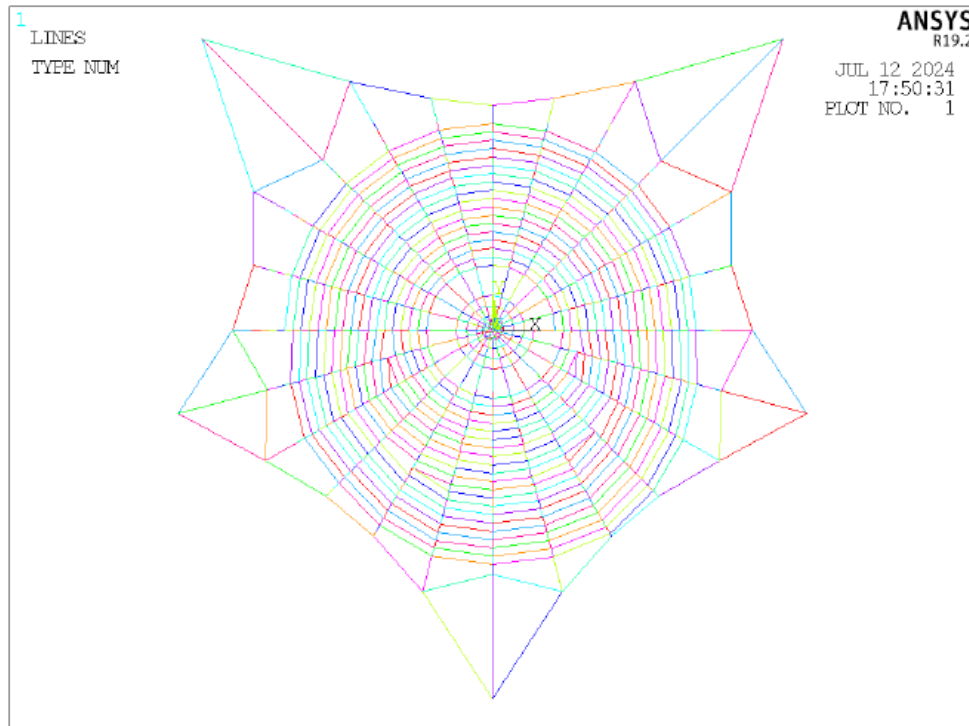


# Biomechanische Analyse von Spinnennetzen



Abschlussbericht der Kooperationsphase 2023/24

Durchgeführt am Institut für Angewandte Materialien - Werkstoff- und Grenzflächenmechanik  
(IAM-MMI)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Betreut durch Dr. Klaus Bethge, Dr. Ing. Roland Kappel,

Dr. Ing. Iwiza Tesari und Dr. Karlheinz Weber

Leah Faulhaber, Anjali Elena Sponda, Kurs KA 18

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1	Eigenschaften von Spinnenseide und -netzen . . . . .	3
1.2	Definition Parameter . . . . .	4
1.3	Finite-Element-Methode . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Simulation</b>	<b>5</b>
2.1	Material und Methoden . . . . .	5
2.1.1	Geometrie und Bau eines Spinnennetzes in der Natur . . . . .	5
2.1.2	Geometrie und Bau eines Spinnennetzes in der Simulation . . . . .	7
2.1.3	Materialwerte . . . . .	10
2.1.4	Methode: Modalanalyse . . . . .	11
2.1.5	Methode: Aufprall einer Fliege . . . . .	12
2.2	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	13
2.2.1	Ergebnisse . . . . .	13
2.2.2	Auswertung/Deutung . . . . .	19
2.2.3	Fehlerdiskussion . . . . .	19
2.3	Fazit . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>21</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>22</b>
	<b>Verzeichnisse</b>	<b>I</b>
	Abkürzungsverzeichnis . . . . .	I
	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>II</b>
	<b>Anhang</b>	<b>IV</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>XIV</b>

## Abstract

Spiderwebs are fascinating in many ways. They are extremely stable while having a very small mass and high elasticity. A spiderweb is made of three different silk types but the web geometry varies depending on the spider species. The biochemical composition of spider silk and its characteristics have already been explored to a great extent. However, the mechanics of the web itself have not really been analysed until now. The assumption is that besides the extraordinary material properties, mostly the geometry leads to the spiderwebs' stability.

Furthermore, the interaction of the different silks is especially interesting since findings could be applied on nets in reality, such as safety nets.

The following paper deals with the mechanical analysis of wheel webs by the use of finite element method as well as the opportunities for applications in reality.

The influence of using one or three silk types and different frame geometries is examined as well as the approach of a fly crashing into the web and concerning this crash the tensile strength of single filaments.

Moreover, a modal analysis was used in order to determine the inherent frequencies.

The previously mentioned influences and the modal analysis were both tested on a realistic and a simplified version of a wheel web.

The realistic web resembles to the wheel web as one can find it in nature. According to specific literature, some zones of the web seem to only be of biological advantage, which is why they were left out in the simplified version.

Our research showed that, concerning the inherent frequencies, the modal analysis of the simplified and the realistic version of the same web led to similar results. Nevertheless, all the frequencies are in a range that doesn't really occur in reality.

Since the crash of a fly on the web itself did not work, it was calculated whether single filaments, respectively certain groups of filaments were able to resist the energy of a fly. This was possible in most of the cases.

## 1 Einleitung

Spinnennetze sind auf vielen Ebenen faszinierend. Sie weisen sehr hohe Stabilitäten bei sehr geringer Masse und hoher Elastizität auf. Ein Spinnennetz besteht meist aus drei verschiedenen Fadentypen und die Geometrie variiert von Spinnenart zu Spinnenart. Die biochemische Zusammensetzung der Fäden und ihre Eigenschaften sind schon weitestgehend erforscht, allerdings wurde die Mechanik dieser Netze bis heute kaum untersucht. Dabei geht man davon aus, dass neben den hervorragenden Werkstoffeigenschaften auch vor allem die Geometrie der Netze zu ihrer hohen Stabilität führt. Außerdem ist das Zusammenwirken der verschiedenen Fadentypen besonders interessant, da daraus gewonnene Erkenntnisse auch für praktische Anwendungen, wie beispielsweise Auffangnetze, sinnvoll wären.

In der folgenden Arbeit wird auf die biomechanische Analyse von Radnetzen mittels Finite-Element-Methode sowie auf die gewonnenen Erkenntnisse und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten für technische Anwendungen eingegangen.

Es wird der Einfluss von einem oder drei Fadentypen und verschiedener Rahmengenometrien untersucht, der Ansatz für den Aufprall einer Fliege in das Netz beschrieben und Untersuchungen zur Zugfestigkeit der einzelnen Fäden bei einem Aufprall vorgestellt.

Außerdem wird bei jedem der Spinnennetze eine Modalanalyse durchgeführt, um die Eigenfrequenzen zu bestimmen.

Dabei werden die beiden oben genannten Einflüsse und die Modalanalyse sowohl auf einem realistisch simulierten Spinnennetz als auch auf einem vereinfachten Spinnennetz getestet. Das realistische Spinnennetz ähnelt sehr stark dem Radnetz, wie es in der Natur vorkommt. Bei dem vereinfachten Radnetz handelt es sich um eine Simulation, bei der manche Zonen eines Radnetzes vereinfacht bzw. vollständig weggelassen werden, die eher einen biologischen als einen mechanischen Nutzen zu haben scheinen.

## 1.1 Eigenschaften von Spinnenseide und -netzen

Bei Spinnenseide handelt es sich um ein auf viele Weisen einzigartiges Material. Aufgebaut aus Proteinen kann sie auf das Dreifache ihrer Länge gedehnt werden, ohne zu reißen, ist aber gleichzeitig auf ihre Masse bezogen etwa vier bis fünf mal so fest wie Stahl. Dabei kann sie diese Festigkeit auch unter extremen Temperaturen von bis zu  $-40^{\circ}\text{C}$  und  $220^{\circ}\text{C}$  beibehalten. Sie ist außerdem teilweise bis vollständig adhäsiv (klebend) und kann trotz ihrer Wasserfestigkeit genauso viel Wasser aufnehmen wie Wolle. Der Wassergehalt eines Fadens beeinflusst dabei seine Elastizität. Je höher der Wasseranteil im Faden, desto höher die Elastizität.

Insgesamt kann eine Spinne sieben verschiedene Fadentypen produzieren. In ihrem Netz sind letztendlich drei verschiedene Fadentypen verbaut:

Die Rahmenfäden stabilisieren das gesamte Netz und sind mit der Umgebung verbunden, an dem die Spinne ihr Netz baut. Sie sind nicht klebrig und sehr stabil.

Die Speichenfäden dienen ebenfalls der Stabilität des Netzes, indem sie die kinetische Energie des Beutetiers abfangen. Außerdem wird die Fangspirale zwischen den Speichenfäden platziert. Speichenfäden sind elastischer als die Rahmenfäden aber ebenfalls nicht klebrig.

Die Fäden der Fangspirale sind nicht nur klebrig, sondern auch sehr elastisch, da sie den Aufprall eines Beutetiers abfangen und das Insekt im Netz gefangen halten.

Spinnennetze an sich dienen primär dem Beutefang, sind aber auch der Aufenthaltsort der Spinnen. Das Spinnennetz verteilt die kinetische Energie des Beutetiers im Netz, wobei diese in Wärme umgewandelt wird.

Die Spinnennetzformen sind artspezifisch. Die bekanntesten Geometrien sind das regelmäßige Radnetz der auch in Deutschland einheimischen Kreuzspinnen, das Baldachinnetz der Baldachinspinnen, und das Trichternetz der Trichterspinnen. Letzteres dient nicht dem Beutefang, sondern ausschließlich dem Aufenthalt der Spinne.



(a) Radnetz [17]

(b) Baldachinnetz [12]

(c) Trichternetz [14]

Abbildung 1: verschiedene Spinnennetzformen

## 1.2 Definition Parameter

**Eigenfrequenzen:** Frequenzen, bei denen ein Objekt nach Anregung in bestimmte Schwingungen versetzt wird, die auf Dauer zu seiner Zerstörung führen können.

**Elastizitätsmodul:** Der Elastizitätsmodul (E-Modul) beschreibt das Verhältnis zwischen Spannung und Dehnung, entspricht also der Steigung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Je höher der E-Modul ist, desto steifer ist ein Material.

**Spannung:** Die mechanische Spannung ist ein Maß für die innere Beanspruchung eines Körpers infolge seiner Belastung. Sie ist definiert als Kraft pro Fläche und hat Pascal (Pa) als Maßeinheit, wobei  $1MPa = 1N/mm^2$

## 1.3 Finite-Element-Methode

Bei der Finite-Elemente-Methode handelt es sich um ein numerisches Verfahren, mit dem das Gesamtverhalten komplexer Strukturen simuliert werden kann. Dabei wird die Struktur in eine finite (endliche) Anzahl an durch sogenannte Knoten definierten Elementen eingeteilt. Durch deren Einzelverhalten und Einfluss aufeinander kann so die gesamte Dehnung, Verformung und Spannungsverteilung in einem Bauteil bzw. in einer Struktur berechnet und anschließend visualisiert werden. Dabei wird das Verhalten unbekannter Strukturen über das bekannte Verhalten der endlichen Elemente berechnet.

Eine FEM-Analyse erfolgt üblicherweise in drei Schritten: Preprocessing, Lösung und Postprocessing. Im Preprocessing wird ein geometrisches Modell der Struktur erzeugt und dann in zahlreiche kleine Elemente zerlegt, die an den Knotenpunkten miteinander verbunden sein können. Diesen Vorgang nennt man vernetzen, wobei Elemente und Knoten das Netz bilden.

Nachdem die Randbedingungen wie z.B. Lasten und Lagerungen definiert sind, erfolgt der Lösungsschritt und die Ergebnisse können im Postprocessing betrachtet oder weiter bearbeitet werden.

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurde mit dem FEM-Programm ANSYS 2019 gearbeitet.

FEM zur biomechanischen Analyse von Spinnennetzen zu nutzen ist insofern sinnvoll, als deren Struktur äußerst kompliziert ist und es zu ihrem mechanischen Verhalten kaum Daten gibt. Durch eine Simulation wird zum einen kein Material verbraucht und zum anderen ist es auf diese Weise einfach, verschiedene Varianten eines Netzes zu testen, wie beispielsweise unterschiedliche Geometrien der Rahmenfäden. Die Möglichkeit, nur einzelne Parameter auf einmal zu verändern, führt dabei zu höherer Reliabilität. Dabei lässt sich feststellen, welche Veränderung der Geometrie oder der Materialeigenschaften zu welchen Ergebnissen bzgl. Verformung und/oder Spannungsverteilung führen.

