



Thomas Ochensberger, Bsc.

## TRAGWERKSMODELLE

Eine fotografische Dokumentation über die Verformung von Tragstrukturen

### MASTERARBEIT

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieurs

Masterstudium Architektur

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters

Institut für Tragwerksentwurf

Graz, Jänner 2020



## EIDESSTAATLICHE ERKLÄRUNG

---

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TU GRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum

---

Unterschrift



## KURZFASSUNG

---

Diese Masterarbeit befasst sich mit Tragwerksmodellen zur Veranschaulichung des Tragverhaltens und der Eigenschaften von Tragstrukturen. Im Hauptteil werden Verformungen von Tragwerksmodellen dokumentiert. Die Modellbautechnik und die fotografische Dokumentation bilden dabei den Rahmen der Arbeit.



# VORWORT

---

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meines Masterstudiums an der Technischen Universität in Graz entstanden. Das Thema dieser Masterarbeit wurde unter dem Titel „Tragwerksmodelle“ am Institut für Tragwerksentwurf ausgeschrieben. Meine Wertschätzung und mein Interesse für Architekturmodelle und den Modellbau haben dazu geführt, dass ich mich dieses Themas angenommen habe.

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben. Ich bedanke mich besonders bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters für die Betreuung dieser Masterarbeit und für die hilfreichen Anregungen sowie für die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit. Ich möchte mich auch bei meiner Familie und bei meinen Freunden bedanken, die mich auf meinem Weg begleitet und unterstützt haben.

Graz, Jänner 2020  
Thomas Ochensberger





## 00. INHALTSVERZEICHNIS

---

●	01.	EINLEITUNG	11
●	02.	SEILTRAGWERKE	17
●	03.	BOGENTRAGWERKE	27
●	04.	BIEGETRÄGER	39
●	05.	HYBRIDE TRAGSYSTEME	59
●	06.	DRUCKSTAB	67
●	07.	HORIZONTALAUSSTEIFUNG	81
●	08.	RAHMENTRAGWERKE	91
●	09.	FACHWERKTRÄGER	113
●	10.	RAHMENTRÄGER	123
●	11.	FACHWERKKRAGARM	133
●	12.	STOCKWERKRAHMEN	145
●	13.	FACHWERKRÖHRE	161
●	14.	RAUMFACHWERKE	169
●	15.	SCHLUSSWORT	177
●	16.	ANHANG	178



# 01. EINLEITUNG

---

Die Tragkonstruktion ist ein integraler Bestandteil eines jeden Bauwerks. In der Tragwerkslehre werden Kenntnisse über das Verhalten von Tragwerken und der Formenvielfalt von Tragkonstruktionen vermittelt. Sie bildet einen wichtigen Bestandteil der Lehre für Architekturstudent\*innen.<sup>1</sup>

Eine wesentliche Aufgabe der Tragwerkslehre besteht darin Grundlagen zu vermitteln, um ein Verständnis für das Gleichgewicht der Kräfte zu entwickeln und durch Kenntnisse über die Festigkeitslehre und die Spannungsermittlung eine Vorbemessung von einfachen statischen Konstruktionen zu ermöglichen.<sup>2</sup>

Das Ziel der Tragwerkslehre ist es die Komplexität der Tragstruktur eines Bauwerks erfassen zu können und mit der Wechselwirkung von Material, Konstruktion und Gestalt als Bestandteil einer architektonischen Entwurfsaufgabe arbeiten zu können.<sup>3</sup>

Die Herausforderung in der Lehre besteht darin wesentliche Grundlagen wirkungsvoll zu vermitteln und ein Interesse für das Fachgebiet zu wecken. Das pädagogische Konzept zur Vermittlung von Grundlagen ist daher ein wichtiger Bestandteil der Tragwerkslehre. Die bildliche Verständigungsmethode in Form von Zeichnungen, Grafiken, Modellfotografien oder Bildmaterial von konkreten Projektbeispielen zur Veranschaulichung und Vermittlung von Lehrinhalten spielt eine wesentliche Rolle, um den Anforderungen an eine umfassende und verständliche Tragwerkslehre gerecht zu werden.

Eine Tragwerkslehre, die sich hauptsächlich auf die Berechnungen von Tragwerken stützt, ist in der Regel sehr abstrakt und schwer zugänglich. Berechnungsmethoden dienen schlussendlich dazu Tragwerke zu dimensionieren und liefern einen mathematischen Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit, sind aber kaum dazu geeignet

---

1 Bezieht sich auf den Lehrinhalt von Tragwerkslehre und Tragwerksentwurf am Institut für Tragwerksentwurf der Technischen Universität Graz, Vgl. <http://www.ite.tugraz.at/index.php?page=209>, Zugriff: 10.12.2019

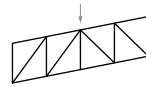
2 Vgl. Ebda.

3 Vgl. Ebda.

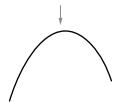
# 01. EINLEITUNG



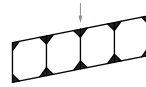
**Seiltragwerk**  
überwiegend Normalkraft



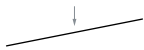
**Fachwerkträger**  
überwiegend Normalkraft



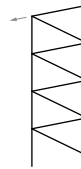
**Bogentragwerk**  
überwiegend Normalkraft



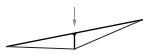
**Rahmenträger**  
überwiegend Biegung und Normalkraft



**Biegeträger**  
überwiegend Biegung



**Fachwerk**  
überwiegend Normalkraft



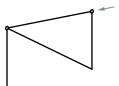
**Hybride Tragsysteme**  
überwiegend Biegung und Normalkraft



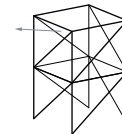
**Stockwerkrahmen**  
überwiegend Biegung und Normalkraft



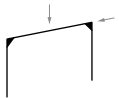
**Druckstab**  
überwiegend Normalkraft



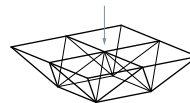
**Horizontalaussteifung**  
überwiegend Normalkraft



**Fachwerkrohre**  
überwiegend Normalkraft



**Rahmentragwerk**  
überwiegend Biegung und Normalkraft



**Raumfachwerk**  
überwiegend Normalkraft

## 01. EINLEITUNG

Eigenschaften über das Tragverhalten des anzuwendenden Tragsystems zu vermitteln. Ergänzend zum theoretischen Unterricht werden in der Lehre daher Demonstrationsmodelle zur Veranschaulichung der Eigenschaften von Tragstrukturen eingesetzt. Im Vergleich zum Architekturmodell steht bei Demonstrationsmodellen nicht die räumliche oder raumbildende Wirkung einer Tragkonstruktion im Vordergrund, sondern die Veranschaulichung der Wirkungsweise von Kräften durch eine am Modell entstehende Verformung.

Demonstrationsmodelle sind Abstraktionen von wirklichen Tragwerken und dafür konzipiert, möglichst große Verformungen zu bilden, um anhand des Verformungsverhaltens ein Verständnis für das Tragverhalten und die Eigenschaften von Tragwerkselementen zu vermitteln. Sie ermöglichen es Zusammenhänge zwischen dem Tragvermögen, dem Tragverhalten, dem Verformungsverhalten, der einwirkenden Belastung und den Lagerungsarten sowie den geometrischen Randbedingungen auf bildliche Art darzustellen.<sup>4</sup>

Ausgehend von der Verwendung von Demonstrationsmodellen in der Lehre für Architekturstudent\*innen soll diese Arbeit einen Beitrag zur Vermittlung von Lehrinhalten der Tragwerkslehre leisten, indem ein Überblick der Eigenschaften unterschiedlicher Tragwerksstrukturen anhand ihres Verformungsverhaltens in einer umfangreichen Bildserie dargestellt wird. Die in einem Entwurfsprozess entwickelten Tragwerksmodelle sowie die Methode der fotografischen Dokumentation bilden den Rahmen dieser Arbeit.

### **Konzeption der Arbeit**

Die Gliederung der Tragwerksmodelle erfolgt durch eine Kategorisierung nach Art der Beanspruchung und Modellbauweise der Tragwerkselemente. Jedes Kapitel beinhaltet eine kurze Beschreibung zu den Merkmalen der Tragwerkselemente und einen Überblick der dargestellten Bildserie sowie Angaben zum Modellbau.

---

<sup>4</sup> Vgl. Künzle 2001, 2.

Die in den einzelnen Kapiteln angeführten Tragwerksmodelle haben immer den gleichen Maßstab und die gleiche Materialität, um eine Vergleichbarkeit der Tragwerksmodelle zu ermöglichen. Die Eigenschaften der Tragwerkselemente werden durch eine Bildserie veranschaulicht, welche mit einer grafischen Darstellung des statischen Systems und einer kurzen Bildbeschreibung ergänzt wird.

### **Eigenschaften der Tragwerksmodelle**

Um einen Überblick zu den Eigenschaften unterschiedlicher Tragwerkselemente zu schaffen wurde eine möglichst umfangreiche Ausarbeitung verschiedener Tragstrukturen angestrebt. Diese Anforderung wurde in der Umsetzung vor allem durch die einfache Modellbauweise aus Bristolkarton oder Polystyrol ermöglicht. Die einzige Ausnahme zeigen die Tragwerksmodelle für die Seiltragwerke, welche aus einer feingliedrigen Kette bestehen.

Die Tragwerksmodelle sind auf wesentliche Merkmale wie die Lagerungsart und die gelenkige oder biegesteife Verbindung von Stäben reduziert, um eine Lesbarkeit und Unterscheidung der jeweiligen Tragwerkselemente zu ermöglichen.

Der Querschnitt der Tragwerksmodelle ist stark unterdimensioniert, um eine größtmögliche Verformung zu erreichen. Die Größe und die Proportionen der Tragwerksmodelle sowie das Verhältnis zur Größe der einwirkenden Last wurde in mehreren Modellversuchen getestet, um eine bestmögliche Veranschaulichung der Formveränderung zu darzustellen.<sup>5</sup>

Die Verformung der Tragwerksmodelle wird durch zwei unterschiedliche Darstellungsformen der einwirkenden Last und durch fotografische Dokumentation veranschaulicht.

In Kapitel 2-10 bestehen die einwirkenden Lasten aus einer unterschiedlichen Anzahl von fünf Eurocent Münzen mit einem Gewicht von ca. 3,92g pro Stück.

---

<sup>5</sup> Anmerkung: die Eigenschaften der Tragwerksmodelle sind in Anlehnung an die Tragwerksmodelle von Künzle und die Anschauungsmodelle von Mann.

Aufgrund der unterschiedlichen Tragfähigkeit der Tragwerkselemente kommen unterschiedliche Belastungsgrößen zur Anwendung. Dabei ist die Größe der einwirkenden Last bei jeder Abbildung deutlich zu erkennen um die Verformung der Tragwerksmodelle nachvollziehen können. Durch die Überlagerung von einem Modellfoto ohne Belastung und einem Modellfoto mit Belastung werden bereits geringe Veränderungen der Form infolge der einwirkenden Last sichtbar. Eine Demonstration besteht immer aus einer Bildserie von mehreren Abbildungen, um die Verformung in Sequenzen wiederzugeben. Somit können Verformungen aus Biegung von plötzlich eintretenden Stabilitätsversagen bei einer Druckbeanspruchung unterschieden werden.

In Kapitel 11-14 erfolgt die einwirkende Belastung durch eine Spule, die von einem Servomotor gesteuert wird. Die entstehende Verformung wird mit der Belichtungszeit der Kamera synchronisiert, dadurch wird die Darstellung des Bewegungsablaufes der Formveränderung ermöglicht. Die Änderung der Darstellungsform hat zwar den Nachteil, dass die Größe der einwirkenden Kraft nicht mehr sichtbar ist, sie gibt aber sehr gut Auskunft über die Verformung von komplexen Tragwerksmodellen.



Abbildung 01: Tragwerksmodelle Seiltragwerke



## 02. SEILTRAGWERKE

---

Seiltragwerke sind Tragstrukturen, die Belastungen nur über Zugkräfte abtragen können. Das Seil verformt sich zunächst dehnungslos unter einer Belastung um in einen Gleichgewichtszustand zu gelangen. Maßgebend für die Formänderung ist das Verhältnis der veränderlichen Last zur ständig einwirkenden Last.<sup>6</sup>

### **Bildbeschreibung**

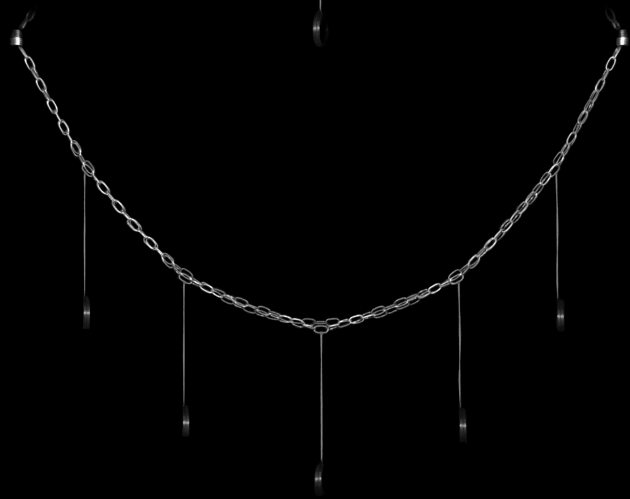
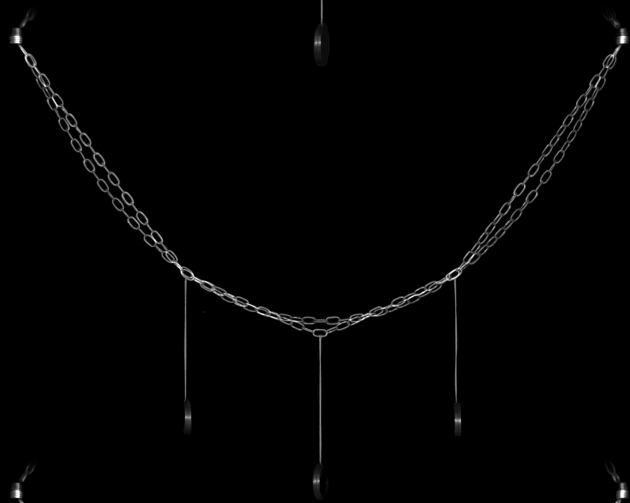
Die Bildserie zeigt Verformungen einer Kette infolge der Anordnung von Einzellasten. Das Eigengewicht der Kette bildet die Form der Kettenlinie und dient als Ausgangsform der Bildserie. Der Vergleich unterschiedlicher Verformungen veranschaulicht die Eigenschaften und das Tragverhalten von Seiltragwerken.

### **Modellbeschreibung**

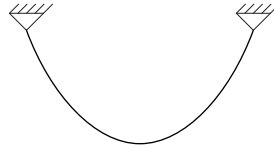
Für das Seiltragwerk wird eine feingliedrige Kette verwendet. Das hohe Eigengewicht der Kette und die als Gelenk wirksamen Kettenglieder ermöglichen eine genaue und klare Abbildung der entstehenden Form. Für die Auflager der Kette werden kleine Magnete verwendet. Die Kette hat eine Länge von ca. 46 cm und eine Spannweite von ca. 30 cm.

---

<sup>6</sup> Vgl. Block/Gegnagel/Peters 2013, 94.

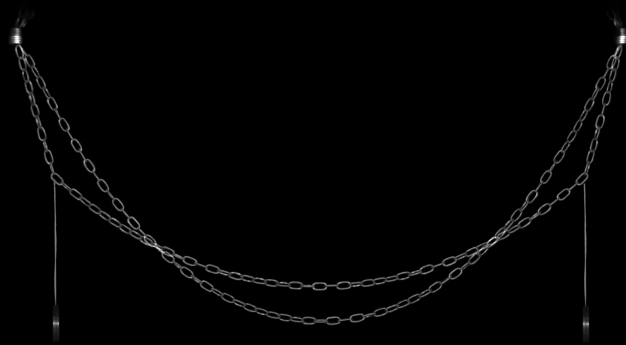
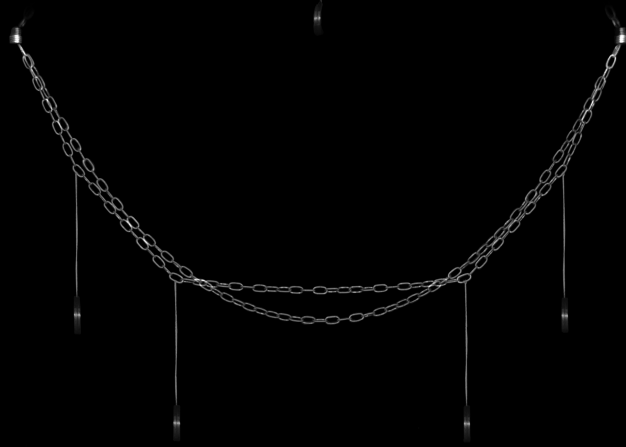
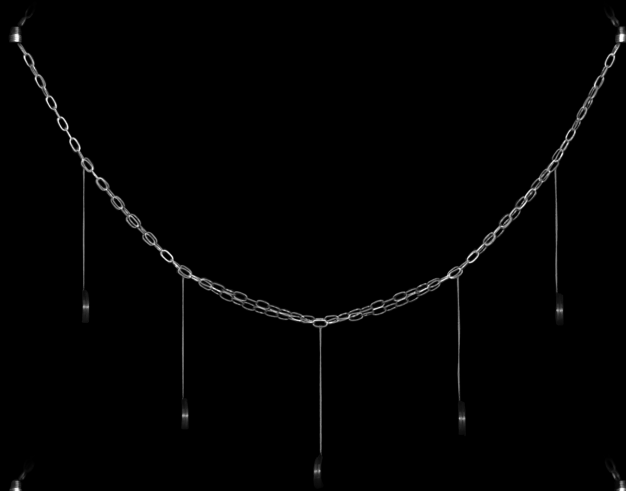


## 02. SEILTRAGWERKE

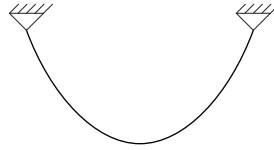


**Abbildung 02: Verformung am Seiltragwerk infolge der Anordnung von Einzellasten**

Die einzelne Belastung in der Mitte führt zu einer großen Formveränderung der Kette. Die Anordnung von gleichmäßig auf die Kettenlänge verteilten Lasten führt zu einer Annäherung an die Form der Kettenlinie.



## 02. SEILTRAGWERKE

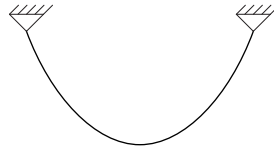


**Abbildung 03: Verformung am Seiltragwerk infolge der Anordnung von Einzellasten**

Ausgehend von Abbildung 02 werden die Einzellasten in der Mitte der Kette schrittweise entfernt. Abhängig von der Anordnung der einwirkenden Last verändert sich der Gleichgewichtszustand der Kette und führt zu unterschiedlichen Verformungen.



## 02. SEILTRAGWERKE



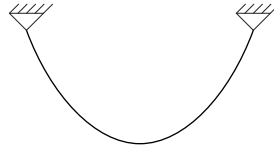
**Abbildung 04: Verformung am Seiltragwerk infolge einer veränderlichen Einzellast**

Die schrittweise Vergrößerung einer Einzellast führt zur Änderung der Gleichgewichtslage. Maßgebend für die Formänderung ist das Verhältnis der einwirkenden Lasten zueinander.





## 02. SEILTRAGWERKE



**Abbildung 05: Formstabilisierung am Seiltragwerk infolge einer gleichmäßig verteilten Last**  
Die Einzellast führt zu einer großen Formveränderung der Kette. Die zusätzliche Anordnung der gleichmäßig auf die Kettenlänge verteilten Lasten führt zu einer geringeren Verformung.

