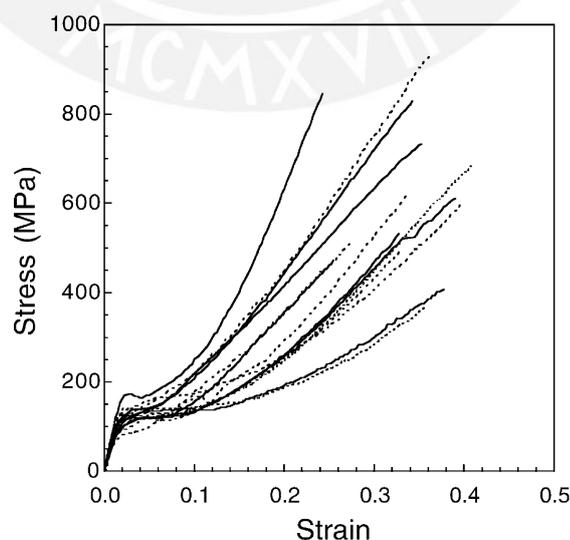


Abb. 5.2: Varianz der Spannungs-Dehnungskurve [Garrido et al. 2002]

Die durchgezogenen Kennlinien in Abb. 5.2 sind Messergebnisse verschiedener *Dragline*-Fäden des gleichen Individuums, während die gestrichelten Kennlinien Messergebnisse der Seide von einem zweiten Individuum der gleichen Spinnenart sind. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass im elastischen, linearen Bereich zu Beginn der Dehnung die unterschiedlichen Stichproben nahezu identisch sind. Es kann daher von einer konstanten Dehnung im elastischen Bereich ausgegangen werden.

Im Elastizitätsbereich wird ein linearer Verlauf der Dehnung approximiert mit einer Steigung von:

$$s_{elastisch} = \frac{F_{elastisch}}{\epsilon_{elastisch}} = \frac{0,016 \text{ N}}{0,02} = 0,8 \text{ N} \quad (5.1)$$

Die Dehnung der Radialfäden bildet sich aus der Dehnung in Folge der Vorspannung und der Auslenkung.

$$\epsilon_{elastisch} = \epsilon_{vorspannung} + \epsilon_{auslenkung} \quad (5.2)$$

Da die maximal zulässige Dehnung gesucht wird, wird die Berechnung mit der maximal auftretenden Vorspannung im einzelnen Radialfaden durchgeführt. Wie zuvor erläutert ist die Vorspannung in den Radialfäden der oberen Radialfäden größer. Daher wird die anhand der Messergebnisse berechnete Vorspannung der Radialfäden in der oberen Netzhälfte durch die Anzahl der Radialfäden in der oberen Netzhälfte dividiert und das Ergebnis als maximal auftretende Vorspannung in den Radialfäden angenommen.

Die Dehnung in Folge der Verschiebung wird mithilfe von Gl.(4.8) berechnet. Die größere Dehnung in Folge der Verschiebung tritt in der oberen Netzhälfte auf.

$$\epsilon_{elastisch} = \frac{F_{oben}}{s_{elastisch} n_{oben}} + \frac{\sqrt{L_1^2 + u^2} - L_1}{L_1} \quad (5.3)$$

Umstellen der Gleichung nach der Verschiebung  $u$  ergibt die Gleichung zur Berechnung der maximal zulässigen Verschiebung im Elastizitätsbereich.

$$u_{max,ela} = \sqrt{\left[ \left[ \epsilon_{elastisch} - \frac{F_{oben}}{s_{elastisch} n_{oben}} \right] L_1 + L_1 \right]^2 - L_1^2} \quad (5.4)$$

Mithilfe der Steifigkeit  $c_{eq}$  des Modells der Gl.(4.13) lässt sich somit ebenfalls die theoretisch maximale Erregerkraft  $F_{max}$  bestimmen.

Für einen Netzrahmen mit den Dimensionen von 300 mm und einer vorhandenen Vorspannung in einem einzelnen Radialfaden von  $1000 \mu N$  ergibt sich eine maximale Verschiebung im Elastizitätsbereich von ca. 29 mm. Diese Berechnung geht von einer nahezu symmetrischen Netzgeometrie aus. Die Vorspannung von  $1000 \mu N$  ist ein Maximalwert der in [Wirth und Barth 1992] an den Radialfäden gemessen wurde. Bei niedrigerer Vorspannung ist die zulässige maximale Verschiebung größer. Der angegebene Wert dient als Orientierungswert für die Experimente.

## 5.4 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Messung der Schwingung des Netzes wird kontaktlos mit interferometrischen Vibrometern durchgeführt. Dazu wird im Netzzentrum, an der Stelle an welcher normalerweise die Spinne sitzt, eine Masse mit einer reflektierenden Folie angebracht. Die Anregung erfolgt mit einer kugelförmigen Masse auf der gegenüberliegenden Seite. Für die Messungen werden folgende Kriterien an den Stoß bzw. den Versuchsaufbau gestellt:

- Die Form des Stoßes ist bekannt
- Es können Stöße mit sehr kleinen kinetischen Energien generiert werden
- Die kinetische Energie des Stoßes kann variiert werden
- Die Energie des Stoßes kann gemessen werden
- Der Stoß ist in seiner Form und Energie reproduzierbar

Zur Erfüllung der Anforderungen ist es notwendig, dass die Kontaktmasse in einer freien Bewegung auf das Netz trifft und somit die Schwingung nicht beeinflusst wird. Die Möglichkeit eines freien Pendels beispielsweise entfällt daher. Eine zuverlässige und reproduzierbare Möglichkeit ist die Verwendung einer Feder, deren Geschwindigkeit beim Auftreffen auf die Kontaktmasse gemessen wird. Bei Vernachlässigung des sehr geringen Energieverlustes der Kontaktmasse zwischen ihrer Beschleunigung durch die Feder und ihrem Auftreffen auf das Netz, kann die kinetische Energie anhand der Masse und der Geschwindigkeit der Feder berechnet werden. Für die Stöße wird ein Versuchsaufbau mit einer Blattfeder aufgebaut. Über einen Anschlag wird gewährleistet, dass die Energie bei mehreren Versuchen konstant ist. Die Blattfeder wird über einen Faden gespannt der daraufhin getrennt wird. Damit wird gewährleistet, dass kein manueller Eingriff des Benutzers beim Spannen der Blattfeder die Energie variiert. Ein technischer Entwurf der Konstruktion für den Versuchsaufbaus ist in Anhang A.5 zu finden.

Es ist notwendig im Netzzentrum eine Scheibe anzubringen, an welcher auf einer Seite der Reflektor für das Interferometer angebracht wird. Die andere Seite dient als Kontaktpunkt für den Stoß. Dazu werden im Zentrum von beiden Seiten zwei kreisrunde Stücke Karton miteinander verklebt. Die Kartonstücke besitzen in allen Versuchen den gleichen Durchmesser von ca. 15 mm. Außerdem werden Öffnungen eingeschnitten, um den Luftwiderstand und Turbulenzen zu reduzieren. Es wird ein dünner, steifer Karton verwendet, um die Dämpfung des Stoßes durch den Karton möglichst gering zu halten. Das Material darf nicht zu dünn sein, da sonst beim Stoß der Reflektor zu stark verdreht wird und die Messung des Interferometers unterbrochen wird.

Nachdem das Netz in dieser Form vorbereitet wurde, wird es in den Versuchsaufbau eingespannt. Dieser ist in Abb. 5.3 als technisches Prinzip dargestellt.

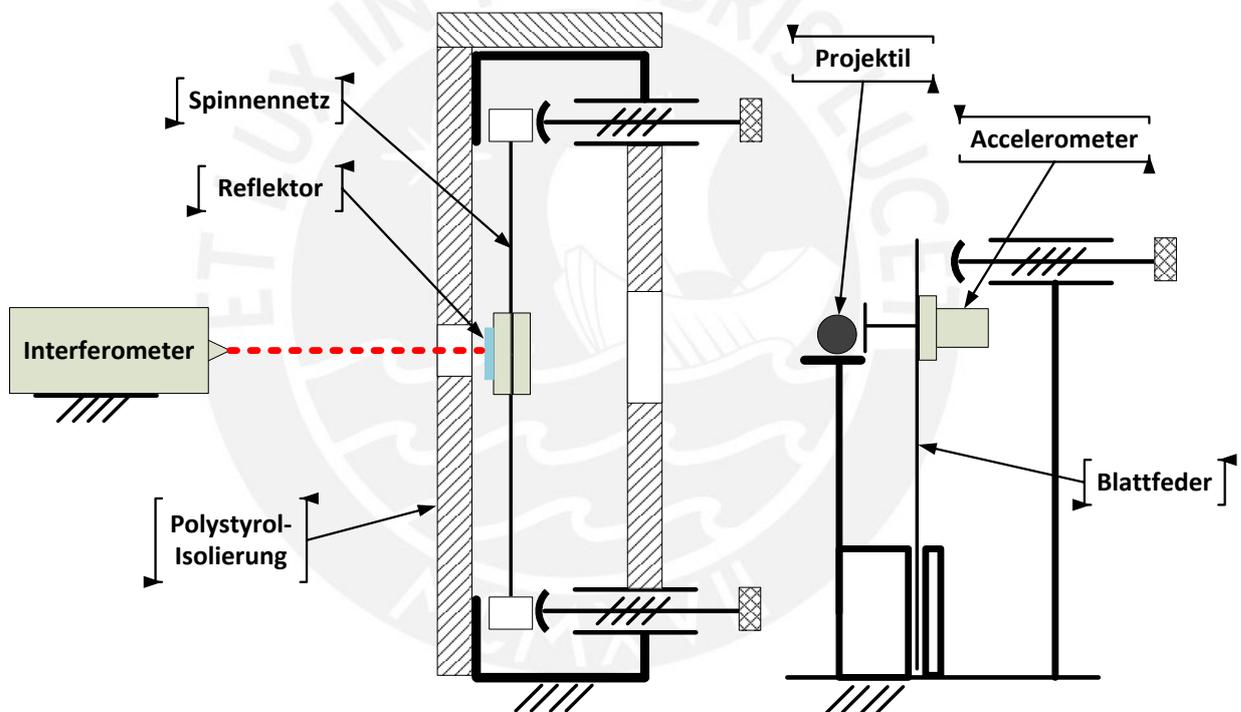


Abb. 5.3: Technisches Prinzip des Versuchsaufbaus

Der Rahmen mit dem Netz der Spinne wird in einen Halterahmen eingespannt. Der Halterahmen ist mit Polystyrol verkleidet, um das Netz während der Messung vor Luftströmungen und anderen Störungen zu isolieren, die die Schwingung beeinflussen können. Auf beiden Seiten sind Öffnungen in der Isolierung vorhanden, durch die mit dem Laser gemessen bzw. das Projektil gestoßen wird. Nachdem das Netz im isolierten Rahmen angebracht ist, werden das Interferometer und die Stoßvorrichtung ausgerichtet und die Messungen durchgeführt.

Der Beschleunigungssensor wurde zunächst mit den beiden verwendeten Interferometern kalibriert, um die Einstellungen des Analysators und die Funktionsweise der Messmethode zu überprüfen. (siehe Kap. 6)

Die Differenz der beiden Messmethoden zur Geschwindigkeitsbestimmung beträgt ca. 4% und wird geringer bei kleineren Amplituden. Die Messung der Geschwindigkeit in den Experimenten mit einem zweiten Interferometer ist nicht möglich, da die Geschwindigkeit der Blattfeder den Messbereich des Interferometers überschreitet. Der geringe zeitliche Phasenversatz zwischen der Messung des Interferometers und des Beschleunigungssensors ist irrelevant für die Auswertung.

Zur Quantifizierung der Dämpfung und um Zusammenhänge zwischen der Netzgröße und der Energiedissipation zu untersuchen, werden die Netze mit kugelförmigen Massen angeregt. Da keinerlei Kenntnisse über die notwendige Erregerkraft bzw. Energie des Stoßes bekannt sind, ist es notwendig gewesen in Vorversuchen zunächst eine Bandbreite für die Parameter zu ermitteln.

Es war geplant in den Versuchsreihen die Energien des Stoßes stufenweise zu erhöhen. Es wird bei einer kleinen Energie begonnen, die ausreichend ist um das Netz zu einer Schwingung anzuregen. Daraufhin wird die Energie gesteigert, bis die Auslenkung des Netzes die maximal zulässige Auslenkung (siehe Kap. 5.3) erreicht. Um Besonderheiten der Energiedissipation zu untersuchen, sollten auch Messungen aufgenommen werden, die die maximale Auslenkung überschreiten. Diese könnten aber nicht zur Berechnung der Modellparameter verwendet werden, da die Seidenfäden über den elastischen Bereich hinaus ausgedehnt werden.

Aufgrund des eingeschränkten Messbereiches der vorhandenen Interferometer bis zu einer Geschwindigkeit von  $500 \text{ mm/s}$  bzw.  $1000 \text{ mm/s}$  und da bei größeren Stößen das Messsignal aufgrund der fehlerhaften Reflexion des Lasers unterbrochen wird, konnte in den Versuchen nicht der gesamte, gewünschte Auslenkungsbereich untersucht werden.

Das Projektil wird mithilfe der Blattfeder auf das Netz gestoßen und die Auslenkung gemessen. Durch eine Öffnung in der Polystyrol-Isolierung kann die Flugbahn des Projektils beobachtet werden. Sollte das Projektil nach dem Aufprall das Netz berühren oder sich im Netz verfangen ist die Messung nicht gültig.

In den Messreihen wird in kleinen Schritten die kinetische Energie des Stoßes erhöht, bis der Messbereich überschritten wird oder die Querschwingungen des Netzes zu stark werden und das Interferometersignal unterbrechen.

In den Versuchen werden außerdem die Anzahl der Radial- und Spiralfäden, die Dimension des Netzes, die Ersatzmasse, die Umgebungstemperatur und die Luftfeuchtigkeit dokumentiert.

## KAPITEL 6

---

# Auswertung und Ergebnisse

---

## 6.1 Auswertung der Messdaten

Im nachfolgenden Kapitel wird detailliert auf die Auswertung der Messdaten eingegangen. Bei der numerischen Auswertung von Daten ist die Reihenfolge und Struktur der Algorithmen von großer Bedeutung für das Ergebnis der Berechnungen. Die genaue Dokumentation und Erläuterung von Details der Auswertungsalgorithmen ist daher erforderlich.

### 6.1.1 Filtern der Messdaten

Die Messdaten des Laser- und Beschleunigungssensors werden in der numerischen Auswertung in mehreren Stufen bearbeitet und zur Berechnung verwendet.

Die Messdaten des Beschleunigungssensors an der Blattfeder werden genutzt, um die Geschwindigkeit des Projektils zu bestimmen. Die Daten werden bereits durch den Analysator integriert und in den Einheiten  $m/s$  bereitgestellt. Zur Berechnung der Energie der Projektille ist die Geschwindigkeit der Blattfeder zum Zeitpunkt des Auftreffens auf das Projektil zu ermitteln. Dazu wird anhand der Messergebnisse das Maximum der ersten Geschwindigkeitssamplitude manuell ermittelt. Mithilfe der Geschwindigkeit und der Masse des Projektils wird anschließend die kinetische Energie des Projektils berechnet. Da es nicht möglich ist

zu bestimmen, wie viel kinetische Energie nach dem Aufprall im Projektil verbleibt, kann dieser Messwert nur als Referenz dienen, um die Stoßanregung abzuschätzen.

Das Ausgangssignal des Lasersensors ist ein analoges Spannungssignal, welches proportional zur Geschwindigkeit ist und im Kontrollmodul digitalisiert wird. Die Daten zeigen Störungen im hochfrequenten Bereich. Der untersuchte Frequenzbereich des Spinnennetzes liegt hingegen im niedrigen Frequenzbereich zwischen 3-7 Hz. In Abb. 6.1 ist beispielhaft ein Ausschnitt aus dem digitalisierten Signal des Interferometers gezeigt.

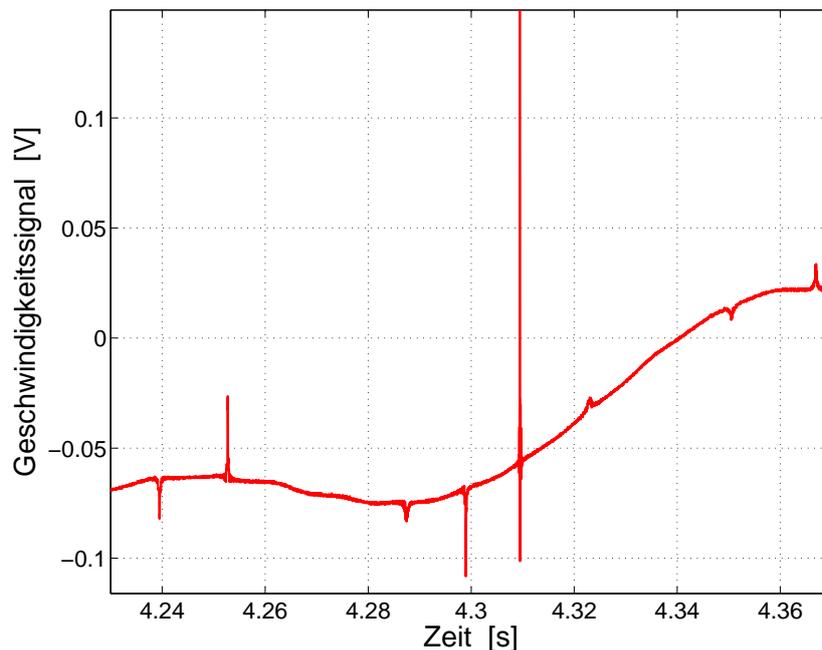


Abb. 6.1: Hochfrequentes Rauschen und Störungen des Lasersignals

Besonders auffällig sind neben dem konstanten, hochfrequenten Rauschen des Signals, die hohen transienten Ausschläge des Signals. Diese Störungen werden durch Fehler bei der Messung des reflektierten Laserstrahls verursacht, da das Netz mehrere Freiheitsgrade besitzt und es daher nicht, wie idealisiert, auf der Koordinatenachse des Modells schwingt. Das Signal ist daher vor der weiteren numerischen Analyse mit einem Tiefpassfilter zu glätten, um den hochfrequenten Anteil zu eliminieren und ein Filter zu ermitteln, der besonders die Störungen des Signals reduziert.

Im ersten Abschnitt des Skriptes *datenauswerten.m* werden die Messdaten eingelesen, zur ersten Prüfung auf Vollständigkeit geplottet und gefiltert. Zur Filterung sind mehrere Algorithmen eines Tiefpassfilters möglich. Einige Filtertypen sind z.B. der Gauß-, Sinc-, oder Butterworth-Tiefpassfilter. Eine weitere übliche Methode des Tiefpassfilters ist ein gleiten-

der Mittelwertfilter. Die Filter unterscheiden sich in ihren Eigenschaften und sind in Abhängigkeit der Signaleigenschaften und der gewünschten Ergebnisse zu wählen. Dazu ist es notwendig zu unterscheiden, welcher Signalanteil eine Störung darstellt, und welcher Anteil die Informationen enthält. Außerdem können die Filter grundsätzlich unterschieden werden, wie bereits bei der Erläuterung des digitalen Filters zur Berechnung des SRS in Kap. 4.2 erwähnt wurde, in FIR- und IIR-Filter. Da IIR-Filter rekursiv arbeiten, das bedeutet zur Berechnung auch vergangene Ausgangswerte zurückgeführt werden, wird die Flankensteilheit des Filters bei deutlich niedriger Ordnung erreicht.

Der Vollständigkeit wegen sei hier erwähnt, dass das Programm *Matlab* unter dem Command-Befehl *fdatool* ein Filterdesign- und Analyse-Tool mit grafischer Benutzeroberfläche bereitstellt, das verwendet werden kann, um eine schnelle und übersichtliche Berechnung der Filterparameter zu ermöglichen. Dazu stehen eine breite Auswahl von FIR- und IIR-Filtertypen zur Auswahl. Des Weiteren ist mit Hilfe des Designtools eine Stabilitätsuntersuchung der IIR-Filter möglich, da diese instabil sein können. Die Auslegung des Filters für die Laser- und Beschleunigungsmessdaten ist aufgrund des übersichtlichen Datenumfangs und dem niedrigen Frequenzbereich des Spinnennetzes, auch über das manuelle Testen unterschiedlicher Parameter möglich. Unter Zuhilfenahme des Designtools wurden eine Reihe von Filtern getestet. Einige Beispiele dieser Filter sind im Skript *filter.m* demonstriert. Auch die Kombination verschiedener Filter wurde verglichen. Die besten Ergebnisse werden mit einem *Zero-Phase-Butterworth-FIR-Filter* erzielt.

Der *Butterworth-Filter* ist ein gängiger Filter in der Bewegungsanalyse. Zwei besondere Eigenschaften des Filters sind ein monotoner Amplitudengang und eine relativ hohe Flankensteilheit bereits bei kleiner Ordnung. Die Parameter des *Butterworth-Filters* werden als FIR-Filter implementiert. Somit ist es unter Zuhilfenahme eines *Zero-Phase-Filters* möglich, den Phasenversatz zu verhindern. Der *Zero-Phase-Filter* verarbeitet das Signal jeweils einmal vorwärts und rückwärts, wodurch der Phasenversatz, der herkömmlicherweise auftritt, vermindert wird, bzw. bei passender Auswahl der Filterparameter, nahezu verhindert wird. Bei IIR-Filtern hingegen ist es, im Vergleich zu FIR-Filtern, relativ schwierig den Phasenversatz zu verhindern.

In Abb. 6.2 ist das gefilterte Signal (schwarz) über dem ungefilterten Signal (rot) dargestellt. Außerdem ist ein gleitender Mittelwertfilter des Signals (blau) gezeigt, um den Phasenversatz dieses Filters zu verdeutlichen.

Wie zu erkennen ist, wurde mit dem ermittelten Filter ein sehr gutes Ergebnis erzielt. Der Filter erzeugt nahezu keinen Phasenversatz, beseitigt vollständig das Rauschen des Signals und korrigiert die Störungen. Der zum Vergleich dargestellte Mittelwertfilter zeigt bei ausreichender Signallbreite zur Beseitigung der Störungen einen hohen Phasenversatz. Außerdem

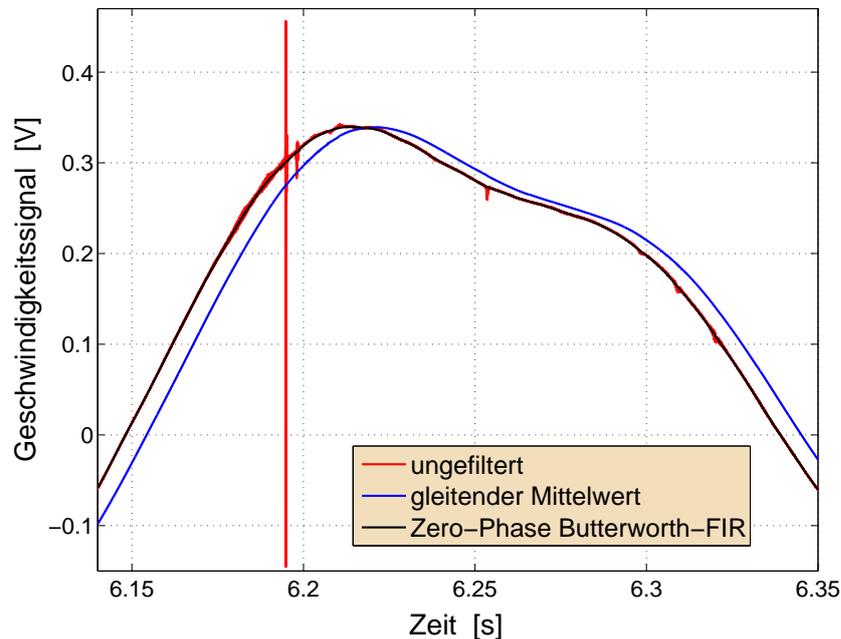


Abb. 6.2: Ergebnisse unterschiedlicher Filter

ist das Ergebnis dieses Filters an den Stellen großer Störungen unstetig, was wiederum Fehler bei der weiteren Auswertung bereiten würde. Der verwendete Butterworth-Filter ist hingegen auch an Stellen großer Störungen stetig.