## 2 Simulation

Im folgenden Kapitel wird auf die Simulation der Radnetze und auf die gewonnenen Erkenntnisse eingegangen.

Dabei wird zunächst der Aufbau eines natürlichen Radnetztes betrachtet und daraus ein realistisches und ein vereinfachtes Spinnennetz simuliert. Des Weiteren werden der Aufbau dieser beiden Simulationsnetze und die als Grundlage dienenden Literaturwerte thematisiert. Abschließend werden die Ergebnisse präsentiert, gedeutet und diskutiert.

(Hinweis: Die Abbildungen der simulierten Netze sind im Anhang ab Seite IV aufgeführt.)

### 2.1 Material und Methoden

Die Simulation mittels FEM mit ANSYS dient zunächst der biomechanischen Analyse eines Radnetzes, sodass im Anschluss Aussagen über das mechanische Verhalten von Radnetzen gemacht werden können. Von Vorteil ist, dass man gezielte Veränderungen am Netz vornimmt und deren Auswirkungen auf das mechanische Verhalten analysiert. Des Weiteren kann man damit auch bestimmen, inwiefern eine technische Umsetzung möglich ist.

In unserem Fall haben wir sowohl die Rahmenfaden- und Netzgeometrie als auch den Aufbau der Netze durch unterschiedliche Fadentypen (ob ein simuliertes Netz aus einem oder drei Fadentypen besteht) variiert.

Die Veränderung der Geometrie der Rahmenfäden ermöglicht es, Aussagen über deren Einfluss auf das mechanische Verhalten zu treffen.

Die Variation der Netzgeometrie besteht aus der Simulation von realistischen und vereinfachten Radnetzen. Dies ist insbesondere von Bedeutung, da zum einen geklärt werden kann, ob die freie Zone und die Unordnung der Nabe (siehe Abb. 3b) die Mechanik verändern. Zum anderen wird aufgezeigt, ob das vereinfachte Netz ähnliche mechanische Eigenschaften wie das realistische Netz aufweist und somit eine technische Umsetzung mit einer vereinfachten Form in Frage kommt.

Die Simulation mit verschiedenen Fadentypen dient dazu, die Bedeutung unterschiedlich verbauter Fadentypen für die Mechanik des Netzes zu überprüfen.

Bei jedem der simulierten Netze wird eine Modalanalyse durchgeführt, um Eigenfrequenzen der Netze zu bestimmen. Diese wird durch das Programm ANSYS berechnet. In der vorliegenden Arbeit werden jeweils die ersten sechs Frequenzen jedes untersuchten Netzes miteinander verglichen.

Außerdem wird versucht, den frontalen Aufprall einer gemeinen Stubenfliege auf die Fangspirale zu simulieren. Dafür wird die kinetische Energie der Stubenfliege und die Netzfläche, die vom Aufprall betroffen ist berechnet. Das genaue Vorgehen wird im Kapitel 2.1.5 beschrieben.

#### 2.1.1 Geometrie und Bau eines Spinnennetzes in der Natur

Ein Radnetz in der Natur ist näherungsweise zweidimensional aufgebaut und besteht aus drei verschiedenen Fadentypen: den Rahmenfäden, den Speichenfäden und den Fäden, die die Fangspirale bilden.

Das Radnetz wird in verschiedene Zonen eingeteilt. Von innen nach außen sind diese die Nabe, die

Befestigungszone, die freie Zone, die Fangspirale und die Rahmenfäden (siehe Abb. 2a). Dabei besteht jeder Faden aus bis zu 400 übereinander gezogenen Einzelfäden.

Für den Bau selbst beginnt die Spinne damit, einen Brückenfaden zwischen zwei Punkten (Punkt A und B in Abb. 2b) zu spannen, der am Ende kleine Schlaufen bildet, die als mechanische Verankerung dienen. Danach beißt sie diesen Faden durch und rollt ihn wieder bis zum Mittelpunkt des Brückenfadens (Punkt M in Abb. 2b) auf. Von dort seilt sie sich bis zu einem vierten Punkt (Punkt C in Abb. 2b) ab. Die entstandene Y-Struktur dient als Grundlage für das weitere Netz.

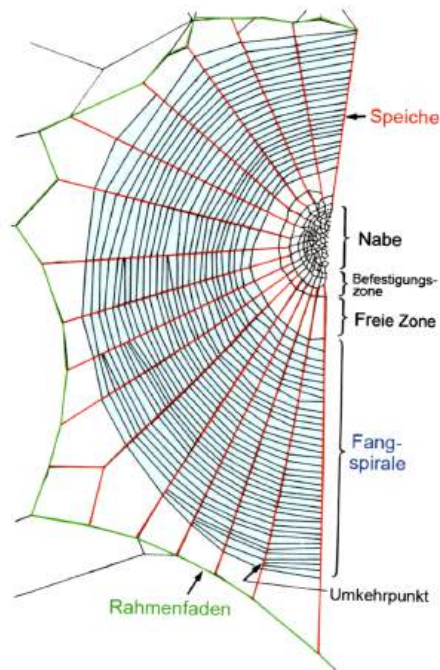
Von dem vierten Punkt C läuft die Spinne wieder zum Mittelpunkt M des ehemaligen Brückenfadens, der auch den Mittelpunkt des Netzes darstellt. Von dort aus fängt die Spinne an, Speichenfäden und Rahmenfäden zu platzieren, wobei der nächste Faden immer dort beginnt, wo der letzte Faden endet. Die Platzierung der Speichenfäden entscheidet die Spinne durch das Abtasten der Abstände zwischen den bereits vorhandenen Speichenfäden mit ihren Vorderbeinen. Dort wo der größte Abstand ist, wird der nächste Faden abstandsmittig platziert. Dabei muss die neu platzierte Speiche in die der vorherigen entgegengesetzte Richtung gezogen werden.

Sind alle Speichen- und Rahmenfäden nach fünf bis zehn Minuten platziert, beginnt der Bau der Fangspirale. Dazu erstellt die Spinne eine Hilfsspirale, die sowohl die Befestigungszone bildet als auch den späteren Bau der Fangspirale erleichtert. Nach einer kurzen Pause beginnt die Spinne, die endgültige Fangspirale zu konstruieren. Dies dauert etwa 30 bis 40 Minuten und ist somit der zeitaufwendigste Abschnitt des Netzbaus.

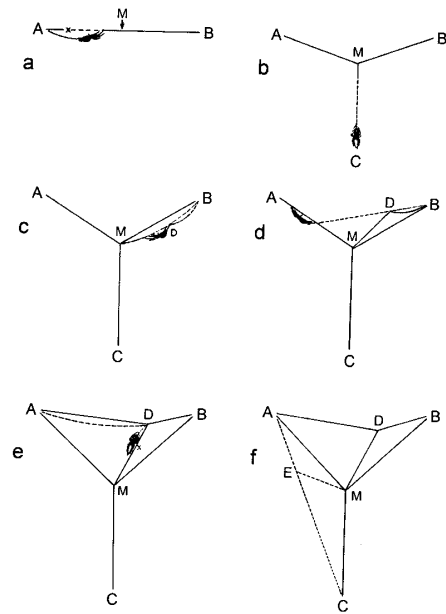
Die Nabe des Netzes mit dem Mittelpunkt M ist dabei leicht nach oben versetzt, sodass die Fangspirale in der unteren Hälfte größer ist, als über der Nabe. Infolgedessen baut die Spinne auch Umkehrpunkte in die untere Fangspiralenhälfte ein (siehe Abb. 2a).

Die gesamte Fadenlänge eines Netzes beträgt am Ende ca. 20 Meter bei einem Gesamtgewicht von etwa einem Milligramm. [1] Die Spinne baut dabei das gesamte Netz ausschließlich mit ihrem Tastsinn und unabhängig von der Schwerkraft. Es ist außerdem davon auszugehen, dass der Bau der Spinnennetze den Spinnen angeboren ist, das heißt im genetischen Code enthalten ist.





(a) Zonen im Radnetz [15]



(b) Beginn des Bau eines Radnetzes [16]

Abbildung 2: Das Radnetz

### 2.1.2 Geometrie und Bau eines Spinnennetzes in der Simulation

Nach einer Einarbeitungsphase in das Programm ANSYS wurden zunächst stark vereinfachte Spinnennetze modelliert, die aus wenigen Speichen und konzentrischen Polygonen bestanden. Bei diesen Netzen gab es noch keine Aufteilung in verschiedene Zonen und auch keine Rahmenfäden (siehe Abb. 5, Anhangseite IV).

In einem nächsten Schritt wurden statt der Polygone Spiralen verwendet, was bereits deutlich realistischer ist. Allerdings sind auch hier noch keine Rahmenfäden vorhanden (siehe Abb. 6, Anhangseite IV). Entscheidend war schließlich, realistische Werte für Größe und Speichenanzahl der Radnetze festzulegen, um vergleichbare realistische und vereinfachte Netze zu modellieren. Beide Netze bestehen aus 24 Speichen, jeweils mit einem Innenwinkel von  $15^\circ$ , wobei die Maße in horizontaler Richtung etwa 40 cm betragen (ohne Rahmenfäden). Die Fangspirale durchläuft jeden Speichenfaden alle 8 mm.

Die Anzahl der Speichen sowie die Innenwinkel stammen aus Literaturwerten zu Spinnennetzen (siehe [2]). Die Anzahl der Durchläufe der Fangspirale pro Speiche wurde mittels Bildern von Spinnennetzen ermittelt. Dafür wurde der Abstand zweier Überschneidungen auf einer Speiche, sowie der Gesamtanteil der Fangspirale auf dem Netz ermittelt. Der Mittelwert ergab, dass auf einem Prozent der Fangspirale 0,25 Überschneidungen vorkommen. Auf den simulierten Netzen ergab dies eine Überschneidung alle acht Millimeter ([4], [7], [5], [6]).

### Realistisch

Die realistischen Simulationsnetze orientieren sich an Radnetzen, wie sie in der Natur vorkommen. Es wurden alle Zonen eines realen Radnetzes übernommen. Dabei gelten die folgenden Verhältnisse:

Nabe: 5 % = 1 cm

Befestigungszone: 15 % = 3 cm

freie Zone: 10 % = 2 cm

Fangspirale: 70 % = 14 cm

In der unteren Hälfte gibt es außerdem vier Umkehrpunkte, weshalb die Nabe etwa 2 cm nach oben verschoben und der Radius in vertikaler Richtung größer ist.

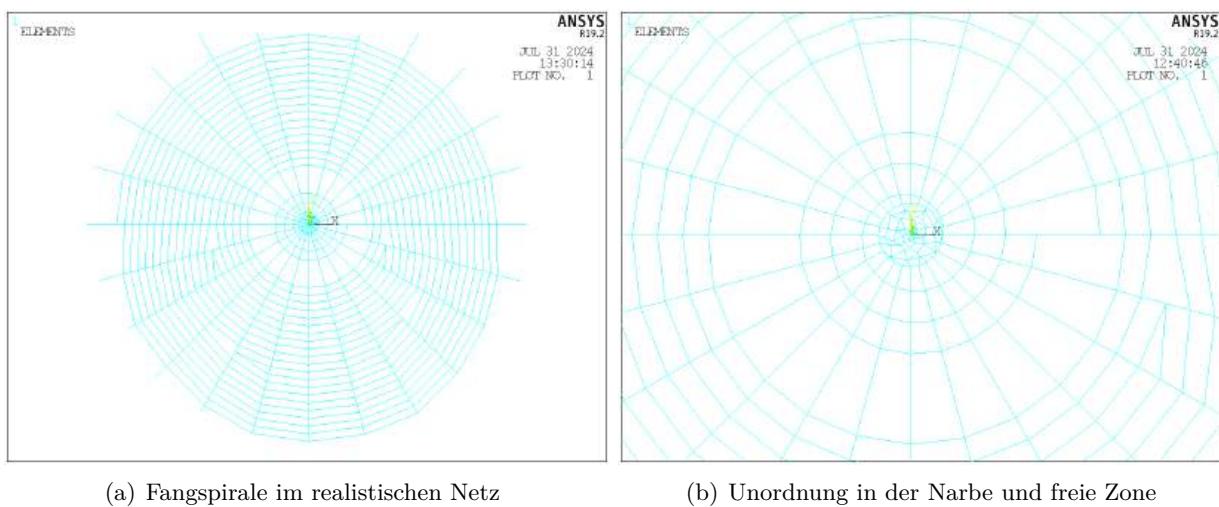


Abbildung 3: Simulation: Spinnennetz realistisch

### Vereinfacht

Die vereinfachten Simulationsnetze bestehen nur aus einer Fangspirale und Rahmenfäden. Nabe, Befestigungszone sowie freie Zone fehlen, da diese vor allem einen biologischen Nutzen haben [2].