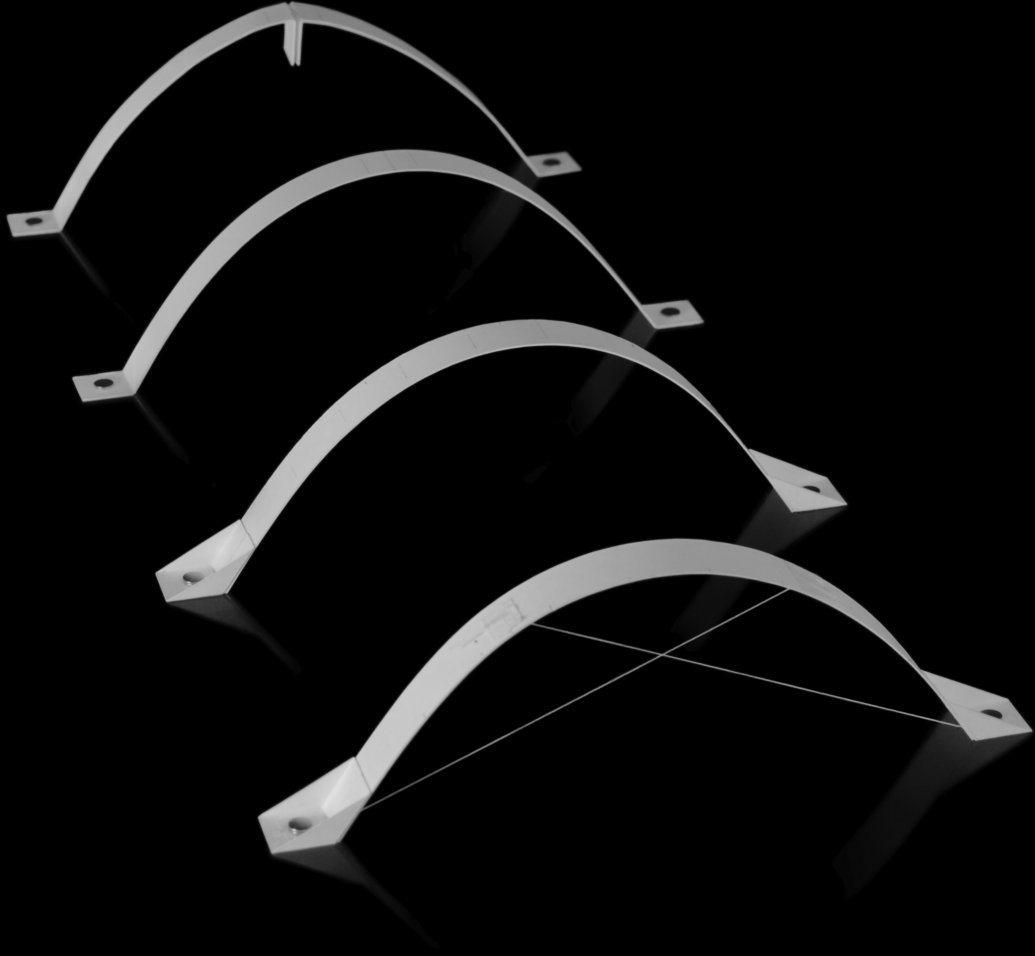


Abbildung 06: Tragwerksmodelle Bogentragwerke

## 03. BOGENTRAGWERKE

---

Bogentragwerke sind Tragstrukturen, die eine kontinuierliche Krümmung aufweisen. Wenn die Bogenachse und die Form der Stützlinie übereinstimmen, werden Belastungen vorwiegend über Druckkräfte abgetragen. Die Stützlinie eines Bogens entspricht der Umkehrung einer bei gleicher Belastung entstehenden Form der Seillinie. Bei einer Abweichung der Bogenform von der Stützlinie muss der Bogen biegesteif ausgeführt oder stabilisiert werden.<sup>7</sup>

### **Bildbeschreibung**

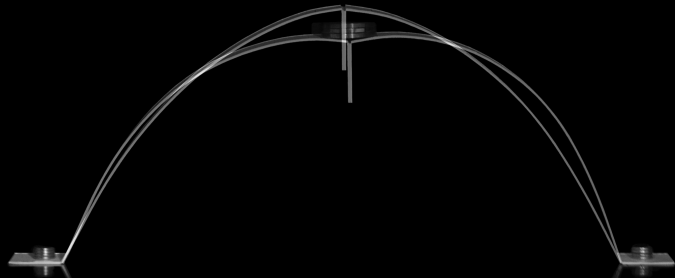
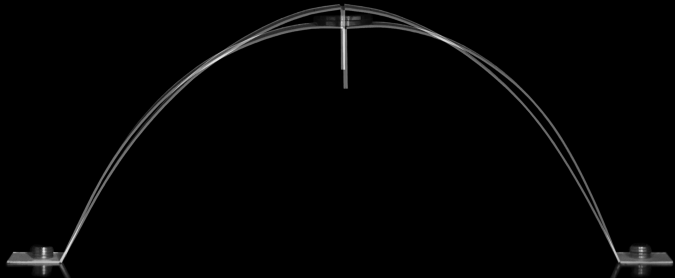
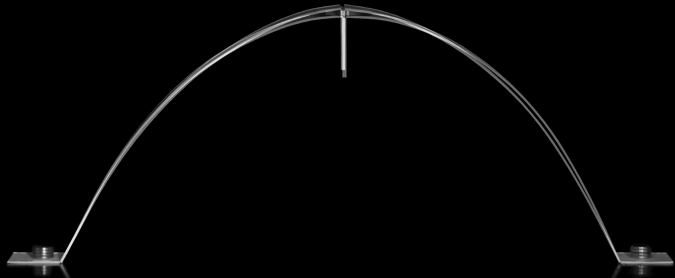
Die Bildserie zeigt drei unterschiedliche biegesteife Bogenarten, den Dreigelenkbogen, den Zweigelenkbogen und den eingespannten Bogen. Die Verformung der drei Bögen wird infolge einer vertikalen Einzellast am Bogenscheitel veranschaulicht. Am Beispiel des eingespannten Bogens wird die Verformung infolge einer verteilten Last und die Formstabilisierung mit Zugstäben dargestellt.

### **Modellbeschreibung**

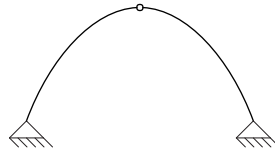
Der Dreigelenkbogen besteht aus zwei Bogensegmenten, die am Bogenscheitel mit einem Gelenk verbunden sind und deren Auflager als Gelenk ausgeführt werden. Der Zweigelenkbogen verfügt über Gelenke am Auflager. Der eingespannte Bogen verfügt über eingespannte Auflager. Die Tragwerksmodelle bestehen aus einem 0,5 mm Bristolkarton. Sie haben eine Bogenlänge von 28 cm, eine Spannweite von 21 cm, eine Stichhöhe von ca. 8 cm und eine Breite von 2 cm. Für die Formstabilisierung werden Nylonfäden verwendet.

---

<sup>7</sup> Vgl. Block/Gengnagel/Peters 2013, 96.

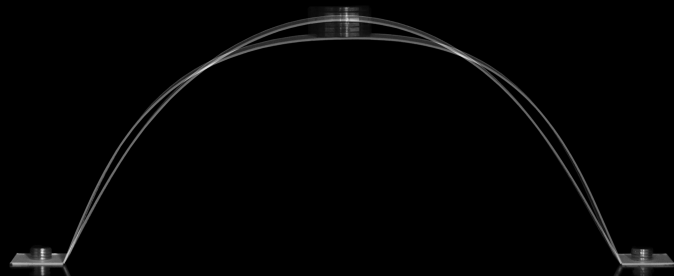
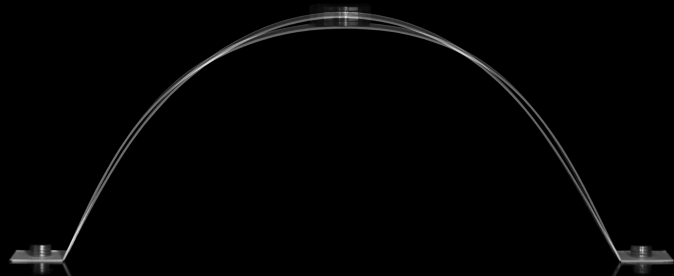
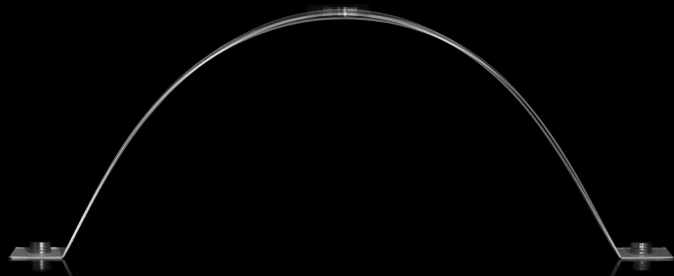


### 03. BOGENTRAGWERKE

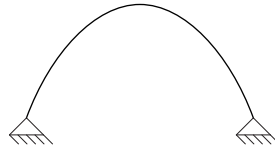


**Abbildung 07: Verformung am Dreigelenkbogen**

Die Verformung am Dreigelenkbogen zeigt ein Absenken am Bogenscheitel und ein Abheben der unteren Hälfte. Das Gelenk am Bogenscheitel führt zu einem Knick in der Biegelinie infolge der Lasteinwirkung.

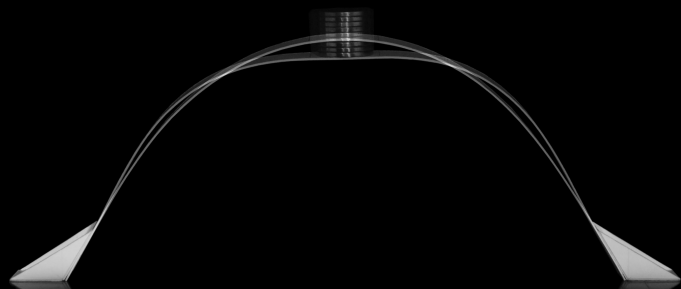
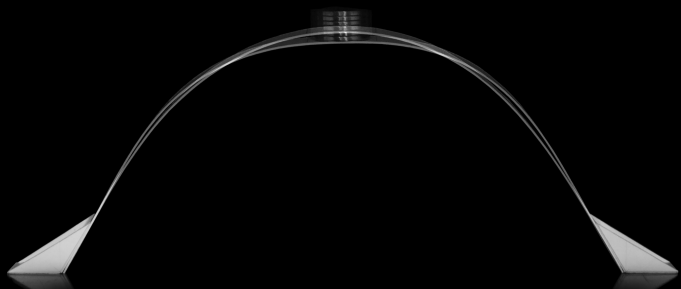
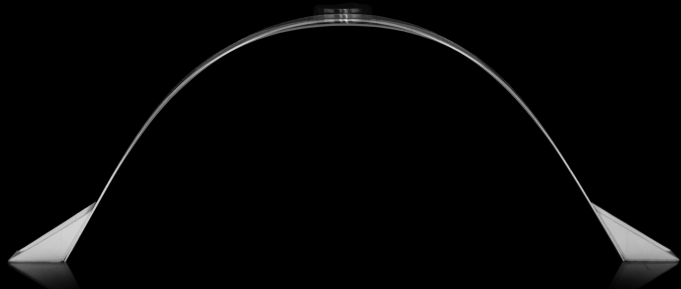


### 03. BOGENTRAGWERKE



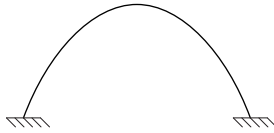
**Abbildung 08: Verformung am Zweigelenbogen**

Die Verformung am Zweigelenbogen zeigt eine durchgehende Krümmung der Biegelinie. Im Vergleich zum Dreigelenkbogen weist der Zweigelenbogen eine geringere Verformung auf.



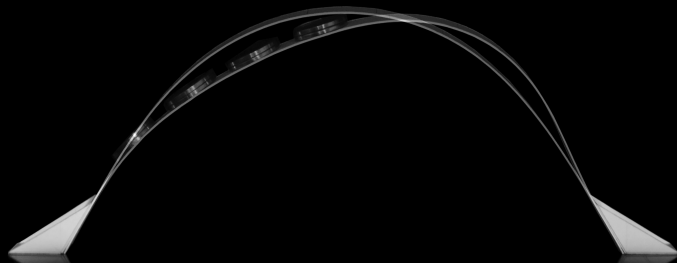
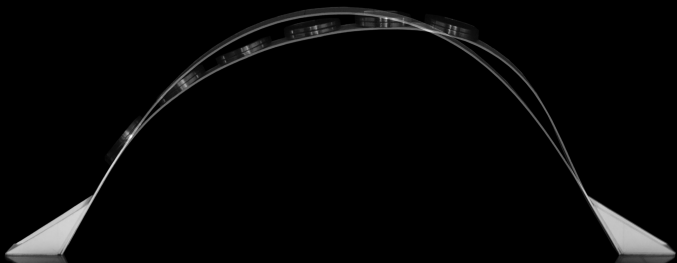
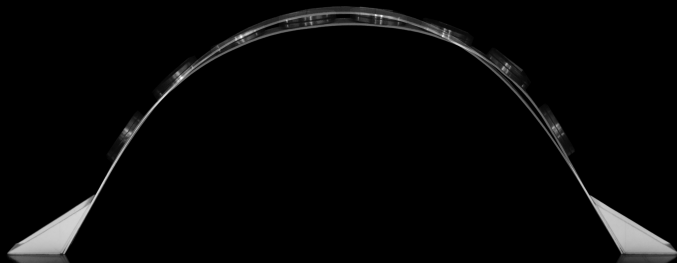


### 03. BOGENTRAGWERKE

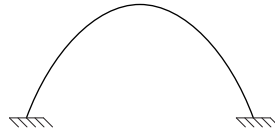


**Abbildung 09: Verformung am eingespannten Bogen**

Die Einspannung verhindert eine Verdrehung der Bogenachse am Auflager. Im Vergleich zum Dreigelenkbogen und Zweigelenkbogen weist der eingespannte Bogen die geringste Verformung auf.



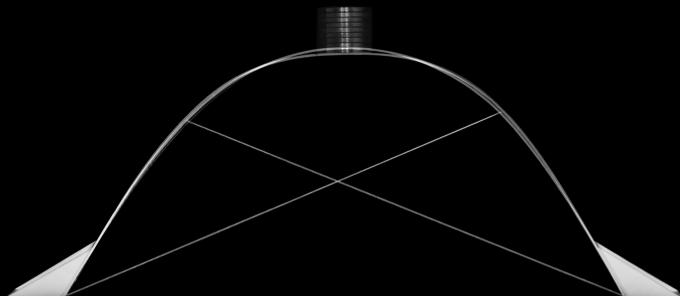
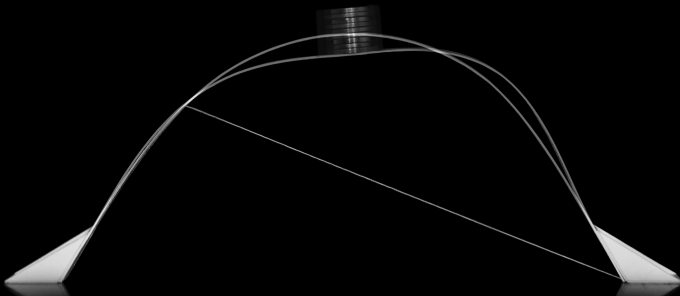
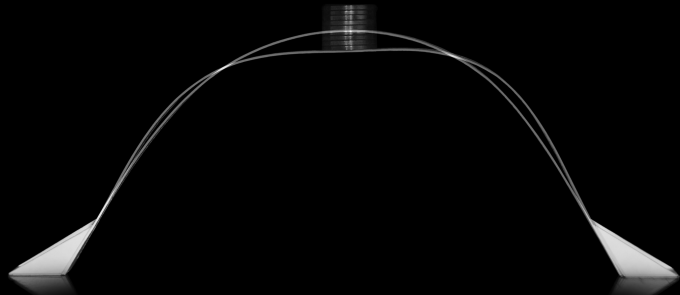
### 03. BOGENTRAGWERKE



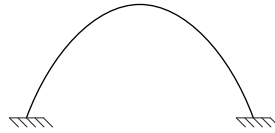
**Abbildung 10: Verformung am eingespannten Bogen infolge einer verteilten Lasteinwirkung**

Die unterschiedliche Anordnung der einwirkenden Last führt zu unterschiedlichen Formen der Stützlinie.

Die Anordnung einer gleichmäßig verteilten Belastung führt zu einer Verformungsfigur, die der Bogenform ähnlich ist. Die Anordnung einer ungleichmäßig verteilten Belastung führt zu einer großen Abweichung der Stützlinie von der Bogenform und zu einer größeren Formveränderung.



### 03. BOGENTRAGWERKE



**Abbildung 11: Formstabilisierung am eingespannten Bogen**

Um die Verformung infolge der einwirkenden Last zu verringern, wird das Modell mit zwei Nylonfäden stabilisiert. Bei einer Formstabilisierung müssen die zugbeanspruchten Speichen dem entsprechenden Belastungsfall angepasst werden und der größten Verformung entgegengesetzt ausgerichtet.

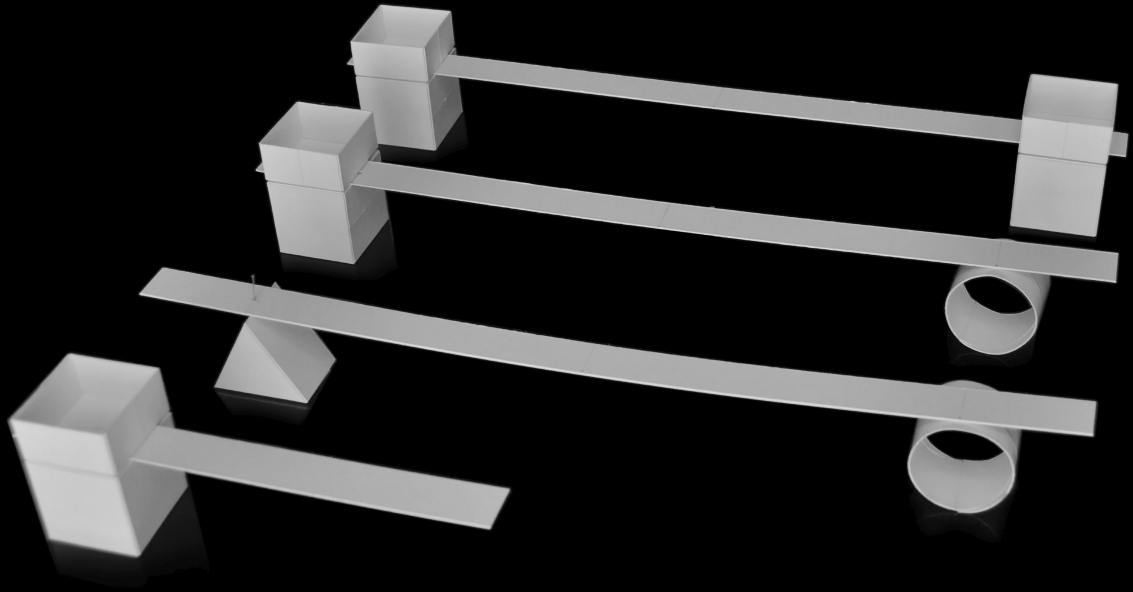


Abbildung 12: Tragwerksmodelle Biegeträger

## 04. BIEGETRÄGER

---

Der Biegeträger ist ein stabförmiges Bauteil, der quer zu seiner Ausdehnungsebene belastet wird. Unter einer Belastung entstehen Biegebeanspruchungen, in deren Folge Zug- und Druckspannungen an der Außenseite des Trägers auftreten.<sup>8</sup>

### **Bildbeschreibung**

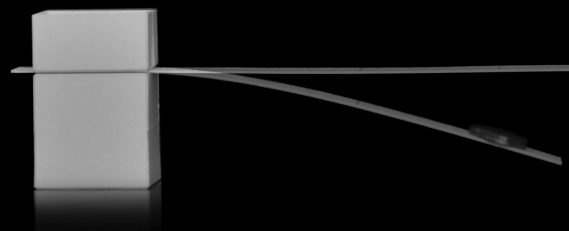
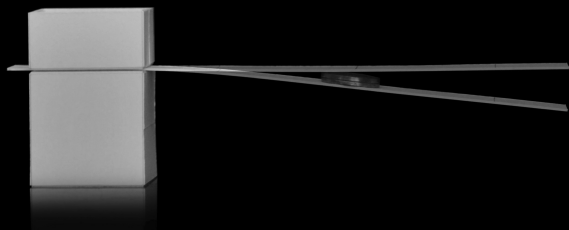
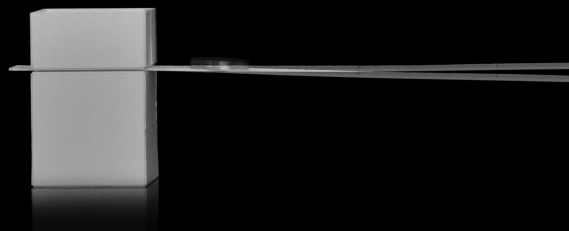
Die Bildserie veranschaulicht die Auswirkung von unterschiedlichen Belastungsgrößen, Spannweiten, Trägerhöhen und Lagerungsarten auf die Tragfähigkeit und Verformung eines Biegeträgers. Am Beispiel des Mehrfeldträgers werden Verformungen als Folge unterschiedlicher Laststellungen veranschaulicht.