Zu erwähnen ist noch, dass der Filter bei den Stoßversuchen eine sehr wichtige Rolle spielt. Da das Netz nicht wie idealisiert nur einen Freiheitsgrad hat, kommt es aufgrund des Stoßes, der nie absolut zentral auf das Netz trifft, zu Querschwingungen und Verschiebungen. Außerdem ist die Geometrie des Netzes und die Vorspannung der Radialfäden niemals symmetrisch. Die Folge sind zum Teil sehr große Störungen der interferometrischen Messung, da es zu Fehlern oder Überlagerungen des reflektierten Strahles kommt. Umso entscheidender ist daher ein wirksamer Filter für die Auswertung der Stoßversuche, der gleichzeitig nicht den eigentlichen Signalverlauf verändert. Bei falscher Auslegung oder zu hoher Ordnung werden zwar die Störungen beseitigt, aber es kommt zu einer Änderung von Phase und Amplitude. Ein Beispiel von hohen Störungen ist in Abb. A.4 zu finden. Es ist zu erkennen, dass die Störung nahe der Umkehrlage der Schwingung liegt. Dies entspricht in der dargestellten Geschwindigkeitskennlinie einer Geschwindigkeit nahe null. Als Ursache wird angenommen, dass an den Stellen größerer Auslenkung die unsymmetrische Vorspannung der Radialfäden zu einer Verkipfung der Ersatzmasse und somit des Reflektors führt. Somit kommt es zu Fehlern bei der Messung mit dem Interferometer.

Es ist wichtig den Filter auf das Signal anzupassen. Falls ein Filter zu hoher Ordnung ange-

wendet wird, werden die Amplituden des Signals verringert und der Signalverlauf verwischt. Außerdem ist durch die Verwendung einer niedrigeren Filterordnung die Auswertung der Messdaten schneller. Ein Filter zu geringer Ordnung hingegen, beseitigt das Rauschen und die Störungen nicht vollständig.

Die gefilterten Daten werden anschließend ggf. um ihren Offset korrigiert, der zu Beginn der Messaufnahme im Ruhezustand gemessen und berechnet wird. Die Daten, die im Analysator durch Integration berechnet werden, also die Geschwindigkeit des Beschleunigungssensors und die Verschiebung des Netzes, sind bereits geglättet bzw. gefiltert, da die Integration eine glättende Wirkung zur Folge hat.

### 6.1.2 Umrechnung der Messdaten

Der zweite Abschnitt des Skriptes *datenauswerten.m* setzt die Umrechnung der Messdaten fort. Die Messdaten liegen wie beschrieben in den Einheiten *Volt* und *Volt s* des Lasersensors und in  $m/s^2$  bzw.  $m/s$  des Beschleunigungssensors vor. Um die Daten für die Berechnung der Modellparameter nutzen zu können, ist es erforderlich die gemessene Geschwindigkeit in die Verschiebung des Netzes umzurechnen. Die Daten werden nach dem Filtern umgerechnet. So wird vermieden, dass das Rauschen und die Störungen multipliziert werden und in die Umrechnung eingehen.

Die Geschwindigkeitsdaten des Lasersensors werden zunächst mit dem Skalierungsfaktor des Messgerätes in Abhängigkeit der Einstellungen multipliziert, um das Signal in den Einheiten  $mm/s$  zu erhalten. Dabei ist darauf zu achten, dass ein möglicher Offset zuvor korrigiert wurde. Es besteht die Möglichkeit anstatt der internen Integration des Gerätes eine numerische Integration bei der Auswertung vorzunehmen. Diese Möglichkeit und die Überprüfung der Einstellungen des Analysators wurde anhand der Kalibrierung des Beschleunigungssensors mit dem Interferometer überprüft. Bei dieser Integration wurde das Trapezverfahren verwendet. Dadurch wird die Genauigkeit der Berechnung erhöht, indem im Integrationsintervall die Funktion mit einem Polynom 1. Grades interpoliert wird. Auf diese Weise wird aus dem Signal des Beschleunigungssignals die Geschwindigkeit ermittelt. Es zeigte sich jedoch, dass die Integration des Analysators einen kleineren Fehler aufweist als die numerische Integration, die in *Matlab* implementiert wurde. Daher wird für die Auswertungen die Integration des Analysators verwendet. Die Kalibrierung des Beschleunigungssensors mit dem Interferometer und die Beschränkung des Messbereichs des Interferometers ist in Abb. A.5 dargestellt.

Bei der Differentiation hingegen zeigt sich, dass die nachträgliche Differentiation in *Matlab* genauere Ergebnisse erzielt. Anders als die Integration wirkt die Differentiation nicht

glättend, sondern reagiert besonders empfindlich auf Rauschen und Störungen des Ausgangssignals. Beim Ergebnis der Differentiation des Analysators ist aufgrund des Rauschens und der Störungen daher nicht mehr die Information von den Störungen und Rauschen zu trennen. Daher werden im Auswertungsskript die gefilterten Daten differenziert und somit die Beschleunigung der Netzschnwingung berechnet. Nach der Differentiation wird das Ergebnis ein weiteres mal gefiltert, um Störungen und Rauschen des Beschleunigungsverlaufes zu reduzieren.

Als letzter Schritt wird der relevante Datenbereich der Messdaten ausgeschnitten und zur weiteren Berechnung im Arbeitsspeicher in der Matrix "*verschiebung*" gespeichert.

### 6.1.3 Berechnung der Modellparameter

In Kap. 3.1.1 wurde gezeigt, wie anhand des Amplitudenverlaufes einer gedämpften Schwingung mithilfe des logarithmischen Dekrements die Dämpfung berechnet werden kann. Anhand der Schwingung und des Amplitudenverlaufes des Spinnennetzes werden die Dämpfungsparameter  $d$ ,  $\delta$  und  $D$  ermittelt. Die Periodendauer  $T$  ermöglicht die Berechnung der Kreisfrequenz und Steifigkeit.

Mit dem erstellten Modell in Kap. 4.1 können anhand der Messergebnisse außerdem die theoretischen Vorspannungen in der oberen und unteren Netzhälfte berechnet werden. Anhand dieser Modellberechnungen wird es möglich die Vorspannungen in den Seidenfäden zu berechnen. Vorherige Arbeiten haben zur Modellbildung bislang Messergebnisse von [Wirth und Barth 1992] herangezogen und die Vorspannungen approximiert.

Ausgangspunkt ist die Verschiebungs-Zeit-Kennlinie, die im Arbeitsspeicher bereitgestellt wird. Das Skript `netz_auswerten.m` lädt zunächst die Daten und plottet den Verlauf. Der Nutzer definiert daraufhin anhand der Schwingung, ab welchem Zeitpunkt die Auswertung beginnt. Dies ist notwendig, da es sich zum Beginn der Schwingung um eine erzwungene Schwingung durch das Projektil handelt. Außerdem kann das Messergebnis zu Beginn der Schwingung aufgrund der Querschwingungen des Netzes noch relativ große Störungen zeigen und die Schwingung kann nicht als freie, gedämpfte Schwingung mit einem FG betrachtet werden. Der Benutzer muss daher festlegen ab welchem Zeitpunkt die Schwingung keine größeren Störungen zeigt. Außerdem ist der Betrag der angebrachten Ersatzmasse in das Programm einzugeben.

Da es beim Stoß zu einer geringen plastischen Verschiebung der Ersatzmasse am Netz kommt, verläuft die gedämpfte Schwingung nicht exakt um die Nullachse, sondern ist um wenige Zehntel Millimeter verschoben. Diese geringe Verschiebung der Ersatzmasse wird durch den Algorithmus korrigiert, indem der Mittelwert der gesamten Messung von den

Messdaten abgezogen wird. Danach werden die Nullstellen der Perioden und die positiven Amplitudenmaxima der Verschiebung und Geschwindigkeit im betrachteten Zeitraum ermittelt. Dieser Schritt der Auswertung ist in Abb. 6.3 zu sehen.

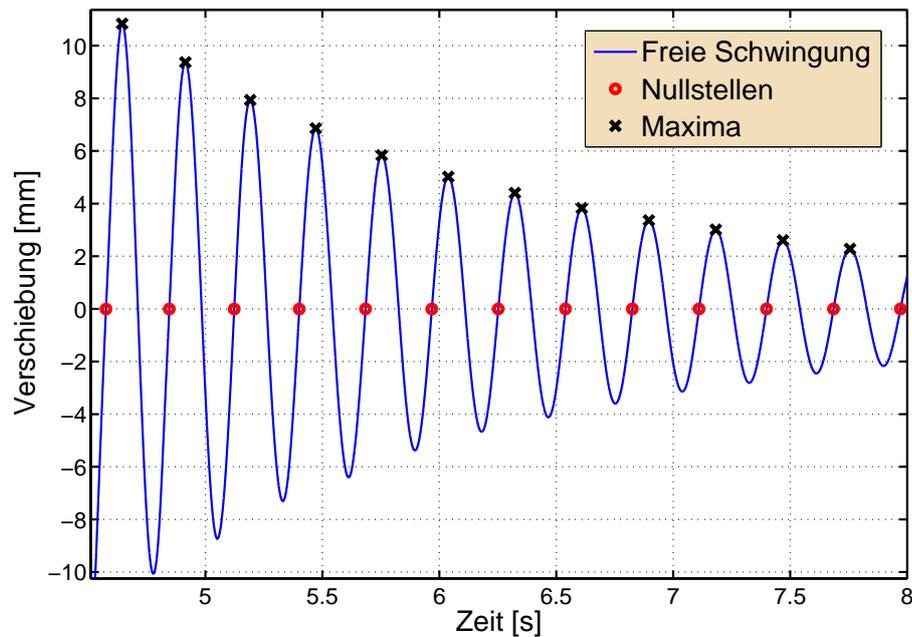


Abb. 6.3: Automatische Nullstellen- und Maxima-Ermittlung

Um die Änderung der Parameter im Verlauf der Schwingung zu ermitteln und so ggf. eine systematische Dynamik der Parameter zu ermitteln, werden die ermittelten Nullstellen in einen Vektor  $N_{n+1}$  geschrieben. Die Maxima der Verschiebung und Geschwindigkeit werden in den Vektoren  $X_{n+1}$  und  $V_{n+1}$  gespeichert. Daraufhin erfolgt die Berechnung aller Modellparameter anhand der Gleichungen aus Kap. 3.1. Der Ablauf der Berechnungen ist in Abb. 6.4 dargestellt.

Aus den Vektoren werden Mittelwerte gebildet und die Netzparameter auf herkömmliche Weise als skalare Größen mit einer Standardabweichung berechnet. Dazu werden u.a. die Gl.(3.2), (3.5) und (3.8) verwendet, um die Parameter der gedämpften Schwingung zu berechnen. Die Ergebnisse der skalaren Berechnung werden in der Datei *ergebnis.txt* gespeichert.

Die aussagekräftigere Berechnung ist die vektorweise Berechnung der Parameter. Anhand der ermittelten Amplituden  $X_i$  und  $X_{i+1}$  sowie der Nullstellen  $N_i$  und  $N_{i+1}$  werden Vektoren der Parameter berechnet, so zum Beispiel die Vektoren Periodendauer  $T_n$  und Dämpfung  $d_n$ . In Form der Vektoren kann jeder Schwingungsperiode ein individueller Parameterwert

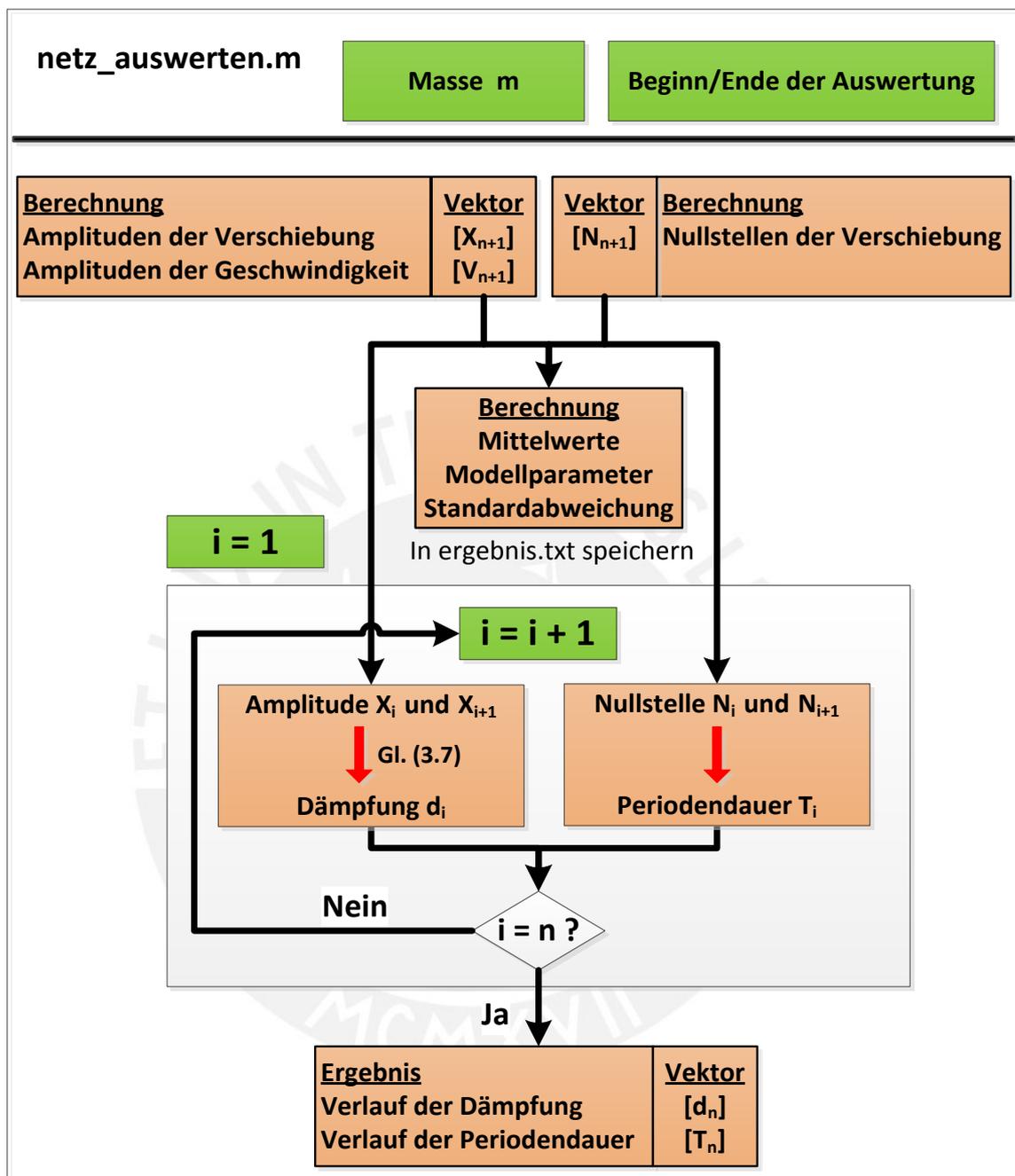


Abb. 6.4: Vektorweise Parameterberechnung im Skript `netz_auswerten.m`

zugeordnet werden. So beschreibt beispielsweise  $d_1$  die Dämpfung in der ersten Periode, welche die Periodendauer  $T_1$  besitzt. Anhand dieser Berechnungsmethode lassen sich die Ergebnisse daraufhin sehr aussagekräftig auswerten und darstellen, um so Zusammenhänge zwischen den Parametern und ihrer Dynamik auf den Grund gehen zu können.

Die Parameter der transienten Erregung sind die Erregerkraft  $F_{max}$  und  $T_p$ , wie in Kap. 4.2.1

berechnet. Für die Berechnung dieser Parameter ist die Federsteifigkeit  $c_{eq}$  erforderlich. Dieser Kennwert wird jedoch nicht gemessen, sondern muss zunächst ausgewertet werden. Eine Möglichkeit zur direkten Berechnung der Modellparameter der Erregerkraft anhand von Messwerten ist es, Gl.(4.19) und den Zusammenhang  $F = c_{eq} u$  zu verwenden. Nach Umstellen der beiden Gleichungen nach einer Unbekannten, lässt sich die Erregerkraft anhand der maximalen Verschiebung des Netzes beim Aufprall des Projektils berechnen mit:

$$F_{max} = v_0^2 \frac{m_{projektil} + M_{objekt}}{u_{max}} \quad (6.1)$$

Der Zusammenhang zwischen Erregerkraft, Verformung und Federsteifigkeit, um die Federsteifigkeit des Netzes zu berechnen, wird nicht genutzt. Der Fehler dieser Berechnungsweise wird als sehr groß eingeschätzt. Zum einen, da bereits die Messung bzw. Berechnung der Erregerkraft und der kinetischen Energie einen relativ großen Fehler aufweist. Zum anderen, da eine Reihe von Vereinfachungen des Modells angenommen werden, die zu einem weiteren Fehler führen, wie zum Beispiel die Annahme eines idealen Stoßes.

Es wird daher angenommen, dass die Berechnung der Steifigkeit des Systems über die freie Schwingung nach dem Stoß mit einem kleineren Fehler behaftet ist.

Die Berechnung der Parameter mithilfe des erstellten Algorithmus bietet eine Vielzahl von Vorteilen. Neben der offensichtlichen Zeitersparnis, ist es möglich mit der automatischen Auswertung die Messdaten sehr detailliert zu analysieren.

In Abb.6.5 sind einige verwendete Methoden zur Darstellung und Untersuchung von Zusammenhängen dargestellt.

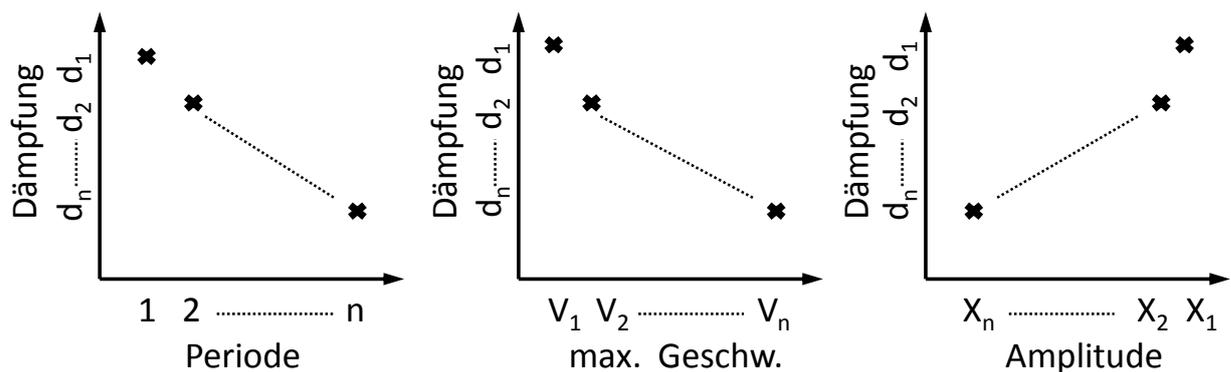


Abb. 6.5: Darstellungsmethoden der Parametervektoren

Nachfolgend sind die erläuterten Ergebnisse der Berechnung anhand eines Netzes dargestellt. In Abb.6.6 ist als Beispiel dieser Berechnungsmethode der Parameter Dämpfung in Abhängigkeit der Periodennummer dargestellt.

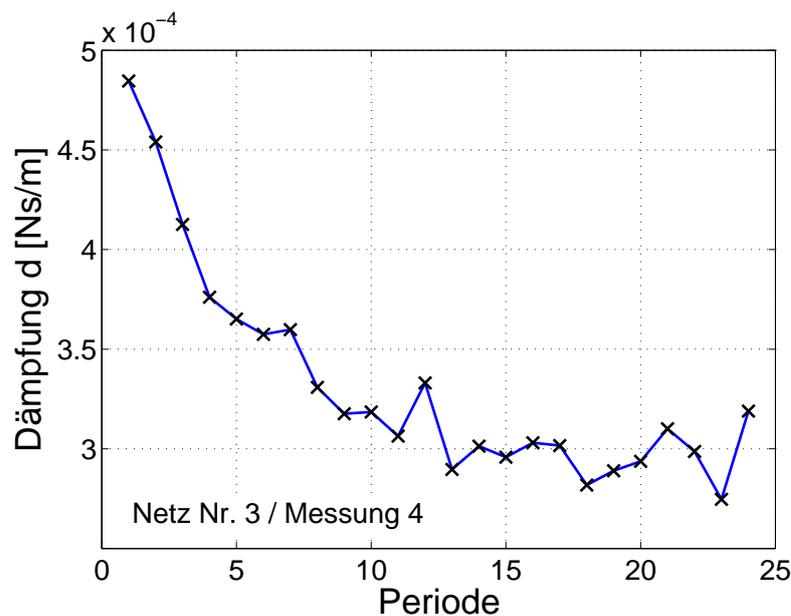


Abb. 6.6: Dämpfung in Abhängigkeit der Periodennummer

Anstatt einzelner Parameter, die als konstanter Wert des gesamten schwingenden Netzes betrachtet werden oder der Berechnung eines Mittelwertes aller einzelnen Perioden, wird so beispielsweise deutlich, dass die Dämpfung nicht wie im linearen Modell beschrieben ein konstanter Wert ist, sondern deutlich eine systematische Änderung über dem Verlauf der Schwingung zeigt.

Aufgrund der äußeren Einflüsse und der verschiedenen Störungen, die bei der Berechnung der Dämpfung eingehen, zeigen die Kennwerte erwartungsgemäß Streuungen. Um Tendenzen zu erkennen wird die Analyse der Daten durch verschiedene Interpolationen unterstützt. Im Fall des Parameters Dämpfung gibt es eine Reihe von möglichen Abhängigkeiten, die in Betracht gezogen werden können. Zum einen ist die Dämpfung abhängig von der Geometrie. Mit größerer Auslenkung ist es zu erwarten, dass sich die Dämpfung ändert, da der Anteil der Spiralen an der Materialdämpfung zunimmt. Daher ist eine Möglichkeit der Analyse einen Zusammenhang zwischen der Dämpfung und der Amplitude zu suchen. In Abb. 6.7 sind die berechneten Dämpfungen der einzelnen Perioden über der relativen Amplitude dargestellt. Dabei ist die erste ausgewertete Amplitude das Relativmaß.

Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Dämpfung ist ein weiterer Aspekt, der untersucht werden soll. Wie in den vorherigen Kapiteln erläutert, sind die Eigenschaften der Spinnenseide abhängig von der Dehnrage. In Simulationen und Messungen von [Lin et al. 1995] wurde der hohe Anteil der aerodynamischen Dämpfung des Netzes gezeigt und dabei insbesondere der hohe Anteil den die Spiralfäden an der aerodynamischen Dämpfung

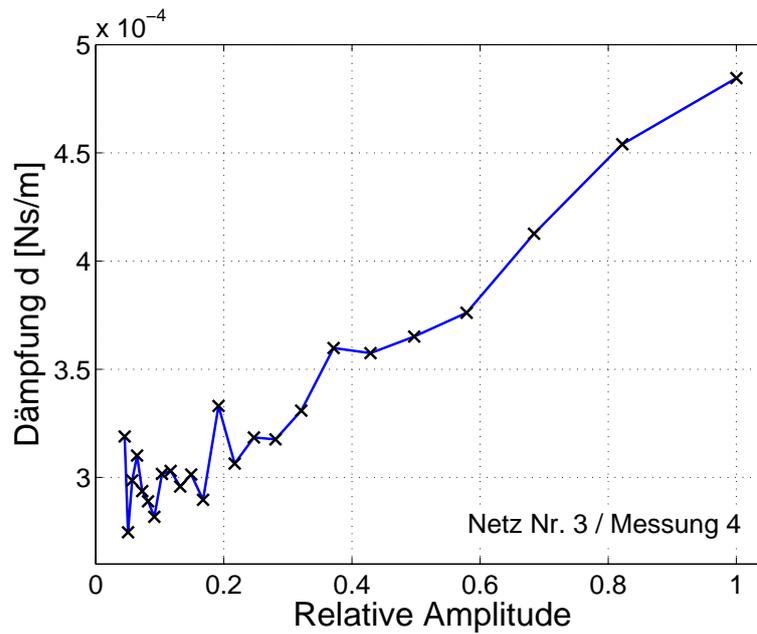


Abb. 6.7: Dämpfung in Abhängigkeit der relativen Periodenamplitude

fung besitzen. Daher ist zu erwarten, dass die Dämpfung eine markante Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zeigt. In Abb. 6.8 sind die berechneten Dämpfungskennwerte der einzelnen Perioden in Abhängigkeit der maximalen Geschwindigkeit der jeweiligen Periode dargestellt.

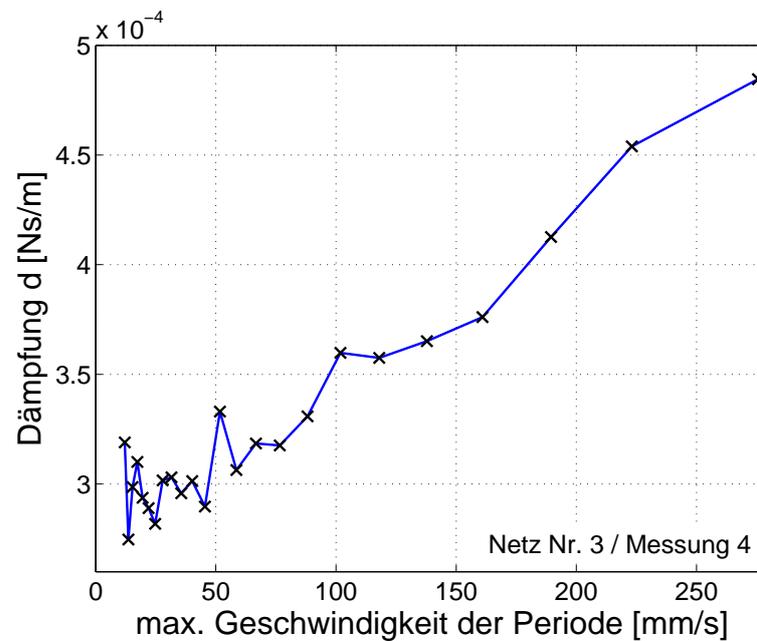


Abb. 6.8: Dämpfung in Abhängigkeit der max. Periodengeschwindigkeit

Auf die weitere und detailliertere Diskussion der Ergebnisse wird in Kap. 7 eingegangen. Dort werden die Ergebnisse außerdem verwendet, um das lineare Modell zu erweitern und zu verbessern.

## 6.2 Berechnung des Stoßspektrums

Zur Berechnung des SRS ist die Beschleunigung der Schwingung erforderlich. Während der Versuche zeigte sich, dass die Differentiation des Analysators aufgrund von Störungen der Messungen und des relativ hohen Rauschens sehr große Fehler verursacht und die ausgegebene Beschleunigung des Analysators nicht verwendet werden kann. Eine reine Erhöhung der Filterordnung im Analysator oder während der Auswertung ist nicht ausreichend. Um die un stetigen Störungen ausreichend zu glätten, damit die Berechnung der Beschleunigung zutreffend ist, müsste die Ordnung des Filters soweit erhöht werden, dass der eigentliche Kennlinienverlauf stark geglättet und somit in einem großen Maße geändert wird. Daher wird die Beschleunigung anhand der gemessenen Geschwindigkeit in *Matlab* berechnet. Zunächst wird das Geschwindigkeitssignal gefiltert, um die Störungen und das Rauschen zu minimieren. Bei der Auswertung sind die Daten auf Vollständigkeit zu kontrollieren. Die Reflexion des Laserstrahls kann bei zu starken Schwingungen außerhalb der Strahlenachse des Interferometers unterbrochen werden. Ein Beispiel des unterbrochenen Signals ist in Abb. 6.9 zu sehen.

Zum Zeitpunkt der Unterbrechung verläuft das Signal auf einem konstanten Wert. Sobald das Signal wiederhergestellt wird, da die Reflexion des Lasers detektiert wird, springt das Signal auf den tatsächlichen Wert. Dieser Sprung verursacht bei der Berechnung der Beschleunigung des Netzes extreme Maxima, die ungünstig sind. Zu erkennen ist außerdem, dass zu starke Unterbrechungen des Signals nicht durch den Filter ausgeglichen werden können. In diesen Fällen kann das Signal manuell interpoliert werden oder wird nicht ausgewertet. Für die Auswertung wurden nur Signale verwendet, die geringe Störungen zeigen. Zur Korrektur kleiner Störungen und Signalunterbrechungen, die durch den Filter nicht beseitigt werden, ist das Skript *bearbeiten.m* erstellt worden. Größeres Rauschen und Störungen können damit manuell vom Benutzer markiert werden und werden vom Programm ausgeschnitten, damit das Ergebnis des Filters weiterhin stetig verläuft und nicht fälschlicherweise einen Sprung erfährt.

Nach dem Filtern der Geschwindigkeit und der Überprüfung, ob das Signal vollständig ist, wird das Signal nach der Zeit differenziert und die Beschleunigung berechnet.

Die resultierende Beschleunigung des Netzes wird ohne weitere Bearbeitung durch das

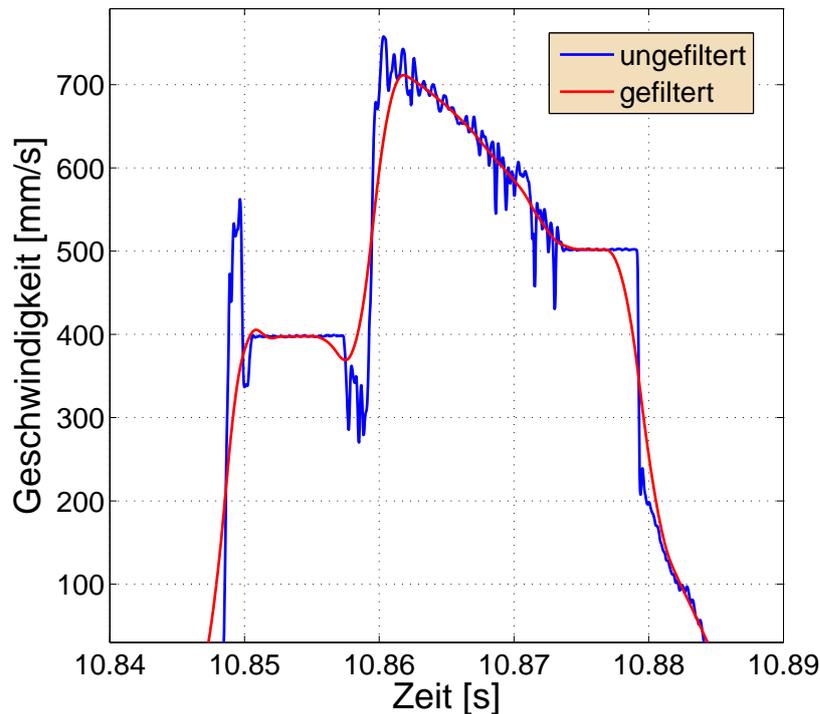


Abb. 6.9: Unterbrochenes Signal des Interferometers

Skript *datenauswerten.m* im Arbeitsspeicher bereit gestellt. Zur Berechnung des SRS wird das Skript *smallwood.m* verwendet, das bereits in Kap.4.2.2 bei der Modellberechnung verwendet wird. Das Skript *smallwood.m* führt zunächst eine Hoch- und Tiefpassfilterung an den Messdaten aus, entsprechend den Empfehlungen eines standardisierten SRS in Kap.3.2.5. Der Phasenversatz der Filter bei der Berechnung ist dabei vernachlässigbar, da der absolute Zeitpunkt für die Berechnung des SRS keine Bedeutung hat. Das SRS von Netz-Nr. 5 und 7 ist in Abb. 6.10 abgebildet.

Es ist zu erkennen, dass der Kennlinienverlauf beider Netze den gleichen charakteristischen Verlauf zeigt. Dabei ist anzumerken, dass die beiden Messungen mit unterschiedlichen Interferometern aufgenommen wurden. Die Messungen an Netz-Nr. 5 sind mit dem Interferometer von Brüel & Kjør aufgenommen. Netz-Nr. 7 wurde mit dem Vibrometer von Ometron vermessen. Die Ursache für die Unterschiede in den Amplituden ist die höhere kinetische Energie des Stoßes bei der Vermessung von Netz-Nr.5. Daher treten höhere Beschleunigungen während der Schwingung auf und folglich höhere Beschleunigungen des SRS. Die geringe Verschiebung des ersten lokalen Maxima auf der Frequenzachse wird durch die niedrigere Eigenfrequenz der Netze verursacht. Netz-Nr. 7 hat eine geringere Eigenfrequenz von etwa 4 Hz. Netz-Nr. 5 hingegen eine höhere Eigenfrequenz von ca. 5 Hz.

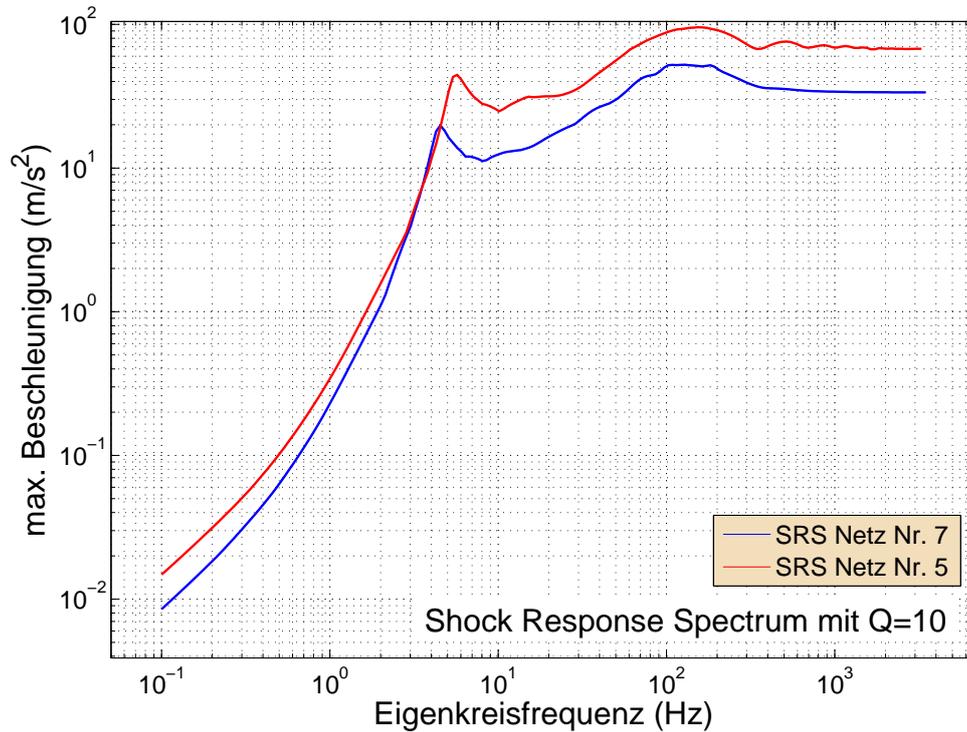


Abb. 6.10: Experimentelles SRS der Netze Nr. 5 und Nr. 7

### 6.3 Vergleich zwischen Modellergebnissen und Messungen

Anhand eines Vergleiches zwischen den Ergebnissen der Modellberechnung und den Messungen zeigen sich die Besonderheiten des Netzes bzw. des Materials. Mithilfe der Parameter, die in Kap. 6.1.3 berechnet wurden, werden die Parameter im Skript *faltung.m* eingestellt. Die gemittelten Ergebnisse für Dämpfung, Steifigkeit und Periodendauer der transienten Erregung werden direkt übernommen. Da beim Stoß die kinetische Energie nicht vollständig übertragen wird, sondern ein Teil im zurückgeprallten Projektil verbleibt, wird die Erregerkraft der Modellberechnung angepasst, sodass die erste freie Schwingungsamplitude zwischen dem Modell und dem Versuch übereinstimmt. In Abhängigkeit des Stoßes variiert der Anteil der kinetischen Energie der im Projektil verbleibt. Die transiente Erregerkraft muss für jede Auswertung einzeln angepasst werden. In Abb. 6.11 ist die Verschiebung der Modellberechnung im Vergleich zum experimentellen Messergebnis dargestellt.

Bei dieser Abbildung sind einige Besonderheiten zu erkennen. Die erste Amplitude der Messung ist kleiner ausgebildet als die darauffolgenden Schwingungen. In Abb. 6.13 ist zu

## 6 Auswertung und Ergebnisse

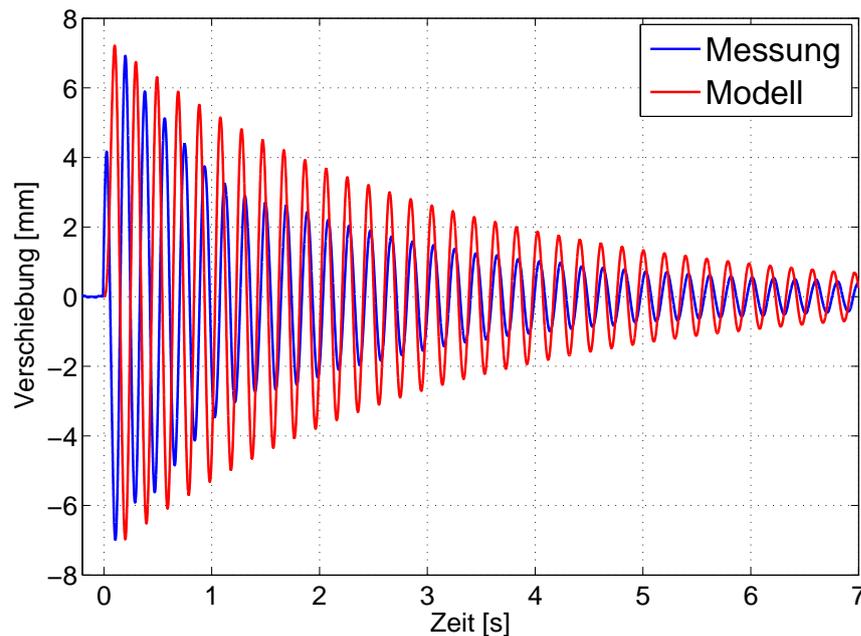


Abb. 6.11: Vergleich Verschiebung zwischen Modell und Versuch

erkennen, dass die Beschleunigung der ersten Periode bei der Messung ein relativ starkes Maximum zeigt. Das kann darauf hindeuten, dass die Steifigkeit nicht nur abhängig von der Verschiebung ist, sondern auch von der Beschleunigung. Dies ist eine mögliche Erklärung dafür, dass die Steifigkeit in Ruhelage relativ niedrig ist. Beim Stoß kommt es so zu hohen Beschleunigungen. Aufgrund des Messprinzips kann aber auch eine Störung der interferometrischen Messung nicht vollständig ausgeschlossen werden. Darauf wird in der Diskussion und dem Ausblick näher eingegangen.

Es ist außerdem zu erkennen, dass nicht alle einzelnen Perioden in ihrem Nulldurchgang übereinstimmen. Die Ursache dafür ist nicht ein Phasenversatz, sondern eine *nichtkonstante* Periodendauer des Netzes. Diese Besonderheit wird detailliert in Kap. 7.1 ausgewertet und diskutiert. Sie deutet auf eine nicht konstante Steifigkeit hin.

Die Unterschiede zwischen linearem Modell und Messung spiegeln sich ebenfalls in der Geschwindigkeit wieder, wie in Abb. 6.12 zu erkennen ist.

Außerdem ist die Dämpfung der Amplituden in den Messergebnissen zu Beginn der Schwingung stärker, obwohl für die Modellbildung der berechnete Mittelwert der Dämpfung verwendet wird. Hieran ist der bereits erläuterte Sachverhalt zu erkennen, dass die Dämpfung ebenfalls ein nicht konstanter, dynamischer Parameter ist.

Für die Berechnung des SRS ist schlussendlich die Beschleunigung des Netzes notwendig. Die Beschleunigung für das diskutierte Ergebnis ist in Abb. 6.13 gezeigt.

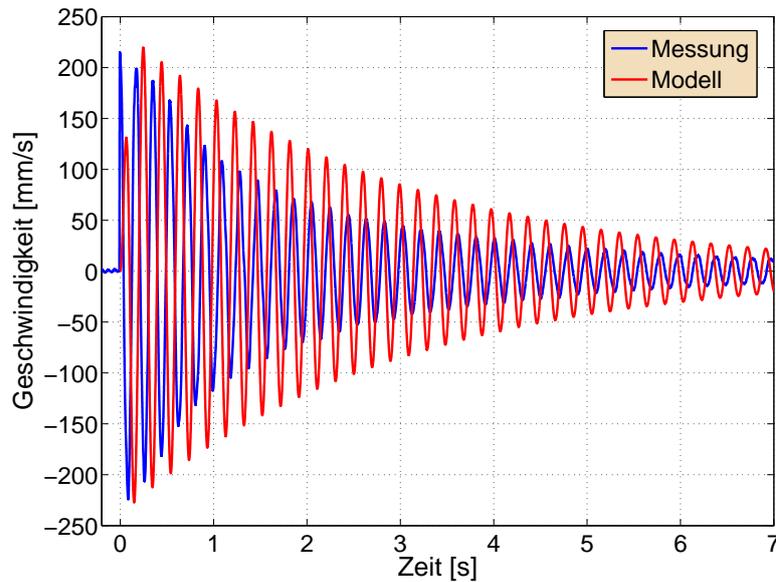


Abb. 6.12: Vergleich Geschwindigkeit zwischen Modell und Versuch

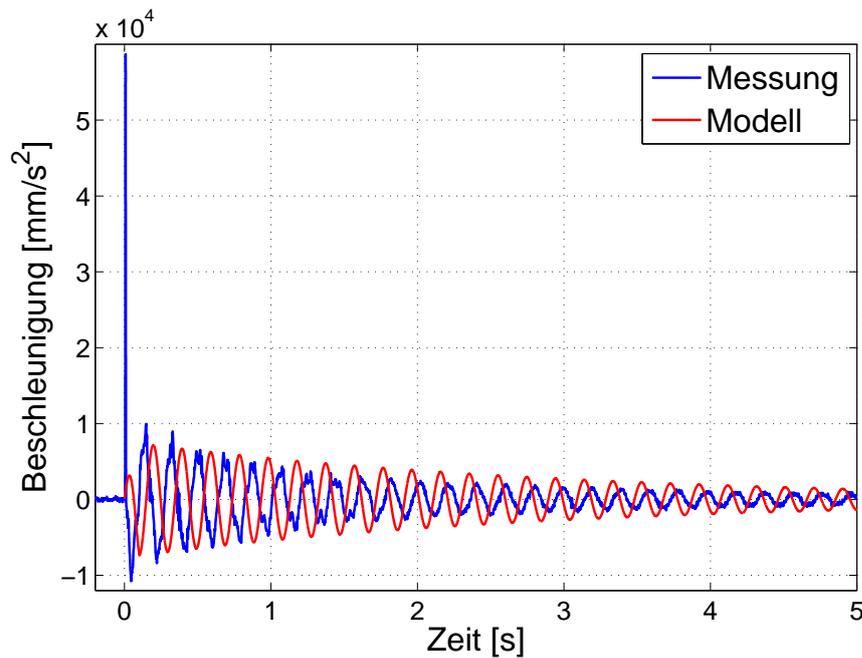


Abb. 6.13: Vergleich Beschleunigung zwischen Modell und Versuch

Hier ist besonders die bereits erwähnte starke Beschleunigung beim Aufprall zu erkennen, die auf eine geringere Steifigkeit des Netzes schließen lässt, solange es sich in Ruhelage befindet. Diese liegt um ein Vielfaches über dem Ergebnis des Modells. Die geometrische Nichtlinearität, die im Modell linearisiert wird, konnte in einer erweiterten Modellbildung,

welche die Nichtlinearität berücksichtigt, als Ursache für das Beschleunigungsmaximum ausgeschlossen werden.

Die berechneten SR-Spektren anhand der Beschleunigung von Modell und Versuch aus Abb. 6.13 sind in Abb. 6.14 dargestellt.

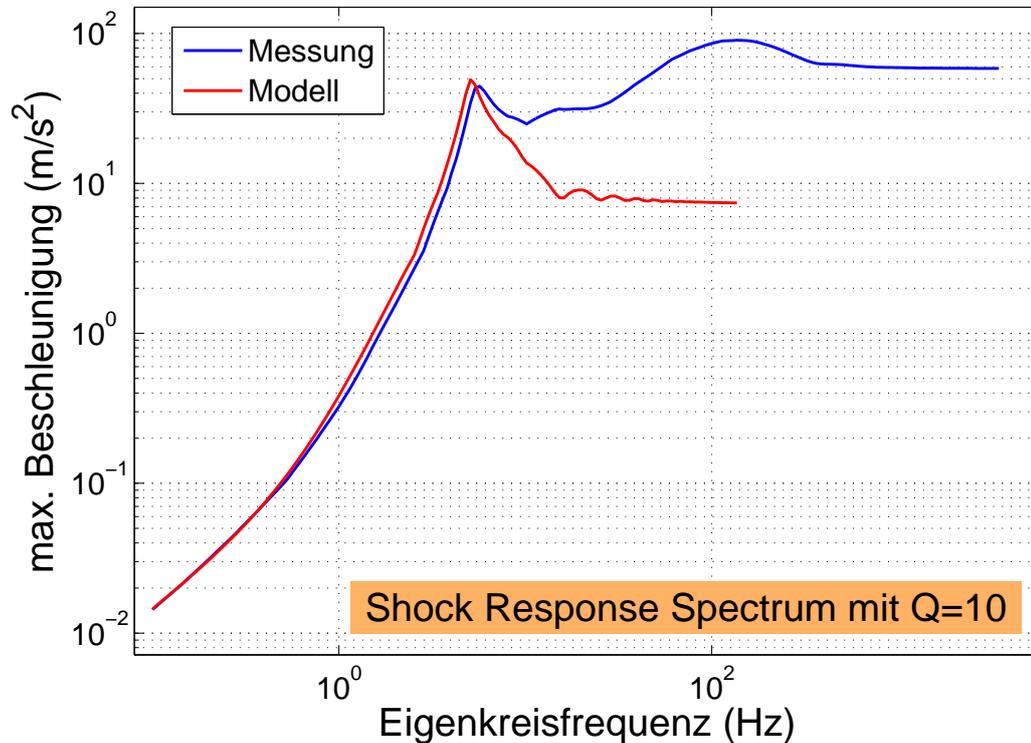


Abb. 6.14: Vergleich SRS zwischen Modell und Versuch

Der Unterschied zwischen Modell und Messergebnissen wird verursacht durch die transiente, hohe Beschleunigung des Netzes zu Beginn der gemessenen Schwingung. Bei einer Reduzierung dieser charakteristischen Beschleunigung der Messergebnisse, stimmen das lineare Modell und die Messergebnisse nahezu überein.