Es sollte untersucht werden, inwiefern das Fehlen dieser Zonen einen Einfluss auf das mechanische Verhalten von Spinnennetzen haben kann. Umkehrpunkte sind ebenso nicht vorhanden. Am Rand der Fangspirale befindet sich ein Kreis, sodass der Radius überall gleich groß ist.

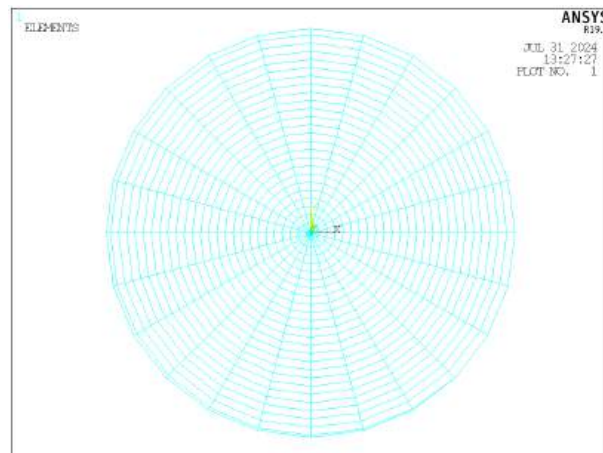


Abbildung 4: Simulation: Fangspirale im vereinfachten Netz

### Rahmenfäden

Für die Befestigung wurden insgesamt acht verschiedene Geometrievarianten bei beiden Netzen simuliert, von denen zwei später genauer untersucht wurden (siehe Abb. 7, Anhangseite V).

### Untersuchte Netze

Im weiteren Verlauf des Projektes wurde der Fokus vor allem auf die Netze 4 und 8 gelegt, da bei diesen die Art der Festmachung am nächsten an der Realität war. Außerdem sollte der Unterschied zwischen dreieckiger und fünfeckiger Rahmenfadengeometrie untersucht werden, da die Grundstruktur der Rahmenfäden dreieckig ist, umgebungsbedingt jedoch fünfeckige Rahmenfadenstrukturen üblicher sind.

Bei beiden Netzen wurden das realistische und das vereinfachte Netz jeweils mit einem als auch mit drei verschiedenen Fadentypen untersucht, sodass insgesamt acht Simulationsnetze genauer untersucht wurden.

### 2.1.3 Materialwerte

In bereits existierender Literatur wurden verschiedene mechanische Eigenschaften von Spinnenseide allgemein sowie bei konkreten Fadentypen recherchiert. Die Ergebnisse dieser Literaturrecherche sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Die Gesamtlänge des Fadens beträgt ca. 20 m, wobei das Spinnennetz jedoch nur ca. 1 mg wiegt. Zwischen Fangspirale und Speichen gibt es bei der Kreuzspinne etwa 1000-1500 Schweißpunkte, d.h. Stellen, an denen zwei übereinanderliegende Fäden miteinander verklebt werden. Ein Spinnennetz besteht aus drei verschiedenen Fadentypen, von denen jeder unterschiedliche mechanische Eigenschaften hat.

Tabelle 1: Quellenwerte

Fadentyp	allgemein	Speichenfaden	Rahmenfaden
Dichte in $g/cm^3$	1.3 [18]		
Durchmesser in $\mu m$	1-2 [1]	2-3 [3]	6 [3]
E-Modul in $GPa$	6 [13]      10 [18]		
Zugspannung in $MPa$	700 [13]		1100 [18]

Da nicht zu allen Eigenschaften ausreichend Werte gegeben waren, wurden für die Simulation einige Näherungen vorgenommen. Die Querkontraktion ist der Literatur zufolge noch nicht untersucht worden, weshalb hier von einer Poissonzahl von 0.3 ausgegangen wurde. Allen Fadentypen wurde dieselbe Dichte zugeordnet. Es sind keine fadentypspezifischen E-Module bekannt, jedoch muss die Fangspirale elastischer als die Speichenfäden sein, welche wiederum elastischer als die Rahmenfäden sind. Auch sind nur Durchmesser von Speichen- und Rahmenfäden der Literatur zu entnehmen. Der Fangspiralfaden muss allerdings am dünnsten sein. Die genauen Werte sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Bei der Zugfestigkeit sind ebenfalls nicht alle Werte bekannt, jedoch weiß man auch hier, dass Rahmenfäden zugfester sind als Speichenfäden, welche wiederum zugfester als die Fangspirale sein müssen.

Die jeweilige Gesamtfadenlänge sowie das Gewicht der Spinnennetze sind in der Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 2: Werte in der Simulation

Anzahl Fadentypen Fadentyp	drei			einer
	Fangspirale	Speichen	Rahmenfaden	
Poissonzahl	0.3	0.3	0.3	0.3
Dichte in $g/cm^3$	1.3	1.3	1.3	1.3
Durchmesser in $\mu m$	1	3	6	2.5
E-Modul in GPa	8	10	13	10

Tabelle 3: Gesamtfadenlänge und Gesamtgewicht der Simulationsnetze

Spinnennetz	realistisch			
	04.1	04.2	08.1	08.2
Gesamtfadenlänge in $m$	27,05	27,05	25,87	25,87
Gesamtgewicht in $mg$	0,0208	0,0249	0,1827	0,2378

Spinnennetz	vereinfacht			
	04.1	04.2	08.1	08.2
Gesamtfadenlänge in $m$	27,27	27,27	26,29	26,29
Gesamtgewicht $mg$	0,0208	0,0251	0,1859	0,2416

#### 2.1.4 Methode: Modalanalyse

Bei der Modalanalyse werden die Eigenfrequenzen (siehe Kap. 1.2) der Netze ermittelt. Bei jedem der acht Netze wird eine Modalanalyse durchgeführt und die ersten sechs Eigenfrequenzen ermittelt. Die jeweils entstandenen Verformungen werden graphisch dargestellt.

Genauer untersucht und gedeutet werden die ersten drei Eigenfrequenzen, sowie die sechste.

Dabei gilt, dass die erste Frequenz die gefährlichste ist, die größten Verformungen bedingt und am ehesten zur Zerstörung führen kann, da die höheren Frequenzen schneller als tiefere abgedämpft werden (Abbildungen ab Anhangseite VII).

Die Eigenfrequenzen sowie die Verformung werden dabei vom Programm ANSYS berechnet.

### 2.1.5 Methode: Aufprall einer Fliege

Um den Aufprall einer Fliege auf die Netze zu simulieren, muss zunächst die kinetische Energie der Fliege berechnet werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde mit einer gemeinen Stubenfliege, *Musca domestica*, gearbeitet.

Die kinetische Energie einer gemeinen Stubenfliege wurde mit den folgenden Werten berechnet:

$$\text{Geschwindigkeit: } v = 3 \text{ m/s [11]}$$

$$\text{Masse: } m = 0.000007 \text{ kg [8]}$$

$$\text{kinetische Energie: } E = 1/2 \cdot m \cdot v^2 = 0.0000315 \text{ J}$$

Um die Aufprallfläche der Fliege zu bestimmen wurde davon ausgegangen, dass die gemeine Stubenfliege frontal, mit ihrem Kopf, auf das Netz aufprallt. Um die Fläche des Kopfes der Fliege zu berechnen, wurde mit einer Studie zu *Musca crassirostris* gearbeitet, da diese Fliegenart ähnlich groß wie die gemeine Stubenfliege ist und uns keine Werte zur gemeinen Stubenfliege zur Verfügung standen.

Dabei wurden mithilfe von zwei Bildern vom Kopf der *Musca crassirostris* dessen Höhe und Breite ermittelt und anschließend mit der Formel zur Berechnung von Ellipsen die Kopffläche berechnet und gemittelt.

Tabelle 4: Ermittlung der Fläche des Kopfes einer gemeinen Stubenfliege

	Bild 1 [9]	Bild 2 [10]	Mittelwert
Kopfhöhe in <i>mm</i>	1,277	1,213	1,245
Kopfbreite in <i>mm</i>	1,66	1,7	1,68
Fläche in <i>mm</i> <sup>2</sup>			1,643

Die berechnete Fläche ist kleiner als eine Lücke zwischen den Fäden, weswegen die Kraft auf einen Knotenpunkt auf der Fangspirale ausgeübt werden sollte. Ein Knotenpunkt der Fangspirale zu wählen ist deswegen sinnvoll, weil die Beute der Spinnen zum einen in der Fangspirale gefangen wird, zum anderen ist es auch der Bestandteil des Netzes mit der größten Fläche, sodass ein Aufprall in der Fangspirale am wahrscheinlichsten ist.

Da die Simulation des Aufpralls fehlschlug und der Zeitrahmen nicht mehr ausreichte, um das Problem zu beheben, wurde stattdessen berechnet, ob ein einzelner Faden des Netzes dem Aufprall einer gemeinen Stubenfliege standhalten kann. Dafür wurde die Zugspannung, die in diesem Fall auf dem Faden lasten würde, mit den Zugfestigkeiten der Fäden, die aus der Literatur bekannt sind, verglichen.

## 2.2 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die aus den Simulationen gewonnenen Ergebnisse vorgestellt, gedeutet und diskutiert. Dies gilt auch für mögliche Fehlerquellen.

### 2.2.1 Ergebnisse

#### Modalanalyse

Die bei der Modalanalyse untersuchten sechs Eigenfrequenzen sind hier in den Tabellen 5 und 6 aufgeführt, die Bilder der Verformungen sind im Anhang 3 angefügt.

Die Eigenfrequenzen liegen mit Werten zwischen  $0,0049542\text{Hz}$  und  $0,17845\text{Hz}$  in einem sehr tiefen Bereich.

Vergleicht man die Eigenfrequenzen von Spinnennetzen mit einem oder mehreren Fadentypen, fällt auf, dass die Eigenfrequenzen der Netze, die aus mehreren Fadentypen aufgebaut sind, höher sind.

Dabei ist die Abweichung zwischen den Netzen 04, also mit einer dreieckigen Rahmenstruktur, größer, als zwischen den Netzen 08, die eine fünfeckige Rahmenstruktur besitzen.

Die Eigenfrequenzen der Netze 04 sind immer tiefer als die jeweilige Eigenfrequenz der Netze 08.

Dies gilt sowohl für die realistisch simulierten Netze als auch für die vereinfachten Netze.

Beim Vergleich der Eigenfrequenzen der realistischen mit denen der vereinfachten Netze zeigt sich, dass die Eigenfrequenzen der Netze 04 "realistisch" und "vereinfacht" sich sehr stark ähneln. Die Abweichungen liegen dabei am häufigsten in der vierten Nachkommastelle.

Die Unterschiede zwischen den Eigenfrequenzen der Netze 08 "realistisch" und "vereinfacht" ist größer als der der Netze 04, da hier die Abweichungen teilweise bereits in der zweiten oder dritten Nachkommastelle auftreten, allerdings sind auch diese Unterschiede so klein, dass sie keine praktische Relevanz haben.

Die relative Verformung der Netze bei einer Anregung durch ihre Eigenfrequenzen wird im Folgenden beschrieben:

Bei der ersten Frequenz verteilt sich die maximale Verformung bei den Netzen 04.2 "realistisch" und "vereinfacht" kreisförmig auf die gesamte Netzfläche zwischen Mittelpunkt des Netzes und den äußeren Grenzen der Fangspirale (siehe Abb. 9a,b und Abb. 11a,b). Bei den Netzen 04.1 "realistisch" und "vereinfacht" erstreckt sich die maximale Verformung zwar auch über den Mittelpunkt des Netzes, allerdings nicht so weit nach außen wie bei den Netzen 04.2 (siehe Abb. 8a,b und Abb. 10a,b). Bei den Netzen 08.1 und 08.2 "realistisch" und "vereinfacht" ist die Fläche, die eine maximale Verformung erleidet, deutlich kleiner als bei den Netzen 04.1 und 04.2 "realistisch" und "vereinfacht". Die Netze 08.1 "realistisch" und "vereinfacht" weisen allerdings ebenfalls eine, bei der maximalen Verformung, kreisförmige Form auf, die von der Nabe ausgeht (siehe Abb. 12a,b und Abb. 14a,b). Dies ist bei den Netzen 08.2 "realistisch" und "vereinfacht" nicht der Fall, da sich hier die maximale Verformung über der Nabe bis zu dem oberen Rahmenfaden ausbreitet (siehe Abb. 13a,b und Abb. 15a,b).