### **Modellbeschreibung**

Das gelenkige Auflager kann vertikale sowie horizontale Kräfte übertragen. Das eingespannte Auflager kann horizontale sowie vertikale Kräfte aufnehmen und zusätzlich ein Moment übertragen. Das verschiebliche Auflager kann sich auf der Grundebene frei bewegen und nur vertikale Kräfte aufnehmen. Der Kragarm hat eine Auskrägung von 15 cm und besteht aus einem 0,7 mm Bristolkarton. Der Einfeldträger hat eine Spannweite von 30 cm und besteht aus einem 0,7 mm Bristolkarton. Der Mehrfeldträger hat eine Spannweite von jeweils 20 cm und besteht aus einem 0,5 mm Bristolkarton. Die Tragwerksmodelle haben eine Breite von 2 cm.

---

<sup>8</sup> Vgl. Block/Gengnagel/Peters 2013, 96.



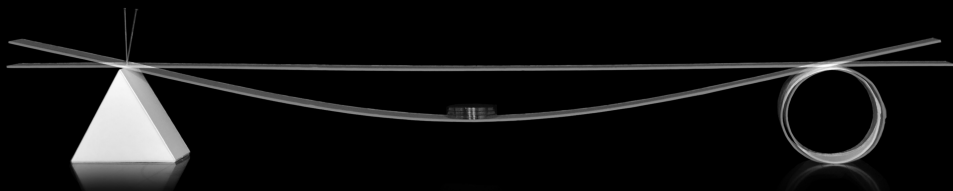
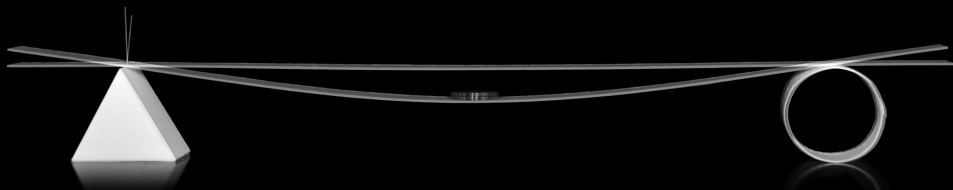
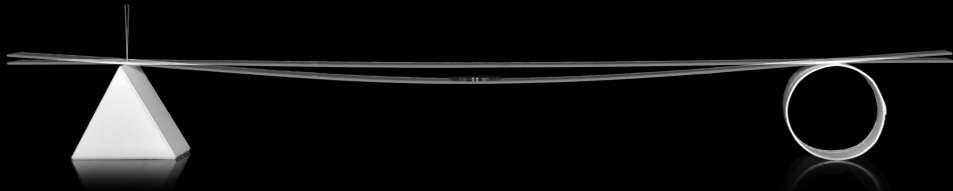


## 04. BIEGETRÄGER

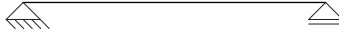


**Abbildung 13: Verformung eines Kragarmes**

Unter Lasteinwirkung entstehen am Kragarm Druckbeanspruchungen an der Trägerunterseite und Zugbeanspruchungen an der Trägeroberseite. Abhängig von der Position der einwirkenden Last vergrößert sich die Durchbiegung am Kragarm.

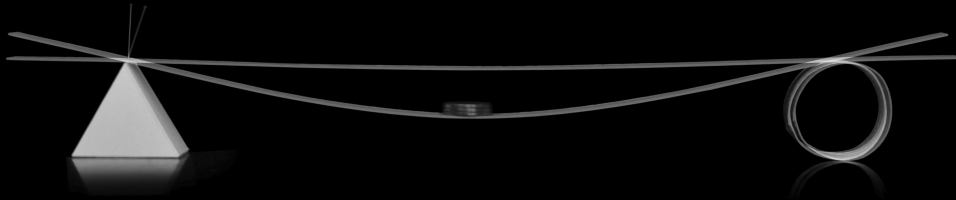
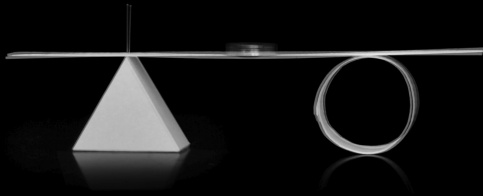


## 04. BIEGETRÄGER

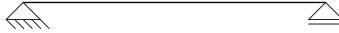


### **Abbildung 14: Verformung eines Biegeträgers**

Unter Lasteinwirkung entstehen am Biegeträger Zugbeanspruchungen an der Trägerunterseite und Druckbeanspruchungen an der Trägeroberseite. Die Lasteinwirkung führt zu einer kontinuierlichen Krümmung der Biegelinie und zu einer Verdrehung des Biegeträgers am Auflager. Die Verdoppelung der einwirkenden Last führt zu einer Verdoppelung der Durchbiegung.

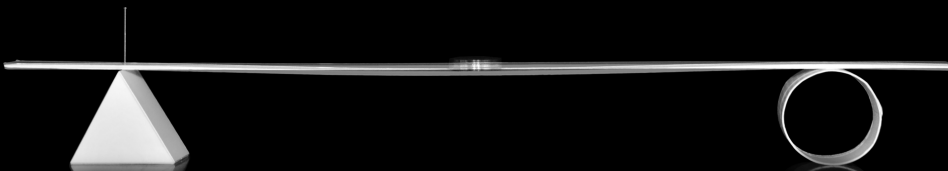
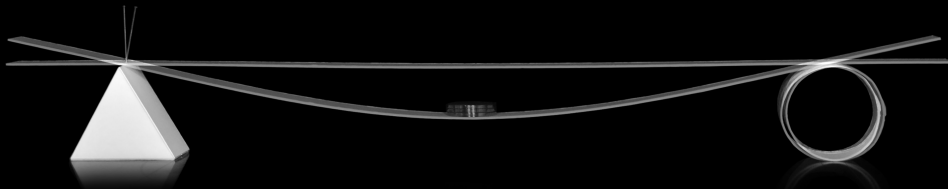


## 04. BIEGETRÄGER

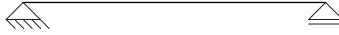


**Abbildung 15: Verformung eines Biegeträgers mit unterschiedlicher Spannweite**

Die Biegeträger haben Spannweiten von 10 cm, 20 cm und 30cm. Bei gleicher Belastungsgröße unterscheidet sich die Größe der Durchbiegung. Die Halbierung der Spannweite führt zu einer 8 mal geringeren Durchbiegung.

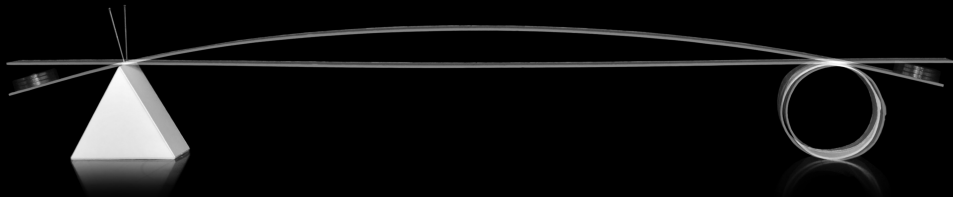
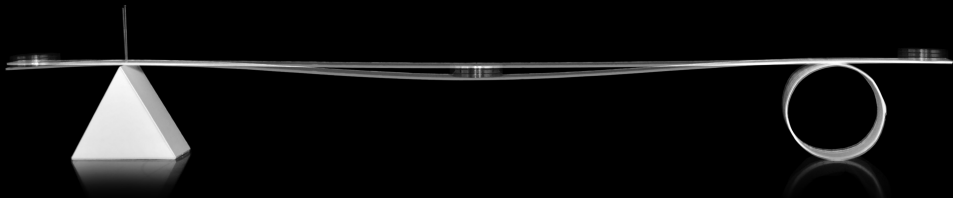
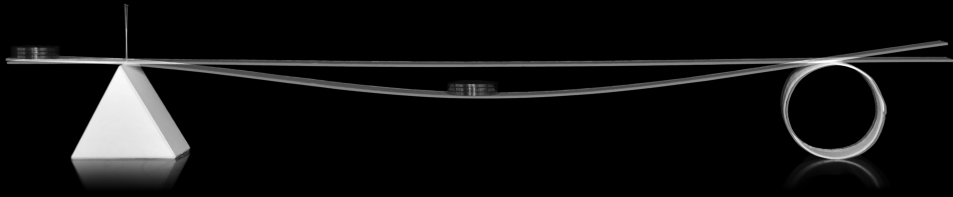
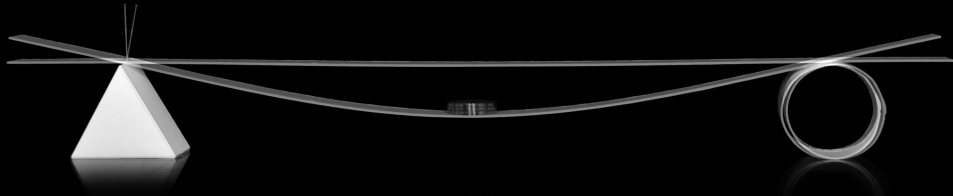


## 04. BIEGETRÄGER



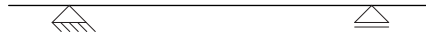
**Abbildung 16: Verformung eines Biegeträgers mit unterschiedlichen Trägerhöhen**

Die verschiedenen Trägerhöhen führen bei gleicher Belastung zu einer unterschiedlich großen Durchbiegung. Im Vergleich zum einfachen Träger halbiert sich die Durchbiegung bei zwei nicht schubfest miteinander verbundenen übereinanderliegenden Trägern. Die schubfeste Verdoppelung der Trägerhöhe führt zu einer 8 mal geringeren Durchbiegung.



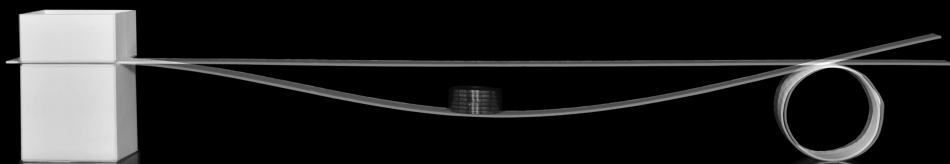
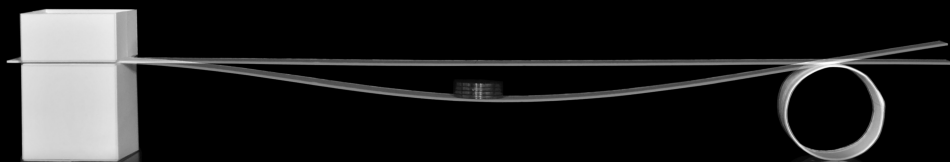
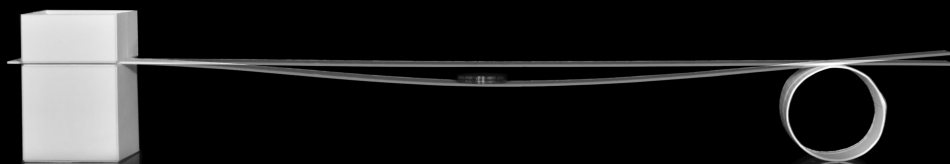


## 04. BIEGETRÄGER



**Abbildung 17: Verformung eines Biegeträgers mit Kragarm**

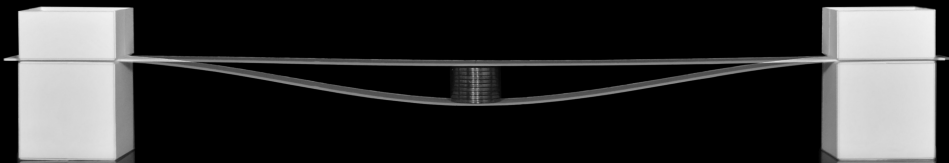
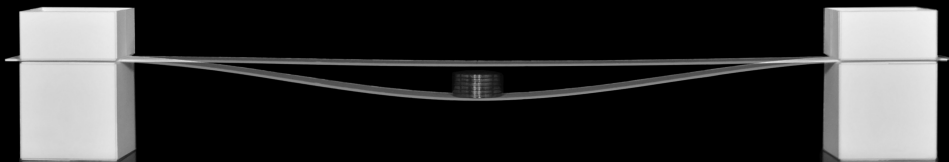
Abhängig von der Laststellung entstehen unterschiedliche Verformungen am Biegeträger. Die einwirkende Last am Kragarm verhindert eine Verdrehung am Auflager und führt zu einer geringeren Durchbiegung des Biegeträgers.



## 04. BIEGETRÄGER



**Abbildung 18: Verformung eines Biegeträgers mit einem einseitig eingespannten Auflager**  
Die Verformung zeigt eine Gegenkrümmung der Biegelinie am eingespannten Auflager und eine Verschiebung der maximalen Durchbiegung zum verschieblichen Auflager.

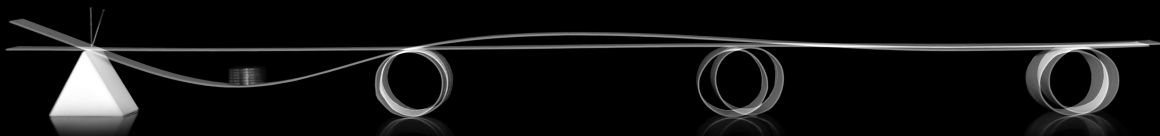
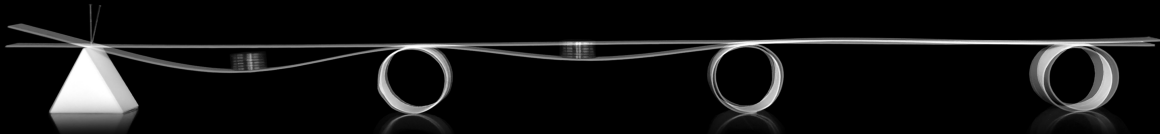
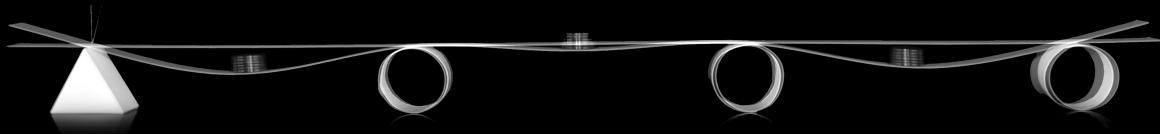
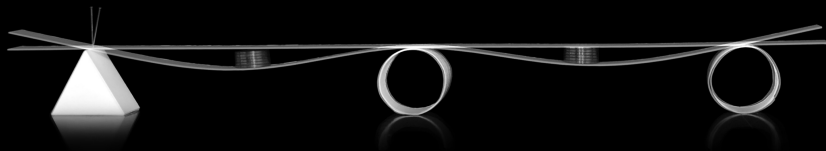
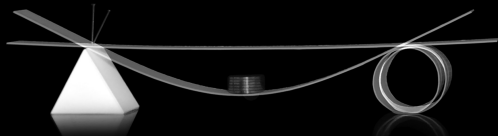


## 04. BIEGETRÄGER

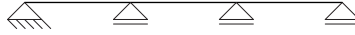


**Abbildung 19: Verformung eines Biegeträgers mit zwei eingespannten Auflagern**

Die Verformung zeigt eine Gegenkrümmung der Biegelinie an beiden Auflagern. Im Vergleich zu dem anderen Lagerungsarten weist der Biegeträger mit zwei eingespannten Auflagern die geringste Verformung auf.

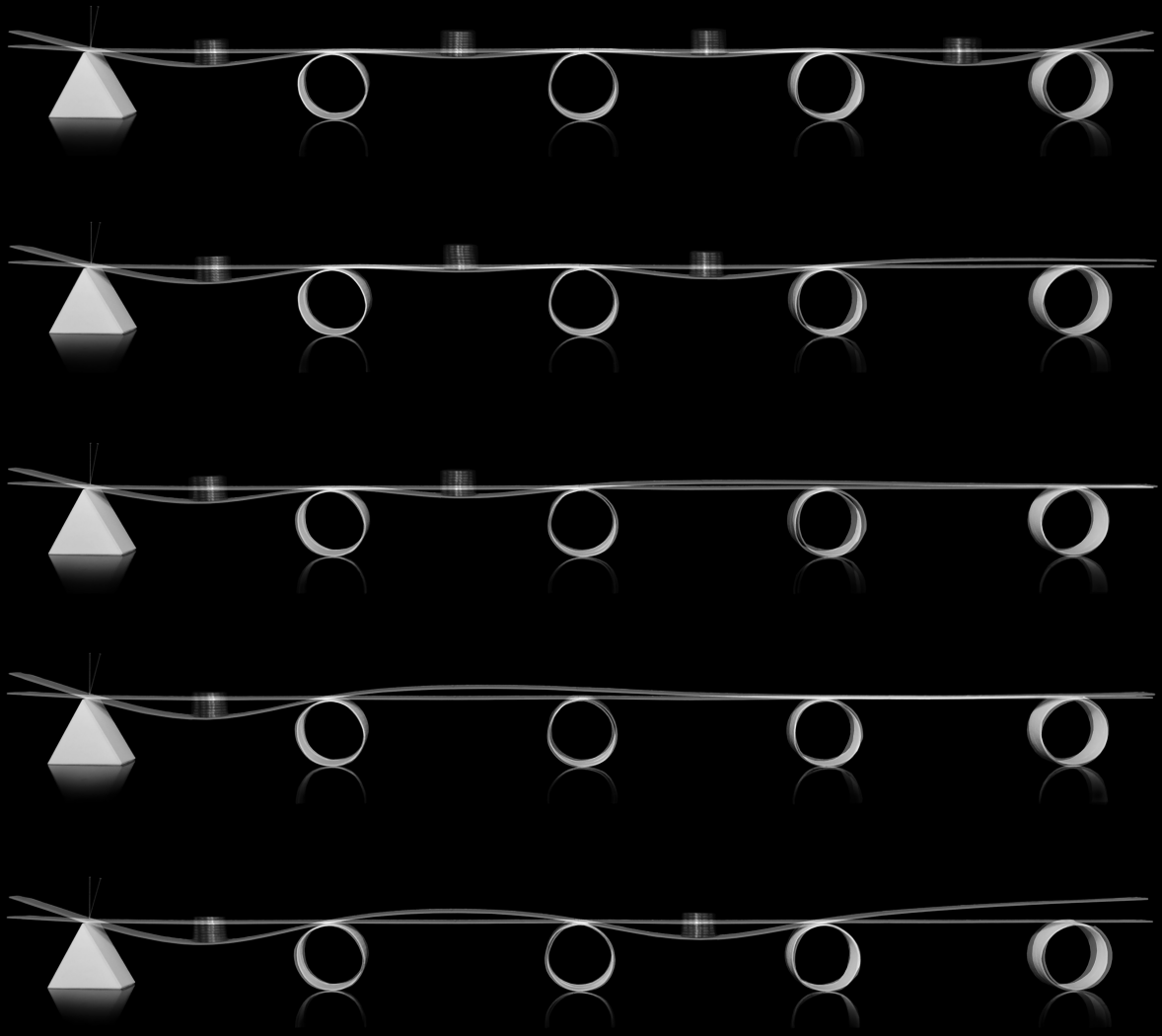


## 04. BIEGETRÄGER



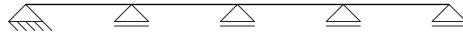
**Abbildung 20: Verformung eines Einfeldträgers, Zweifeldträgers und Dreifeldträgers mit unterschiedlichen Laststellungen**

Die Verformung der Träger ist unterschiedlich. Abhängig von der Anzahl der Auflager und von der Position der einwirkenden Last entstehen Biegelinien, die einem einseitig oder zweiseitig eingespannten Einfeldträger gleichen. Die verschieblichen Auflager können keine abhebenden Lasten aufnehmen.