## 6.4 Energiedissipation des Netzes

Neben dem Stoßspektrum des Netzes wird außerdem die Absorption der Energie untersucht. Wie zuvor erläutert besitzt die Spinnenseide hervorragende Eigenschaften um Stöße und deren kinetische Energie zu absorbieren. Dazu zählen die relativ hohe Dehnbarkeit des Materials, die ansteigende Bruchenergie mit zunehmender Dehnrage und die Geometrie des Netzes.

Die bisher verwendeten Berechnungsmodelle beschreiben das Netz mit einer konstanten Dämpfung. Wie aber erläutert besitzt das Material viskoelastische Eigenschaften, wodurch sowohl die Steifigkeit als auch die Dämpfung geschwindigkeitsabhängig sind. Des Weiteren tritt ein geschwindigkeitsabhängiger Strömungswiderstand an den Netzfäden und der Ersatzmasse auf. Es ist daher zu erwarten, dass die Energiedissipation bei der Auswertung eine Geschwindigkeitsabhängigkeit zeigt. In der Auswertung wird daher die Dämpfung jeder Einzelschwingung berechnet, um die Abhängigkeit der Dämpfung als Funktion der Geschwindigkeit bzw. Periode zu beschreiben. Bei dieser Auswertung kann jedoch nur die Gesamtdämpfung untersucht werden. Um die geschwindigkeitsunabhängige Dämpfung des Materials zu untersuchen, müssen die Versuche im Vakuum durchgeführt werden, um den Strömungswiderstand auszuschließen.

Anhand der allgemeinen Differentialgleichung gedämpfter Schwingungen lässt sich der Zusammenhang zwischen der Energie und deren Änderung zeigen:

$$d\left[\underbrace{\frac{1}{2} m \dot{x}^2}_{E_{kin}} + \underbrace{\frac{1}{2} c x^2}_{E_{pot}}\right]/dt = dE_{ges}/dt = -2 \delta m \dot{x}^2 \quad (6.2)$$

Die Energiedissipation kann man mit dem Zusammenhang aus Gl.(3.9) berechnen:

$$\frac{1}{E} dE = -\frac{d}{m} dt \quad (6.3)$$

Nach Integration, Umstellen und Einsetzen der Anfangsbedingung  $E(t = 0) = E_0$  ergibt sich:

$$E(t) = E_0 e^{-\frac{d}{m} t} \quad (6.4)$$

Für die Untersuchung der Energiedissipation der Versuche wird die Energiedissipation jeder einzelnen Periode berechnet. Es gilt der Zusammenhang:

$$\frac{dW}{dt} = d_{eq} \dot{x}^2 \quad (6.5)$$

Für die Berechnung einer einzelnen Perioden wird von einer konstanten Periode ausgegangen mit der maximalen Amplitude  $x_{max}$ :

$$x = x_{max} \sin(\omega_d t) \quad (6.6)$$

Nach Ableiten und Einsetzen erhält man mithilfe der Integration über der Periodendauer die Änderung der Energie im Zeitraum der betrachteten Periode.

$$\Delta W_P = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega_d}} d_{eq} \dot{x}^2 dt \quad (6.7)$$

Nach Integration und Lösung lautet der Zusammenhang zur Beschreibung der Energiedissipation im Verlauf einer Periode:

$$\Delta W_P = \pi d_{eq} \omega_d x_{max}^2 \quad (6.8)$$

Wie bei der Berechnung der Modellparameter in Kap. 6.1.3 festgestellt wurde, sind alle Parameter der Gleichung nicht konstant, sondern zeigen eine Abhängigkeit von der Periode. Diese Abhängigkeit wird verursacht, da die Parameter weg- und geschwindigkeitsabhängig sind. Eine Trennung ist ohne Weiteres nicht möglich, weshalb zunächst die Energiedissipation in Abhängigkeit der Periode berechnet wird.

Die Parameter der einzelnen Perioden, die in Vektoren gespeichert sind, werden nach Gl.(6.8) zeilenweise multipliziert. Das Ablaufschema zur elementweisen Vektorberechnung der Energiedissipation ist in Abb. 6.15 zu sehen.

Die Darstellung der Berechnungsergebnisse vermittelt einen Eindruck der Energiedissipation über dem Verlauf der Schwingung. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abb. 6.16 dargestellt. Die Ergebnisse sind in Abb. A.8 an einem weiterem Netz verifiziert.

Es ist zu sehen, dass die tatsächliche Energiedissipation des Netzes in den ersten Perioden um ein Vielfaches über der theoretischen Energiedissipation des bisherigen Modells liegt. Für den Vergleich mit der linearen Modellberechnung wurde ein Modell erstellt, dass als

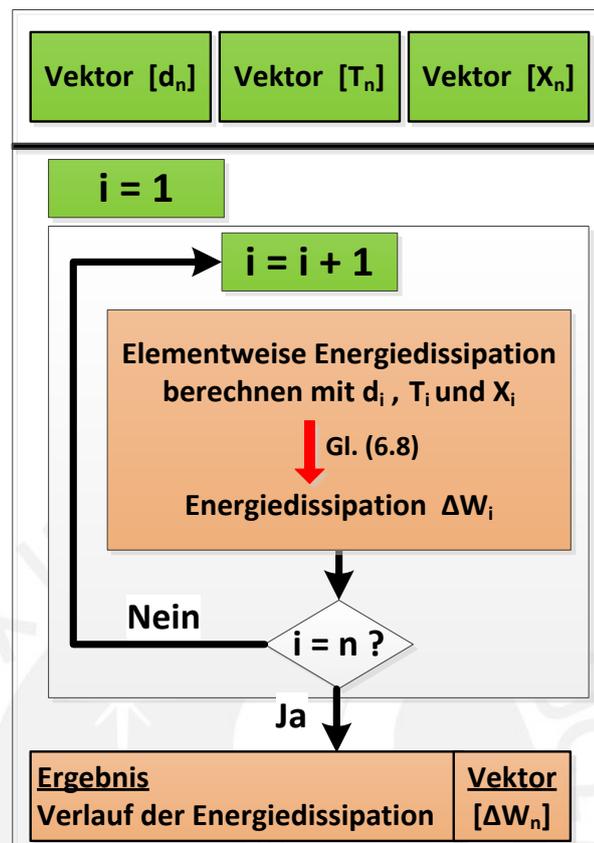


Abb. 6.15: Elementweise Berechnung der Energiedissipation

Dämpfung den Mittelwert der ausgewerteten Messdaten verwendet. Um die Energiedissipation vergleichen zu können, wurde das Modell angepasst, sodass das erste Amplitudenmaximum zwischen Berechnung und Messung übereinstimmt. Es wird ersichtlich, dass das tatsächliche Netz bei der gleichen Auslenkung wesentlich mehr Energie dissipiert, bzw. bei der gleichen kinetischen Energie eine geringere Auslenkung erfährt als das lineare Modell. Diese hohe Energiedissipation wird anhand mehrerer Parameter des Netzes erreicht. Wie dargestellt, ist die Dämpfung  $d_{eq}$  nicht linear, sondern zeigt einen exponentiellen Verlauf. Zusätzlich zur Dämpfung leistet die erhöhte Steifigkeit zu Beginn der Schwingung einen Beitrag zu der hohen Energiedissipation in den ersten Perioden. Dieser Sachverhalt geht in Gl.(6.8) über die Kreisfrequenz ein, die zu Beginn aufgrund der kürzeren Periodendauern höher ist. Die kürzere Periodendauer kann nur über eine höhere Steifigkeit verursacht werden.

In Abb. 6.17 ist die Energiedissipation auf der y-Achse logarithmisch angetragen. Anhand des linearen Verlaufs der Modellberechnung wird deutlich, dass die Parameter- und Vektorberechnung in den Skripten korrekt ausgeführt wird. Die Energiedissipation folgt dem Zusammenhang nach Gl.(6.4) und ist daher in der logarithmischen Darstellung linear.

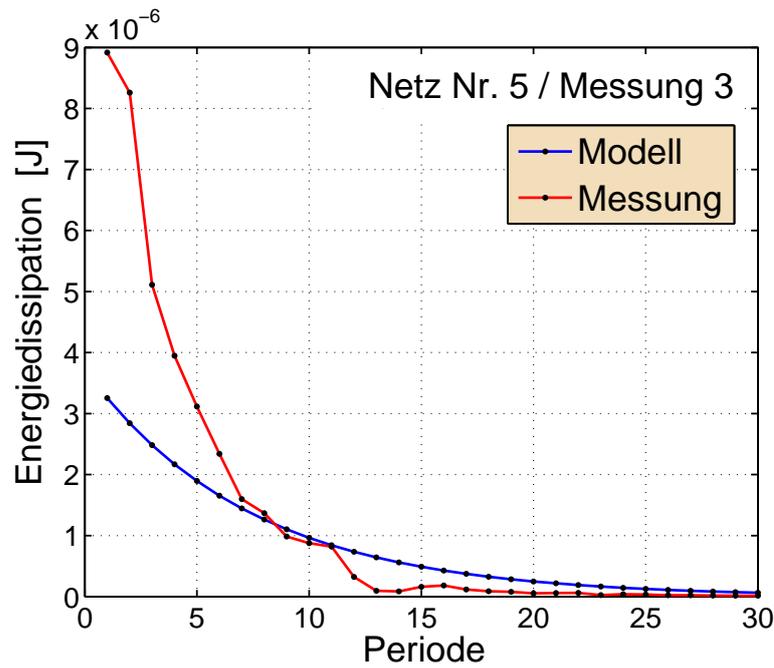


Abb. 6.16: Energiedissipation des Netzes im Vergleich

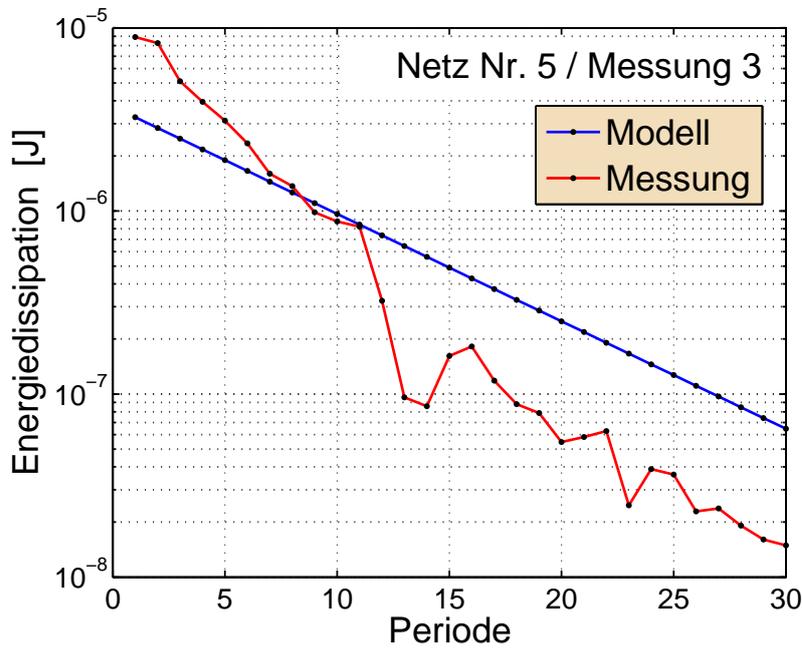


Abb. 6.17: Logarithmische Energiedissipation des Netzes im Vergleich

Hervorzuheben ist besonders die Energiedissipation der ersten Perioden. Im gezeigten Beispiel ist die Energiedissipation der ersten fünf Perioden mehr als doppelt so groß wie die des linearen Modells. Aufgrund des Messbereiches ist es nicht möglich die Energiedissipation bei

höheren Geschwindigkeiten zu untersuchen. Bei Betrachtung des eindeutigen Verlaufes in Abb. 6.16 ist anhand einer Extrapolation abzuschätzen, dass bei einer Erhöhung der kinetischen Energie die Energiedissipation des Netzes weiter exponentiell zunimmt. Die Energien und Geschwindigkeiten, mit denen die Beutetiere in der Natur auf das Netz treffen, liegen um ein Vielfaches über den durchgeführten Messungen. [Dettner und Peters 2003] In diesen Bereichen ist eine relativ große Energiedissipation zu erwarten, wie die Berechnungen und Extrapolationen zeigen.



## KAPITEL 7

---

# Diskussion der Ergebnisse und Erweiterung des Modells

---

Die gewonnenen Ergebnisse der Messungen und Berechnungen erfordern eine ausführliche Erläuterung und Diskussion. Aufgrund der Vielzahl an Parametern und des komplexen Systems wird nachfolgend detailliert auf die Beobachtungen eingegangen. Theorien und Modellerweiterungen werden erläutert.

## 7.1 Nicht konstante Periodendauer

### 7.1.1 Das vollständige Netz

Zur Verifikation der Ergebnisse sind die nachfolgenden Abbildungen und Berechnungsergebnisse im Anhang anhand verschiedener Netze aufgezeigt. Die Messungen wurden mit dem Vibrometer Ometron VH1000-D und dem Laser-Interferometer-Set Brüel & Kjær Typ 3544 durchgeführt. Die Messungen des Laser-Interferometer-Sets Brüel & Kjær Typ 3544 erlauben die Untersuchung höherer kinetischer Energien, Verschiebungen und Geschwindigkeiten, da es einen höheren Messbereich besitzt. Diese Messungen zeigen daher markanter die diskutierten Ergebnisse. Die Messungen des Vibrometers hingegen zeigen aufgrund einer

größeren, zulässigen Störung der Reflexion qualitativ bessere Messergebnisse. Der Vergleich im Anhang zeigt die Reproduzierbarkeit bei unterschiedlicher Netzdimension und Messausrüstung.

Bei der Periodendauer der Schwingung zeigt sich an allen durchgeführten Messungen, dass die Periodendauer nicht konstant ist, sondern sich über dem Verlauf der Schwingung ändert. Ein Beispiel ist in Abb. 7.1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Periodendauer zu Beginn kleiner ist und im Verlauf der Schwingung ansteigt. In der Abbildung ist ebenfalls die Interpolation mit einer e-Funktion eingetragen. Es wird deutlich, dass die Periodendauer gegen einen konstanten Wert strebt.

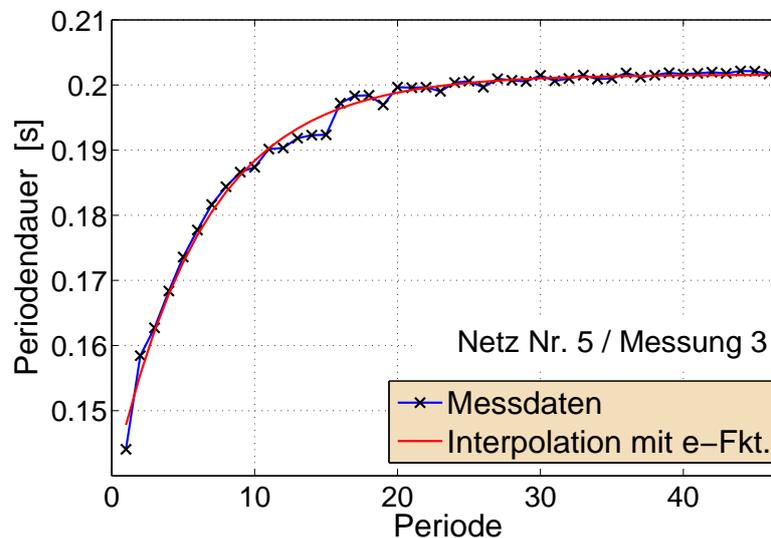


Abb. 7.1: Änderung der Periodendauer in Abhängigkeit der Periode

Das in Kap. 4.1 erläuterte Modell beschreibt eine konventionelle, gedämpfte Schwingung. Dabei ist die Periodendauer konstant. Um die Ursache der geringeren Periodendauer zu lokalisieren, werden die Gleichungen in Kap. 3.1.1 umgestellt und ein Ausdruck für die Periodendauer in Abhängigkeit der Modellparameter aufgestellt.

$$T_{netz} = 2\pi \left( \frac{c}{m} - \frac{d^2}{4m^2} \right)^{-0,5} \quad (7.1)$$

Anhand von Gl.(7.1) wird deutlich, dass die Periode von drei Modellparametern abhängig ist. Der Masse  $m$ , der Dämpfung  $d$  und der Steifigkeit  $c$ . Die Masse  $m$  ist konstant und variiert nicht während der freien Schwingung. Die Dämpfung  $d$  ist zwar abhängig von der Periode bzw. der Geschwindigkeit der Schwingung, wie unter anderem in den Abb. 6.6, 6.7 und 6.8 gezeigt, kann jedoch nicht für die kürzere Periodendauer zu Beginn verantwortlich

sein. Wie an Gl.(7.1) zu erkennen ist, ist für eine Verkürzung der Periodendauer eine Reduzierung der Dämpfung erforderlich. Der Verlauf der Dämpfung ist aber, wie gezeigt wurde, zu Beginn der Schwingung größer, was zu einer Verlängerung der Periodendauer führen sollte.

Es verbleibt somit nur der Parameter der Steifigkeit  $c$ , dem die Ursache für die verkürzte Periodendauer zu Beginn der Schwingung zugeschrieben werden kann. Die Ursache dafür kann wiederum nicht eindeutig bzw. vollständig einer Eigenschaft zugewiesen werden.

Der Parameter der Steifigkeit  $c$  ist, wie in Kap. 4.1.2 erläutert, abhängig von der Dehnung und Dehnrate, da die Spinnenseide viskoelastische Eigenschaften zeigt. Gleichzeitig spielt die Geometrie des Netzes eine Rolle. Die Eigenschaften des Netzes sind mit steigender Verschiebung nicht konstant. Es gibt mehrere Möglichkeiten die steigende Steifigkeit zu begründen. Die Wirkung kann aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften allein den Radialfäden zugeschrieben werden. Außerdem kann der Beitrag der Spiralen an der Dämpfung und Steifigkeit betrachtet werden. Dieser steigt mit zunehmender Verschiebung. Der Beitrag der Spiralen tritt dabei theoretisch erst bei relativ großer Verschiebung auf. Zum einen, da das E-Modul der *Flagelli*-Seide zu Beginn der Dehnung relativ gering ist (siehe Abb. 2.3). Zum anderen, da aufgrund der geometrischen Spiralanordnung der *Flagelli*-Seide, deren Effekt erst mit steigender Verschiebung einen relevanten Beitrag zu den Eigenschaften des Netzes liefert.

Welche der beiden Seidenarten bzw. ob die Geometrie den entscheidenden Beitrag zum Anstieg der Steifigkeit verursacht, kann an den Messungen des Gesamtnetzes nicht bestimmt werden. Es kann aber die These aufgestellt werden, dass sowohl Radial- und Spiralfäden, als auch die Geometrie einen Anteil haben.

Um die Änderung der Steifigkeit im Verlauf der Schwingung zu berechnen wird Gl.(7.1) umgestellt. Es wird ein Zusammenhang zur Berechnung der Steifigkeit mit den ermittelten Kennwerten der Dämpfung  $d$  und Schwingungsperiode  $T$  gebildet. Der Zusammenhang lautet:

$$c = \left( \frac{4\pi^2}{T_{netz}^2} + \frac{d^2}{4m^2} \right) m \quad (7.2)$$

Unter Verwendung der Daten, wie in den Abb. 7.1 und 6.6 beispielhaft gezeigt, erhält man die theoretische Steifigkeit in Abhängigkeit der Periodennummer. Wie zuvor bei der Dämpfung und Periodendauer, wird auch die Steifigkeit elementweise in einem Vektor berechnet. Die Vorgehensweise zur Berechnung ist in Abb. 7.2 gezeigt.

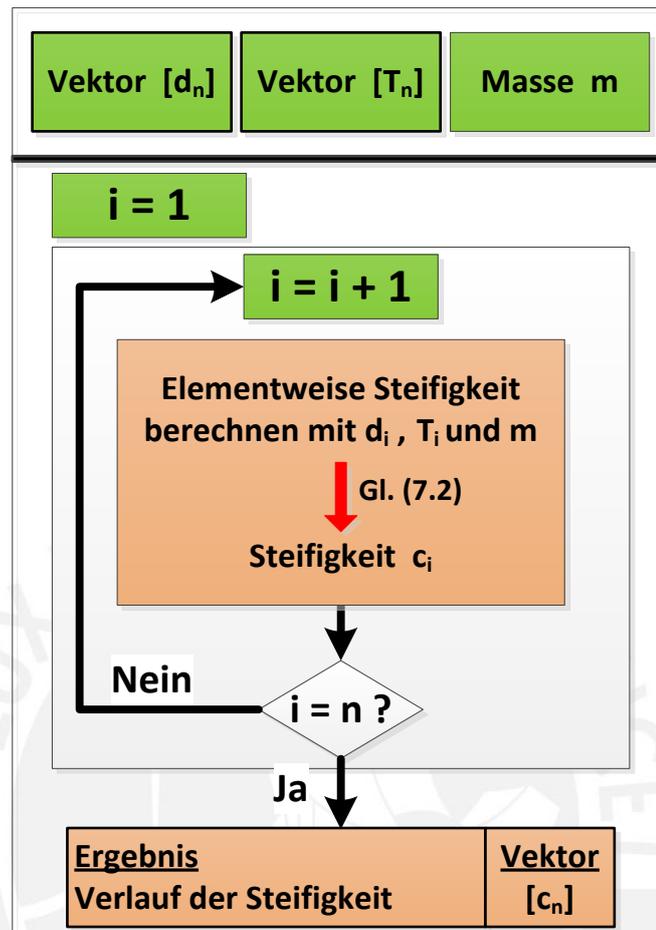


Abb. 7.2: Elementweise Berechnung der Steifigkeit

Somit wird die Änderung der Steifigkeit ebenfalls als dynamischer Parameter in Abhängigkeit der Periode beschrieben und systematische Änderungen der Steifigkeit werden deutlich. Ein Ergebnis dieser Berechnung ist in Abb. 7.3 dargestellt.