Bei den Netzen 04.1, 04.2 und 08.1 "realistisch" und "vereinfacht" geht die Verformung vom Mittelpunkt des Netzes symmetrisch nach außen aus. Keine bis wenig Verformung erleiden dabei die Rahmenfaden-

ecken. Die Verformung der Netze 08.2 "realistisch" und "vereinfacht" ist über der Nabe größer und zur y-Achse symmetrisch. Auch hier liegt keine bis wenig Verformung an den Rahmenfadenecken vor.

Die Eigenfrequenzen zwei und drei weisen immer eine gewisse Symmetrie in der Verteilung der unterschiedlichen Verformungen auf und führen zu einer wellenförmigen Verformung (siehe Abb. 8c,d; Abb. 9c,d; Abb. 10c,d; Abb. 11c,d; Abb. 12c,d; Abb. 13c,d; Abb. 14c,d und Abb. 15c,d; ).

Die Frequenz sechs führt bei den Netzen 04.2, 08.1, 08.2 "realistisch" und "vereinfacht" zu einer Ausbeulung der Netzmitte (siehe Abb. 9e,f; Abb. 11e,f; Abb. 12e,f; Abb. 13e,f; Abb. 14e,f und Abb. 15e,f).

Bei den Netzen 04.1 "realistisch" und "vereinfacht" kommt es zu einer wellenförmigen Verformung (siehe Abb. 8e,f und Abb. 10).

Insgesamt lässt sich also feststellen, dass sich die Verformungen trotz unterschiedlicher Eigenfrequenzen zwischen den realistischen und vereinfachten Netzen, bei gleichen Rahmenfäden, stark ähneln. Dies gilt auch für die Entwicklung der Eigenfrequenzen.

Tabelle 5: Eigenfrequenzen der Netze 04

Eigenfrequenz Nr.	04.1 realistisch	04.2 realistisch	04.1 vereinfacht	04.2 vereinfacht
1 in Hz	0,020016	0,0049955	0,019989	0,0049542
2 in Hz	0,041702	0,012772	0,041831	0,013131
3 in Hz	0,042061	0,013043	0,04215	0,013162
4 in Hz	0,06817	0,046862	0,068176	0,048418
5 in Hz	0,083511	0,047555	0,083689	0,048612
6 in Hz	0,083703	0,056639	0,084064	0,057188

Tabelle 6: Eigenfrequenzen der Netze 08

Eigenfrequenz Nr.	08.1 realistisch	08.2 realistisch	08.1 vereinfacht	08.2 vereinfacht
1 in Hz	0,046045	0,015769	0,044363	0,015040
2 in Hz	0,092172	0,030702	0,088179	0,029791
3 in Hz	0,11968	0,039315	0,11538	0,038787
4 in Hz	0,13496	0,068587	0,13329	0,071182
5 in Hz	0,16822	0,072193	0,16514	0,071918
6 in Hz	0,17845	0,094745	0,17208	0,091940



### Aufprall einer Fliege

Wie in Kapitel 2.1.5 bereits beschrieben, schlug die FEM-Simulation des Aufpralls einer gemeinen Stubenfliege in das Netz fehl, die Rechnung konvergierte nicht.

Daraufhin wurde über den Energieerhaltungssatz analytisch ermittelt, ab wann ein Einzelfaden dem Aufprall standhalten könnte. Die kinetische Energie einer Fliege wird vom Faden, der wie eine Zugfeder wirkt, in elastische Energie umgewandelt. Eine Fliege mit der Masse  $m$ , Geschwindigkeit  $v$ , hat die kinetische Energie  $E_{kin} = 1/2 \cdot m \cdot v^2$ . Diese wird vom Spinnenfaden in elastisch gespeicherte Energie umgewandelt  $E_{Elast} = 1/2 K \cdot x^2$ . Die Federkonstante  $K = \left(\frac{E \cdot A}{L_0}\right)$  wird durch Elastizitätsmodul  $E$ , Querschnittsfläche  $A$  und Ausgangslänge  $L_0$  bestimmt,  $x$  ist die Längung des Fadens.

Daraus wurde für die spezifischen Fäden mit gegebenen Dicken und Zugfestigkeiten unter Annahme linear-elastischen Verhaltens die erforderliche Mindestlänge errechnet, damit der Faden die gesamte kinetische Energie der Fliege aufnehmen kann ohne zu reißen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Mindestlänge der Fadentypen um einem Aufprall standzuhalten

Fadentyp	Dicke in <i>mm</i>	Zugfestigkeit in MPa	E-Modul in MPa	Mindestlänge in <i>mm</i>
Rahmenfaden	0.006	1100	13000	23,94
Speichenfaden	0.003	900	10000	181,9
Fangspiralfaden	0.001	700	8000	1309,62

Man sieht, dass bereits ein Rahmenfaden mit 2,4 cm Länge gerade noch die kinetische Energie einer 7 mg schweren Fliege, die mit 3 m/s heranfliegt, aufnehmen kann ohne zu reißen. Die Speichenfäden müssen schon mindestens 18,2 cm und die Fangspiralfäden sogar 1,31 m lang sein.

Außerdem wurde berechnet, ob einzelne Fäden bzw. Fadengruppen des Netzes "08.1 realistisch" dem Aufprall standhalten könnten. Dafür wurde für einen spezifischen Faden die beim Aufprall lastende Zugspannung ermittelt. Anschließend wurde dieser Wert mit der eigentlichen Zugfestigkeit des jeweiligen Faden verglichen. Untersucht wurden folgende Fäden und Fadengruppen am Netz "08.1 realistisch":

**Kürzester und längster Rahmenfaden:** Da die Rahmenfäden sich am Rand des Netzes befinden, können sie die Energie an weniger Fäden weiterleiten, weshalb es Sinn ergibt Einzelfäden zu untersuchen.

**Einzelner Speichenfaden:** Die Speichenfäden bilden das Grundgerüst für die Fangspirale, weswegen ein Versagen dieser auch zur Zerstörung der Fangspirale führen würde.

**Zwei Speichenfäden:** Aufgrund der Netzsymmetrie wird die meiste Energie eines Aufpralls auf eine Speiche auch auf die gegenüberliegende Speiche übertragen, weswegen dieses Szenario realistischer als der Aufprall auf eine Speiche ist.

**Alle Speichenfäden:** Kommt es zu einem Aufprall in der Umgebung der Netzmitte, wird die Energie auf alle Speichenfäden verteilt.

**Alle Einzelfäden der Fangspirale:** Auch wenn die Fangspirale aus vielen Einzelfäden besteht, wird hier vereinfacht mit der Gesamtlänge aller Fangspiralfäden gerechnet.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in der folgenden Tabelle 8 dargestellt:

Tabelle 8: Standhaftigkeit der Rahmenfäden des Netzes 08.1 realistisch bei einem Aufprall

	Kürzester Rahmenfaden	Längster Rahmenfaden
Durchmesser in $mm$	0.006	0.006
E-Modul in $N/mm^2$	13000	13000
Fadenlänge zu Beginn in $mm$	59.46	155
Verformung (Längung) in $mm$	3.192	5.154
lastende Zugspannung in $MPa$	697.964	432.295
Zugfestigkeit in $MPa$	1100	1100
Faden hält?	ja	ja

	Einzelner Speichenfaden	Zwei Speichenfäden
Durchmesser in $mm$	0.003	0.003
E-Modul in $N/mm^2$	10000	10000
Fadenlänge zu Beginn in $mm$	200	400
Verformung (Längung) in $mm$	13.351	18.881
lastende Zugspannung in $MPa$	667.558	472.035
Zugfestigkeit in $MPa$	700	700
Faden hält?	ja	ja

	Alle Speichenfäden	Alle Einzelfäden der Fangspirale
Durchmesser in $mm$	0.003	0.001
E-Modul in $N/mm^2$	10000	8000
Fadenlänge zu Beginn in $mm$	6461.6	16516
Verformung (Längung) in $mm$	75.888	406.942
lastende Zugspannung in $MPa$	117.445	197.114
Zugfestigkeit in $MPa$	700	700
Faden hält?	ja	ja

Es lässt sich feststellen, dass alle Fäden bzw. Fadengruppen im Netz "08.1 realistisch" standhalten würden, wenn eine Fliege auf das Netz prallt.

Zum Vergleich wurden nun noch die gleichen Berechnungen am Netz "08.2 realistisch" durchgeführt, um aufzuzeigen, dass die unterschiedlichen Fadentypen nicht nur einen biologischen, sondern auch einen mechanischen Nutzen haben.

Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 9 aufgeführt:

Tabelle 9: Standhaftigkeit der Rahmenfäden des Netzes 08.2 realistisch bei einem Aufprall

	Kürzester Rahmenfaden	Längster Rahmenfaden
Durchmesser in $mm$	0.003	0.003
E-Modul in $N/mm^2$	10000	10000
Fadenlänge zu Beginn in $mm$	59.46	155
Verformung (Längung) in $mm$	7.280	11.754
lastende Zugspannung in $MPa$	1224.311	758.295
Zugfestigkeit in $MPa$	700	700
Faden hält?	nein	nein

	Einzelner Speichenfaden	Zwei Speichenfäden
Durchmesser in $mm$	0.003	0.003
E-Modul in $N/mm^2$	10000	10000
Fadenlänge zu Beginn in $mm$	200	400
Verformung (Längung) in $mm$	13.351	18.881
lastende Zugspannung in $MPa$	667.558	472.035
Zugfestigkeit in $MPa$	700	700
Faden hält?	ja	ja

	Alle Speichenfäden	Alle Einzelfäden der Fangspirale
Durchmesser in $mm$	0.003	0.003
E-Modul in $N/mm^2$	10000	10000
Fadenlänge zu Beginn in $mm$	6461.6	16516
Verformung (Längung) in $mm$	75.888	121.327
lastende Zugspannung in $MPa$	117.445	73.460
Zugfestigkeit in $MPa$	700	700
Faden hält?	ja	ja

Bei diesen Berechnungen lässt sich feststellen, dass die Rahmenfäden einem Aufprall nicht standhalten würden. Dies ist auf den kleineren Durchmesser sowie die verringerte Zugfestigkeit zurückzuführen. Die Speichen- und Fangspiralfäden würden dem Aufprall standhalten, wobei hier anzumerken ist, dass sich die Werte der Speichenfäden nicht verändert haben, da die Eigenschaften der Speichenfäden als Mittelwert für die Netze mit einem Fadentyp benutzt wird. Bei den Fangspiralfäden sinkt die lastende Zugspannung um ca. das 0,4-fache bei gleicher Fadenlänge durch das veränderte E-Modul und dem vergrößerten Durchmesser.

Insgesamt weisen die Netze Gesamtfadenlängen von ca. 26 m auf. Diese verteilt sich auf ca. 2,9 m Rahmen-, 6,5 m Speichen- und 16,5 m Fangspiralfäden. Auch wenn sich bei einem Aufprall einer typischen Stubenfliege die Belastung nicht homogen über das Netz verteilt, hat es doch die Kapazität, ein Mehrfaches deren kinetischer Energie sicher aufzunehmen, ohne dabei selbst Schaden zu nehmen.

### 2.2.2 Auswertung/Deutung

#### Modalanalyse

Die Modalanalyse zeigt auf, dass Spinnennetze in der Natur zwar durch Sturm aber nicht durch periodische Anregungen des Windes zerstört werden können, da ihre Eigenfrequenzen viel tiefer als typische Windböen-Frequenzen sind.

Des Weiteren zeigt sie, dass die Eigenfrequenzen ähnliche Verformungen bei den Netzen 04 und 08 hervorrufen.

Eine weitere Erkenntnis ist, dass die einzelnen Fadentypen einen größeren Einfluss auf die Eigenfrequenzen zu haben scheinen. Die Eigenfrequenzen der Netze "realistisch" und "vereinfacht" sind ähnlicher als die Eigenfrequenzen der gleichen Netze mit einem bzw. drei Fadentypen. Gleichzeitig zeigt dies auch, dass die freie Zone und die Unordnung in der Nabe kaum mechanischen Einfluss haben.

#### Aufprall einer Fliege

Auch wenn es wegen numerischer Probleme und aus Zeitgründen nicht gelungen ist, den Aufprall einer gemeinen Stubenfliege auf die Netze zu simulieren, so liefert die Untersuchung der Zugfestigkeit der einzelnen Fäden und Fadengruppen bereits Ergebnisse zu den mechanischen Eigenschaften der Netze. Zum einen zeigen die Ergebnisse auf, dass bereits ein einzelner Faden, und zwar jedes einzelnen Fadentyps, dem Aufprall einer Fliege standhalten kann und das trotz der sehr dünnen Durchmesser. Hierbei ist anzumerken, dass je länger ein Faden ist, desto niedriger ist die Zugspannung, die durch den Aufprall der Fliege und der damit einhergehenden Umwandlung der kinetischen Energie in elastisch gespeicherte Energie einhergeht. Je länger der Faden, desto mehr Energie kann er durch elastische Verformung abfedern.