## 04. BIEGETRÄGER



**Abbildung 21: Verformung eines Vierfeldträgers mit unterschiedlichen Laststellungen**

Ausgehend von Abbildung 20 zeigt die Bildserie weitere Verformungen am Beispiel eines Vierfeldträgers. Abhängig von der Laststellung entstehen wellenförmige Biegelinien und ein Abheben des Biegeträgers vom Auflager.

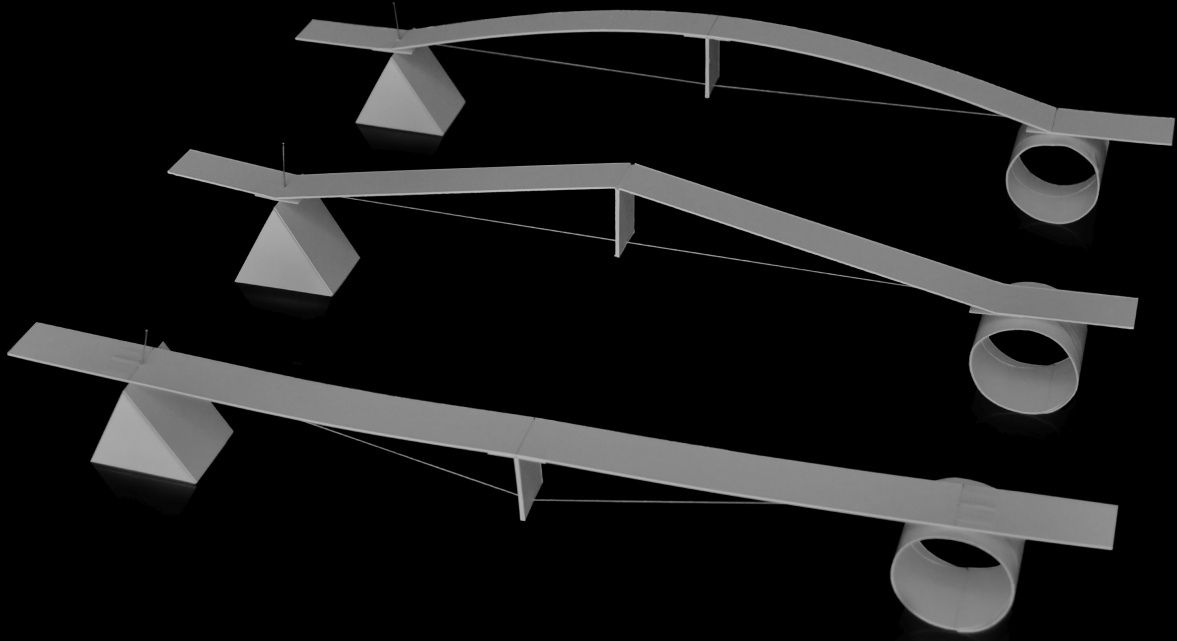


Abbildung 22: Tragwerksmodelle hybride Tragsysteme

## 05. HYBRIDE TRAGSYSTEME

---

Hybride Tragsysteme bestehen aus zwei oder mehreren kombinierten Tragwerkselementen. Sie stellen keine spezielle Art der Lastabtragung dar, sondern bestehen aus mehreren sich ergänzenden Systemen. <sup>9</sup>

### **Bildbeschreibung**

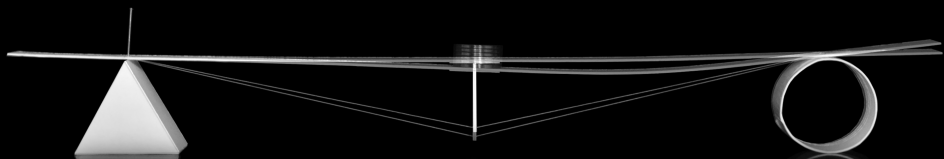
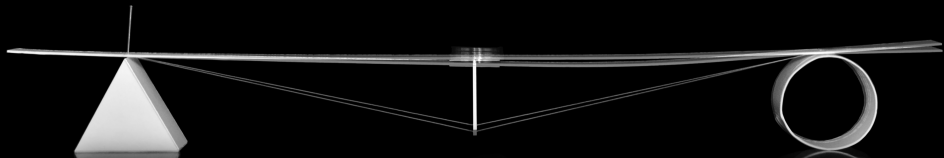
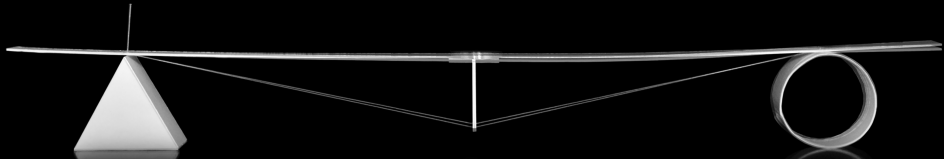
Die Bildserie zeigt drei unterschiedliche hybride Tragsysteme. Die Verformungen veranschaulichen das unterschiedliche Tragverhalten und die unterschiedlichen Eigenschaften zur Lastabtragung der drei hybriden Tragsysteme.

### **Modellbeschreibung**

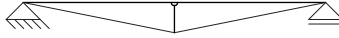
Als Auflager wird ein verschiebliches Auflager und gelenkiges Auflager verwendet. Die Tragwerksmodelle mit unterschiedlicher Bauart haben eine Spannweite von 30 cm, eine Breite von 2 cm und bestehen aus einem 0,7 mm Bristolkarton.

---

<sup>9</sup> Vgl. Eisele 2014, 41-42.

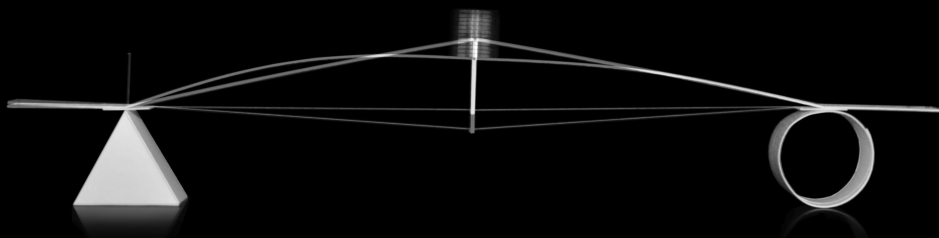
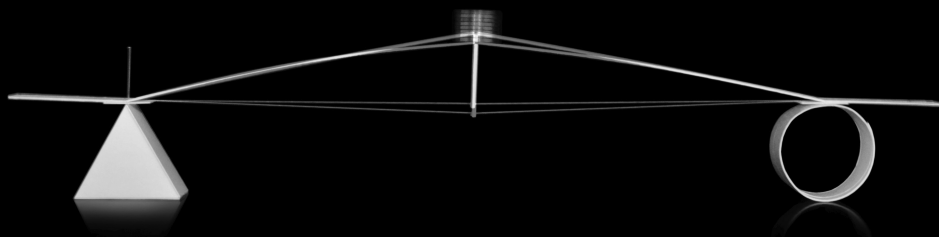
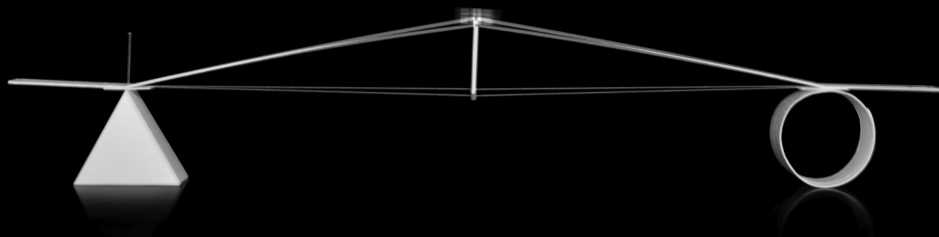


## 05. HYBRIDE TRAGSYSTEME

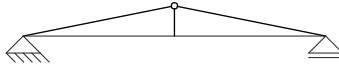


**Abbildung 23: Verformung eines unterspannten Trägers**

Das Tragwerksmodell besteht aus einem Biegeträger, der an der Unterseite mit Zugstäben und einem Druckstab stabilisiert wird.

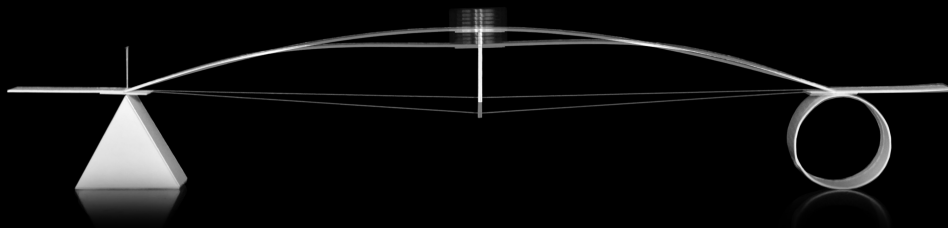
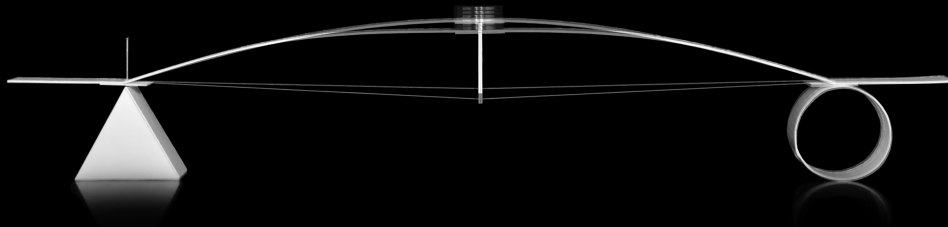
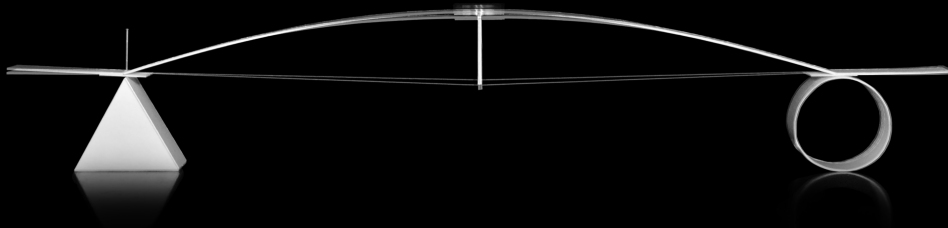


## 05. HYBRIDE TRAGSYSTEME



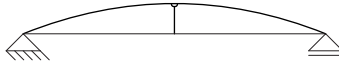
**Abbildung 24: Verformung eines Sprengwerks**

Das Tragwerksmodell besteht aus zwei mit einem Gelenk verbundenen Trägern, die mit Zugstäben und einem Druckstab stabilisiert werden.





## 05. HYBRIDE TRAGSYSTEME



**Abbildung 25: Verformung eines gekrümmten, unterspannten Trägers**

Das Tragwerksmodell besteht aus einem gekrümmten Träger, der mit Zugstäben und einem Druckstab stabilisiert wird.

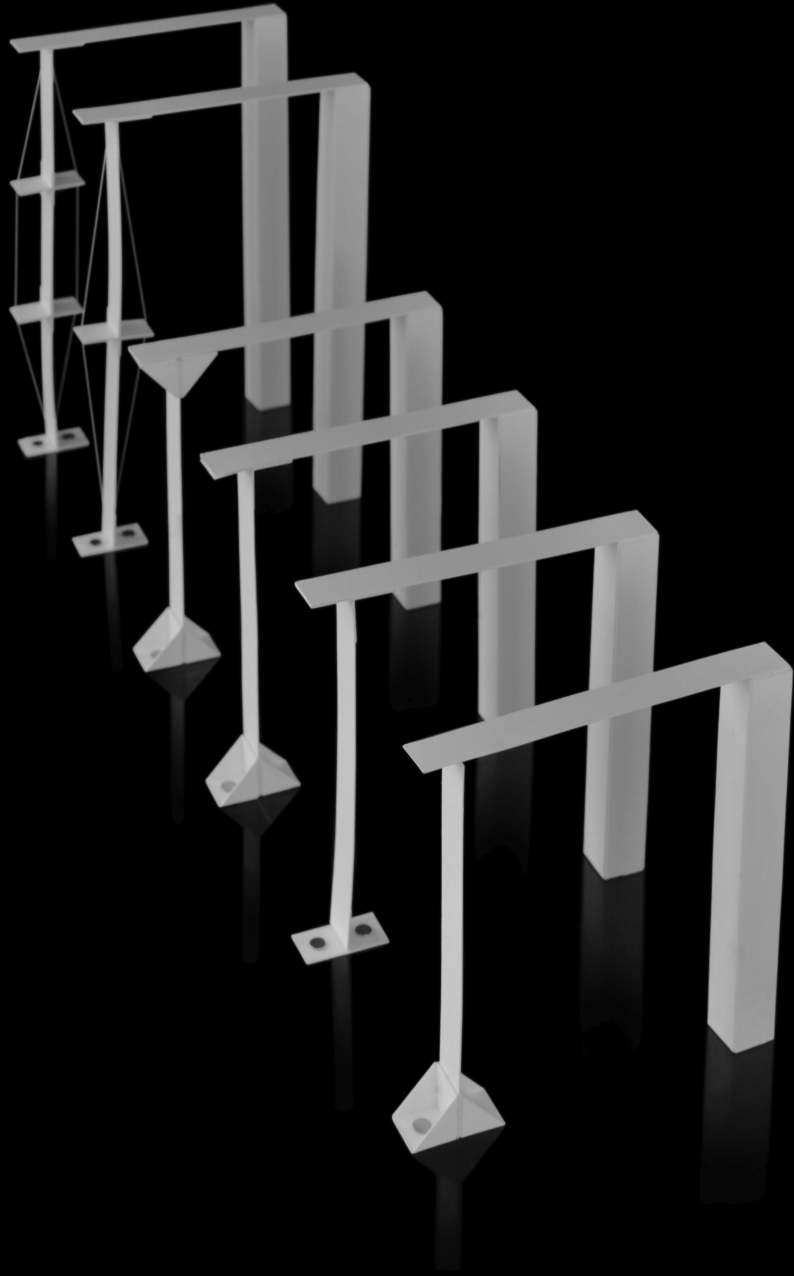


Abbildung 26: Tragwerksmodelle Druckstäbe

## 06. DRUCKSTAB

---

Der Druckstab ist ein durch Druckkraft beanspruchter Stab. Der schlanke Druckstab weist ein spezielles Tragverhalten auf, er ist stabilitätsgefährdet. Unter Belastung weicht der Stab seitlich aus, dies führt zu einem plötzlichen Stabilitätsversagen.<sup>10</sup>

### **Bildbeschreibung**

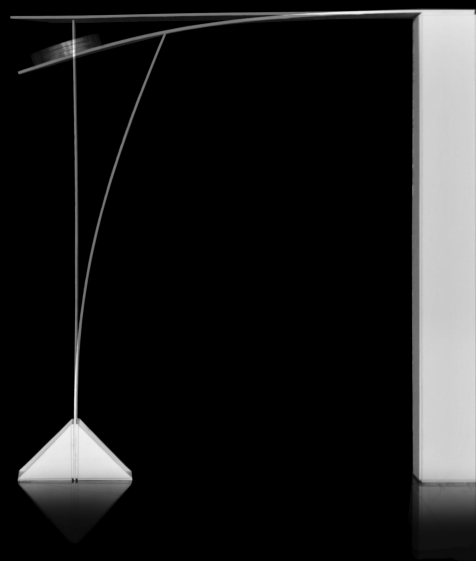
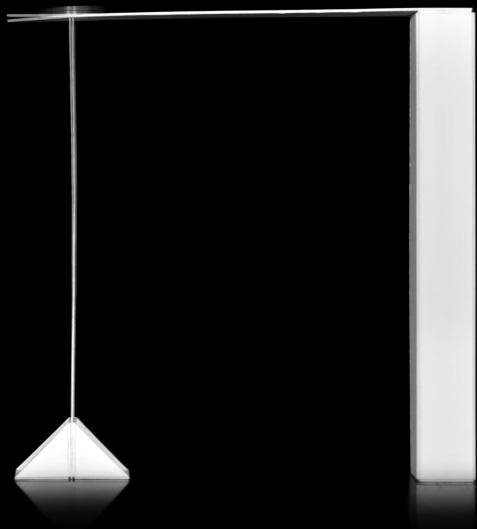
Die Bildserie zeigt vier unterschiedliche Lagerungsarten entsprechend den vier Eulerschen Knickfälle. Abhängig von der Lagerung unterscheiden sich Tragfähigkeit und Verformung des Druckstabes. Die Stabilisierung von Druckstäben wird am Beispiel eines beidseitig gelenkig gelagerten Druckstabes, der mit Zug- und Druckstäben ergänzt wird, veranschaulicht.

### **Modellbeschreibung**

Die Auflager werden gelenkig, eingespannt oder frei beweglich ausgebildet. Die Druckstäbe werden an einer horizontalen Halterung befestigt und bis zur Stabilitätsgrenze belastet. Die Tragwerksmodelle bestehen aus einem 0,5 mm Bristolkarton. Sie haben eine Breite von 2 cm und eine Länge von 17 cm oder 25 cm.

---

<sup>10</sup> Vgl. Block/Gengnagel/Peters 2013, 93/123.