Wie anhand der vorherigen Diskussion zu erwarten war, liegt die Steifigkeit zu Beginn weit über dem erwarteten Mittelwert. Bei Steigerung der kinetischen Energie bzw. der Verschiebung/Geschwindigkeit der Schwingung, nimmt die analytisch berechnete Steifigkeit ebenfalls zu. In Abb. 7.4 sind die Berechnungsergebnisse der Messungen gezeigt, die in einem größeren Messbereich aufgenommen wurden. In dieser Messung ist die theoretische Steifigkeit in der ersten Periode mehr als doppelt so groß, als der konstante Wert.

Es wird die These aufgestellt, dass der Anstieg der Steifigkeit des Netzes bis zum Erreichen der Elastizitätsgrenze einer Extrapolation der Kennlinie folgt. Für eine Extrapolation der Steifigkeit des Netzes wird die Elastizitätsgrenze, wie sie in Kap. 5.3 berechnet wurde, verwendet. Das Ergebnis der Extrapolation im Elastizitätsbereich ist in Abb. 7.5 zu sehen.

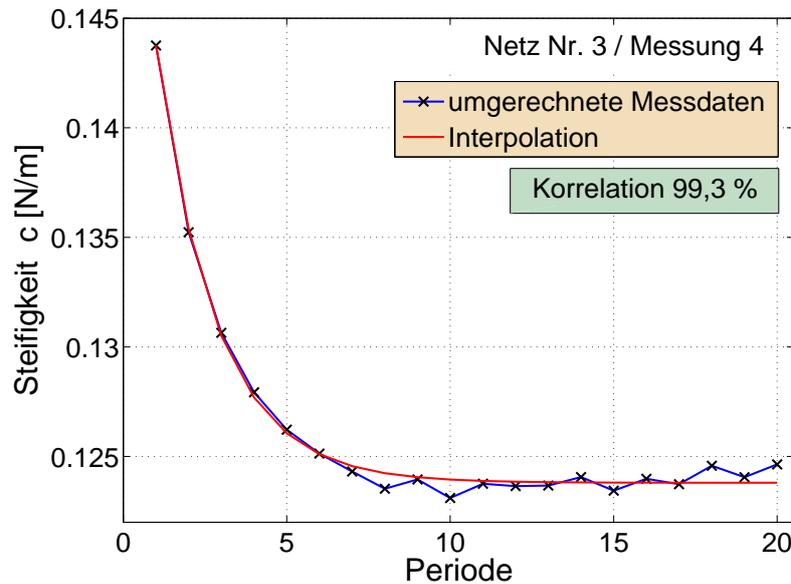


Abb. 7.3: Analytisch berechnete Steifigkeit in Abhängigkeit der Periode

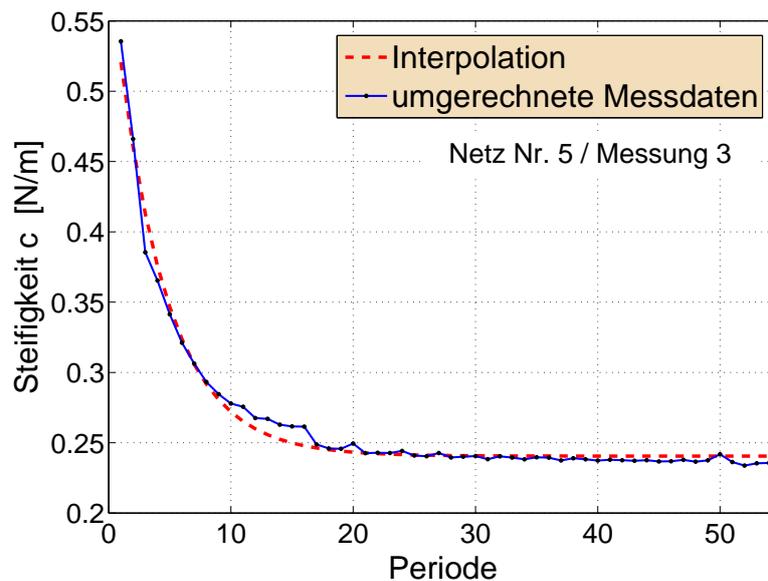


Abb. 7.4: Analytisch berechnete Steifigkeit bei Erhöhung der Verschiebung

Es wird deutlich, dass die Steifigkeit des Netzes zu Beginn der Schwingung um ein Vielfaches über dem konstanten Kennwert liegt. Sowohl die Messergebnisse als auch die daraus folgenden Extrapolationen unterstützen die These, dass beim Aufprall des Projektils, bzw. des Beutetieres, die Steifigkeit des Netzes um ein Vielfaches über dem konstanten Wert in Ruhelage liegt.

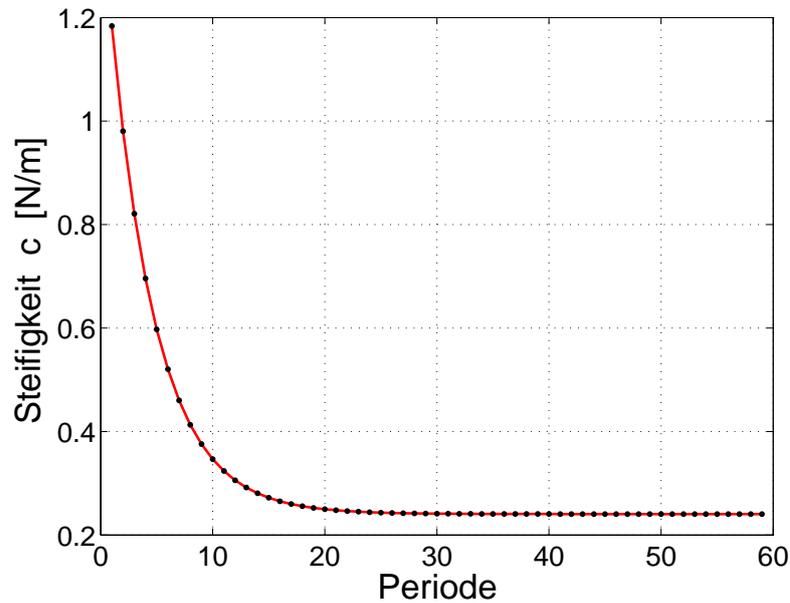


Abb. 7.5: Extrapolierte Steifigkeit im Elastizitätsbereich

Diese ganz besondere Eigenschaft des Netzes ermöglicht das Abfangen von Objekten mit hoher kinetischer Energie. Bei einer linearen Steifigkeit des Netzes würde der Aufprall das Netz zu stark dehnen. Das Netz würde über den Elastizitätsbereich hinaus beansprucht werden oder reißen. Die Dämpfung kann in diesem kurzen Zeitraum die hohe Energie nicht umwandeln. Die Lösung ist eine erhöhte Steifigkeit zu Beginn der Schwingung. Somit wird die Energie im Netz gespeichert ohne zu einer Überbeanspruchung zu führen und es steht ausreichend Zeit zur Verfügung, um die Energie in den verschiedenen Dämpfungsanteilen abzubauen.

Für eine genauere Untersuchung wird empfohlen, die Steifigkeit des Netzes in eine statische und eine dynamische Steifigkeit zu unterteilen. Die statische Steifigkeit ist die theoretische Steifigkeit des Netzes in Ruhelage. Sie wird bei einer kleinen Dehnung ( $u \rightarrow 0$ ) und einer kleinen Dehnrate ( $\dot{u} \rightarrow 0$ ) gemessen. Die dynamische Steifigkeit hingegen tritt bei einer Schwingung des Netzes auf und ist abhängig von Verschiebung, Geschwindigkeit und Beschleunigung. Sie nimmt in Abhängigkeit dieser Parameter exponentiell zu.

Eine Reihe möglicher Ursachen ist denkbar, warum das Netz diese erhöhte Steifigkeit nicht auch in seiner Ruhelage aufweist. Zum einen spielt die Geometrie des Netzes eine Rolle. Erst mit ansteigender Verschiebung werden die Spiralfäden gedehnt und leisten einen Beitrag zur Steifigkeit. Eine weitere mögliche Ursache sind die Materialeigenschaften der Spinnenseide. Wie in Kap. 2.3.1 erläutert, ist die Spinnenseide ein hochkomplexer Bio-Verbundwerkstoff. Die viskoelastischen Eigenschaften und dehnratenabhängige Bruchenergie des Materials

werden durch die spezielle Zusammensetzung der Seide erreicht. Eine mögliche These ist, dass die erhöhte Bruchenergie und Steifigkeit des Materials nur in einem kurzen Zeitraum aufrecht erhalten werden kann und daraufhin Ermüdungserscheinungen auftreten.

Somit zeigt das Material bei Aufprall eine erhöhte Steifigkeit. Nach kurzer Zeit ist die Energie soweit gedämpft, dass das Material seine Steifigkeit reduziert. Es kann die Steifigkeit nicht dauerhaft aufrechterhalten, und leistet die erhöhte Steifigkeit nur zum notwendigen Zeitpunkt.

Um die dehnratenabhängigen Eigenschaften der Seide zu untersuchen, wurden Zugversuche mit einzelnen Seiden durchgeführt. Die Messausrüstung war dabei auf eine maximale, definierte Geschwindigkeit von 5 mm/s beschränkt. An den Messergebnissen war zwar eine Abhängigkeit der Eigenschaften von der Dehnrate erkennbar, diese war aber nicht ausgeprägt genug, um Rückschlüsse auf Modellparameter zu ziehen. Es wird empfohlen Messungen bei höheren Dehnraten im Bereich der Aufprallgeschwindigkeit von Beutetieren durchzuführen. Die gezeigten Ergebnisse sind Beispiele von Messungen, die relativ kleine Streuungen zeigen. Aufgrund von äußeren Einflüssen kann es aber bei den Messungen zu höheren Streuungen kommen. Dabei zeigt besonders die Dämpfung starke Schwankungen. Aufgrund dieser Störungen zeigen nicht alle Messergebnisse den sehr guten qualitativen Verlauf aus Abb. 7.3 und 7.4. In Abb. 7.6 ist die Berechnung anhand einer Messung gezeigt, die größere Störungen aufzeigt. Der qualitative Verlauf kann aber weiterhin mit einer Interpolation deutlich gemacht werden.

Die relativ hohe Streuung der Berechnung wird verursacht durch die Streuung der berechneten Dämpfung, die in die Gleichung eingeht. Die Berechnung der Dämpfung streut unter anderem deshalb so stark, da zum einen die Messdaten an den Amplituden starkes Rauschen und Störungen zeigen können. Zum anderen, da die Amplituden der Schwingung relativ einfach durch äußere Einflüsse, wie beispielsweise Luftzüge, beeinflusst werden. Eine Lösung zur Verbesserung der Berechnung der theoretischen Steifigkeit ist es zuvor eine Interpolation der Dämpfung durchzuführen. Somit wird das Berechnungsergebnis verbessert und man erhält einen stetigen Verlauf der Steifigkeit  $c$ . Das Ergebnis der Dämpfungsinterpolation und Berechnung ist in Abb. 7.7 gezeigt.

Die Berechnung und Auswertung in Abb. 7.7 kann nur eine approximative Aussage über den Verlauf geben, da in dieser Berechnung die Kennwerte der Dämpfung  $d$  interpoliert sind, um die hohe Streuung der Messergebnisse zu kompensieren. Unter verbesserten Messbedingungen, wie beispielsweise ohne äußere Einflüsse und einer Messwerterfassung mit geringeren Störungen und Rauschen, werden diese Ergebnisse auch ohne Interpolation erreicht, wie in Abb. 7.3 demonstriert wurde.

Wiederholungsmessungen an einem Netz zeigen, dass die Werte der Periodendauer nicht

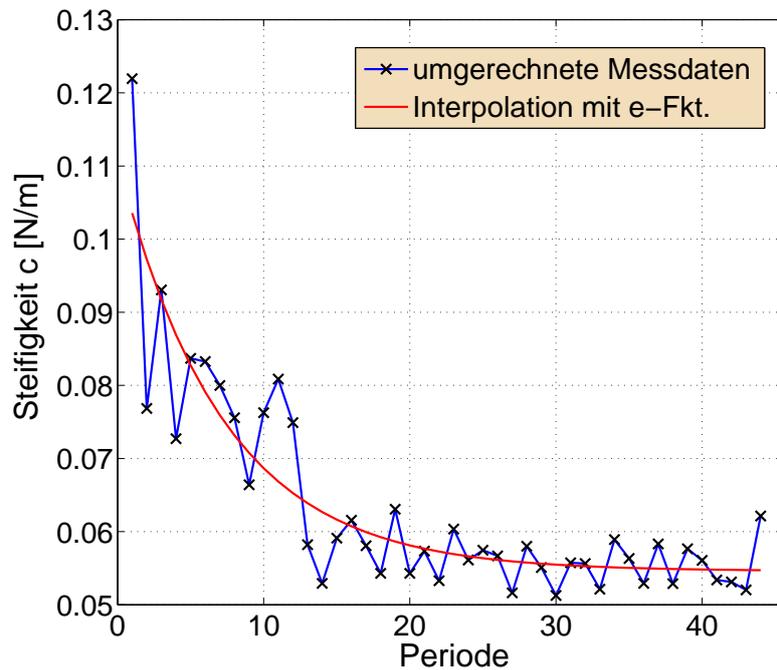


Abb. 7.6: Analytisch berechnete Steifigkeit bei starker Streuung der Dämpfung

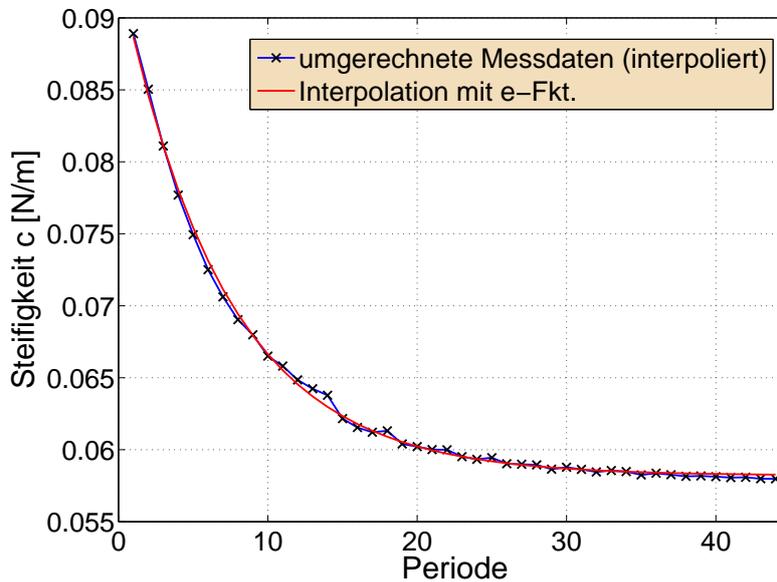


Abb. 7.7: Analytisch berechnete Steifigkeit anhand interpolierter Dämpfung

immer reproduzierbar sind. In Abb. 7.8 sind Ergebnisse von Wiederholmessungen zu sehen, die am gleichen Netz innerhalb kurzer Zeit durchgeführt wurden. In Abb. A.7 ist die Wiederholungsmessung eines weiteren Netzes dargestellt.

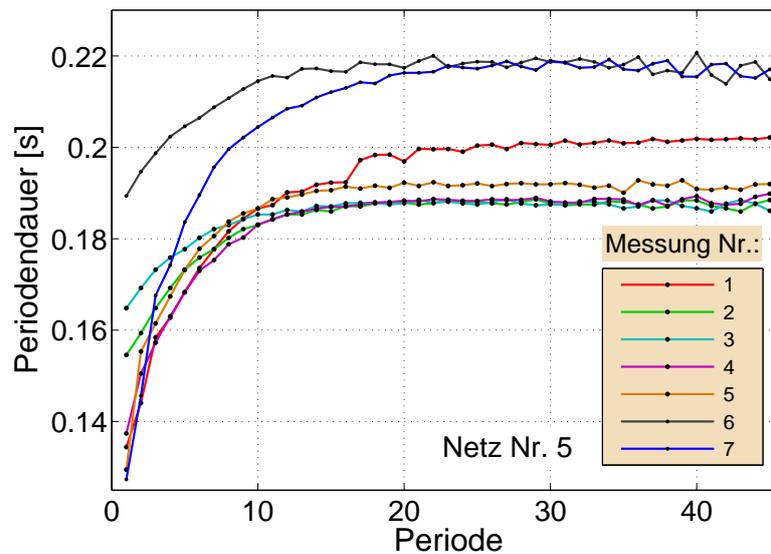


Abb. 7.8: Wiederholmessungen der Periodendauer bei Variation der kinetischen Energie

Die kinetische Energie des Stoßes wurde bei den Versuchen schrittweise erhöht. Es ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Anstieg der kinetischen Energie und der Variation der Periodendauer zu erkennen. Der qualitative Verlauf einer e-Funktion ist bei allen Messungen zu finden, jedoch variiert die Periodendauer der Messungen. Eine Reihe von Einflüssen ist denkbar, die die Varianz der Wiederholungen erklärt. Die Messungen unterliegen äußeren Einflüssen, wie beispielsweise Luftströmungen. Außerdem ist über den Versuchsaufbau nur die Aussage zu treffen, wie groß die kinetische Energie des Projektils beim Auftreffen auf das Netz ist. Es ist nicht möglich zu bestimmen, wie viel kinetische Energie vom Netz aufgenommen wird, und wie viel kinetische Energie im reflektierten Projektil verbleibt.

Herausstechend sind die beiden letzten Messungen Nr. 6 und Nr. 7, deren konstante Periodendauer relativ stark von den vorherigen Messungen abweicht. Es ist denkbar, dass bei diesen Messungen das Netz bereits durch die vorherigen Messungen beschädigt wurde, weshalb es in diesen Folgemessungen eine reduzierte Steifigkeit und somit erhöhte Periodendauer aufweist.

### 7.1.2 Die einzelne *Dragline*-Seide

Um die Ursache für die Änderung der Periodendauer und der Steifigkeit näher zu lokalisieren, werden Messungen von [Miranda 2011] analysiert. In diesen Messungen wurden Spinnen der Spinnenart *Argiope Argentata* die *Dragline*-Seide entnommen und zwei über

Kreuz gespannte Fäden in Schwingung versetzt. Die Messungen wurden zum Vergleich im Vakuum und unter Atmosphäre durchgeführt. Eine Auswertung der Dämpfung ist an diesen Daten nicht möglich, da die Messungen starke Störungen zeigen und der Verlauf nicht eindeutig ist. Daher konnte nur die Periodendauer analysiert werden. Da diese Messdaten eine relativ niedrige Abtastfrequenz haben, wurde mithilfe einer Spline-Interpolation die Auflösung der Messung um den Faktor zehn erhöht. Somit werden genauere Ergebnisse bei der Nullstellenbestimmung erzielt. Die weitere Berechnung der Periodendauer erfolgt mit dem gleichen Algorithmus, der auch zur Auswertung der Netze verwendet wird.

In Abb. 7.9 ist die Periodendauer der *Dragline*-Seide bei Schwingungsversuchen im Vakuum dargestellt.

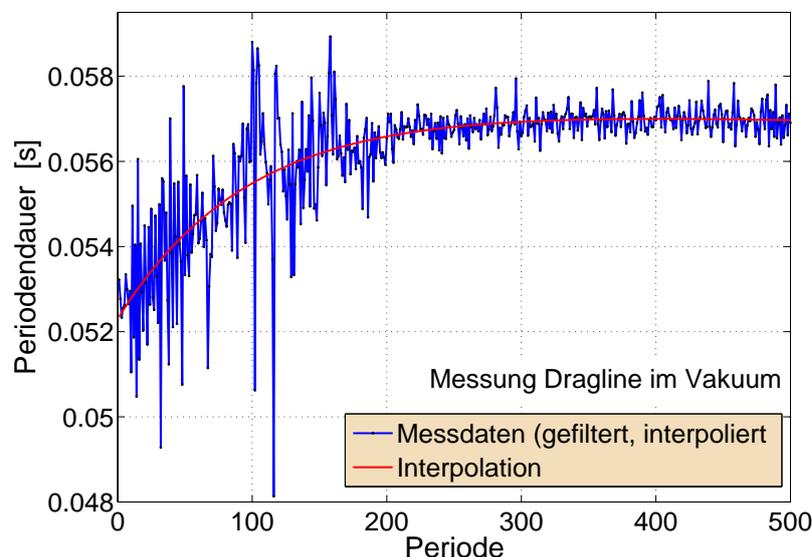


Abb. 7.9: Periodendauer *Dragline*-Seide im Vakuum

Trotz der Störungen ist, insbesondere anhand der Interpolation, zu erkennen, dass die Periodendauer zu Beginn ebenfalls niedriger ist und im Verlauf der Schwingung gegen einen konstanten Wert strebt. Da bei dieser Messung weder die charakteristische Geometrie des gesamten Netzes vorhanden ist, noch der Einfluss der Atmosphäre, handelt es sich bei dieser Eigenschaft um eine Folge der besonderen Materialeigenschaften.

Bei der gleichen Messung in Atmosphäre liefert die Berechnung der Periodendauern die Ergebnisse in Abb. 7.10.

Es ist zu erkennen, dass die Periodendauer abnimmt, anstatt wie zuvor anzusteigen. Die Ursache dafür kann in den Zusammenhängen die Gl.(7.1) beschreibt, gesucht werden. Daran ist zu erkennen, dass eine höhere Dämpfung zu einer Verlängerung der Periode führt. Daher kann als Ursache für die längere Periodendauer der Messungen in Atmosphäre angenommen

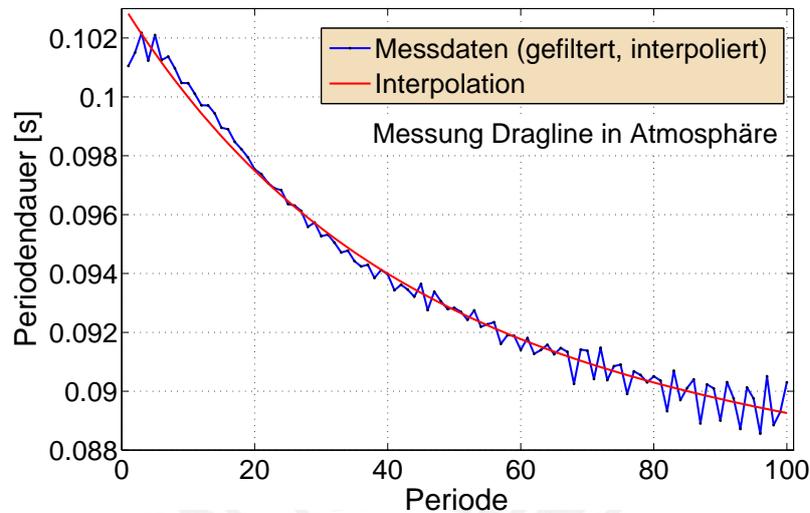


Abb. 7.10: Periodendauer *Dragline*-Seide in Atmosphäre

werden, dass die atmosphärische Dämpfung überwiegt und daher die Periodendauer zu Beginn länger ist. In Abb. 7.9 hingegen wirkt die relativ starke atmosphärische Dämpfung nicht und die besonderen Materialeigenschaften führen zu der Verkürzung der Periodendauer zu Beginn der Schwingung. Außerdem unterscheiden sich in den beiden Messungen die Periodendauern stark. Die Ursache dafür ist wahrscheinlich eine unterschiedliche Vorspannung der Seidenproben im Versuch. Daher kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass u.U. die unterschiedliche Spannung der Seiden zu dem unterschiedlichen, dynamischen Verhalten führt.