Zum anderen zeigt der Vergleich der Netze "08.1 realistisch" und "08.2 realistisch", dass die Verwendung unterschiedlicher Fadentypen auch mechanisch gesehen sinnvoll ist, da die Rahmenfäden des Netzes "08.2 realistisch" aufgrund von kleinerem Durchmesser und geringerer Zugfestigkeit bei einem Aufprall versagen würden. Außerdem verbraucht die Spinne durch die unterschiedlich verbauten Fadentypen auf die Masse bezogen, weniger Material.

Bei diesen Berechnungen ist es allerdings wichtig zu berücksichtigen, dass sie die FEM-Simulation eines Aufpralls nicht vollständig ersetzen kann und es sich um ein rein mathematisches Ergebnis handelt.

### 2.2.3 Fehlerdiskussion

Eine Simulation ist immer eine Vereinfachung. Dadurch kommt es zu Ungenauigkeiten, die auch in dieser Arbeit nicht zu vermeiden waren.

Zum einen konnten die Netzgeometrien aufgrund ihrer Komplexität nicht exakt simuliert werden. So ist es z.B. sehr aufwändig die Unordnung in der Nabe und alle anderen geometrischen Details genau zu erfassen und nachzubilden.

Die Natur ist sehr variationsreich. Diese Variation ist auch im Durchmesser der Spinnennetze vorhanden.

In dieser Arbeit wurde mit einem waagerechten Durchmesser von 40 cm gearbeitet, womit sich bei den simulierten Netzen Gesamtlängen der Fäden von ca. 26 bis 27 Metern ergaben. Dies liegt etwas über der Literaturangabe von ca. 20 Metern.

Zum anderen fehlen in der Literatur viele Werte, gerade zu den mechanischen Eigenschaften der einzelnen Fadentypen. Daher mussten zum Teil Werte für die spezifischen Fadentypen angenommen werden. Dies war der Fall bei den E-Modulen der Fangspiralen- und Speichenfäden, aber auch bei der Poissonzahl und dem Durchmesser der Fangspiralenfäden. Die Dichte unterscheidet sich je nach Fadentyp wahrscheinlich auch, denn die Zusammensetzungen der Proteine eines Fadens sind laut Literatur unterschiedlich. In der vorliegenden Arbeit wurde jedoch mit einer einheitlichen Dichte von  $1,3 \text{ g/cm}^3$  gearbeitet.

Diese Ungenauigkeiten haben auch die Masse der simulierten Netze beeinflusst, wobei hier festzustellen ist, dass die Masse der simulierten Netze unter dem Literaturwert von ca.  $1 \text{ mg}$  liegt.

## 2.3 Fazit

Auch wenn ein ursprüngliches Ziel (die Simulation eines Aufpralls einer Fliege auf das Netz), nicht erreicht wurde, so liefern die erhaltenen Ergebnisse Antworten auf einige Fragen. Die Simulationen und Ergebnisse und selbst die festgestellten Problematiken sind Fortschritte auf diesem Gebiet und bilden Grundlage für die weitere Forschung an der Mechanik von Spinnennetzen.

Da die Modalanalyse außerdem gezeigt hat, dass die vereinfachten Netze ähnliche Eigenfrequenzen wie die realistischen Netze besitzen, ist davon auszugehen, dass dies auch auf den Aufprall einer Fliege zutreffen könnte und ähnliche Ergebnisse zustande kämen, was eine technische Umsetzung, aus geometrischer Sicht, vereinfachen könnte.

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Modalanalyse verschiedener Netztypen konnte deren Eigenfrequenzen bestimmt werden. Der Einfluss von Rahmengeometrie und Fadentypen wurde ermittelt und aufgezeigt, dass die vereinfachten Netze ähnliche Eigenfrequenzen wie die realistischen Netze aufweisen. Spinnennetze könnten aber noch deutlich über diese Arbeit hinaus untersucht werden. Beispielsweise wäre es interessant, sich das Verhalten der simulierten Netze anzuschauen, die andere Rahmengeometrien haben und in dieser Arbeit nicht untersucht wurden. So könnte der Einfluss der Befestigungsart genauer untersucht werden. Des Weiteren könnten Spinnennetze mit komplexeren Geometrien nach demselben Prinzip modelliert und untersucht werden, zum Beispiel Baldachin- oder Trichternetze.

Außerdem wäre es sinnvoll, die Berechnungen zum Aufprall einer Fliege zu überarbeiten, um Ergebnisse für das gesamte Netz zu erhalten.

Langfristig müssten aber auch mehr mechanische Werte zu den einzelnen Fadentypen erforscht werden, um die Genauigkeit der Simulationen zu verbessern.

Ein weiterer Schritt wäre, soweit möglich, eine technische Umsetzung der Netzgeometrien und ihrer mechanischen Eigenschaften auf Basis der gewonnenen Ergebnisse zu untersuchen. Dafür wäre beispielsweise die Entwicklung von Netzen mithilfe von 3D-Druck und anschließende Versuchsreihen bezüglich deren mechanischen Eigenschaften möglich.

## Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns herzlich bei allen bedanken, die uns bei diesem Forschungsprojekt unterstützt haben.

Zunächst bei unseren Betreuern vom Institut für angewandte Materialien am KIT, Dr. Iwiza Tesari, Dr. Klaus Bethge, Dr. Karlheinz Weber, sowie Dr. Roland Kappel, für die gute Einführung in das Thema, sowohl bezüglich der Biologie als auch für all die Hilfe und Erklärungen zu ANSYS und Mechanik allgemein.

Für die Möglichkeit, unsere Kooperationsphase am IAM-MMI durchführen zu können wollen wir uns bei Prof. Christian Greiner und Prof. Christoph Kirchlechner bedanken.

Ein großer Dank gilt dem Ehepaar Josephine und Dr. Hans-Werner Hector, ohne die es die Förderung hochbegabter Jugendlicher im naturwissenschaftlichen Bereich nicht geben würde.

Wir bedanken uns bei unseren Kursleitern Herr Knecht und Herr Gruber für die Betreuung in der gesamten Kooperationsphase, sowie bei allen anderen Kursleiter\*innen, die uns jahrelang beim Hector-Seminar begleitet haben und bei denen wir zahlreiche Erfahrungen sammeln durften.



## Verzeichnisse

### Abkürzungsverzeichnis

FEM: Finite-Element-Methode

Netz 04: Umfasst die simulierten Netze 04.1 und 04.2 realistisch und vereinfacht mit einer dreieckigen Rahmengeometrie (siehe 7d).

Netz 08: Umfasst die simulierten Netze 08.1 und 08.2 realistisch und vereinfacht mit einer fünfeckigen Rahmengeometrie (siehe 7h).

Netz "realistisch": Simuliertes Netz mit einer realistischen Geometrie (siehe Abschnitt 2.1.2).

Netz "vereinfacht": Simuliertes Netz mit einer vereinfachten Geometrie (siehe Abschnitt 2.1.2).

Netz xx.1: simuliertes Netz, welches aus drei Fadentypen besteht.

Netz xx.2: simuliertes Netz, welches aus einem einzigen Fadentyp besteht.

## Quellenverzeichnis

### Literatur

- [1] Widmer Alexander. *Die Spinnenseide im Radnetz*. S. 18. URL: [https://nanoscience.unibas.ch/fileadmin/user\\_upload/nanoscience/06\\_Services/Nano\\_Imaging\\_Lab/Publikationen/Praktikumsarbeiten/spinnenseide-ma.pdf](https://nanoscience.unibas.ch/fileadmin/user_upload/nanoscience/06_Services/Nano_Imaging_Lab/Publikationen/Praktikumsarbeiten/spinnenseide-ma.pdf). letzter Zugriff: 24.11.2023.
- [2] Widmer Alexander. *Die Spinnenseide im Radnetz*. S. 6-7. URL: [https://nanoscience.unibas.ch/fileadmin/user\\_upload/nanoscience/06\\_Services/Nano\\_Imaging\\_Lab/Publikationen/Praktikumsarbeiten/spinnenseide-ma.pdf](https://nanoscience.unibas.ch/fileadmin/user_upload/nanoscience/06_Services/Nano_Imaging_Lab/Publikationen/Praktikumsarbeiten/spinnenseide-ma.pdf). letzter Zugriff: 24.11.2023.
- [3] Widmer Alexander. *Die Spinnenseide im Radnetz*. S. 19. URL: [https://nanoscience.unibas.ch/fileadmin/user\\_upload/nanoscience/06\\_Services/Nano\\_Imaging\\_Lab/Publikationen/Praktikumsarbeiten/spinnenseide-ma.pdf](https://nanoscience.unibas.ch/fileadmin/user_upload/nanoscience/06_Services/Nano_Imaging_Lab/Publikationen/Praktikumsarbeiten/spinnenseide-ma.pdf). letzter Zugriff: 24.11.2023.
- [4] Fotocommunity. *Spinnennetz*. URL: <https://www.fotocommunity.de/photo/spinnennetz-lars-ortgies/44372342>. letzter Zugriff: 26.03.2024.
- [5] Fotocommunity. *Spinnennetz*. URL: <https://img.fotocommunity.com/spinnennetz-45852668-9a9c-4662-bf49-b27a9acaa279.jpg?height=1080>. letzter Zugriff: 26.03.2024.
- [6] Fotocommunity. *Spinnennetz*. URL: <https://img.fotocommunity.com/spinnennetz-9894bcb2-f1bb-4e69-a7e3-e0be344ed0cb.jpg?height=1080>. letzter Zugriff: 26.03.2024.
- [7] Fotocommunity. *Spinnennetz im Morgentau*. URL: <https://img.fotocommunity.com/spinnennetz-im-morgentau-3a4df1b5-30a3-48cc-a6b1-f5a50a655733.jpg?height=1080>. letzter Zugriff: 26.03.2024.
- [8] Shaffer Julie. *Role of Fly Cleaning Behavior on Carriage of Escherichia coli and Pseudomonas aeruginosa - Scientific Figure on ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Average-weight-of-flies-Each-bar-represents-the-mean-and-range-thstandard-deviation-The\\_fig3\\_318433682](https://www.researchgate.net/figure/Average-weight-of-flies-Each-bar-represents-the-mean-and-range-thstandard-deviation-The_fig3_318433682). letzter Zugriff: 30.07.2024.
- [9] Desquesnes M. u. a. "A review and illustrated description of *Musca crassirostris*, one of the most neglected haematophagous livestock fly". In: *Medical and Veterinary Entomology* (2018). S. 7, Fig. 2 (A).
- [10] Desquesnes M. u. a. "A review and illustrated description of *Musca crassirostris*, one of the most neglected haematophagous livestock fly". In: *Medical and Veterinary Entomology* (2018). S. 7, Fig. 2 (D).
- [11] NABU (Naturschutzbund Deutschland) e.V. *Schnellstarterin und Weltenbummlerin - Die Gemeine Stubenfliege im Porträt*. URL: <https://www.nabu.de/tiere-und-pflanzen/insekten-und-spinnen/fliegen-und-muecken/26474.html>. letzter Zugriff: 03.07.2024.
- [12] Naseweis. *Baldachinnetz*. URL: <https://naseweisbz.net/wp-content/uploads/2021/10/baldachinnetz.jpg?w=768>. letzter Zugriff: 30.07.2024.

- [13] Naseweis. *Spinnennetze: Architektonische Meisterwerke mit High-Tech-Produkten*. URL: <https://naseweisbz.net/2021/10/09/spinnennetze-meisterwerke/>. letzter Zugriff: 24.11.2023.
- [14] Naseweis. *Trichternetz mit Spinne*. URL: <https://naseweisbz.net/wp-content/uploads/2021/10/trichternetz.jpg>. letzter Zugriff: 30.07.2024.
- [15] Foelix Rainer F. “Abb. 5.24: ‘Anatomie’ des Radnetzes der Kreuzspinne *Araneus diadematus*”. In: *Biologie der Spinnen*. 3. Aufl. Edition Chimaira, 2015.
- [16] Foelix Rainer F. “Abb. 5.35: Frühe Stadien der Radnetz-Konstruktion”. In: *Biologie der Spinnen*. 3. Aufl. Frankfurt am Main: Edition Chimaira, 2015.
- [17] Charles J. Sharp. *Typische Radnetze im Sonnenlicht*. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=95115225>. letzter Zugriff: 30.07.2024.
- [18] Prof. Dr. Scheibel Thomas. *Die Geheimnisse der Spinnenseide: Vom natürlichen Vorbild zu ersten Produkten*. Folie 3: Mechanische Eigenschaften. URL: [https://www.iap.fraunhofer.de/content/dam/iap/en/documents/event/Fairs/password-protected/Biopolymer-Kolloquium\\_2014\\_Dr-Scheibel.pdf](https://www.iap.fraunhofer.de/content/dam/iap/en/documents/event/Fairs/password-protected/Biopolymer-Kolloquium_2014_Dr-Scheibel.pdf). letzter Zugriff: 24.11.2023.