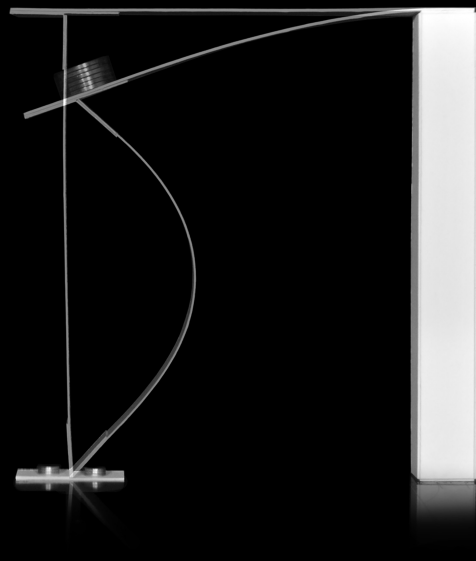
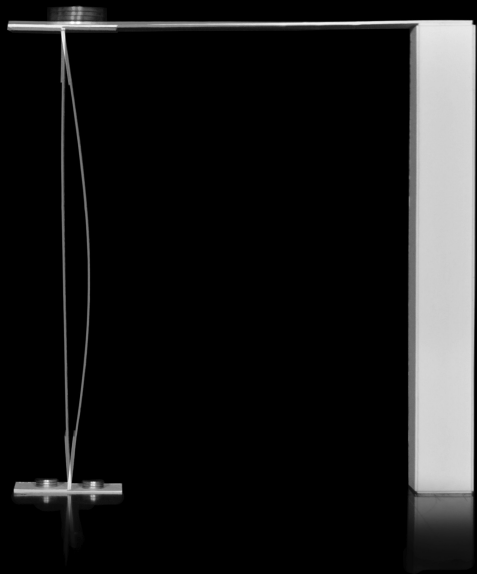


## 06. DRUCKSTAB



**Abbildung 27: Verformung eines Druckstabes mit eingespanntem Auflager und freiem Stabende (1.Eulerfall)**

*Im ersten Belastungsfall weist der Druckstab kaum Verformungen auf. Eine geringe Vergrößerung der Belastung führt zum plötzlichen Ausknicken des Druckstabes. Die Verformung zeigt eine einfach gekrümmte Biegelinie.*

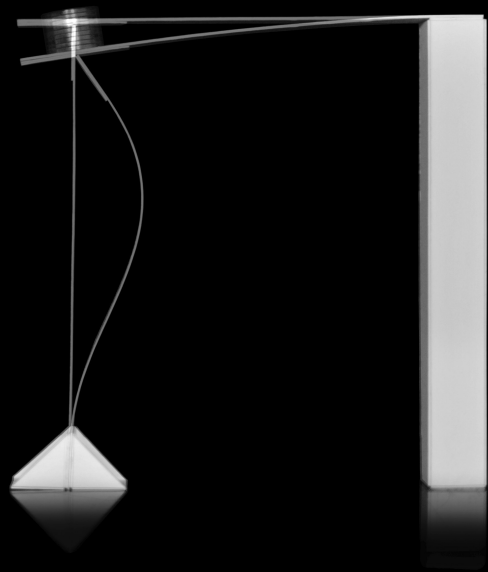
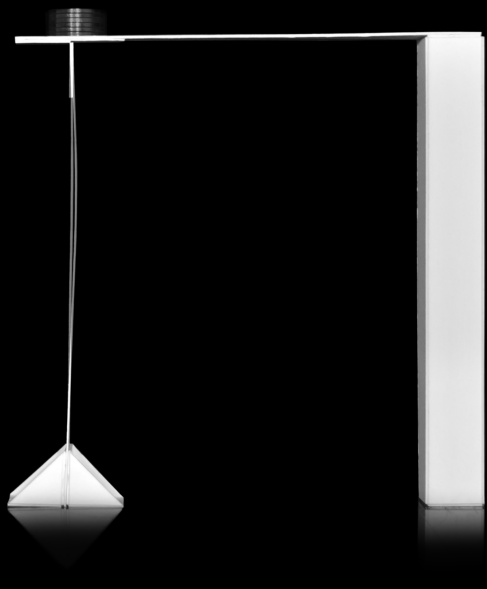


## 06. DRUCKSTAB



**Abbildung 28: Verformung eines Druckstabes mit zwei gelenkigen Auflagern (2.Eulerfall)**

Im Vergleich zum 1. Eulerfall ist bei gleicher Stablänge eine höhere Last notwendig bis die Stabilitätsgrenze des Stabes erreicht wird. Die Verformung zeigt eine einfach gekrümmte Biegelinie.

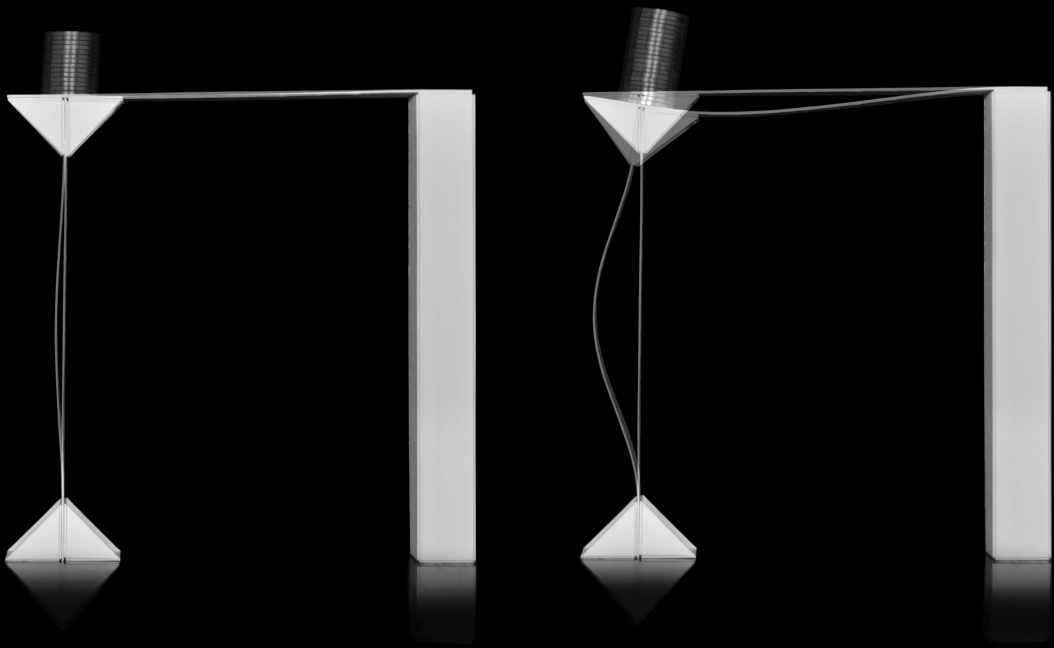




## 06. DRUCKSTAB



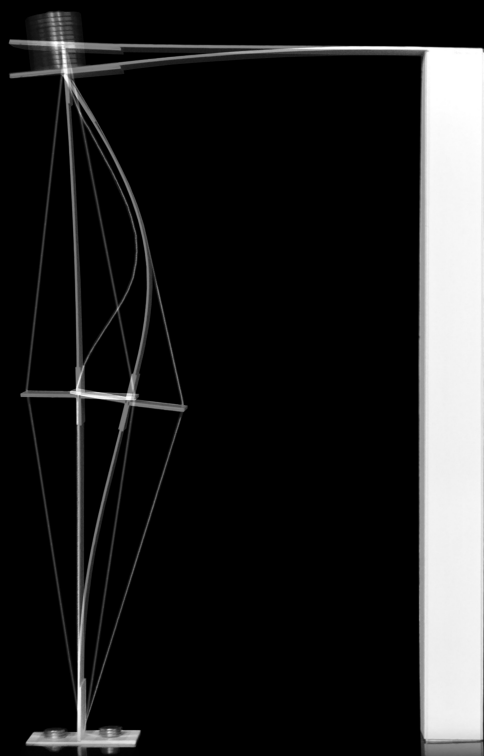
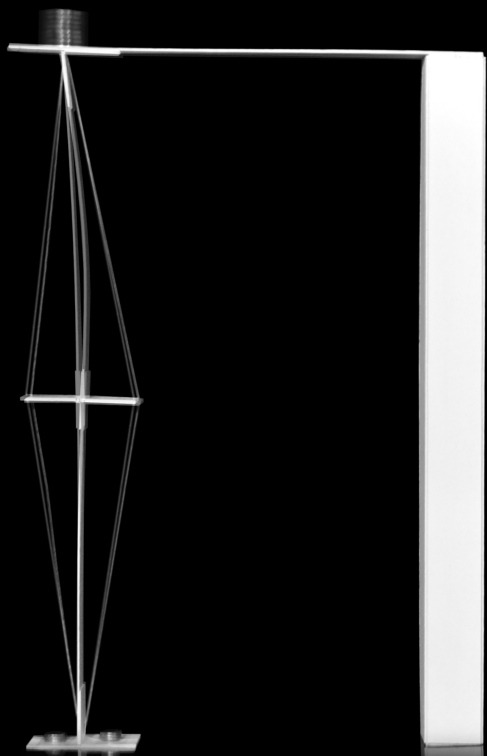
**Abbildung 29: Verformung eines Druckstabes mit eingespanntem und gelenkigem Auflager (3.Eulerfall)**  
Im Vergleich zum 1. und 2. Eulerfall weist der Druckstab eine geringere Verformung auf. Die Verformung zeigt eine Biegelinie mit einem Wendepunkt im unteren Drittel des Druckstabes.



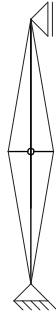
## 06. DRUCKSTAB



**Abbildung 30: Verformung eines Druckstabes mit zwei eingespannten Auflagern (4. Eulerfall)**  
Der beidseitig eingespannte Druckstab weist die geringste Verformung der 4 Eulerfälle auf. Die Verformung zeigt eine Biegelinie mit zwei Wendepunkten an beiden Auflagern des Druckstabes.

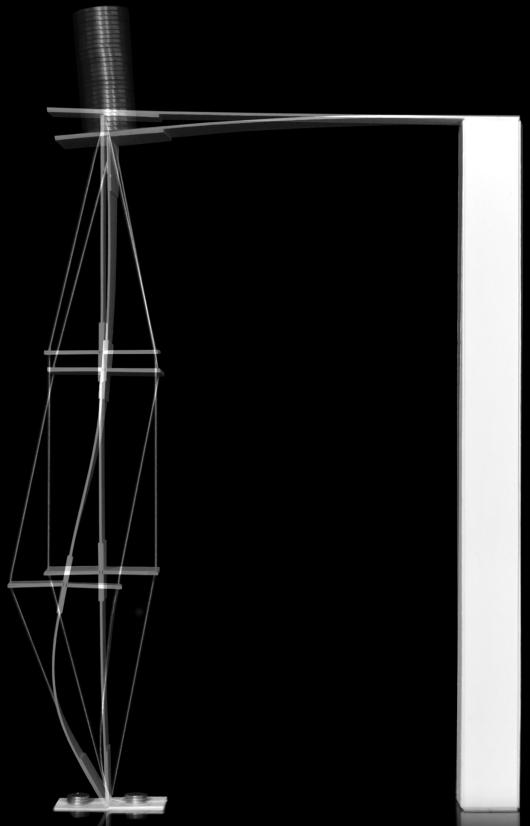


## 06. DRUCKSTAB



**Abbildung 31: Stabilisierung eines Druckstabes mit Zug- und Druckstäben**

Der Druckstab weist bei einer Stablänge von 25 cm eine geringe Verformung auf. Die Verformung unterscheidet sich von einem Druckstab mit zwei gelenkigen Auflagern und zeigt eine Biegelinie mit einem Wendepunkt am unteren Auflager.



## 06. DRUCKSTAB



**Abbildung 32: Stabilisierung eines Druckstabes mit mehreren Zug- und Druckstäben**  
Die Anordnung von mehreren Zug- und Druckstäben führt zu einer maßgeblichen Verringerung der Verformung.

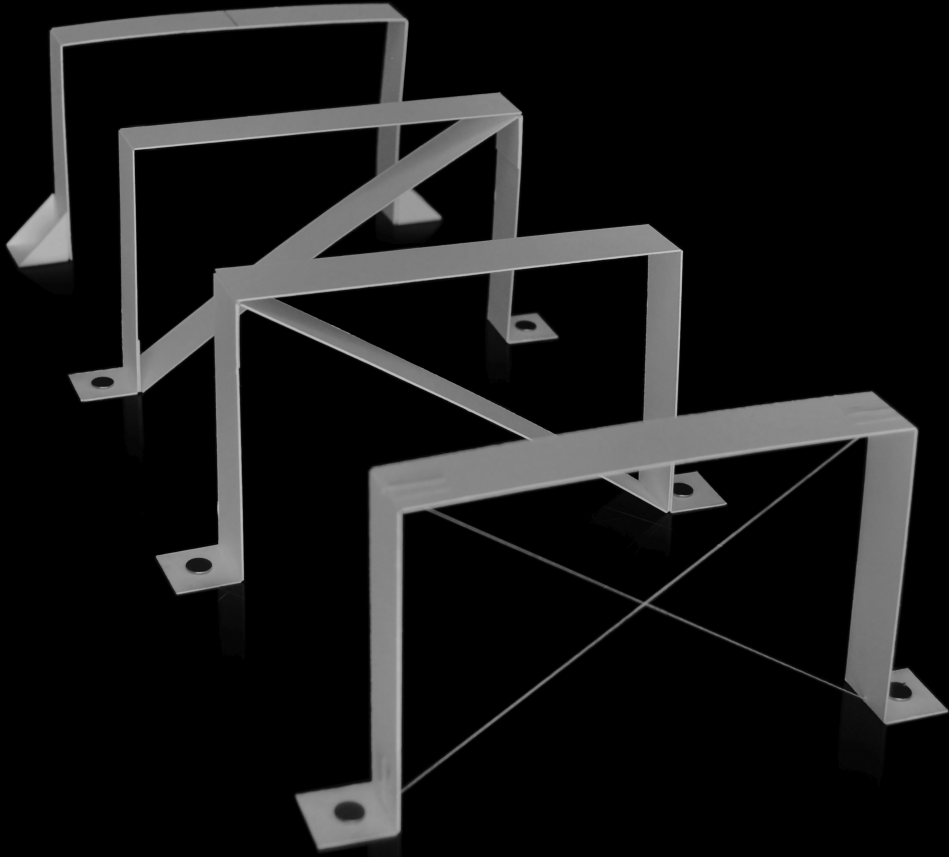


Abbildung 33: Tragwerksmodelle Horizontalaussteifungen



## 07. HORIZONTALAUSSTEIFUNG

---

Die Gebäudeaussteifung gewährleistet die Stabilität eines Gebäudes bei horizontaler Lasteinwirkung. Durch entsprechende Aussteifungselemente werden horizontale Lasten in die Fundamente geleitet. Eine Horizontalaussteifung kann durch die Anordnung von diagonal verlaufenden Fachwerkstäben oder durch die Einspannung von Stützen am Stützenfuß gebildet werden.<sup>11</sup>

### **Bildbeschreibung**

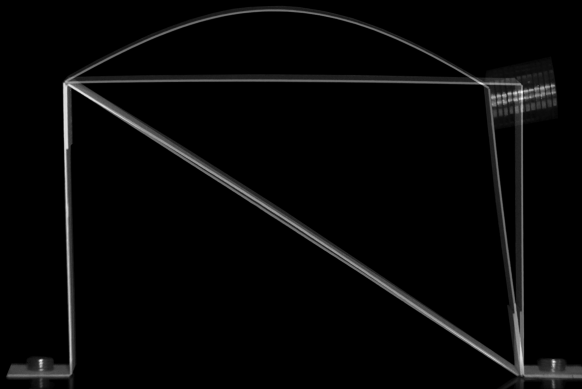
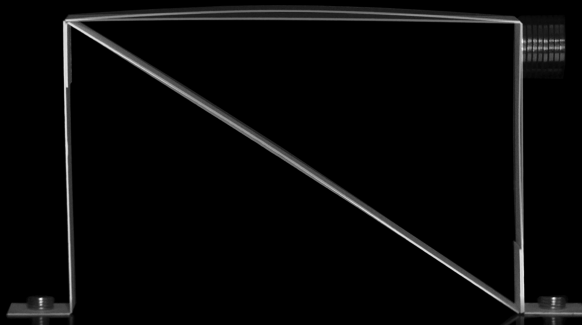
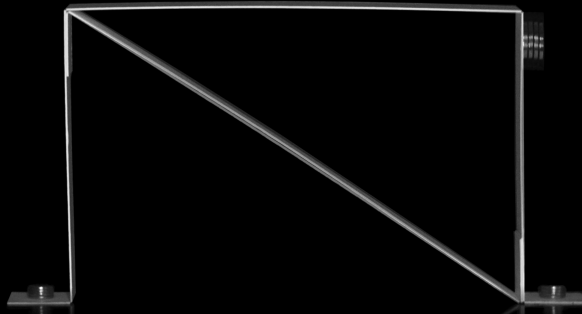
Die Bildserie veranschaulicht die Wirkungsweise unterschiedlicher Aussteifungsvarianten. Dargestellt wird eine Horizontalaussteifung mit diagonal verlaufendem Fachwerkstab und mit eingespanntem Stützenfuß. Abhängig von der Bauart unterscheidet sich die Beanspruchung der Stäbe durch Zugkräfte, Druckkräfte oder Biegemomente.

### **Modellbeschreibung**

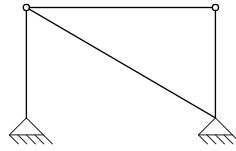
Die Stäbe sind mit Gelenken verbunden und haben ein gelenkiges Auflager oder eine Einspannung am Stützenfuß. Für die horizontale Lasteinwirkung werden die Tragwerksmodelle um 90° gedreht. Die Tragwerksmodelle bestehen aus einem 0,5 mm Bristolkarton. Sie haben eine Länge von 14 cm, eine Höhe von 9 cm und eine Breite von 2 cm.

---

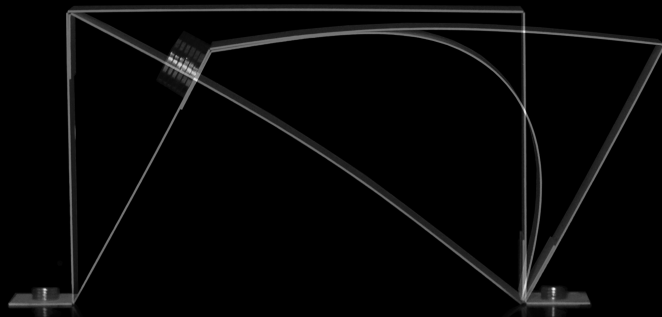
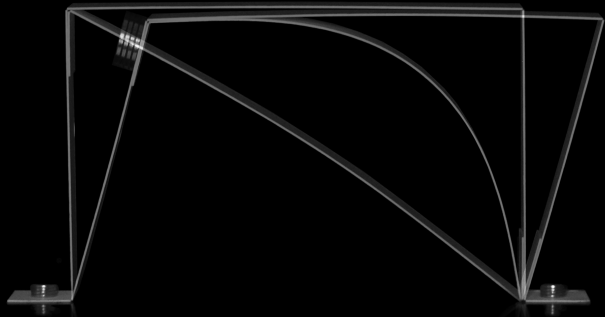
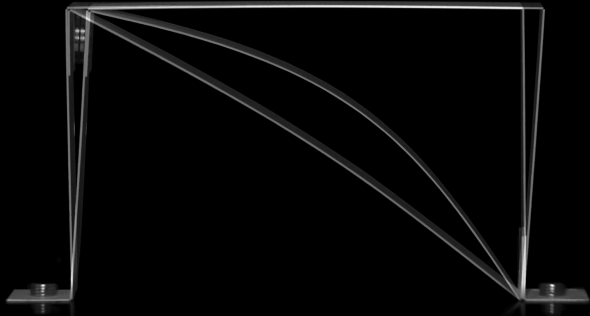
<sup>11</sup> Vgl. Block/Gengnagel/Peters 2013, 140-142.



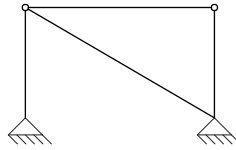
## 07. HORIZONTALAUSSTEIFUNG



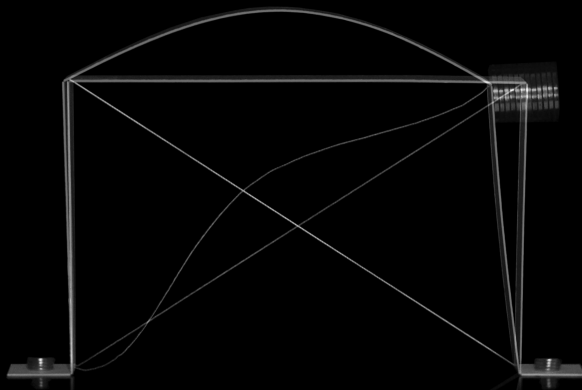
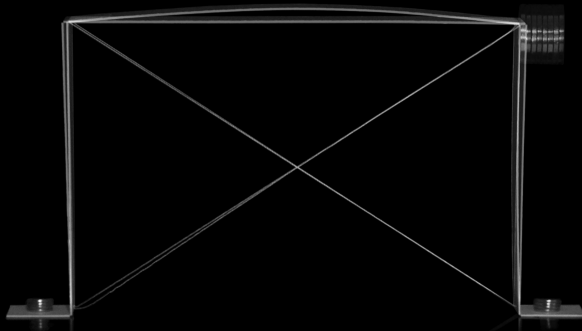
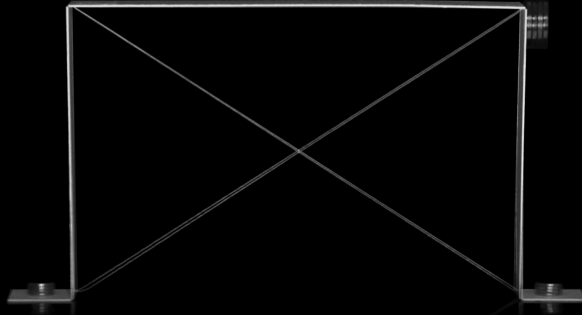
**Abbildung 34: Verformung eines Fachwerks mit zugbeanspruchtem, diagonalem Stab**  
Die Lasteinwirkung führt zur Verformung des Trägers infolge einer Druckbeanspruchung.