Daran wird noch einmal deutlich, dass sich bei den dynamischen Eigenschaften der Spinnenseide und des vollständigen Netzes eine Reihe verschiedener Parameter überlagern. Diese Überlagerung und die Summe von verschiedenen Einflussfaktoren kann nicht ohne Weiteres extrapoliert werden. Weitere Untersuchungen, die die Parameter und Bestandteile einzeln untersuchen, sind notwendig. Dies ist der Hauptgrund warum die Berechnungsergebnisse als Funktion der Periodennummer dargestellt werden. Eine Darstellung in Abhängigkeit von Verschiebung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung wäre rein spekulativ.

### 7.1.3 Überschwingung der Amplitude

Eine weitere Besonderheit, die die These der erhöhten Steifigkeit beim Aufprall des Objektes untermauert, kann an den Messungen erkannt werden.

Die Verschiebung der ersten Amplitude erreicht nicht die theoretische Verschiebung die vom ursprünglichen, linearen Modell oder vom verbesserten Modell berechnet wird. Die Verschiebung ist wesentlich kleiner. Das allein stellt noch keine Auffälligkeit dar. Differenzen in der Berechnung der theoretischen Erregerkraft oder der Steifigkeit wären denkbar. Jedoch sind die nachfolgenden Amplituden höher als die erste Schwingung. Es ist nicht möglich, dass die Energie der Schwingung nach dem Stoß in dieser Größenordnung systematisch durch äußere Einflüsse zugenommen hat.

In Abb. 7.11 ist der erläuterte Sachverhalt anhand einer Messung beispielhaft dargestellt.

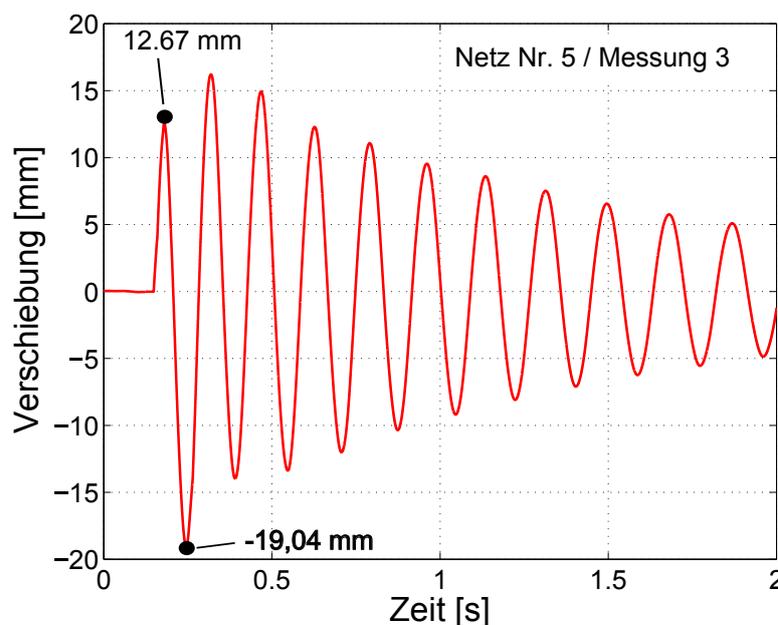


Abb. 7.11: Überschwingung der Amplitude

Bei Aufprall des Projektils wird das Netz um 12,7 mm ausgelenkt. Die darauffolgende, entgegen gesetzte Schwingungsamplitude beträgt 19 mm. Dies deutet daraufhin, dass die Steifigkeit des Netzes in der ersten Schwingungsamplitude höher ist, als in der nachfolgenden Schwingungsamplitude. Aufgrund der dynamischen Steifigkeit liegt die Gesamtsteifigkeit des Netzes während des Aufpralls über der statischen Steifigkeit des Netzes.

Aus diesem Sachverhalt lässt sich eine weitere Information ableiten. Die dynamische Steifigkeit ist nicht, bzw. nur zu einem kleinen Anteil, abhängig von der Verschiebung. Trotz der geringeren Verschiebung in der ersten Auslenkung, ist die dynamische Steifigkeit höher. Nur

so kann die höhere Energie in einer kleineren Schwingungsamplitude gespeichert werden. Das lässt darauf schließen, dass die dynamische Steifigkeit des Netzes von den Parametern Geschwindigkeit und Beschleunigung bestimmt wird. Dies ist ein Sachverhalt, der sich bei den Materialeigenschaften in der erhöhten Bruchenergie bei höheren Dehnraten widerspiegelt.

Trotz der wiederholten Messung dieser Eigenschaft, kann ein Messfehler der Interferometer anhand der Daten nicht vollständig ausgeschlossen werden. Es ist möglich, dass der gezeigte Sachverhalt das Ergebnis einer fehlerhaften Datenauswertung des Analysators beim Aufprall des Projektils ist. Auf eine Möglichkeit zur Überprüfung wird im Ausblick eingegangen.

## 7.2 Die Interpretation der SRS-Analyse

Das berechnete SRS kann in seiner Form für eine Reihe von Interpretationen und Entwicklungen verwendet werden. Die standardisierte Darstellung der resultierenden Beschleunigung über der Eigenfrequenz kann umgerechnet werden, um eine Reihe von Kennwerten zu ermitteln.

Die Beschleunigung kann bei bekannter Masse der belasteten Bauteile in resultierende Kräfte umgerechnet werden, die während der Schwingung das Bauteil belasten. Weitere Anwendungen und Darstellungen sind möglich. So kann die y-Achse in weiteren Schritten in die resultierende Verformung des Bauteils umgerechnet werden. Die resultierende Verformung wiederum kann normiert werden mit der zulässigen oder je nach Anwendung gewünschten Verformung. So wird anschaulich dargestellt, bei welchen Eigenfrequenzen das Bauteil die markanten Verschiebungen erreicht.

Das SRS kann außerdem verwendet werden, um die Entwicklung in eine andere Richtung einzuschlagen. An der x-Achse kann erkannt werden, welche Eigenfrequenzen des Systems kritisch sind. Diese Eigenfrequenzen können gezielt beeinflusst werden. Dabei ist es denkbar, Eigenfrequenzen zu vermeiden, oder gezielt bestimmte Eigenfrequenzen anzustreben.

Um die Vorteile und Unterschiede der SRS-Analyse näher zu verdeutlichen, wird zum Vergleich eine diskrete Fourier-Transformation der Messergebnisse durchgeführt. Das Skript *FFM.m* berechnet anhand der Verschiebung mit dem FFT-Algorithmus von *Matlab* das Fourier-Spektrum. Die Ergebnisse des Fourier-Spektrums anhand von Messergebnissen und den Modellberechnungen des linearen Modells sind in Abb. 7.12 gezeigt.

Erwartungsgemäß liegt das Maximum der FFT-Analyse bei der Eigenfrequenz mit welcher das Netz bei niedrigeren Amplituden schwingt bzw. an der Eigenfrequenz der linearen Mo-

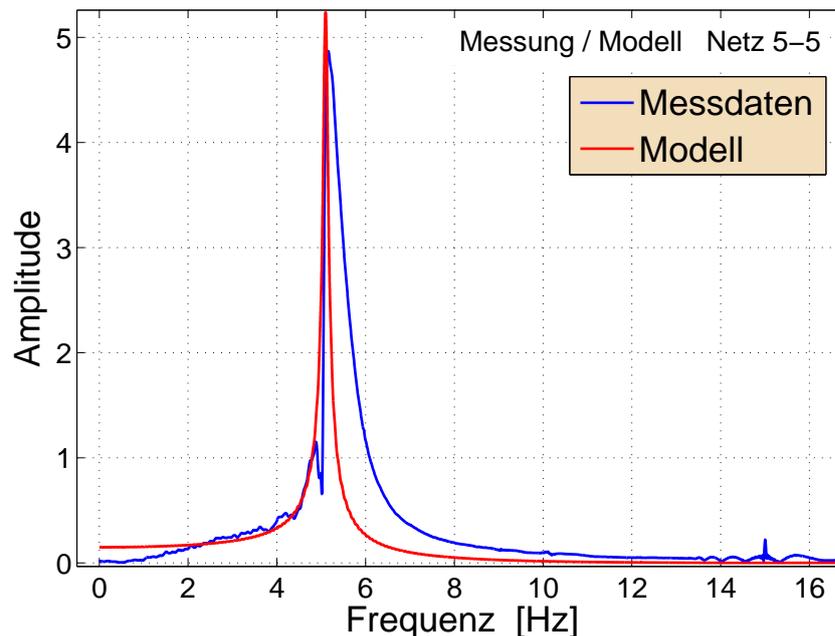


Abb. 7.12: FFT-Analyse im Vergleich zwischen linearem Modell und Messung

dellsimulation. Die Änderung der Periodendauer im Verlauf der gemessenen Schwingung zeigt sich bei den Messdaten durch ein breiteres Maximum. Im Vergleich zum SRS in Abb. 6.14 werden die Vorteile des SRS deutlich.

Die FFT-Analyse liefert eine Aussage über die Eigenfrequenz der Schwingung und deren Intensität. Daraus lassen sich aber keine direkten Aussagen über Bauteilbelastungen oder Konstruktionsänderungen treffen. Alleine die Aussage, dass das System eine Resonanz an dieser Stelle aufweist, kann getroffen werden.

Aussagen über die Belastung an den Stellen der Eigenfrequenz oder im restlichen Frequenzbereich können nicht getroffen werden.

Das SRS liefert hingegen nicht nur eine Information über die Eigenfrequenzen des Systems. An den lokalen Maxima können die Eigenfrequenzen des Systems abgelesen werden. Zudem bietet das SRS eine Aussage über die resultierenden Beanspruchungen, nicht nur an den Stellen der Resonanzfrequenzen, sondern über dem gesamten Frequenzbereich. Das SRS kann somit für eine gezieltere Entwicklung und Konstruktion genutzt werden. Am gezeigten Beispiel lässt sich erkennen, dass die untersuchte Schwingung zwar ein lokales Maximum an der Stelle ihrer Eigenfrequenz besitzt, die maximale Belastung aber an einer anderen Stelle auftritt. Dabei kann die kritischere Frequenz sowohl unterhalb als auch oberhalb der Resonanzfrequenzen liegen. Die Folge kann sein, dass bei der Vermeidung der Resonanzfrequenzen durch konstruktive Änderung der Eigenfrequenz des Systems, kritischere

Eigenfrequenzen umgesetzt werden.

Daher ist besonders bei komplexeren, nicht harmonischen Schwingungen das SRS eine Möglichkeit, um eine aussagekräftige Analyse zu machen, die dem Ingenieur direkte Informationen für seine Konstruktion liefert.

Transiente Elemente der Schwingung gehen in der FFT-Analyse nahezu vollständig verloren. Als Beispiel kann an den Messergebnissen die starke transiente Beschleunigung zu Beginn der Schwingung betrachtet werden. In der SRS-Analyse führt sie zu einem Maximum oberhalb der Eigenfrequenz der Schwingung. In der FFT-Analyse geht ihr Schadenspotential vollständig unter.



## 7.3 Erweitertes und verbessertes Modell

In den vorherigen Kapiteln wurde deutlich, dass das bisherige Modell nicht ausreichend ist, um die Besonderheiten des Netzes abzubilden. Diese Besonderheiten sind die nicht konstante Periodendauer aufgrund einer nicht konstanten Steifigkeit und die nicht konstante Dämpfung der Schwingung. Um ein tieferes Verständnis für die detaillierte Zusammenwirkung der Material- und Geometrieigenschaften zu gewinnen, ist es erforderlich das Modell zu erweitern. Ziel muss es sein die speziellen Eigenschaften zu verstehen und die Ursache ihrer evolutionären Entwicklung.

Die Modellerweiterung sollte folgende Punkte beinhalten, die im Rahmen der Untersuchungen ausgemacht wurden:

- dynamische Dämpfung
- dynamische Steifigkeit
- Geometrische Nichtlinearität

### 7.3.1 Dynamische Parameter

Die Ermittlung der dynamischen Parameter ist aufgrund der sehr feinen und empfindlichen Struktur des Netzes und der Vielzahl der Variablen nicht direkt möglich. Für das Erweitern des Modells werden die Parameter mit den vorhandenen Messdaten interpoliert. Die Bestimmung der Modellparameter erfolgt periodenweise, das bedeutet es ist kein kontinuierlicher Parameterverlauf vorhanden. Eine Interpolation ist erforderlich, um die Parameter für das Modell zu ermitteln. In weiteren Arbeiten können die Informationen über die Parameter erweitert und in einzelnen Messreihen genauer festgelegt werden.

#### Dynamische Dämpfung

Die dynamische Dämpfung ist eine Funktion in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und Verschiebung des Netzes. Dies wird durch die besonderen Materialeigenschaften, die Fluiddämpfung an der Atmosphäre und die Geometrie des Netzes verursacht. Da aus den vorhandenen Messdaten nicht ausreichend Informationen vorhanden sind, um diese Abhängigkeiten getrennt voneinander zu beschreiben und zu berechnen, wird nachfolgend die Dämpfung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit beschrieben. Es wird angenommen, dass die Fluiddämpfung den überwiegenden Anteil der Gesamtdämpfung ausmacht und daher die Funktion

der Dämpfung von der Geschwindigkeit dominiert wird. Messungen von [Miranda 2011] an Einzelfäden im Vakuum zeigen die sehr geringe Eigendämpfung des Materials. Hingegen zeigen Untersuchungen und Modellsimulationen von [Lin et al. 1995], dass die Fluiddämpfung des Netzes an der Atmosphäre der entscheidende Faktor für die Dämpfung des Netzes ist. Die Spiralfäden leisten dabei den Großteil an der Dämpfung. In der beschriebenen Arbeit wurden dazu Messungen mit und ohne Spiralfäden durchgeführt.

An den Messungen der Schwingungen sind die Dämpfungen einer gesamten Schwingungsperiode ermittelt worden. Zusätzlich wird die maximale Geschwindigkeit der jeweiligen Schwingungsperiode berechnet. Ergebnis ist die Darstellung der Dämpfung in Abhängigkeit der maximalen Periodengeschwindigkeit, wie in Abb. 7.13 beispielhaft gezeigt wird.

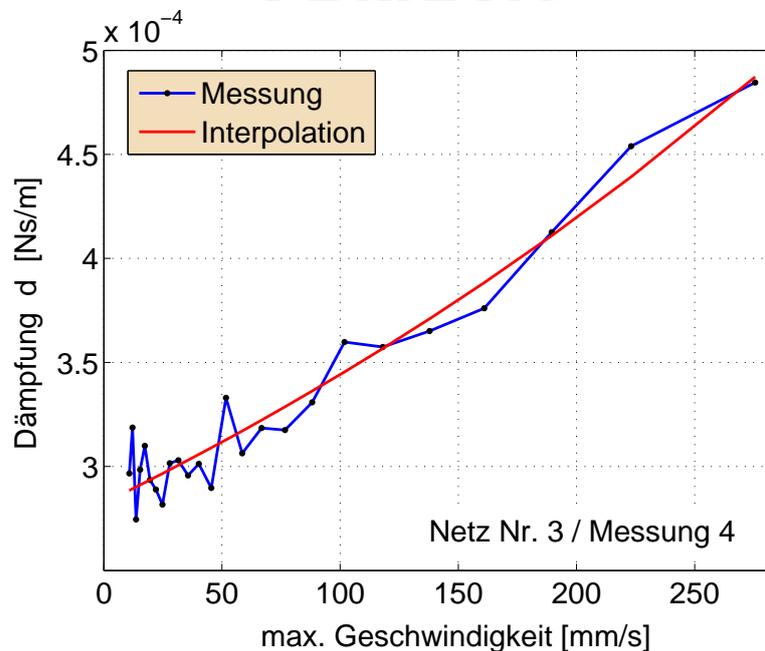


Abb. 7.13: Dämpfung in Abh. der maximalen Periodengeschwindigkeit

In der Abbildung ist außerdem eine Interpolation mit einer e-Fkt. angetragen. Der Verlauf der ausgewerteten Messwerte zeigt natürlich eine Streuung. Ursache davon sind äußere Einflüsse in Form von Luftströmungen, die Unsicherheit der interferometrischen Messtechnik, deren Signal geglättet und bearbeitet wird und schlussendlich die Bestimmung der Dämpfung und Geschwindigkeit im Auswertungsskript. Außerdem ist zu erkennen, dass die Werte im untersuchten Messbereich relativ klein sind. Störungen und Abweichungen wirken sich daher proportional stärker auf die Ergebnisse aus.

Mit den ausgewerteten Daten ist aber nur eine diskontinuierliche Aussage über den Dämpfungsverlauf gegeben. Es sind die durchschnittliche Dämpfung und die maximale Geschwindigkeit der betrachteten Periode ermittelt. Zur Interpolation der Dämpfung in Abhängigkeit

der Geschwindigkeit wird ein Effektivwert der Geschwindigkeit berechnet. Die Geschwindigkeit hat einen Sinusförmigen Verlauf. Das Amplitudenmaximum wird entsprechend der RMS-Methode (Root Mean Square) zur Berechnung von Effektivwerten umgerechnet mit:

$$v_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{max}^2 \sin^2(\omega_a t) dt} \quad (7.3)$$

Das Ergebnis ist der bekannte Zusammenhang zur Berechnung des Effektivwertes eines Parameters mit Sinus-Verlauf:

$$v_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} v_{max} \quad (7.4)$$

Mithilfe des Effektivwertes wird die maximale Geschwindigkeit, zur kontinuierlichen Beschreibung der Dämpfung, in einen Effektivwert umgerechnet. Der berechnete Zusammenhang ist in Abb. 7.14 dargestellt.

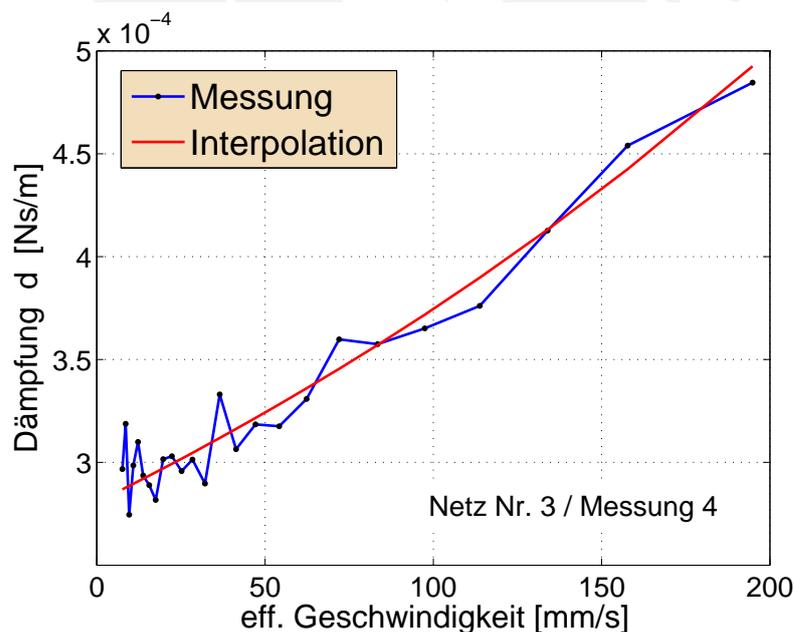


Abb. 7.14: Kontinuierliche Dämpfung in Abh. der effektiven Periodengeschwindigkeit

Es wird betont, dass dieses Ergebnis eine Interpolation darstellt, um die dynamische Simulation definieren zu können. Es kann nur von einer Approximation des Zusammenhangs zwischen Dämpfung und Geschwindigkeit gesprochen werden.

### Dynamische Steifigkeit

Ähnlich zu der Dämpfung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, wird die Steifigkeit in Abhängigkeit der Verschiebung berechnet. Wie in Kap. 7.1 erläutert, deutet die nicht konstante Periodendauer auf eine nicht konstante Steifigkeit des Netzes hin. Das Netz besitzt eine dynamische Steifigkeit in Abhängigkeit von Verschiebung, Geschwindigkeit und Beschleunigung. In Kap. 7.1.3 wurde anhand der Überschwingung der aufeinanderfolgenden Amplituden die These formuliert, dass die dynamische Steifigkeit eine Funktion ist, die von den Parametern Geschwindigkeit und Beschleunigung dominiert wird.

Im Laufe der Simulation des erweiterten Modells zeigte sich jedoch, dass die dynamische Steifigkeit alleine als Funktion der Geschwindigkeit, die Messergebnisse nicht vollständig beschreibt. Da die Funktionsparameter der dynamischen Steifigkeit anhand der vorhandenen Messdaten nicht voneinander getrennt werden können, wurde in verschiedenen Simulationen die dynamische Steifigkeit als Funktion der Verschiebung und Geschwindigkeit untersucht. Trotz der zuvor aufgestellten These zeigte sich, dass die dynamische Steifigkeit als Funktion der Verschiebung bessere Simulationsergebnisse liefert. Daher wird die Steifigkeit als Funktion der Verschiebung in der Simulation beschrieben.

Für das untersuchte Netz ergibt sich unter Verwendung von Gl.(7.2), in Abhängigkeit der jeweils maximalen Verschiebung der Periode, der Zusammenhang in Abb. 7.15.

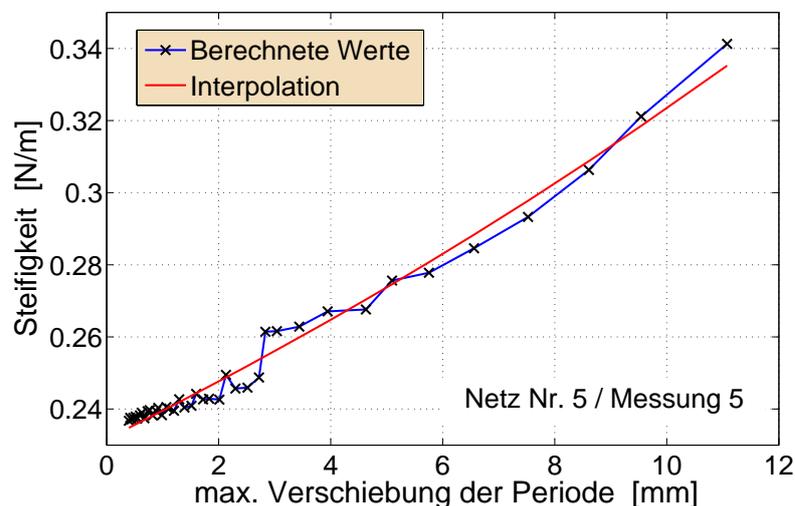


Abb. 7.15: Steifigkeit in Abh. der maximalen Periodenauslenkung

Die Umrechnung der Abhängigkeit Steifigkeit-Verschiebung nach der Vorgehensweise von Gl.(7.4) liefert den dynamischen Parameter der Steifigkeit für die Modellbildung (siehe Abb. 7.16).