## Anhang

### Vorläufermodelle der Spinnennetze

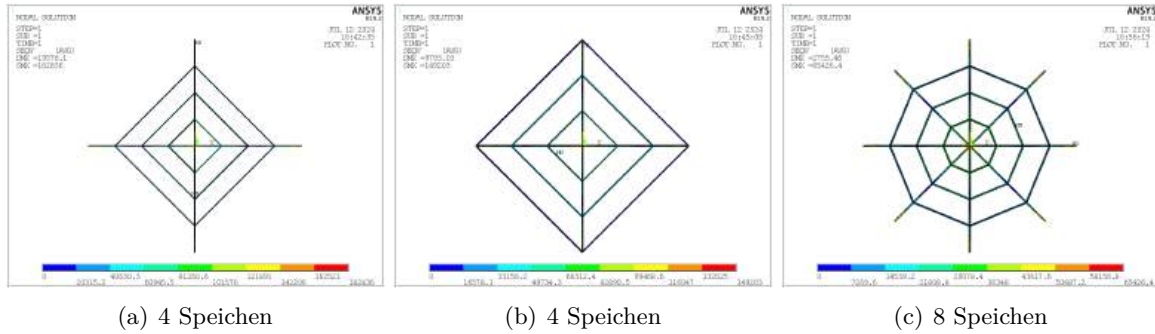


Abbildung 5: Netze mit konzentrischen Polygonen

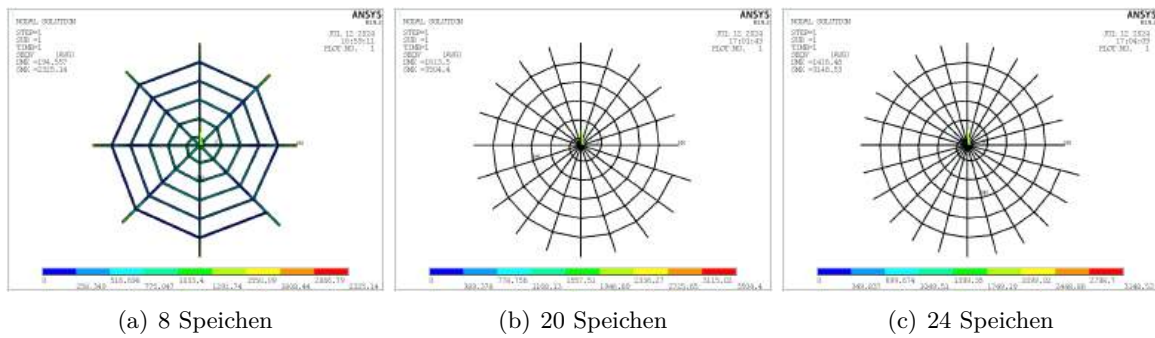


Abbildung 6: Netze mit Spirale

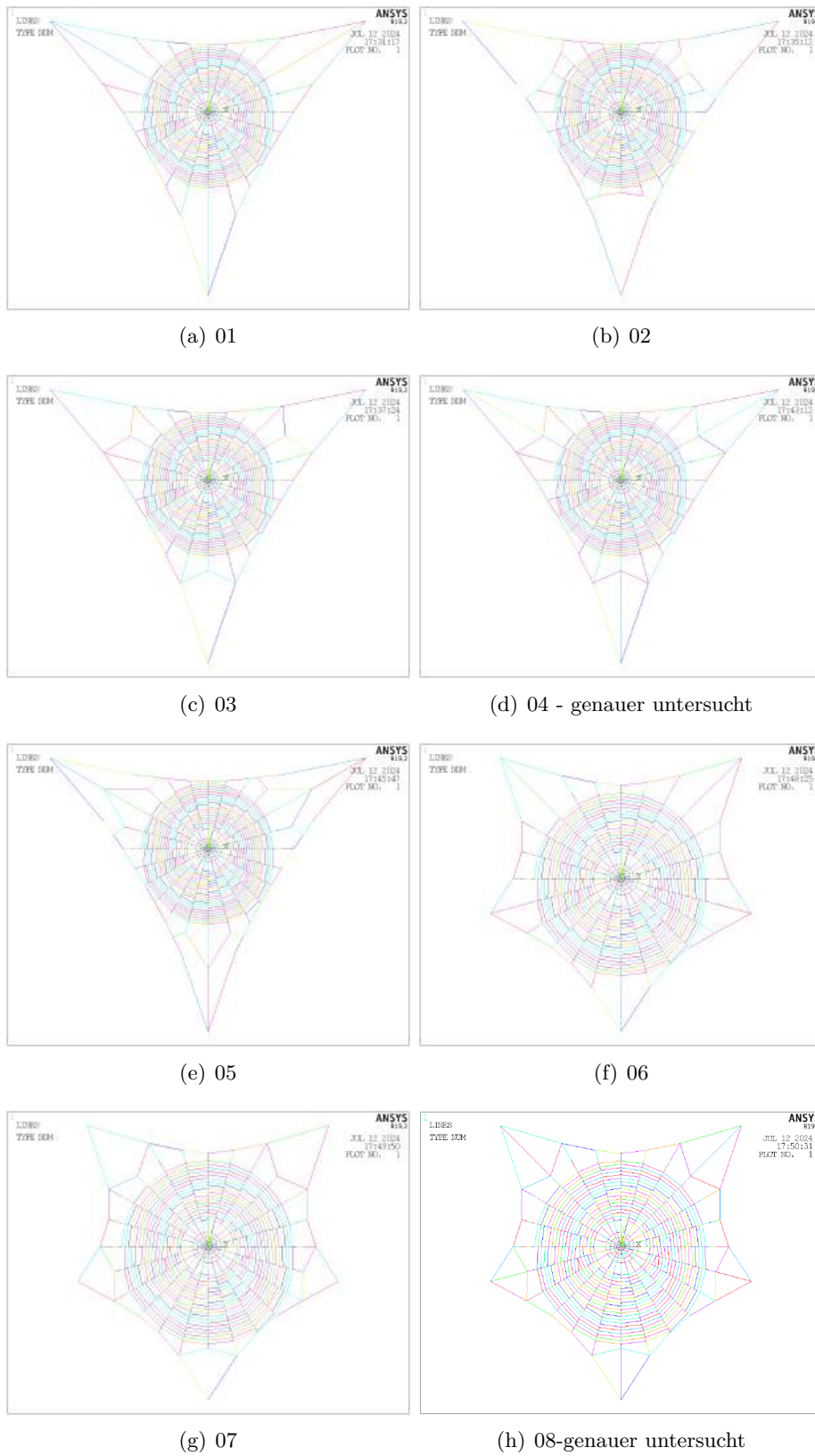


Abbildung 7: Rahmengenometrien am Beispiel realistischer Netze

### Modalanalyse

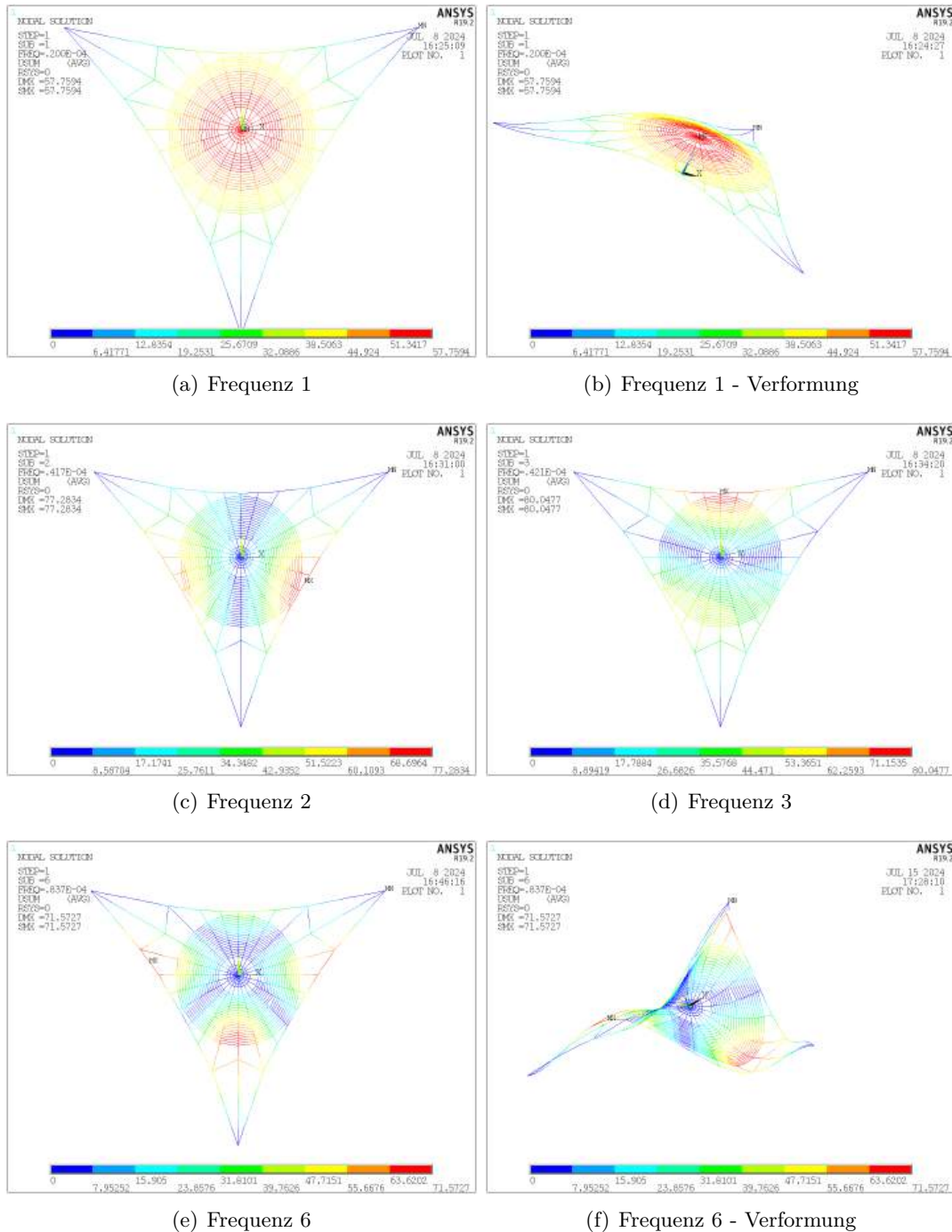


Abbildung 8: Modalanalyse 04.1 realistisch

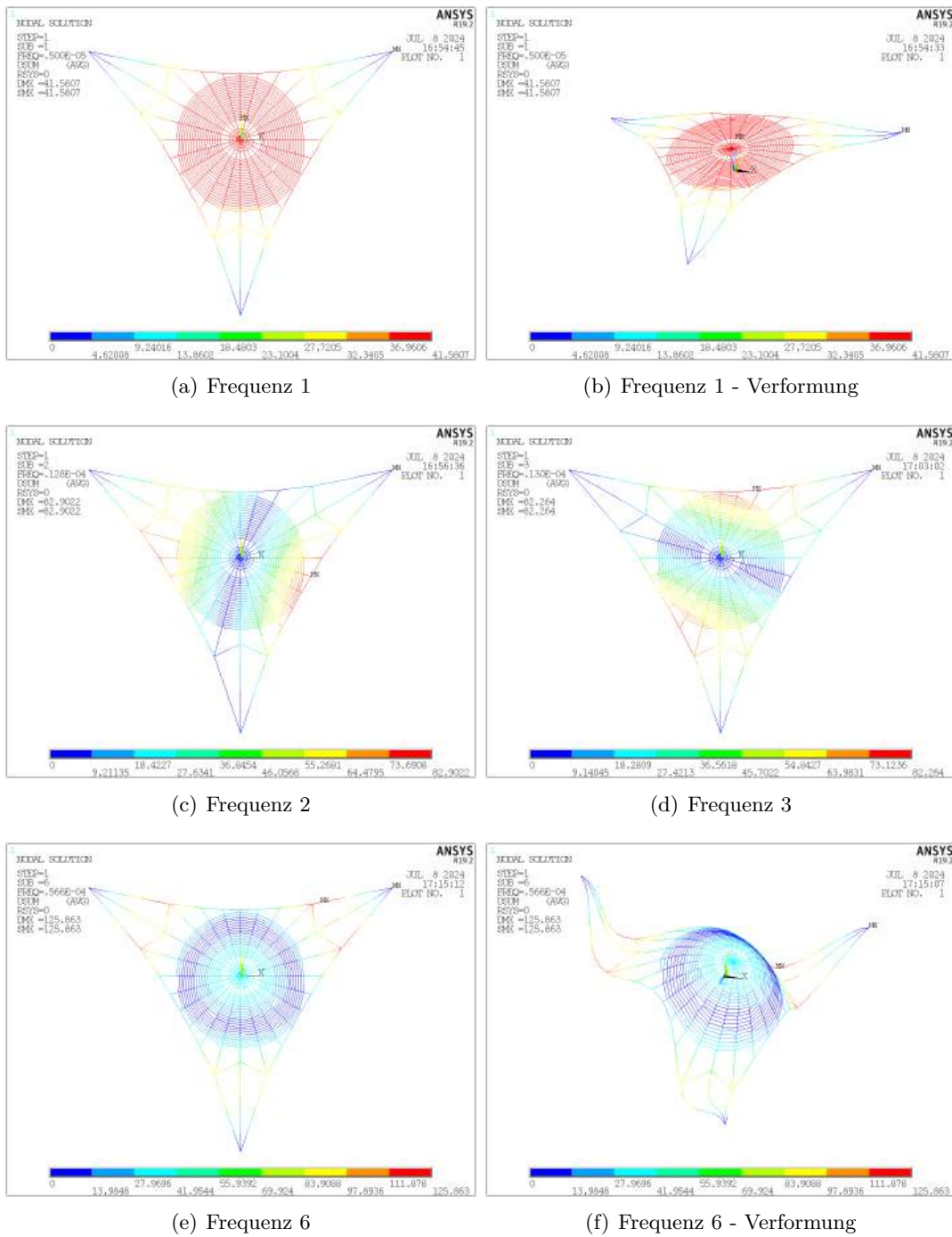