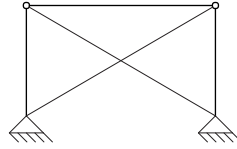
## 07. HORIZONTALAUSSTEIFUNG



**Abbildung 35: Verformung eines Fachwerkes mit druckbeanspruchtem, diagonalem Stab**  
Der diagonale Stab zeigt große Verformungen infolge einer Druckbeanspruchung. Im Vergleich zum Fachwerk mit zugbeanspruchten, diagonalem Stab ist die einwirkende Last wesentlich geringer.



## 07. HORIZONTALAUSSTEIFUNG



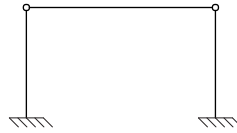
**Abbildung 36: Verformung eines Fachwerkes mit zwei Zugdiagonalen**

Die Horizontalaussteifung erfolgt durch zwei sich kreuzende Zugstäbe. Abhängig von der Richtung der einwirkenden Last wird der jeweilige Zugstab zur Lastabtragung wirksam.





## 07. HORIZONTALAUSSTEIFUNG



**Abbildung 37: Verformung eines Tragwerkes mit zwei eingespannten Stützen**

Im Gegensatz zu Fachwerken entstehen an den eingespannten Stützen Biegebeanspruchungen bei horizontaler Lasteinwirkung. Der mit Gelenken verbundene Träger weist keine Verformungen auf.

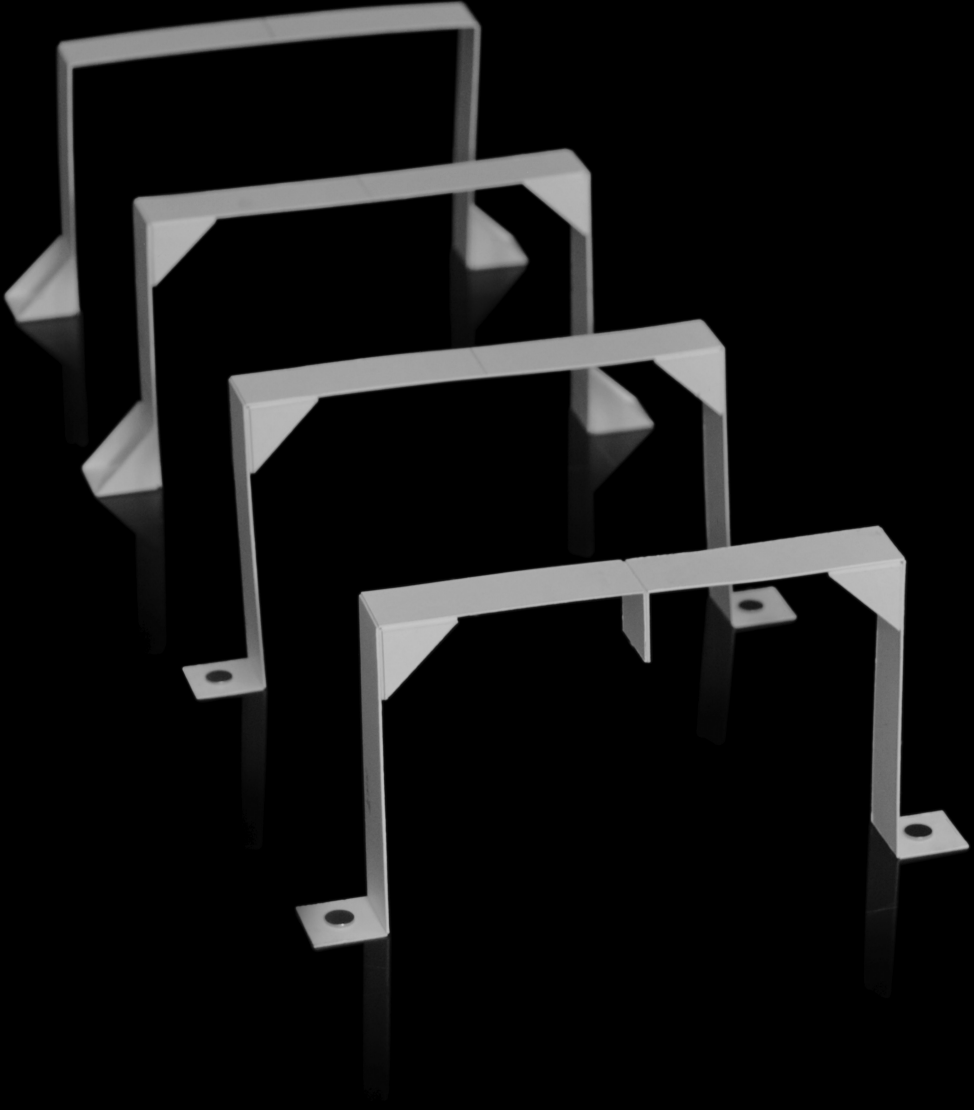


Abbildung 38: Tragwerksmodelle Rahmentragwerke

## 08. RAHMEN TRAGWERKE

---

Rahmentragwerke bestehen aus biegesteif miteinander verbundenen Stützen und Trägern. Sie sind stark biegebeanspruchte Tragwerke und können vertikale und horizontale Lasten aufnehmen.<sup>12</sup>

### **Bildbeschreibung**

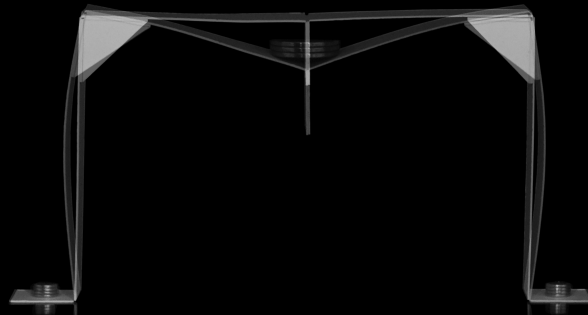
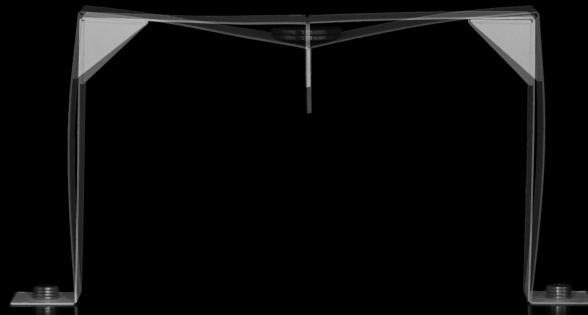
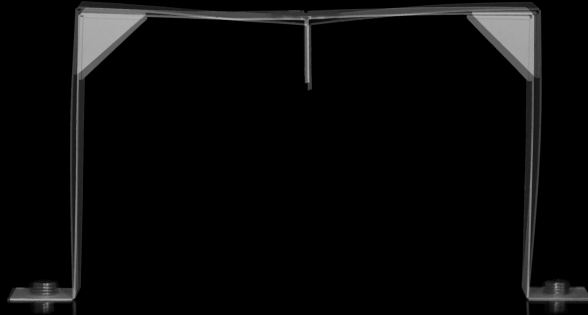
Die Bildserie zeigt drei unterschiedliche Bauarten, den Dreigelenkrahmen, den Zweigelenkrahmen und den eingespannten Rahmen. Es werden Verformungen infolge einer vertikalen Lasteinwirkung, einer horizontalen Lasteinwirkung und einer horizontalen Auflagerverschiebung dargestellt.

### **Modellbeschreibung**

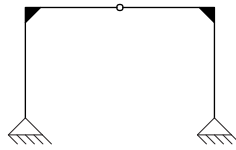
Die Auflager und Stäbe sind biegesteif miteinander verbunden oder als Gelenk ausgebildet. Die Tragwerksmodelle bestehen aus einem 0,5 mm Bristolkarton. Sie haben eine Länge von 14 cm, eine Höhe von 9 cm und Breite von 2 cm.

---

<sup>12</sup> Vgl. Block/Gengnagel/Peters 2013, 104.

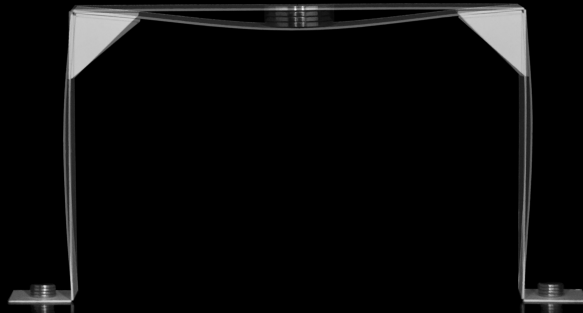
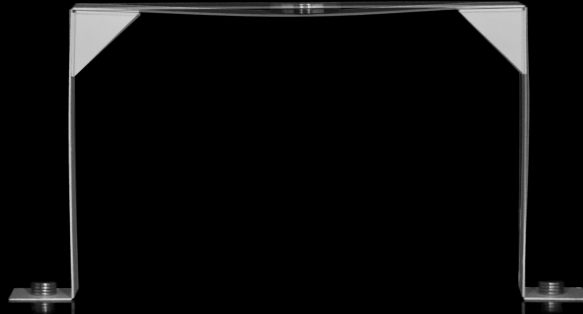


## 08. RAHMENTRAGWERKE

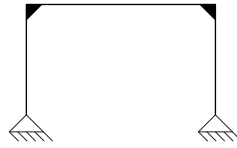


**Abbildung 39: Verformung eines Dreigelenkrahmens unter vertikaler Lasteinwirkung**

Die Verformung zeigt eine Durchbiegung am Rahmenriegel und eine einfache Krümmung am Rahmenstiel. Das Gelenk am Rahmenriegel führt zu einem Knick der Biegelinie infolge der Lasteinwirkung.

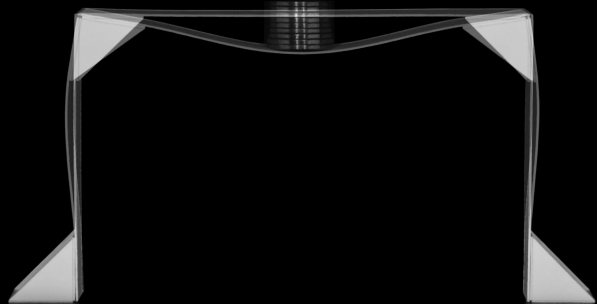
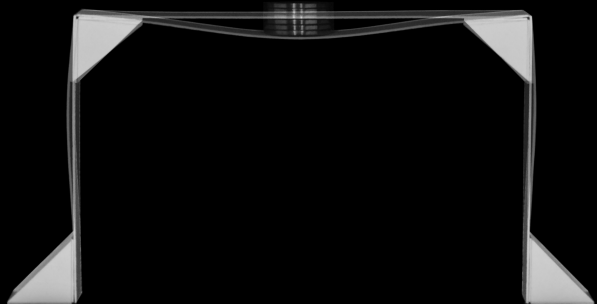
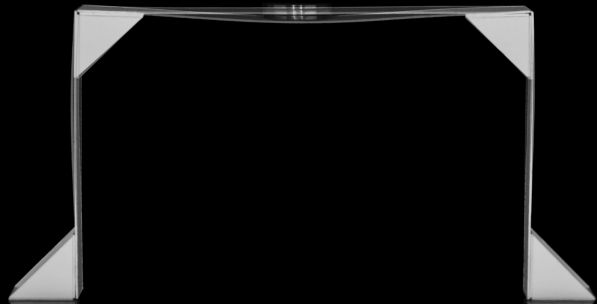


## 08. RAHMENTRAGWERKE



**Abbildung 40: Verformung eines Zweigelenrahmens unter vertikaler Lasteinwirkung**

Die Verformung zeigt eine Durchbiegung am Rahmenriegel und eine einfache Krümmung am Rahmenstiel. Im Vergleich zum Dreigelenrahmen weist der Zweigelenrahmen eine geringere Durchbiegung auf.



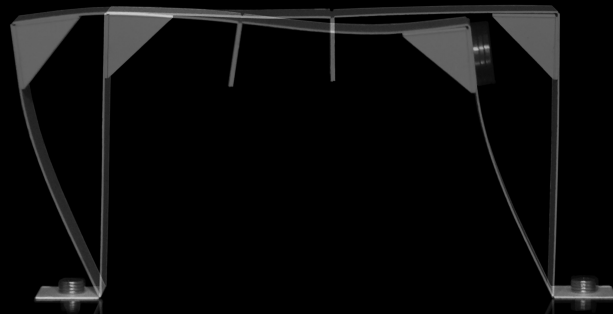
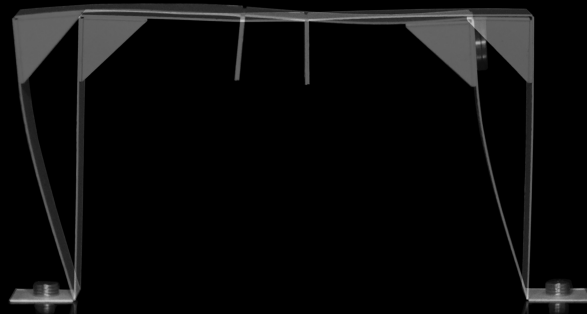
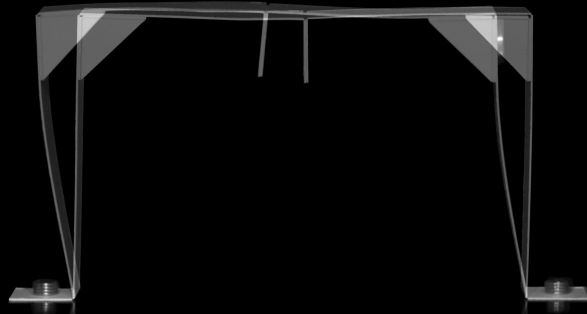


## 08. RAHMENTRAGWERKE

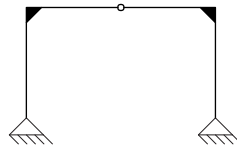


**Abbildung 41: Verformung eines eingespannten Rahmens unter vertikaler Lasteinwirkung**

Die Verformung zeigt eine Durchbiegung am Rahmenriegel. Der Rahmenstiel bildet eine Biegelinie mit einem Wendepunkt nahe am Auflager. Der eingespannte Rahmen weist eine geringere Durchbiegung als Dreigelenk- und Zweigelenkbogen auf.

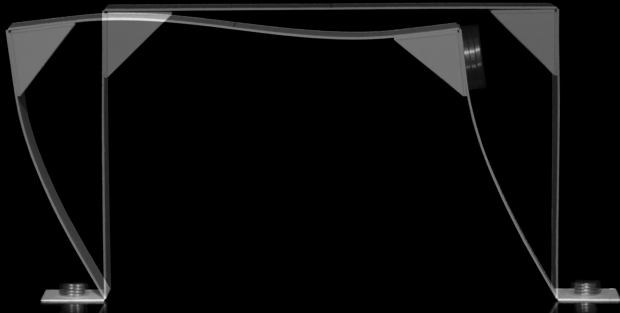
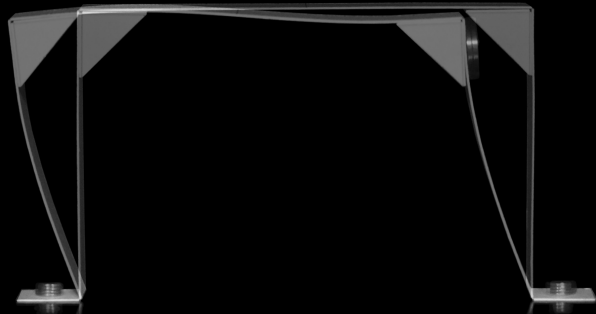
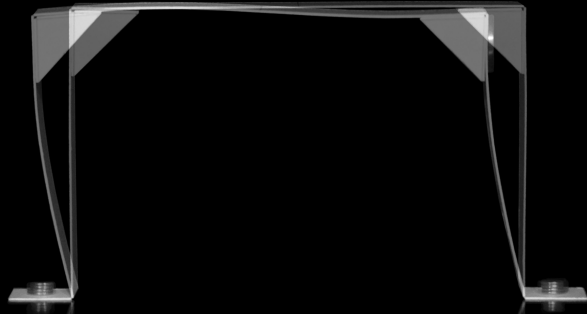


## 08. RAHMENTRAGWERKE



**Abbildung 42: Verformung eines Dreigelenkrahmes unter horizontaler Lasteinwirkung**

Die Verformung zeigt eine wellenförmige Biegelinie am Rahmenriegel und eine einfache Krümmung am Rahmenstiel. Im Vergleich zur vertikalen Lasteinwirkung entsteht bei horizontaler Lasteinwirkung kein Knick am Rahmenriegel.

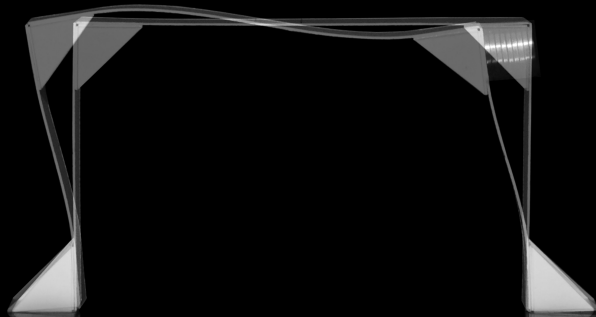
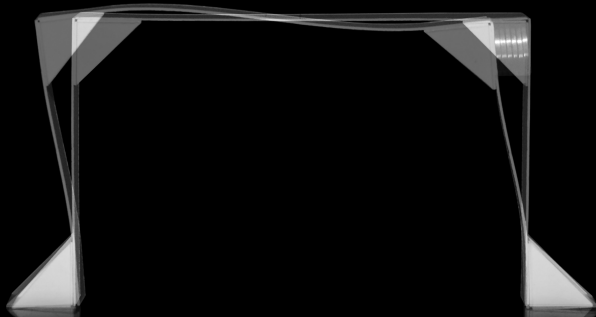


## 08. RAHMENTRAGWERKE



**Abbildung 43: Verformung eines Zweigelenrahmes unter horizontaler Lasteinwirkung**

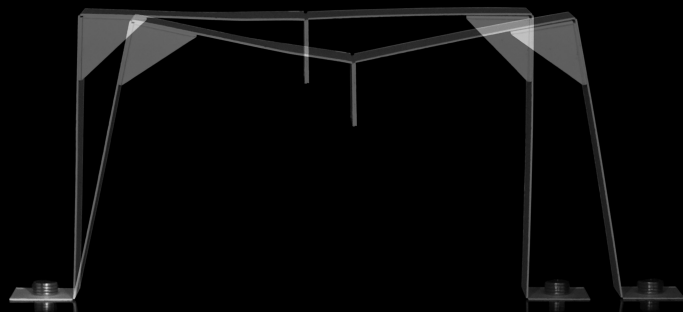
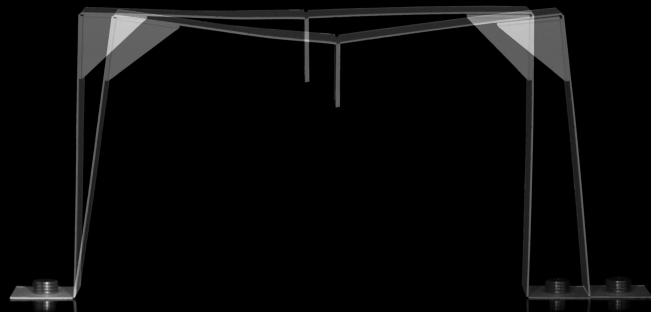
Der Zweigelenrahmen weist bei einer horizontalen Lasteinwirkung eine ähnliche Verformung auf wie der Dreigelenrahmen.