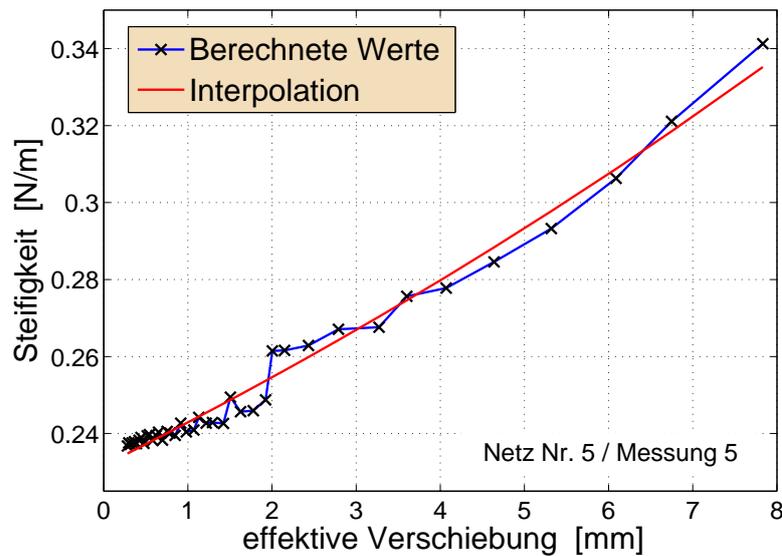


Abb. 7.16: Kontinuierliche Steifigkeit in Abh. der effektiven Verschiebung

### 7.3.2 Dynamisches Modell

Das erweiterte Modell wird in *Simulink*, einer grafischen Benutzeroberfläche von *Matlab* zur Erstellung komplexer, dynamischer Modelle in Blockschaltdiagrammen, erstellt. Das Programm nutzt die Algorithmen des Basisprogramms *Matlab* zur numerischen Lösung der Modelle. Mithilfe der grafischen Oberfläche ist es einfacher komplexere Modelle zu erstellen, zu modifizieren und Fehler in der Programmierung zu lokalisieren.

Die DGL des erweiterten Modells lautet:

$$m \ddot{u} + d_v(\dot{u}) \dot{u} + c_u(u) u = p(t) \quad (7.5)$$

Die geometrische Nichtlinearität des Modells ist bereits im berechneten dynamischen Faktor  $c_u$  enthalten. Eine Trennung des Faktors in die geometrische und viskoelastische, nicht-lineare Steifigkeit ist anhand der vorliegenden Messdaten nicht möglich.

In der nachfolgenden Tab.7.1 sind die berechneten und angepassten Interpolationsfunktionen aufgelistet, die berechnet bzw. zur Verwendung weiter angepasst wurden und im erweiterten Modell für Netz-Nr. 5 verwendet werden.

Die Modellierung der dynamischen Parameter erfolgt in Subsystemen. Die Verschiebung bzw. Geschwindigkeit sind die Funktionsparameter. Das Blockschaltdiagramm des Subsys-

Tab. 7.1: Berechnete, dynamische Parameter Netz. Nr. 5

<b>Dynamische Dämpfung</b>				
	Interpolationsfkt.	a	b	$R^2$
max. Periodengeschw.	$a \exp(bx)$	$0.1351 * 10^{-3} Ns/m$	5.709 s/m	98 %
eff. Geschwindigkeit	$a \exp(bx)$	$0.1351 * 10^{-3} Ns/m$	8.074 s/m	98 %
Maximalwert $0.45 * 10^{-3} Ns/m$				
<b>Dynamische Steifigkeit</b>				
	Interpolationsfkt.	a	b	$R^2$
max. Verschiebung	$a \exp(bx)$	0.2317 N/m	33.35 1/m	41 %
effektive Verschiebung	$a \exp(bx)$	0.2317 N/m	47.16 1/m	41 %
angepasst	$a \exp(bx)$	0.2317 N/m	37.21 1/m	-
Maximalwert 0.45 N/m				

tems *Dämpfung* ist in Abb. 7.17 dargestellt. Die Modellierung der dynamischen Steifigkeit erfolgt nach dem gleichen Schema mit der Verschiebung als Eingangsgröße.

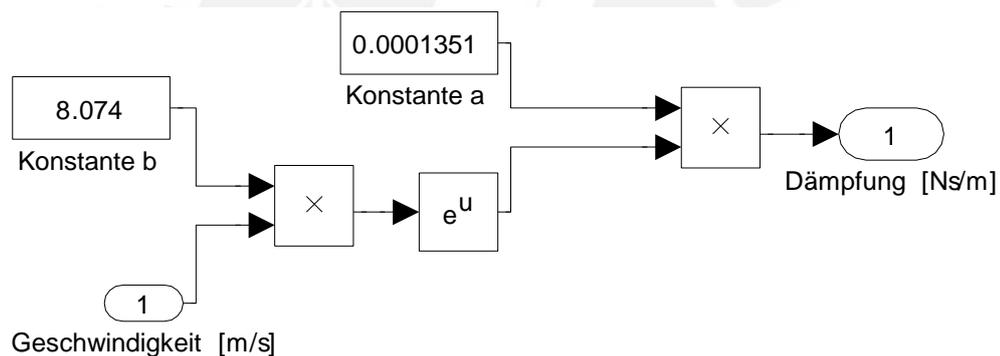


Abb. 7.17: Subsystem zur Berechnung der dynamischen Dämpfung

Weitere Details der Modellierung sind im digitalen Anhang dem vollständigen Blockschalt-  
diagramm zu entnehmen. Zum Zweck der Übersichtlichkeit wird auf eine Abbildung des  
gesamten Simulationsmodell an dieser Stelle verzichtet.

### 7.3.3 Ergebnisse des dynamischen Modells

Mit den berechneten Parametern wurde das verbesserte Modell erstellt. Es zeigte sich in  
den ersten Simulationen, dass die Berücksichtigung der geringen Asymmetrie des Netzes  
nahezu vernachlässigbar ist. Für die Simulation wurde die Erregerkraft angepasst, bis die  
erste maximale Amplitude der Simulation die maximale Amplitude der Versuchsergebnisse  
erreicht. Die Verwendung der theoretisch berechneten Erregerkraft ist nicht möglich, da

keine Aussage darüber zu treffen ist, wie viel kinetische Energie schlussendlich tatsächlich übertragen wird.

Für die Simulation ist es außerdem notwendig eine maximale Obergrenze der dynamischen Parameter im Modell zu definieren. Die Steifigkeit und die Dämpfung können in der Realität nicht unendlich exponentiell steigen, sondern erreichen einen Maximalwert, der bedingt ist durch die Geometrie- und Materialeigenschaften. Aufgrund des limitierten Messbereiches ist es nicht möglich die dynamischen Parameter bis zu ihrem Maximalwert in der dynamischen Schwingung zu messen. Die Maximalwerte wurden daher manuell angepasst, bis eine möglichst hohe Übereinstimmung zwischen Simulations- und Messergebnissen erreicht wurde. Die Maximalwerte der dynamischen Parameter sind ebenfalls in Tab. 7.1 zu finden. In Abb. 7.18 ist das Simulationsergebnis im Vergleich mit dem Messergebnis zu sehen. In diesem Simulationsergebnis ist die dynamische Dämpfung als Funktion der Geschwindigkeit und die dynamische Steifigkeit als Funktion der Verschiebung beschrieben.

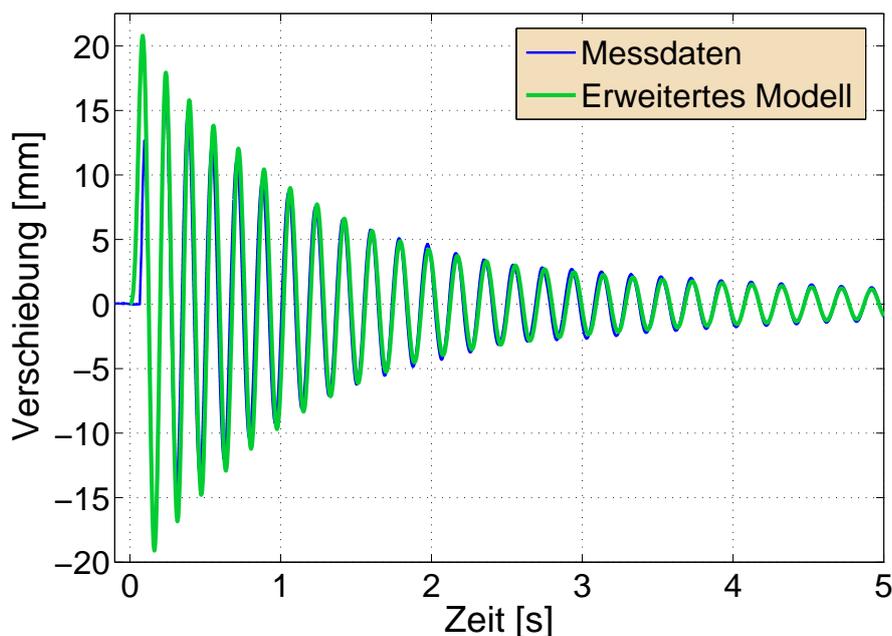


Abb. 7.18: Vergleich zwischen Messergebnis und verbessertem Modell

Am Vergleich zwischen dem Messergebnis und dem dynamischen Modell ist zu erkennen, dass eine sehr gute Übereinstimmung erreicht werden konnte. Die dynamische Dämpfung im Modell beschreibt die tatsächliche Messung sehr gut. Anders als im linearen Modell, siehe Abb. 6.11, wird die Dämpfung der Amplituden sehr exakt beschrieben. Dies ist nicht nur ein Anzeichen dafür, dass die Modellbeschreibung zutreffend ist, sondern auch, dass die Berechnung der dynamischen Dämpfung in Kap. 7.3.1 zulässig ist und sehr genaue Ergebnisse liefert.

Die Beschreibung der dynamischen Steifigkeit zeigt ebenfalls positive Ergebnisse. Dies wird bei einem Vergleich zwischen der nicht konstanten Periodendauer der Messung und der Periodendauer des dynamischen Modell am deutlichsten. Der Vergleich ist in Abb.7.19 dargestellt.

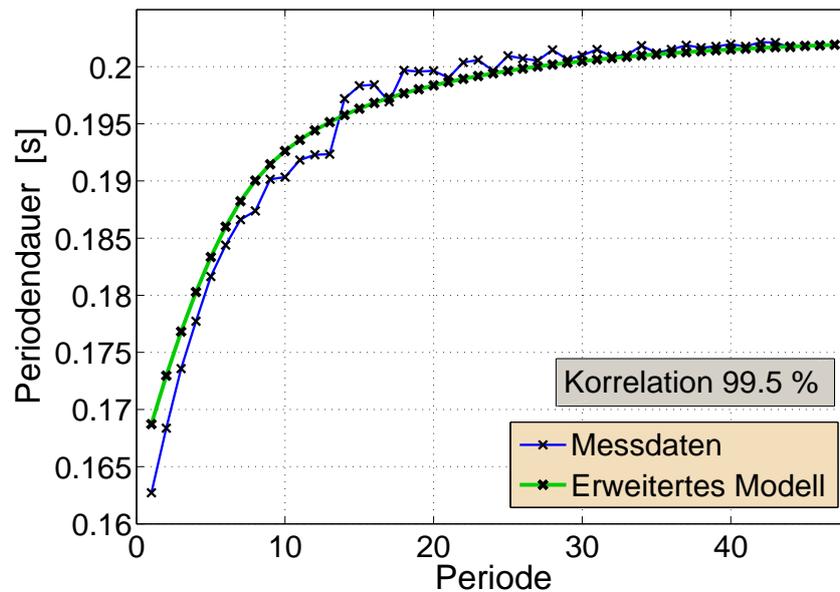


Abb. 7.19: Korrelation Periodendauer zwischen Messung und verbessertem Modell

Es ist gut zu erkennen, dass das dynamische Modell diese gemessene Besonderheit ebenfalls sehr gut beschreibt. Es wird eine hohe Korrelation zwischen Mess- und Simulationsergebnis erreicht.

Die dynamische Steifigkeit lässt sich dabei wesentlich schwieriger erfassen, als die dynamische Dämpfung. Dies wird unter anderem daran ersichtlich, dass die berechneten Ergebnisse manuell angepasst werden mussten (siehe Tab.7.1). Wie an mehreren Anhaltspunkten erläutert, deuten die Messergebnisse daraufhin, dass die dynamische Steifigkeit ein sehr komplexer Parameter in Abhängigkeit einer Vielzahl von Einflussgrößen ist.

Um die Verbesserung und Erweiterung des Modells auch in Hinsicht auf die Energiedissipation, eine der besonderen Eigenschaften des Spinnennetzes, zu verdeutlichen, wird die Energiedissipation entsprechend den Formeln aus Kap.6.4 berechnet. In Abb.7.20 ist ein Vergleich der Energiedissipation der Messung, des linearen und des dynamischen Modells gezeigt.

Auch in diesem Punkt wird deutlich, dass das dynamische Modell das tatsächliche Netz sehr gut abbildet. Die sehr hohe Energiedissipation in den ersten Perioden wird ebenfalls erreicht.

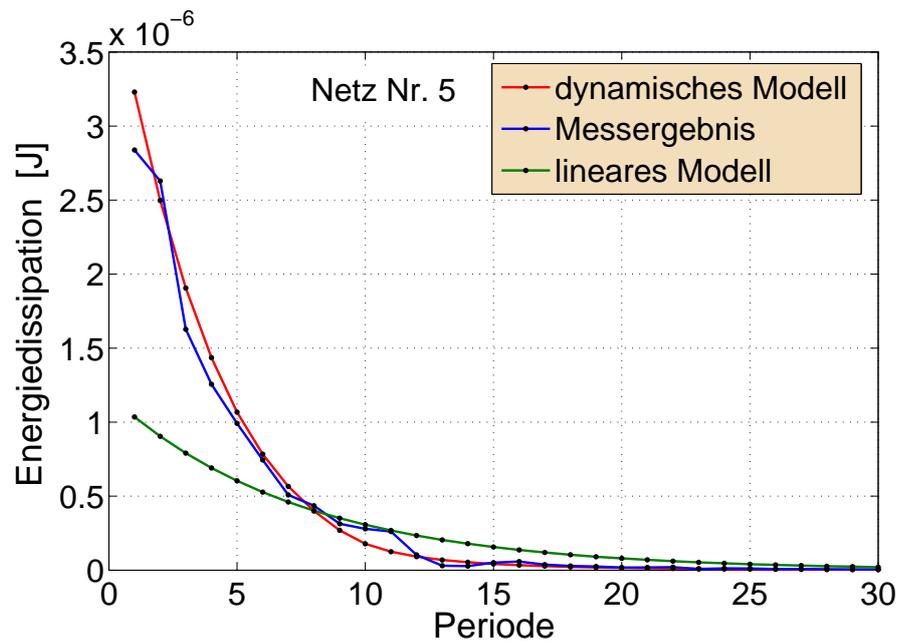


Abb. 7.20: Energiedissipation des dynamischen Modells

Die dynamischen Parameter Dämpfung und Steifigkeit, die in der Simulation berechnet werden, sind im Anhang in den Abb. A.9 und A.10 zu finden. Es wird die Funktion der dynamischen Parameter im Verlauf der Schwingung deutlich.

Zum Abschluss der Diskussion wird noch auf eine Einschränkung der dargestellten Ergebnisse hingewiesen. Wie in Kap. 7.1.3 erläutert, deutet die kleinere erste Amplitude, die in den nachfolgenden Amplituden überstiegen wird, daraufhin, dass die Steifigkeit des Netzes während des Aufpralls stark zunimmt. Die Energiedissipation in diesem Bereich kann nicht ausgewertet werden, da es nicht möglich ist einen herkömmlichen Dämpfungsfaktor zu berechnen. Es kann angenommen werden, dass daher die tatsächliche Energiedissipation des Netzes noch höher liegt, als die Berechnung der Dissipation von Messung und dynamischen Modell beschreibt. Dieser Bereich kann anhand der in dieser Arbeit aufgenommenen Messungen und der konventionellen Schwingungstheorie nicht näher untersucht werden.

## 7.4 Zusammenhang zwischen Netzgeometrie und Parametern

Anhand der durchgeführten Messungen an verschiedenen Netzen unterschiedlicher Durchmesser und Geometrien wurden Zusammenhänge zu den dynamischen Parametern untersucht.

Eine Reihe von beschriebenen Arbeiten hat bereits qualitativ ermittelt, dass die Spiralen der ausschlaggebende Faktor der Dämpfung sind. Die durchgeführten Messungen ermöglichen darüber hinaus nicht nur die Quantifizierung der Dämpfung, sondern zeigen auch den Zusammenhang zur Anzahl der Spiralen.

Ein Beispiel für die Dämpfung zweier Netze ist in Abb. 7.21 dargestellt. Um einen übersichtlichen Überblick zu wahren, wird die Diskussion anhand von zwei Netzen geführt. Im digitalen Anhang sind die Ergebnisse aller durchgeführten Messungen im Detail zu finden.

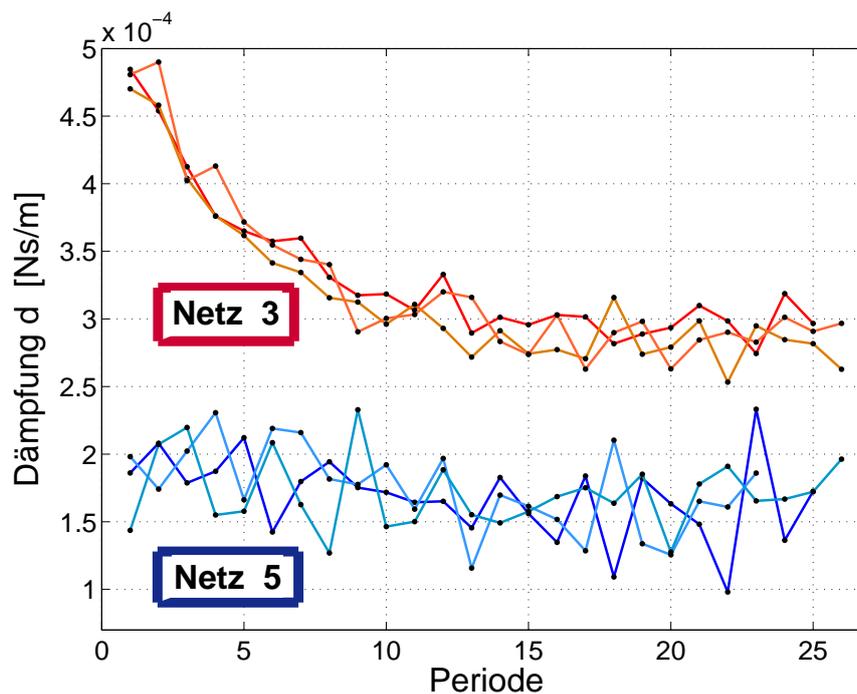


Abb. 7.21: Abhängigkeit der Dämpfung verschiedener Netze

Für beide Netze sind jeweils 3 Messungen dargestellt, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und der Auswertungsskripte zu demonstrieren. Die Unterschiede der Netze sind deutlich zu erkennen. Die konstante Dämpfung von Netz-Nr. 3 ist deutlich höher. Außerdem ist zu erkennen, dass die Abhängigkeit der Dämpfung von der Periode in Netz-Nr. 3 stärker

ausgeprägt ist. Bei den höheren Geschwindigkeiten zu Beginn der Schwingung steigt die Dämpfung stärker an, als in Netz-Nr. 5. Die Geometrieparameter der beiden Netze sind in Tab. 7.2 zu finden.

Tab. 7.2: Geometrieparameter Netz Nr. 3 und 5

	Rahmenbreite	Netzdurchmesser	Anzahl Radien	Anzahl Spiralen	Spinnenmasse
<b>Netz 3</b>	300 mm	280 mm	28	39	261 mg
<b>Netz 5</b>	250 mm	150 mm	19	11	311 mg

An diesem Beispiel lässt sich der starke Einfluss der Spiralanzahl zeigen. Netz-Nr. 3 besitzt mehr als die dreifache Anzahl an Spiralen. Die Dämpfung ist höher. Weitere Einflussgrößen sind der Netzdurchmesser und die Anzahl der Radialfäden.

Die Ableitung eines Zusammenhanges zwischen Energiedissipation und Netzparameter ist daher anhand der Messergebnisse nicht möglich. Eine Vielzahl von Einflussfaktoren, wie Netzdurchmesser, Anzahl von Radial- und Spiralfäden, sowie den Parametern des Projektils, sind zu beachten. Die Eigenschaften des Netzes variieren, bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Projektils, stark. Das Verständnis über das Netz und seine verschiedenen Eigenschaften, die ineinandergreifen, ist nicht ausreichend, um die Energiedissipation beschreiben zu können.

Die Studien müssen konzentriert werden, um die einzelnen Eigenschaften gezielt zu spezifizieren.

## KAPITEL 8

---

# Zusammenfassung und Ausblick

---

## 8.1 Zusammenfassung

**Spinnenseide** Als Einstieg in das Thema und zum Verständnis der Vorgehensweise dieser Untersuchung wurde ausführlich auf die Spinnenseide und ihre Eigenschaften eingegangen. Anhand einer Reihe von Kennwerten, die mit herkömmlichen Materialien verglichen wurden, wurden die besonderen Eigenschaften dieses Biomaterials verdeutlicht. Des Weiteren wurde auf besondere Werkstoffeigenschaften, wie beispielsweise die Superkontraktion und die dehnratenabhängige Bruchenergie eingegangen. Aktuell erforschte Anwendungen in Medizin und Mikrosystemtechnik werden erläutert und somit das Potential dieses neuen Biomaterials aufgezeigt. Aufgrund der vielseitigen Eigenschaften werden mit der industriellen Produktion des Materials eine Vielzahl von Anwendungen eröffnet.

Eine Übersicht über die chemischen Grundlagen der Seide veranschaulicht die hohe Komplexität dieses besonderen Verbundwerkstoffes. Mit einer Einführung in die synthetische Herstellung im rekombinanten Prozess wird ein Ausblick auf eine mögliche, kommerzielle Herstellung des Materials gegeben, dass es von der reinen Grundlagenforschung in die kommerzielle Nutzung tragen wird.

**Shock Response Spectrum** Ein theoretischer Kernpunkt dieser Arbeit ist die detaillierte Darstellung des SRS. Die Grenzen konventioneller Schwingungsanalysen, wie beispielsweise der FFT, wurden aufgezeigt und anhand dessen die Entwicklung des SRS als logische Erweiterung der Schwingungsanalyse deutlich. Das Ziel und der Nutzen des SRS wurden anhand von Beispielen zunächst demonstriert. In Schritten wurde auf die mathematischen Grundlagen und verschiedenen Arten des SRS eingegangen. Die kritischen Bestandteile der SRS-Analyse wurden hervorgehoben und anhand von verschiedenen Quellen ein standardisiertes SRS entworfen. Am Ende steht der Algorithmus zur Analyse von Schwingungen, der allgemein verwendet werden kann, um anhand von Schwingungsmessungen das SRS zu berechnen.

Das SRS der Messungen und der Modelle wurde berechnet und mit der konventionellen FFT-Analyse verglichen. Die Auswertung und Interpretation der SRS-Analyse von durchgeführten Schwingungsversuchen wurde laufend erläutert. Somit präsentiert die Arbeit nicht nur das SRS des Spinnennetzes im Speziellen, sondern ein vollständiges und allgemeines Bild der gesamten SRS-Analyse.