Abbildung 9: Modalanalyse 04.2 realistisch

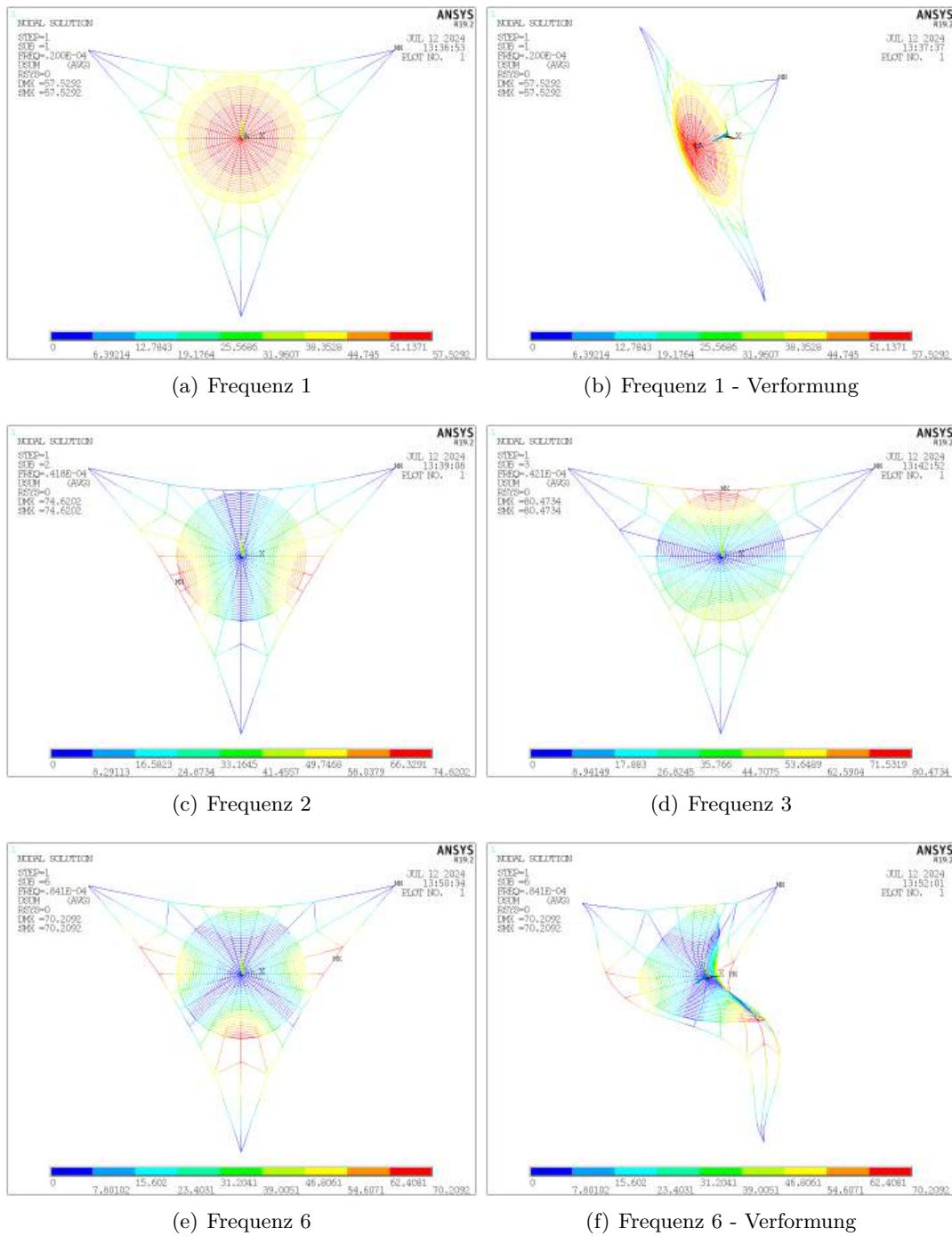


Abbildung 10: Modalanalyse 04.1 vereinfacht



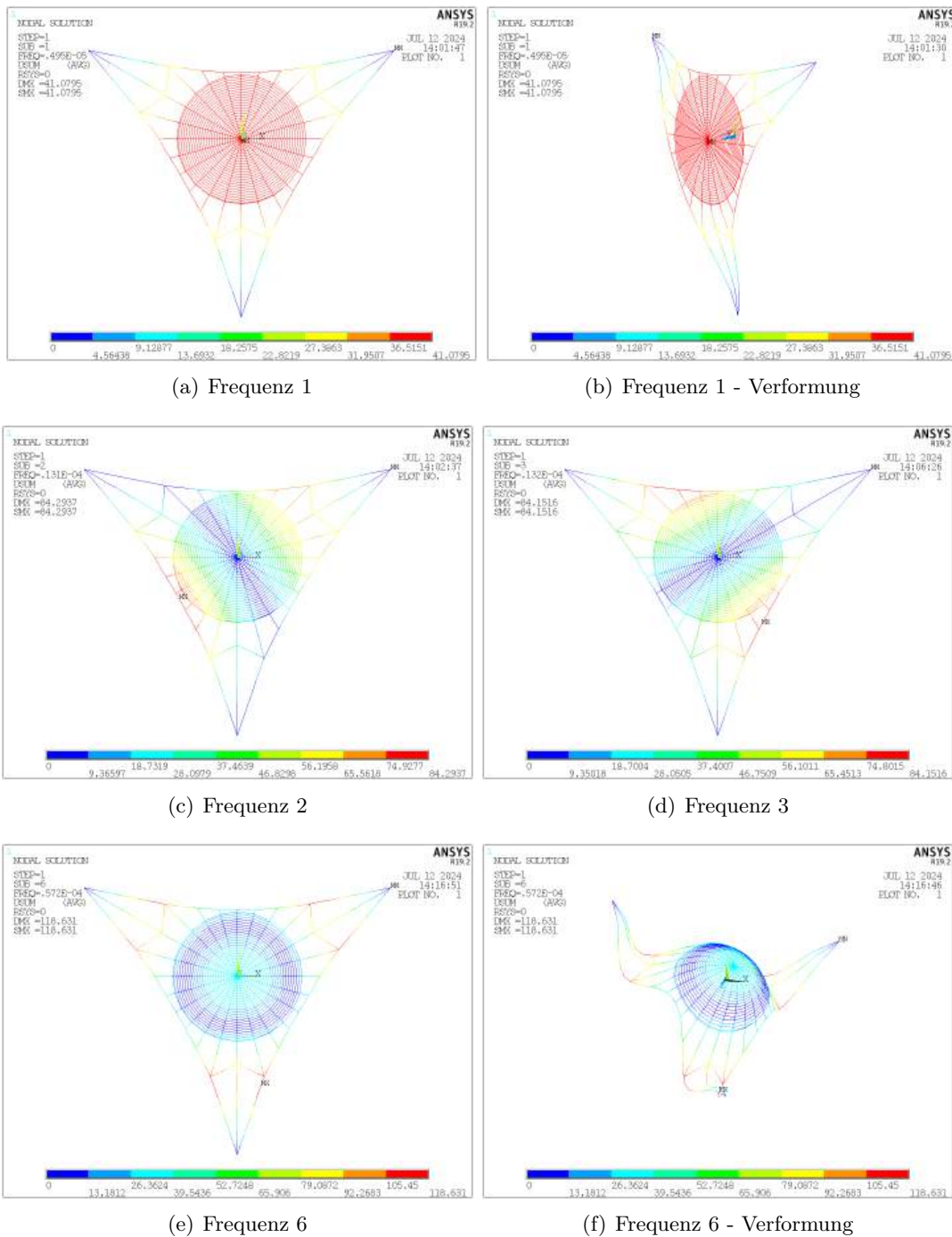


Abbildung 11: Modalanalyse 04.2 vereinfacht

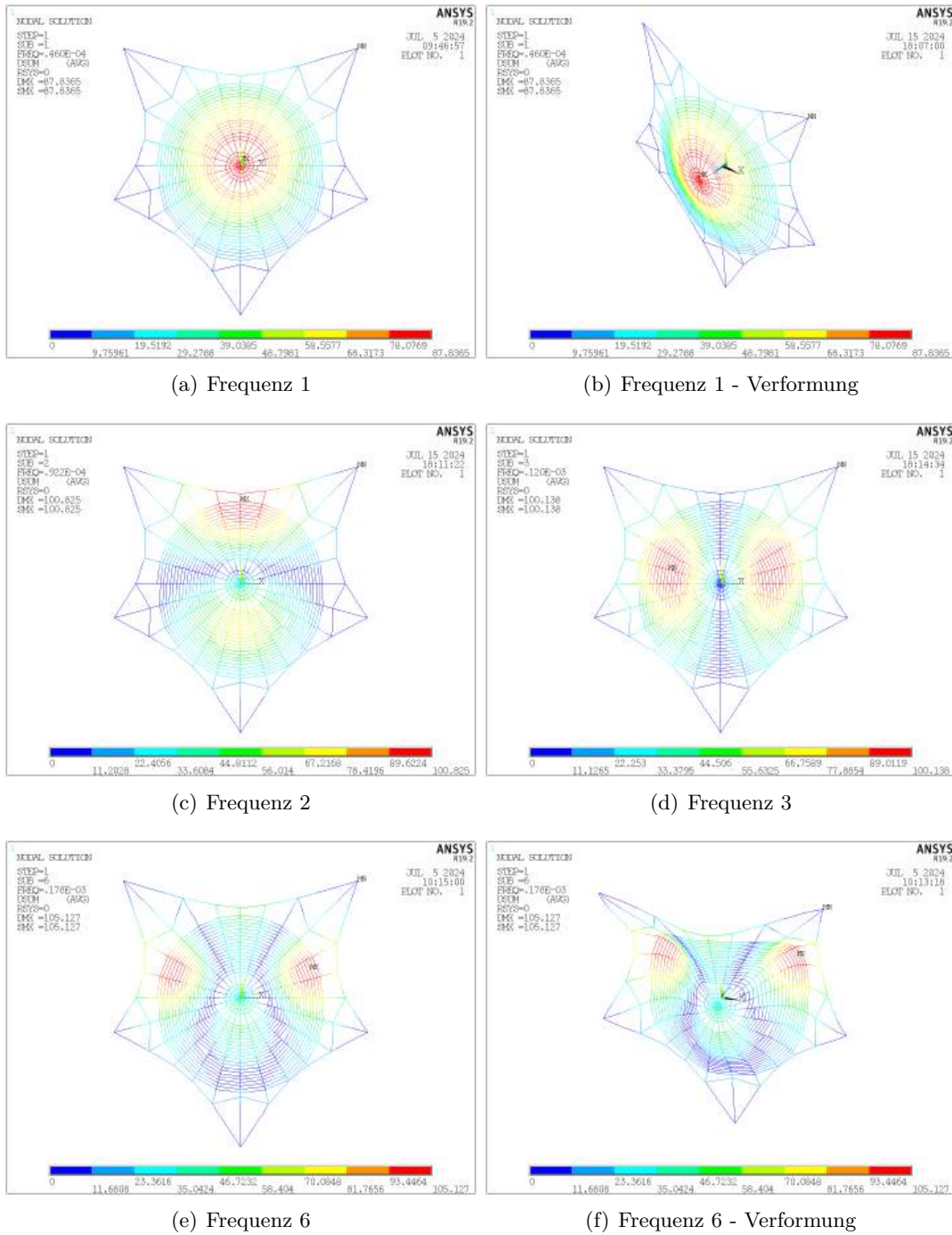


Abbildung 12: Modalanalyse 08.1 realistisch

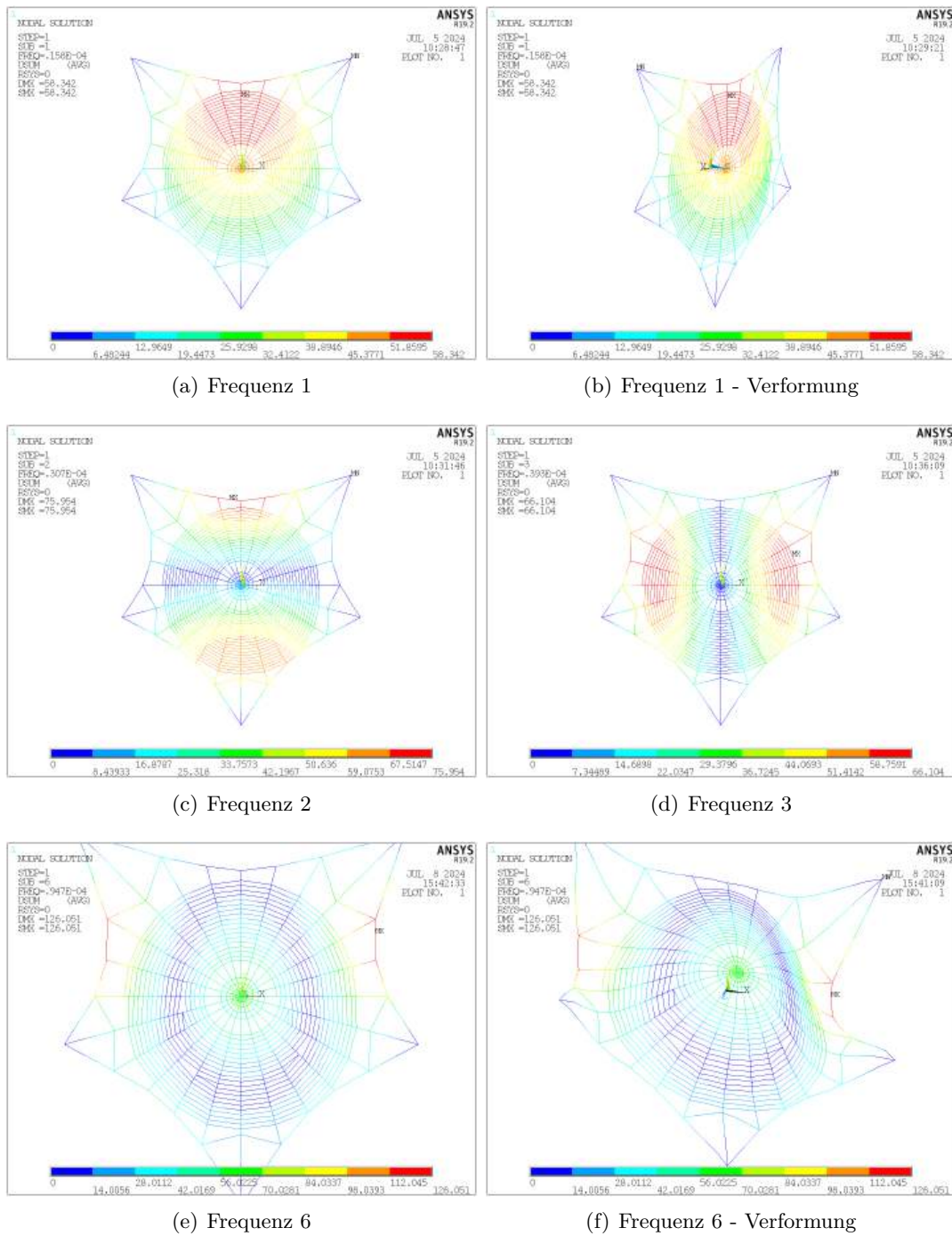


Abbildung 13: Modalanalyse 08.2 realistisch

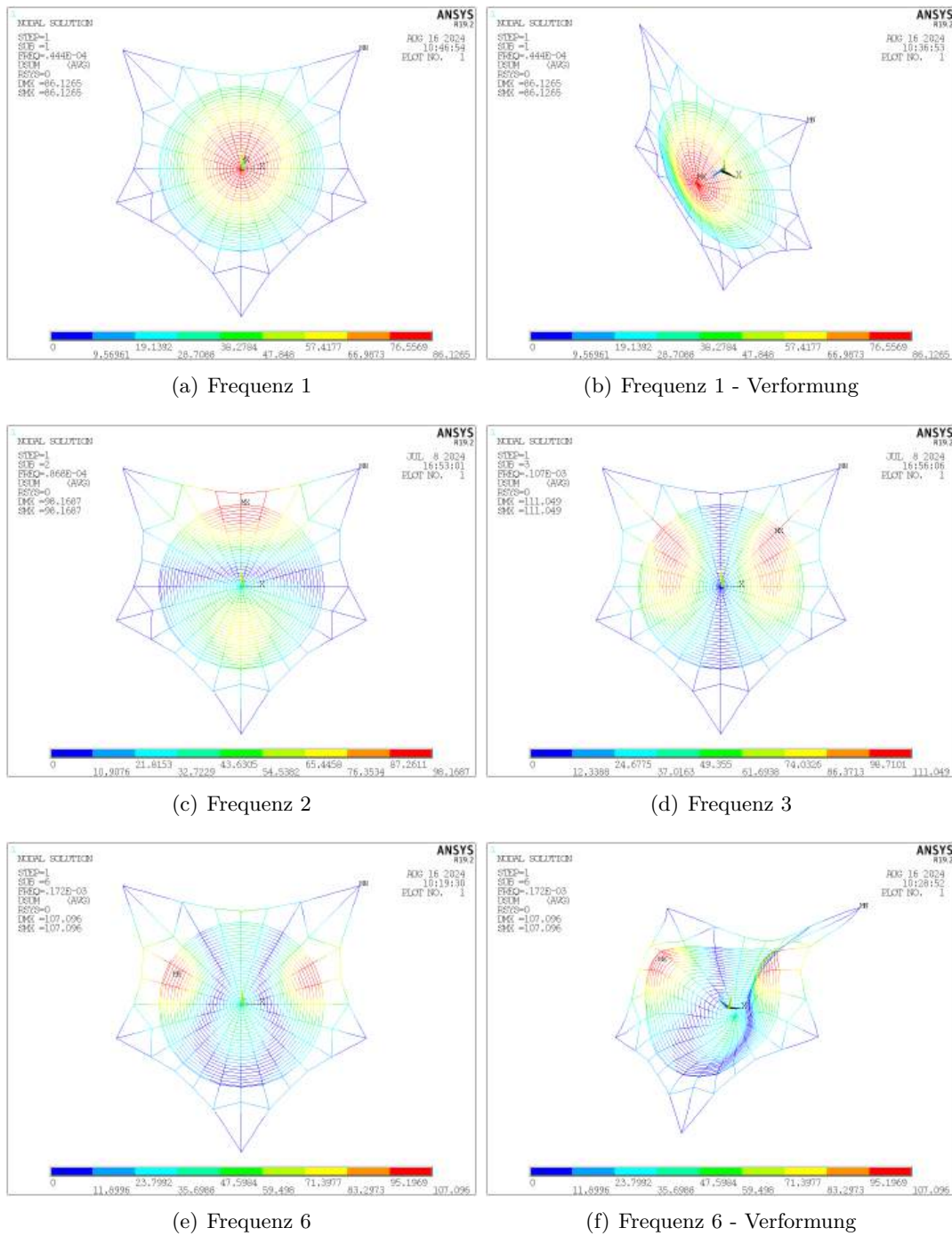


Abbildung 14: Modalanalyse 08.1 vereinfacht