## 08. RAHMENTRAGWERKE

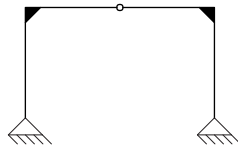


**Abbildung 44: Verformung eines eingespannten Rahmens unter horizontaler Lasteinwirkung**  
Die Verformung zeigt eine wellenförmige Biegelinie am Rahmenriegel und am Rahmenstiel.  
Der eingespannte Rahmen weist eine geringere Verformung als Dreigelenk- und Zweigelenkrahmen auf.



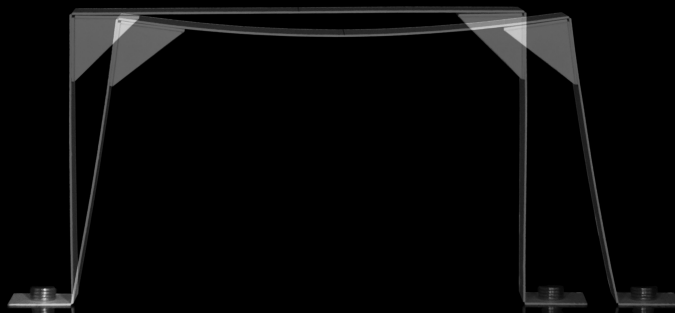
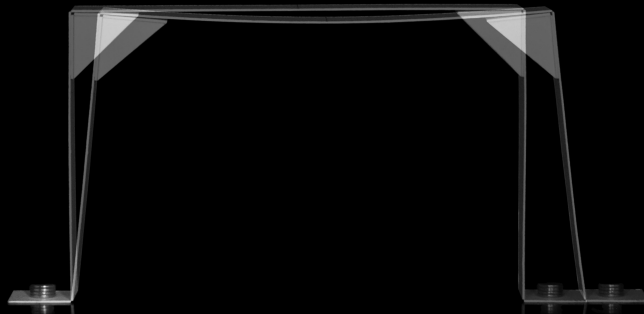
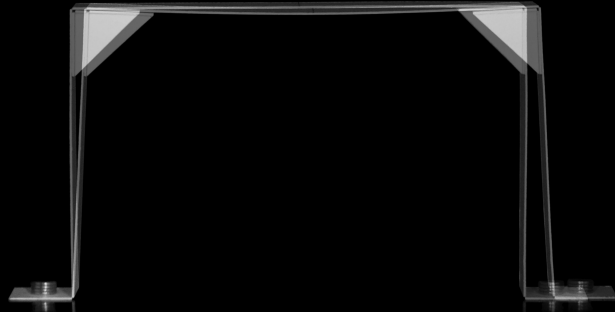


## 08. RAHMENTRAGWERKE

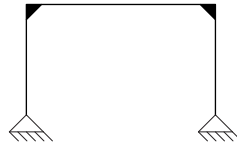


**Abbildung 45: Verformung eines Dreigelenkrahmes infolge einer Auflagerverschiebung**

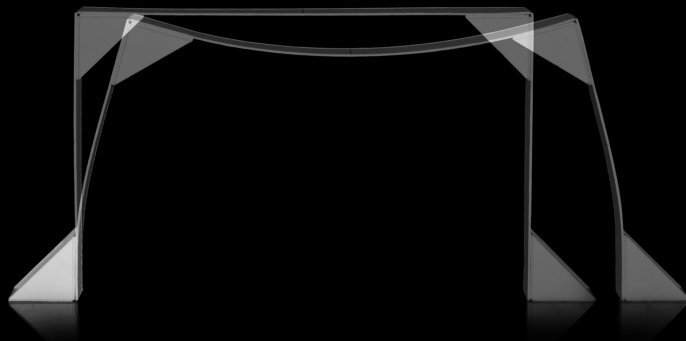
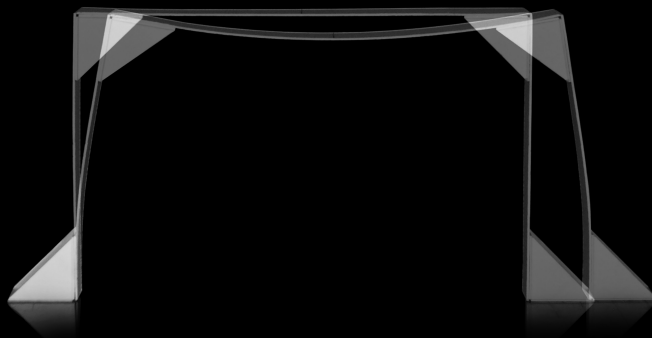
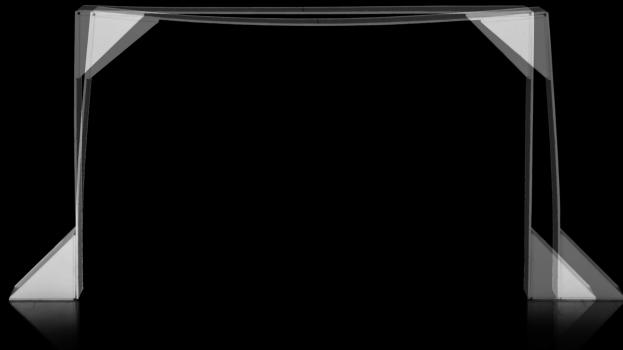
Die Auflagerverschiebung am Dreigelenkrahmen führt zu einem Knick am Rahmenriegel. Die drei Gelenke ermöglichen eine Auflagerverschiebung ohne dass Biegeverformungen und damit Beanspruchungen am Rahmen entstehen.



## 08. RAHMENTRAGWERKE



**Abbildung 46: Verformung eines Zweigelenrahmens infolge einer Auflagerverschiebung**  
Die Auflagerverschiebung führt vor allem am Rahmenriegel zu Verformungen. Im Vergleich zum Dreigelenrahmen entstehen am Zweigelenrahmen Biegebeanspruchungen aufgrund der Auflagerverschiebung.



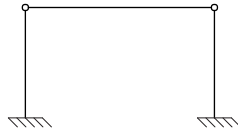
## 08. RAHMEN TRAGWERKE



**Abbildung 47: Verformung eines eingespannten Rahmens infolge einer Auflagerverschiebung**  
Die Auflagerverschiebung führt zu Verformungen am Rahmenriegel und am Rahmenstiel. Im Vergleich zum Dreigelenkrahmen und Zweigelenkrahmen entstehen am eingespannten Rahmen die größten Biegebeanspruchungen aufgrund der Auflagerverschiebung.



## 08. RAHMEN TRAGWERKE



**Abbildung 48: Verformung eines Tragwerkes mit zwei eingespannten Stützen infolge einer Auflagerverschiebung**

Die Verformung zeigt eine einfache Krümmung an den eingespannten Stützen. Aufgrund der Gelenke zwischen Träger und Stützen entstehen bei Auflagerverschiebung keine Biegebeanspruchungen am Träger.

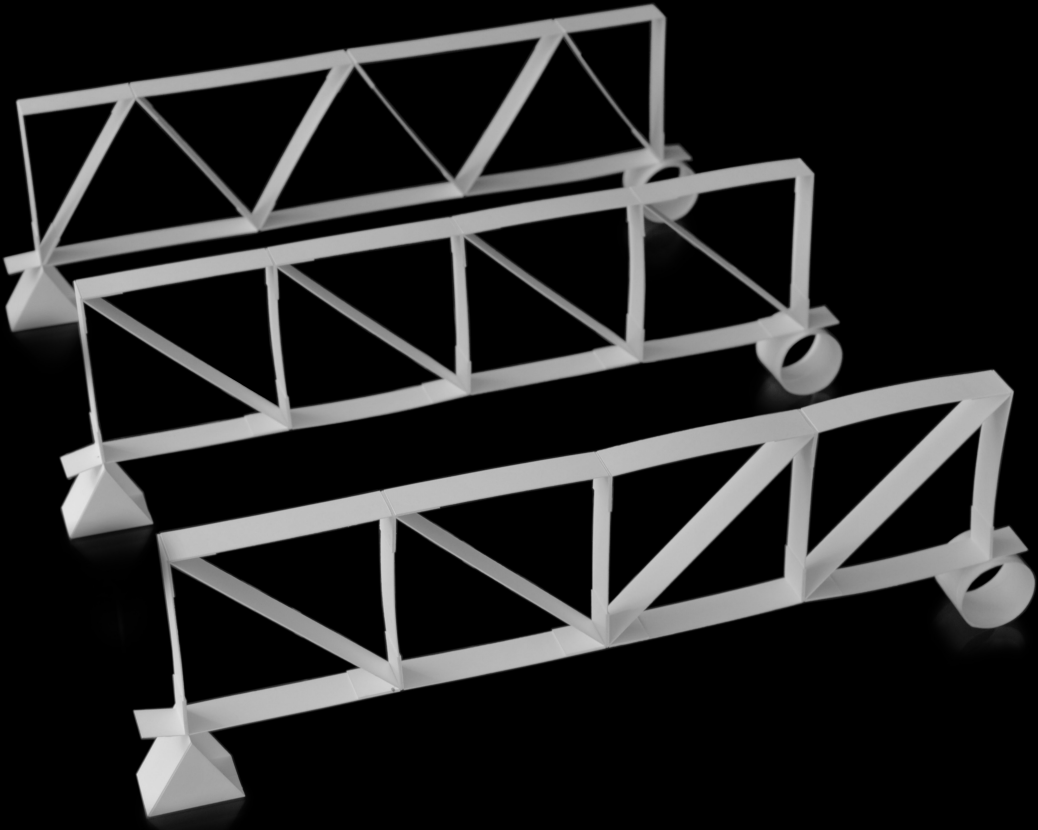


Abbildung 49: Tragwerksmodelle Fachwerkträger



## 09. FACHWERKTRÄGER

---

Der Fachwerkträger ermöglicht im Vergleich zum Biegeträger große Spannweiten und weist dabei eine hohe Materialeffizienz auf. Die Zug- bzw. Druckbeanspruchung der diagonalen Stäbe ergibt sich aus der Betrachtung der Seil- bzw. Stützlinie. Druckbeanspruchte Stäbe sind stabilitätsgefährdet und führen zu einem plötzlichen Versagen des Fachwerkträgers. Eine Reduzierung der Anzahl von druckbeanspruchten Stäben ermöglicht die Optimierung von Fachwerkträgern.<sup>13</sup>

### **Bildbeschreibung**

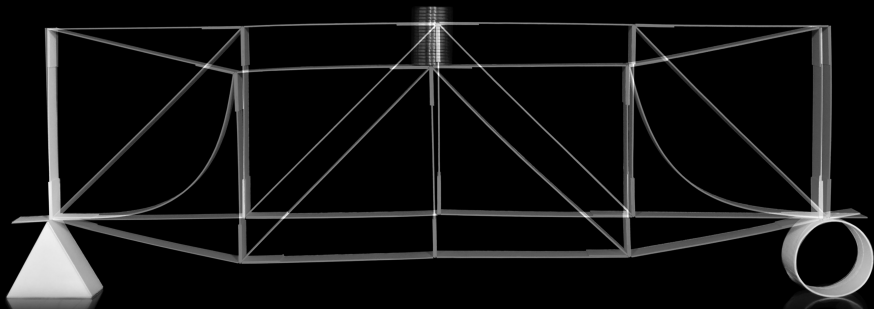
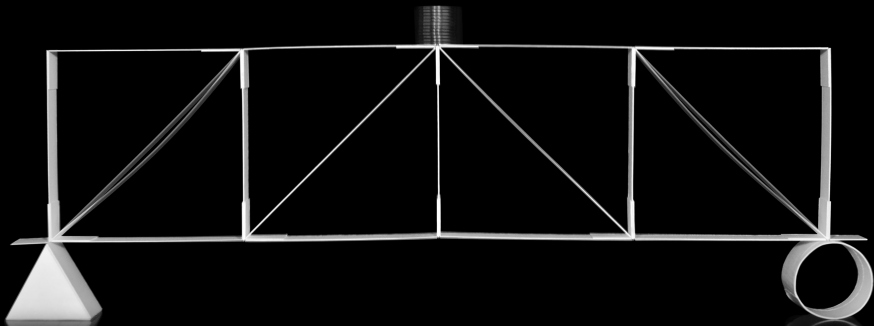
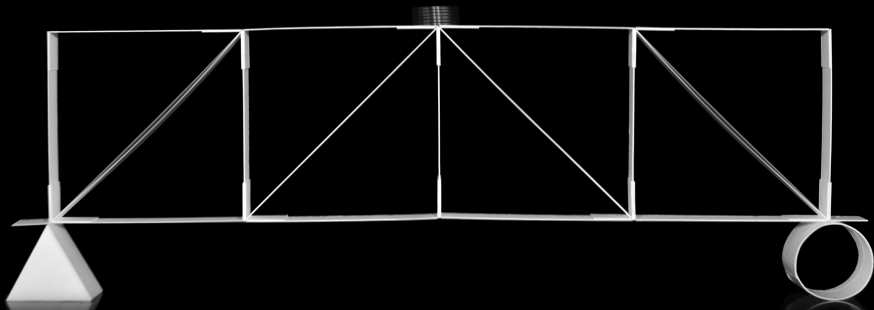
Die Bildserie zeigt verschiedene Bauarten von Fachwerkträgern. Die Beanspruchung und die Verformung unterscheiden sich abhängig von der Anordnung der diagonalen Stäbe. Die Fachwerkträger werden bis zur Stabilitätsgrenze belastet.

### **Modellbeschreibung**

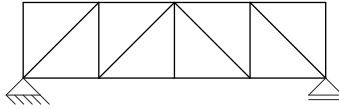
Als Auflager werden ein verschiebliches Auflager und ein gelenkiges Auflager verwendet. Alle Stäbe sind mit Gelenken verbunden. Die Tragwerksmodelle bestehen aus 0,5 mm Bristolkarton. Sie haben eine Höhe von 10 cm, eine Spannweite von 40 cm und eine Breite von 2 cm.

---

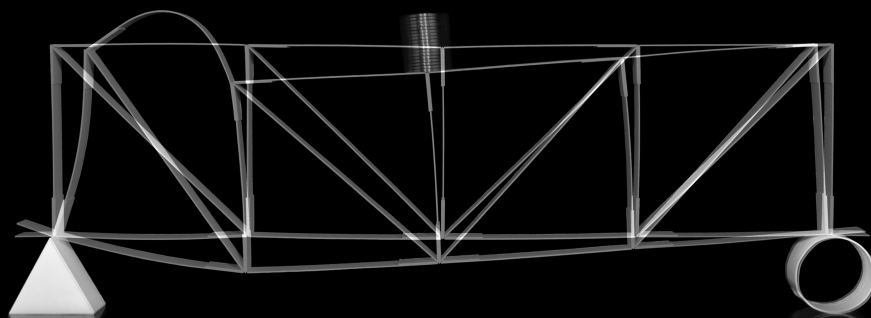
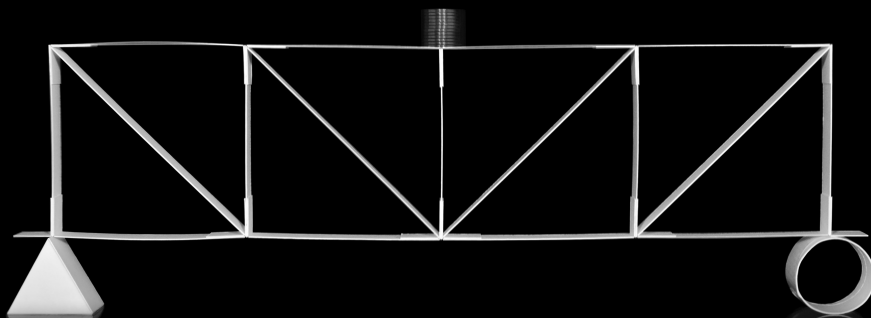
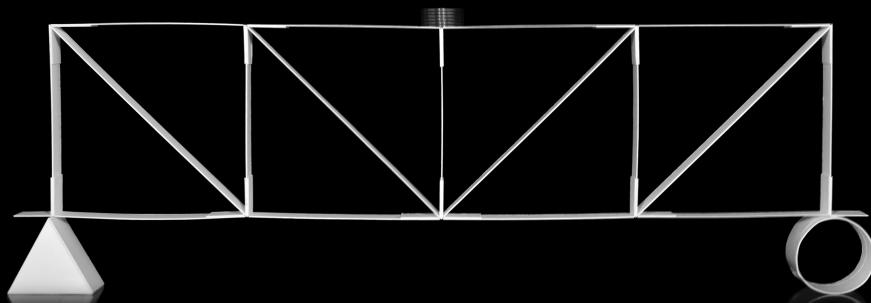
<sup>13</sup> Vgl. Block/Gengnagel/Peters 2013, 98.



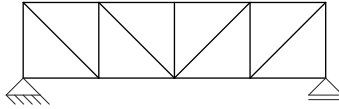
## 09. FACHWERKTRÄGER



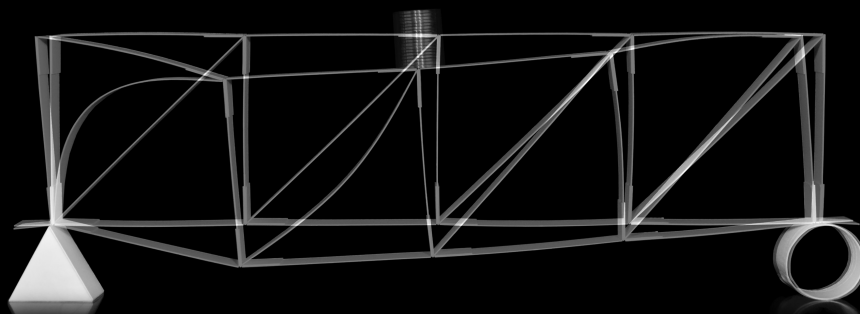
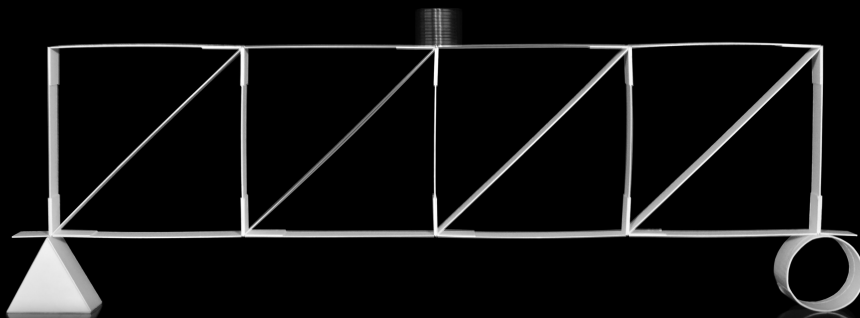
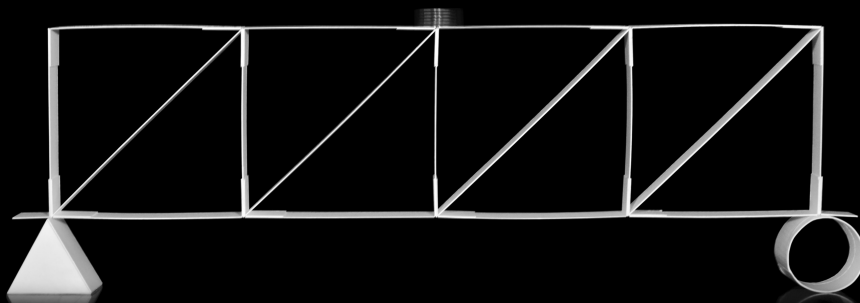
**Abbildung 50: Verformung eines Fachwerkträgers mit druckbeanspruchten, diagonalen Stäben**  
Im ersten und zweiten Belastungsfall weist der Fachwerkträger kaum Verformungen auf. Eine geringe Vergrößerung der Belastung führt zum plötzlichen Ausknicken der äußeren, druckbeanspruchten, diagonalen Stäbe.