**Versuch** Im Verlauf der Arbeit stellte sich der Umgang mit den Spinnentieren und die Konstruktion der notwendigen Netze als kritischer Abschnitt der Arbeit heraus. Die Konstruktion der Netze durch die gefangenen Spinnentiere ist stark abhängig von den Bedingungen unter denen die Tiere gehalten werden. Eine Reihe von verschiedenen Bedingungen wurde untersucht und die Beobachtungen erläutert. Für nachfolgende Arbeiten ist es somit möglich anhand der gewonnenen Kenntnisse schneller positive Resultate bei der Netzkonstruktion zu erzielen. Der Stichprobenumfang kann somit in nachfolgenden Arbeiten erhöht werden. Damit wird der Einstieg in folgende Forschungsarbeiten erleichtert. Ein Versuchsaufbau zur Anregung und Messung der Schwingungen wurde entwickelt und aufgebaut, der Verbesserungen und Erweiterungen an vorausgegangen Arbeiten vornimmt und somit detailliertere Messergebnisse liefert. Dazu wurde u.a. die vorhandene Messtechnik in Betrieb genommen und als Grundlage für die spätere Qualität der Messergebnisse zunächst der Aufbau und die digitale Verarbeitung der Messdaten optimiert. Die Qualität und Aussagekraft der Messdaten im Vergleich zu vorherigen Untersuchungen konnte gesteigert werden.

**Resultate und neue Erkenntnisse** Mithilfe der verbesserten Messergebnisse und einer Reihe von entwickelten Algorithmen wurden eine Vielzahl neuer Erkenntnisse gewonnen. Zum ersten Mal werden die verschiedenen Parameter des Netzes, wie z.B. Steifigkeit, Dämpfung und Periodendauer über dem gesamten Schwingungsverlauf quantitativ ermittelt. Bisherige Arbeiten beschreiben die Parameter qualitativ und statisch. Die entwickelten

Algorithmen zeigen die dynamischen Eigenschaften der Parameter auf. Die bisherige Aussage, dass die Dämpfung zu einem hohen Grade abhängig von der Anzahl der Spiralfäden ist [Lin et al. 1995], wird nicht nur qualitativ bestätigt, sondern zudem quantitativ die starke Geschwindigkeitsabhängigkeit gemessen und als dynamischer Modellparameter erfolgreich modelliert.

Eine weitere entwickelte Methode ist die indirekte Berechnung der Steifigkeit. Diese Berechnung wurde aufgrund der beobachteten Änderung der Periodendauer durchgeführt. Ergebnis ist ein Algorithmus, der anhand der gemessenen Periodendauer, die Berechnung der Steifigkeit vornimmt. Das Ergebnis ist die Erkenntnis, dass die Steifigkeit des Netzes bei größeren Auslenkungen zunimmt und im Verlauf der Schwingung gegen einen konstanten Wert strebt. Ein Ergebnis, dass eine Reihe von bisherigen Arbeiten in einem neuen Blickwinkel erscheinen lässt. Die Messungen, Berechnungen und Extrapolationen haben zudem gezeigt, dass die Steifigkeit des Netzes während des Aufpralls des Projektils, bzw. des Beutetieres, um ein Vielfaches über dem statischen Wert liegt. Ein bemerkenswertes Ergebnis, das die ganz besonderen Eigenschaften des Netzes zum Abfangen von kinetischer Energie demonstriert. Eine erhöhte Steifigkeit zu Beginn der Schwingung speichert die Energie. Somit wird die Energie absorbiert ohne zu einer Überbeanspruchung zu führen und es steht ausreichend Zeit zur Verfügung, um die Energie in den verschiedenen Dämpfungsanteilen abzubauen. Für weitere Untersuchungen wird daher empfohlen, die Steifigkeit des Netzes in eine statische und eine dynamische Steifigkeit zu unterteilen.

Auch die Berechnung der dissipierten Energie setzt die Reihe der neuen Erkenntnisse fort. Die tatsächliche Energiedissipation liegt innerhalb der ersten Schwingungsperioden und besonders während des Aufpralls um ein Vielfaches über der des bisherigen linearen Modells. Die hervorragenden Eigenschaften des Netzes zur Energiedissipation werden in allen diesen Ergebnissen bestätigt und quantifiziert.

Zum Abschluss werden die gewonnen Erkenntnisse in einem dynamischen Modell umgesetzt. Berechnungsmethoden zur Ermittlung der dynamischen Parameter werden erarbeitet und verschiedene Möglichkeiten der Simulation untersucht. Das gefundene Modell beschreibt in sehr guter Übereinstimmung die Messergebnisse, wie z.B. dynamische Parameter und Energiedissipation. Anhand des dynamischen Modells und den neuen Erkenntnissen die dieses darstellt, eröffnen sich eine Vielzahl neuer Untersuchungspunkte, um das Verständnis der Netzeigenschaften weiterzuentwickeln.

## 8.2 Ausblick

Die Erkenntnisse und Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bieten eine Vielzahl an Möglichkeiten, um die Untersuchungen fortzusetzen. In Verbindung mit weiteren Arbeiten, die im Quellenverzeichnis zu finden sind, zeigt sich das hohe Potential weiterer Untersuchungen.

**Messtechnik** Grundlage weiterer Untersuchungen muss zunächst der Aufbau leistungsstärkerer Messtechnik sein. Die Einschränkung des Messbereiches verhinderte in dieser Arbeit die dynamischen Parameter detaillierter zu untersuchen. Da in der Natur Beutetiere mit Geschwindigkeiten über dem vorhandenen Messbereich auf das Netz treffen, ist davon auszugehen, dass die festgestellten Eigenschaften und Parameter mit Zunahme der Geschwindigkeiten ebenfalls exponentiell zunehmen. Diese Annahme dient als Grundlage für die durchgeführten Extrapolationen in dieser Arbeit und deutet auf hervorragende Eigenschaften des Spinnennetzes hin, welche bisherige Erwartungen weiter übertreffen. Für nachfolgende Untersuchungen besteht die Möglichkeit Interferometer mit höheren Messbereichen zu verwenden. Ein Beispiel ist beispielsweise das SIOS Laserinterferometer SP-S. Dieses besitzt den dreifachen Geschwindigkeitsmessbereich der in dieser Arbeit verwendeten Messtechnik und ermöglicht die Messung von Geschwindigkeiten, die in der Natur beim Aufprall der Beutetiere auftreten.

Da es aber bereits bei den Geschwindigkeiten in dieser Arbeit zu Störungen der Messdaten aufgrund von Verkippungen des Reflektors kam, wird ein anderer Ansatz für die Messtechnik empfohlen. Bei höheren Geschwindigkeiten ist zu erwarten, dass die Störungen des interferometrischen Signals ansteigen und die Messergebnisse nur noch geringe Aussagekraft besitzen. In Arbeiten beispielsweise von [Lin et al. 1995] und [Koski et al. 2013] wurde gezeigt, dass das Netz mit Kameras aufgezeichnet werden kann. In der Arbeit von [Lin et al. 1995] wurden bereits dynamische Eigenschaften mithilfe von Bildmesstechnik untersucht. Dabei wurden die Messdaten manuell ausgewertet und die Bildrate war eingeschränkt. Heutige Fortschritte in der Bilderfassung mit Hochgeschwindigkeitskameras und der computerunterstützten, automatisierten Bildverarbeitung bieten die Möglichkeit, die Schwingungen des Netzes bei hohen Geschwindigkeiten zuverlässig und kontaktlos ohne Zusatz eines Reflektors zu vermessen. Dieser Schritt ist notwendig, da das Netz aufgrund seiner sehr feinen Struktur empfindlich auf äußere Eingriffe reagiert und idealerweise ohne Eingriff vermessen werden sollte. Für weitere Arbeiten wird daher der Aufbau eines optischen Systems bestehend aus einer Hochgeschwindigkeitskamera mit geeigneter Bildverarbeitung empfohlen, um die dynamischen Eigenschaften zu untersuchen.

**Untersuchungen** Unter Verwendung der erweiterten Messtechnik können im nächsten Schritt die dynamischen Eigenschaften der einzelnen Seide untersucht werden. Dies ist notwendig, um bei Messungen des Gesamtnetzes die Eigenschaften der Geometrie und des Gesamtsystems von Eigenschaften des Materials zu trennen. Bereits in Arbeiten von [Barboza 2010] und [Miranda 2011] wurden Messungen an den einzelnen Seiden durchgeführt. Um die dynamischen Eigenschaften, die in dieser Arbeit präsentiert wurden, näher zu untersuchen, müssen die Messungen bei höheren Geschwindigkeiten und Energien im markanten Schwingungsbereich der Seide untersucht werden. Dabei wird empfohlen, die Messungen getrennt im Vakuum und unter Atmosphäre durchzuführen, um die gemessenen Eigenschaften dem Material alleine oder dem Material in Zusammenspiel mit der Atmosphäre zuzuschreiben.

Parallel sind die viskoelastischen Eigenschaften, wie die dehnratenabhängige Steifigkeit zu messen, um die Funktion der Steifigkeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und Beschleunigung detailliert quantitativ zu beschreiben. Es sollten zunächst die viskoelastischen Parameter des Materials genau quantifiziert werden. Für deren Beschreibung wird die Verwendung eines fraktionalen Dreiparameter-Modells empfohlen. Es verspricht anhand der bisherigen Kenntnisse und unter Betrachtung theoretischer Grundlagen rheologischer Modelle eine genauere Beschreibung als das reine Kelvin-Voigt-Modell. Bevor nicht ein vollständiges Verständnis des reinen Materials erarbeitet ist, werden in Modellen und FE-Simulationen stets Fragen offen bleiben. In den Quellen gefundene Messungen (siehe Tab. A.3) sind nicht ausreichend für die Verwendung in einem dynamischen Modell. Mit aktuellen Fortschritten in der Messtechnik ist auch hier zu erwarten, dass umfangreichere und detaillierter Ergebnisse erreicht werden.

Am Ende der Messreihen sollte die Vermessung gesamter Netze stehen, um die Ergebnisse dieser Arbeit und die Extrapolationen, unter anderem der Energiedissipation, bei höheren Geschwindigkeiten zu untersuchen.

**Modellerweiterung** Die einzelnen Ergebnisse der beschriebenen Untersuchungen bilden zudem über ihren einzelnen Wert hinaus die Möglichkeit, in einem letzten Schritt zusammengefasst zu werden und so ein vollständiges, komplexes Bild des gesamten Netzes zu entwerfen. Durch die stufenweise Vermessung von Material, Seidenfaden und Netz abwechselnd im Vakuum und an Atmosphäre, können zum Schluss alle dynamischen Parameter eindeutig zugeordnet werden. Das in dieser Arbeit entworfene dynamische Modell kann anhand dieser Messdaten in wenigen Schritten vervollständigt werden. Alle dynamischen Eigenschaften des Netzes werden so beschrieben. Dieses abschließende Modell kann als Entscheidungsgrundlage dienen, um eine Vielzahl von zukünftigen Anwendungsgebieten der Spinnenseide zu betrachten. Ausgehend von dem vollständigen dynamischen Verständ-

nis können besonders Anwendungen in der Mikrosystem- und Messtechnik, sowie auf dem Gebiet der Verbundwerkstoffe untersucht werden.

**FE-Modell** Parallel zu den Messungen und der Erweiterung des begonnenen Modells ist der Aufbau eines FE-Modells zur Untersuchung der mechanischen Spannungsverteilung im Gesamtsystem, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Seidenarten *Dragline* und *Flagelli*, eine weitere interessante Möglichkeit. Eine Fragestellung, die ein FE-Modell in Verbindung mit den Messergebnissen beantworten kann, ist der Einfluss der besonderen Netzgeometrie. Außerdem kann der Frage nachgegangen werden, welche Bedeutung die Spiralfäden für die Festigkeit und Steifigkeit des Netzes während des Aufpralls und im Verlauf der abklingenden Schwingung haben. Detaillierter kann dabei auf die unterschiedlichen Eigenschaften von Radial- und Spiralfäden eingegangen werden.

Insgesamt wird ausdrücklich empfohlen die Untersuchungen bei höheren Geschwindigkeiten und Energien als bisher durchzuführen, um in den Bereich der markanten, dynamischen Eigenschaften des Netzes vorzustoßen. Zentrales Ziel muss es sein die dynamischen Eigenschaften vollständig zu beschreiben und so mögliche Anwendungen ableiten zu können.

---

## Quellenverzeichnis

---

- [Alexander 2009] ALEXANDER, J. E.: Shock Response Spectrum - A Primer. In: *SOUND & VIBRATION* (2009), S. 6–14
- [Allmeling et al. 2008] ALLMELING, C. ; JOKUSZIES, A. ; REIMERS, K. ; WEITERE: Spider silk fibres in artificial nerve constructs promote peripheral nerve regeneration. In: *Cell Proliferation* 41 (2008), S. 408–420
- [AMSilk 2011] AMSILK: *Silkfibers - Technology insights*. 2011. – Produktinformation der AMSilk GmbH
- [Bai et al. 2006] BAI ; SAHEB-DJAWAHER ; MA ; CHU ; WANG ; SILVA ; MICHAL ; CHIAO: Spider silk as a new biomaterial for MEMS. In: *MEMS Istanbul*, 2006
- [Bai 2006] BAI, J.: *Regenerated spider silk as a new biomaterial for micro-electromechanical systems (MEMS) applications*, University of British Columbia, Masterarbeit, 2006
- [Barboza 2010] BARBOZA, C. E. M.: *Caracterización de la energía de disipación de la seda de araña sometida a cargas impulsivas*, Pontificia Universidad Católica del Perú, Tesis de magister, 2010
- [Bautista 2011] BAUTISTA, C. A. O.: *Estudio dinámico del sistema araña - tela de araña en condiciones de resonancia*, Pontificia Universidad Católica del Perú, Tesis de magister, 2011

- [Biot 1932] BIOT, M. A.: *Transient oscillations in elastic systems*. Pasadena, California Institute of Technology, Dissertation, 1932
- [Blatter 2006] BLATTER, C.: *Komplexe Analysis, Fourier- und Laplace-Transformation für Ingenieure*. Vorlesungsumdruck. 2006. – ETH Zürich
- [Bottega 2006] BOTTEGA, W.: *Engineering Vibrations*. New York : Taylor and Francis, 2006
- [Brandt 2011] BRANDT, M.: *Das Antwortspektrumverfahren*, RWTH Aachen, Seminararbeit, 2011
- [Brunetta und Craig 2010] BRUNETTA, L. ; CRAIG, C.: *Spider silk*. Yale University Press, 2010
- [Bäumer 2012] BÄUMER, R.: *Schwingungsverhalten von Spinnennetzen*, TU Ilmenau, Masterarbeit, 2012
- [Cabrele 2014] CABRELE, C.: *Im Netz der Spinne*. September 2014. – URL <http://www.chemie-im-alltag.de/articles/0040/index.html>
- [Chiao und Chiao 2011] CHIAO, M. (Hrsg.) ; CHIAO, J. (Hrsg.): *Biomaterials for MEMS*. Pan Stanford, 2011
- [Coddington et al. 2004] CODDINGTON, J. ; GIRIBET, G. ; SONSTIGE: Arachnida. In: *Assembling the Tree of Life*. New York : Oxford University Press, 2004
- [Craig 1987] CRAIG, C.: The ecological and evolutionary interdependence between web architecture and web silk spun by orb web weaving spiders. In: *Biological Journal of the Linnean Society* 30 (1987), Nr. 2, S. 135–162
- [Denny 1976] DENNY, M.: The physical properties of spiders' silk and their role in the design of orb-webs. In: *Experimental Biology* 65 (1976), S. 483–506
- [Dettner und Peters 2003] DETTNER, K. ; PETERS, W.: *Lehrbuch der Entomologie, Teil 1*. Spektrum Akademischer Verlag, 2003
- [Elices 2005] ELICES, M.: Finding inspiration in Argiope trifasciata spider silk fibers. In: *JOM* 57 (2005), Nr. 2, S. 60–66
- [F.W.Cox 1983] F.W.COX: Efficient algorithms for calculating shock spectra on general purpose computers. In: *The Shock and Vibration Bulletin* 53 (1983), S. 143–161

- [Garrido et al. 2002] GARRIDO, M. ; VINEY, C. ; ELICES, M. ; PÉREZ-RIGUEIRO, J.: The variability and interdependence of spider drag line tensile properties. In: *Polymer* 43 (2002), S. 4495–4502
- [Gosline et al. 1999] GOSLINE, J. ; GUERETTE, P. ; ORTLEPP, C. ; SAVAGE, K.: The mechanical design of spider silks: from fibroin sequence to mechanical function. In: *The Journal of experimental biology* 202 (1999), S. 3295–3303
- [Gross et al. 2008] GROSS, D. ; HAUGER, W. ; SCHRÖDER, J. ; WALL, W.: *Technische Mechanik: Kinetik*. Springer-Verlag, 2008
- [Hardy und Scheibel 2010] HARDY, J. ; SCHEIBEL, T.: Composite material based on silk proteins. In: *Progress in Polymer Science* 35 (2010), Nr. 9, S. 1093–1115
- [Harmer et al. 2011] HARMER, A. ; BLACKLEDGE, T. ; MADIN, J. ; HERBERSTEIN, M.: High-performance spider webs: integrating biomechanics, ecology and behaviour. In: *The Royal Society Interface* 8 (2011), Nr. 57, S. 457–471
- [Harris 1995] HARRIS, C.: *Shock and Vibration*. 4. McGraw-Hill, 1995
- [Heim et al. 2009] HEIM, M. ; KEERL, D. ; SCHEIBEL, T.: Spider Silk: From soluble protein to extraordinary fiber. In: *Angewandte Chemie, International Edition* 48 (2009)
- [Herberstein und Heiling 1999] HERBERSTEIN, M. ; HEILING, A.: Asymmetry in spider orb webs: a result of physical constraints ? In: *Animal Behaviour* 58 (1999), S. 1241–1246
- [Himmelblau et al. 1994] HIMELBLAU, H. ; WISE, J. H. ; PIERSOL, A. G. ; GRUNDTVIG, M. R.: *Handbook for Dynamic Data Acquisition and Analysis - IES Recommended Practice 012.1*. Institut of Environmental Sciences, 1994
- [Hollowell und Smith 1996] HOLLOWELL, B. ; SMITH, S.: A proposed method to standardize shock response spectrum analysis. In: *IES Journal* (1996)
- [Irvine 2012] IRVINE, T.: *An introduction to the shock response spectrum*. NASA. 2012
- [ISO 2007] ISO: *18431-4 (2007) -Mechanical vibration and shock - Signal processing - Part 4: Shock-response spectrum analysis*. 2007
- [ISO 2009] ISO: *2041(2009) - Mechanical vibration, shock and condition monitoring - Vocabulary*. 2009
- [Jonsson 2012] JONSSON, M.: *Development of a Shock Test Facility for Qualification of Space Equipment*, Chalmers University of Technology, Masterarbeit, 2012

- [Kaplan 2002] KAPLAN, D.: Spiderless spider webs. In: *Nature biotechnology* 20 (2002), S. 239–240
- [Kelly und Richman 1969] KELLY, R. ; RICHMAN, G.: *Principles and Techniques of shock data analysis*. The Shock and Vibration Information Center, 1969
- [Koch 2005] KOCH, M.: *VUV-Laserablation von Spinnenseide*, Universität Kassel, Dissertation, 2005
- [Koski et al. 2013] KOSKI, K. ; AKHENBLIT, P. ; MCKIERNAN, K. ; YARGER, J.: Non-invasive determination of the complete elastic moduli of spider silks. In: *Nature Materials* 12 (2013), S. 262–268
- [Lalanne 2009] LALANNE, C.: *Mechanical Vibration and Shock Analysis: Mechanical Shock*. London and Hoboken : ISTE and Wiley, 2009
- [Lewis 2006] LEWIS, R.: Spider Silk: Ancient ideas for new biomaterials. In: *Chemistry Reviews* 106 (2006), S. 3762–3774
- [Lin et al. 1995] LIN, L. ; EDMONDS, D. ; VOLLRATH, F.: Structural engineering of an orb-spider's web. In: *Nature* 373 (1995), S. 146–148
- [Lion 2007] LION, A.: *Einführung in die Lineare Viskoelastizität und Elementare Materialmodelle der linearen Viskoelastizität im Zeitbereich*. Vorlesungsumdruck. 2007. – Universität der Bundeswehr München
- [MIL-STD-810G ] MIL-STD-810G, T. M. S.: *Method 516.5*
- [Miranda 2011] MIRANDA, J. A.: *Determinación de las propiedades dinámicas de una estructura hecha de seda de araña MA*, Universidad politécnica de Madrid, inédito tesis doctoral, 2011
- [Paz 1980] PAZ, M.: *Structural Dynamic: Theory and Computation*. New York : Van Nostrand Reinhold, 1980
- [Rao 2011] RAO, S.: *Mechanical Vibrations*. 5. University of Miami : Pearson Education, 2011
- [Scheibel 2009] SCHEIBEL, T.: Spinnenseide - was Spiderman wissen sollte. In: *BIOspektrum* (2009), Nr. 01.09
- [Schlichthärle 2011] SCHLICHTHÄRLE, D.: *Digital Filters - Basics and Design*. 2. Springer-Verlag Berlin, 2011

- [Shultz 1986] SHULTZ, J.: The origin of the spinning apparatus in spiders. In: *Biol. Review* 62 (1986), S. 89–113
- [Slotta 2009] SLOTTA, U.: *Charakterisierung von Assemblierungsformen rekombinanter Spinnenseidenproteine*, TU München, Dissertation, 2009
- [Smallwood 1981] SMALLWOOD, D. O.: An improved recursive formula for calculating shock response spectra. In: *The shock and vibration bulletin* 2 (1981), Nr. 51, S. 211–217
- [Smith und Hollowell 2014] SMITH, S. ; HOLLOWELL, W.: *Techniques for the normalization of shock data*. August 2014. – URL <http://www.tti4edu.com/articles/shock-normalization.pdf>
- [Thieman und Palladino 2013] THIEMAN, W. ; PALLADINO, M.: *Introduction to biotechnology*. 3. Pearson, 2013
- [Tuma und Kocí 2009] TUMA, J. ; KOCÍ, P.: Calculation of shock response spectrum. In: *Dynamics of Machines Prague*, 2009
- [Vehoff et al. 2007] VEHOFF ; GLISOVIC ; SCHOLLMMEYER ; ZIPPELIUS ; SALDITT: Mechanical properties of spider dragline silk: humidity, hysteresis and relaxation. In: *Biophysical Journal* 93 (2007)
- [Vollrath 2000] VOLLRATH, F.: Strength and structure of spiders' silks. In: *Molecular Biotechnology* 74 (2000), S. 67–83
- [Vollrath et al. 1997] VOLLRATH, F. ; DOWNES, M. ; KRACKOW, S.: Design Variability in Web Geometry of an Orb-Weaving Spider. In: *Physiology and Behavior* 62 (1997), Nr. 4, S. 735–743
- [Wei 2014] WEI, B.: *Density of Spider Silk*. Internet. August 2014. – URL <http://www.geneseo.edu/nuclear/density-spider-silk>
- [Wißler 2009] WISSLER, C.: Die Natur als Vorbild für neue Materialien: Bayreuther Forschungen zu Seidenproteinen im Ausstellungszug 'Expedition Zukunft' / Universität Bayreuth. 2009. – Forschungsbericht
- [Wirth und Barth 1992] WIRTH, E. ; BARTH, F.: Forces in the spider orb web. In: *Journal of Comparative Physiology* 171 (1992), S. 359–371
- [Zschokke 2000] ZSCHOKKE, S.: Radius construction and structure in the orb-web of *Zilla diodia*. In: *Journal of Comparative Physiology A* (2000), Nr. 186, S. 999–1005