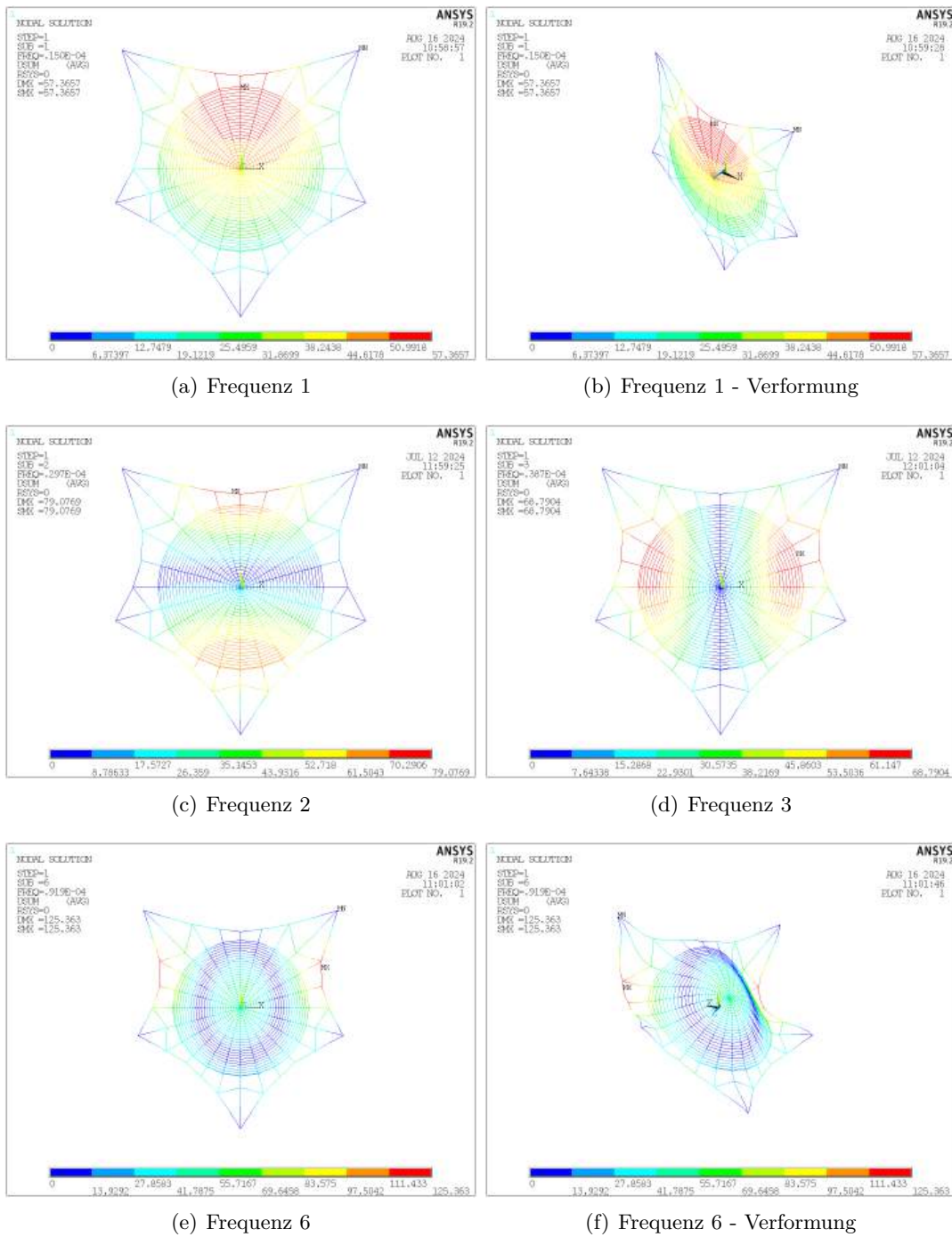


Abbildung 15: Modalanalyse 08.2 vereinfacht

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit versichern wir, dass diese Arbeit unter Beratung durch Herrn Dr. Klaus Bethge, Herrn Dr. Ing. Roland Kappel, Herrn Dr. Ing. Iwiza Tesari, Herrn Dr. Karlheinz Weber und unserem Kursleiter Herrn Thomas Knecht selbstständig verfasst wurde und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet wurden.

---

Leah Faulhaber

---

Anjali Elena Sponda