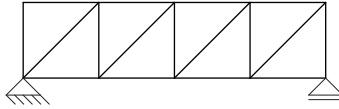
## 09. FACHWERKTRÄGER



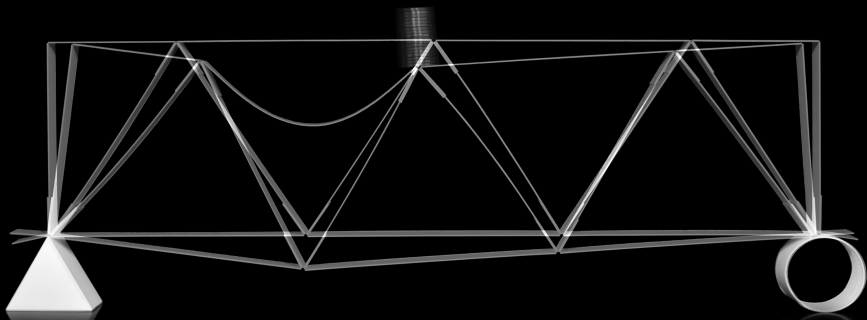
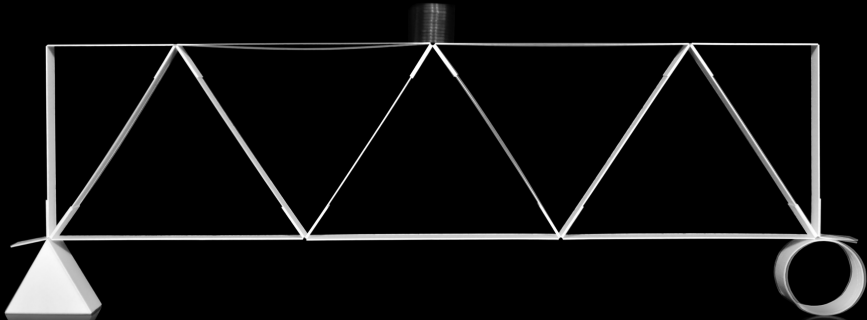
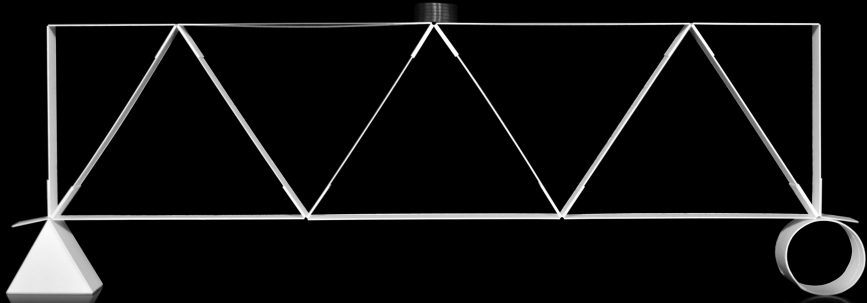
**Abbildung 51: Verformung eines Fachwerkträgers mit zugbeanspruchten, diagonalen Stäben**  
Infolge der Lasteinwirkung entstehen am Fachwerkträger Druckbeanspruchungen am Obergurt und Zugbeanspruchungen am Untergurt.



## 09. FACHWERKTRÄGER

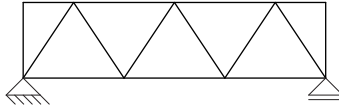


**Abbildung 52: Verformung eines Fachwerkträgers mit parallel angeordneten, diagonalen Stäben**  
Die diagonalen Stäbe der rechten Hälfte werden durch Zugkräfte beansprucht. Die diagonalen Stäbe der linken Hälfte zeigen eine Verformung infolge der Druckbeanspruchung.





## 09. FACHWERKTRÄGER



**Abbildung 53: Verformung eines diagonalen Fachwerkträgers**

Die horizontalen und diagonalen Stäbe haben annähernd die gleiche Stablänge. Unter Lasteinwirkung zeigt der Fachwerkträger ein Knickversagen am druckbeanspruchten Obergurt.

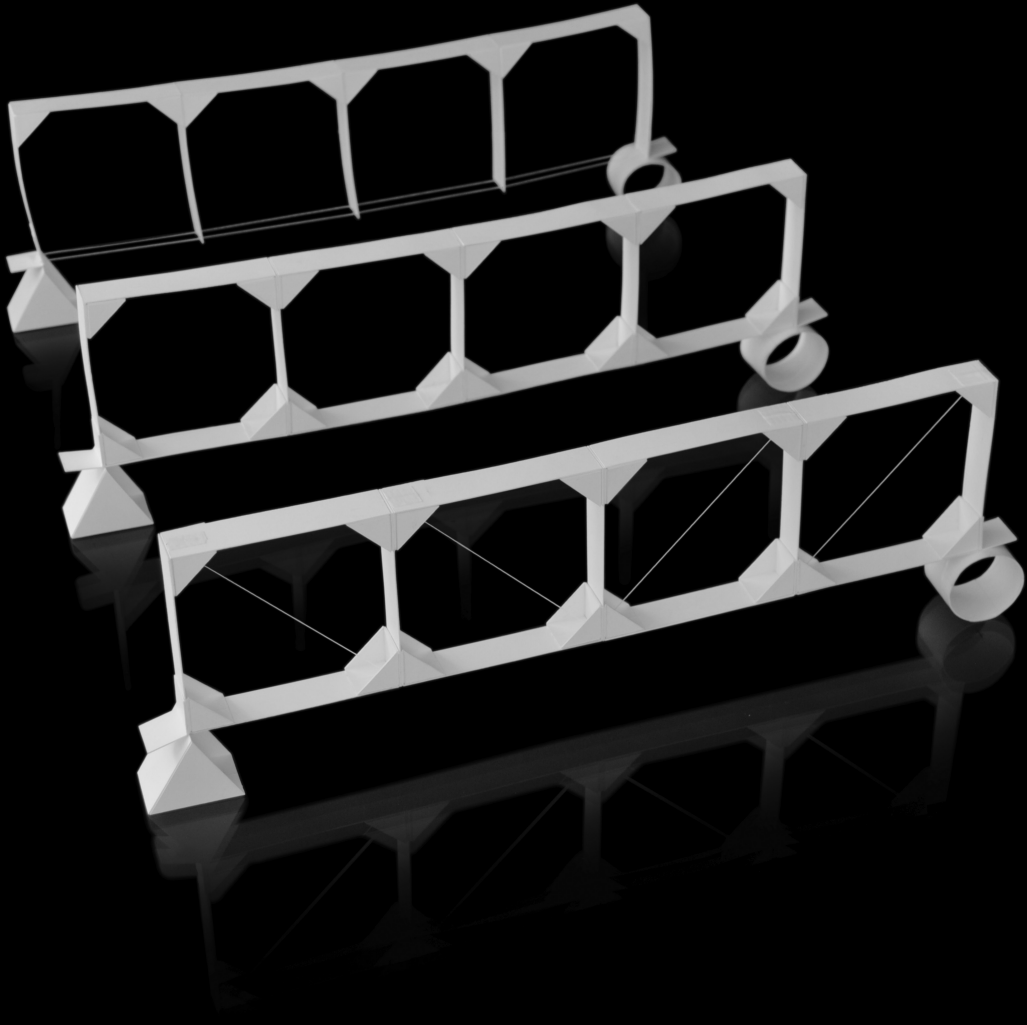


Abbildung 54: Tragwerksmodelle Rahmenträger

## 10. RAHMENTRÄGER

---

Rahmenträger bestehen aus der Aneinanderreihung von biegesteif miteinander verbundenem Obergurt, Untergurt und Pfosten. Sie können vereinfacht als Scheiben mit großen Öffnungen betrachtet werden. Unter Lasteinwirkung werden Rahmenträger stark biege- und normalkraftbeansprucht.<sup>14</sup>

### **Bildbeschreibung**

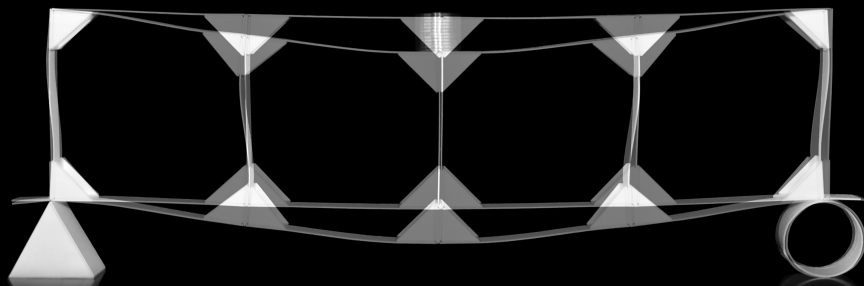
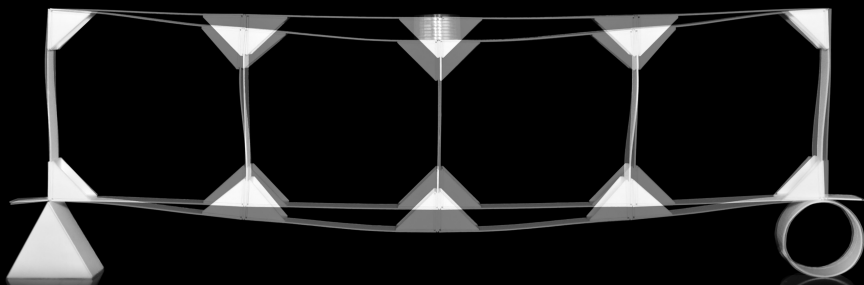
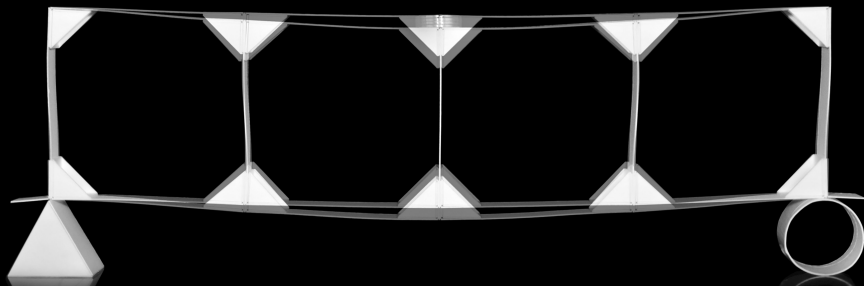
Die Bildserie zeigt Verformungen am Beispiel eines Rahmenträgers, eines einhüftigen Rahmenträgers und eines Rahmenträgers mit der Stabilisierung einzelner Rahmenfelder durch Zugstäbe.

### **Modellbeschreibung**

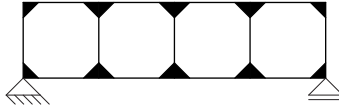
Für die Auflager werden ein verschiebliches Auflager und ein gelenkiges Auflager verwendet. Alle Stäbe sind biegesteif verbunden. Die Tragwerksmodelle bestehen aus 0,5 mm Bristolkarton. Sie haben eine Höhe von 10 cm, eine Spannweite von 40 cm und eine Breite von 2 cm.

---

<sup>14</sup> Vgl. Block/Gegnagel/Peters 2013, 106.

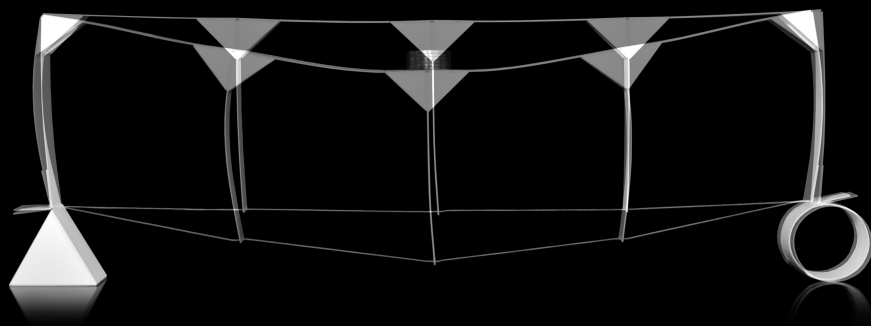
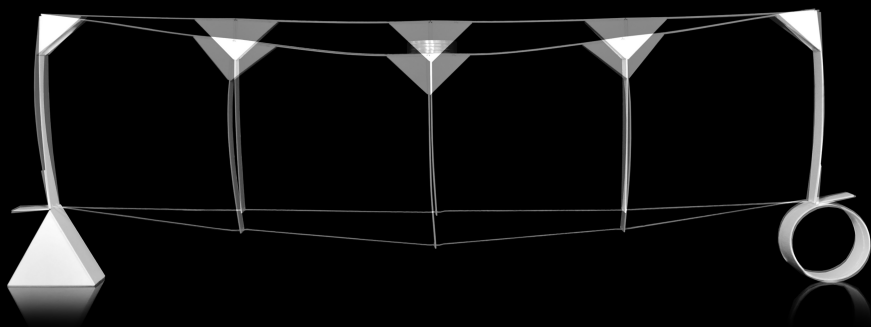
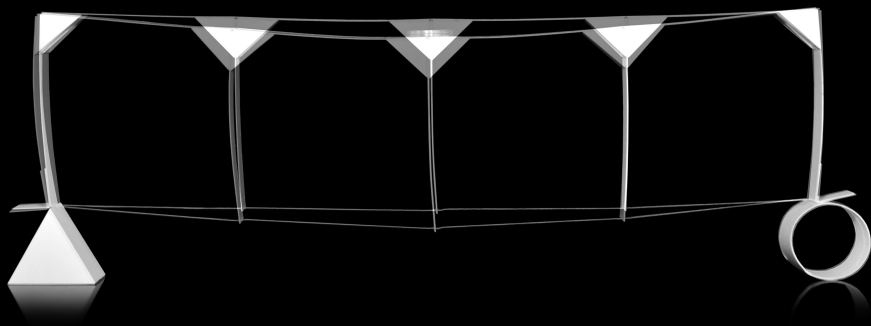


## 10. RAHMENTRÄGER

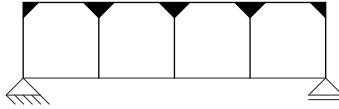


### **Abbildung 55: Verformung eines Rahmenträgers**

Im Gegensatz zum Fachwerk erfahren die Stäbe nicht nur Zug- und Druckkräfte sondern auch Biegebeanspruchungen. Die vertikalen Stäbe zeigen am Auflager die größten Verformungen und in der Trägermitte die geringsten Verformungen.

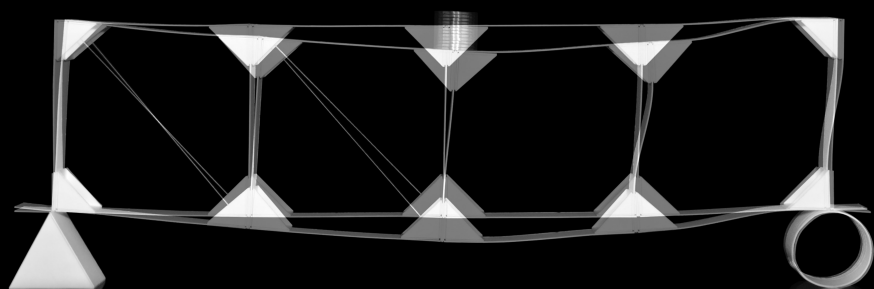
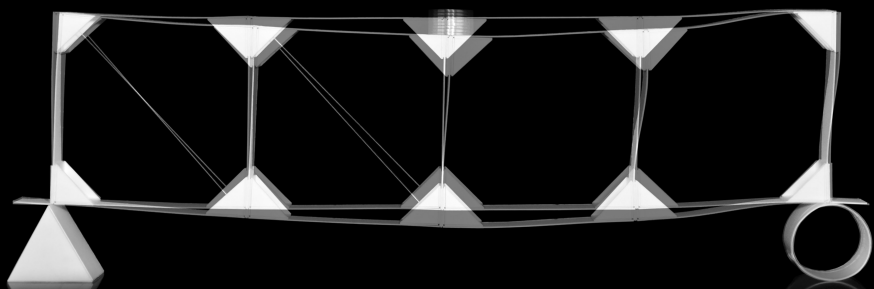
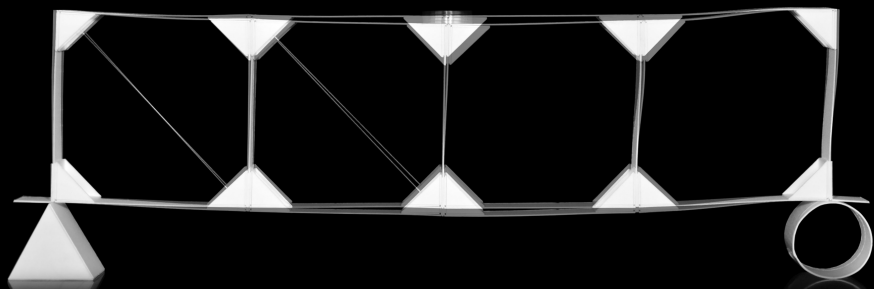


## 10. RAHMENTRÄGER



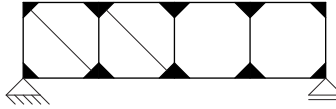
**Abbildung 56: Verformung eines einhüftigen Rahmenträgers**

Der einhüftige Rahmenträger besteht aus biegesteif miteinander verbundenen Stäben am Obergurt und aus Zugstäben am Untergurt. Im Vergleich zum Rahmenträger zeigt die Verformung am einhüftigen Rahmenträger eine einfache Krümmung der vertikalen Stäbe.



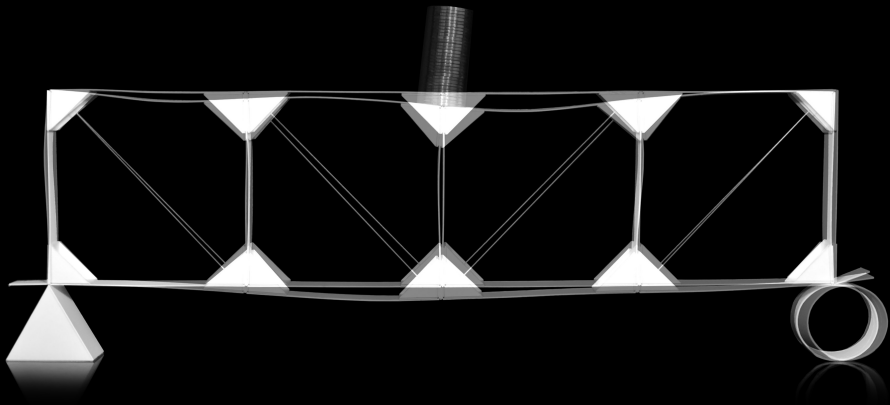
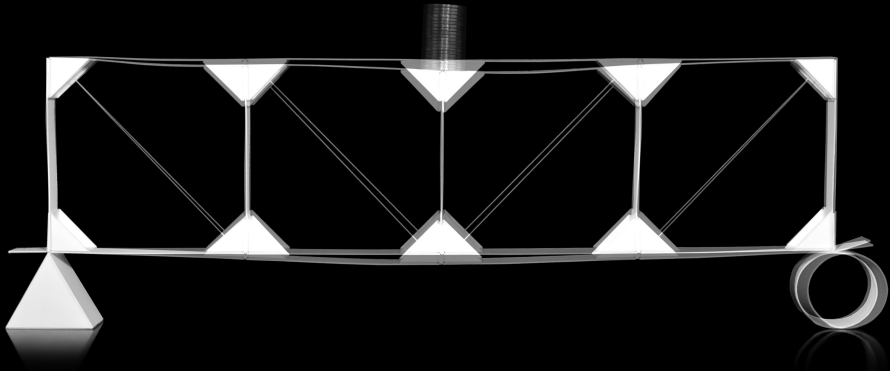
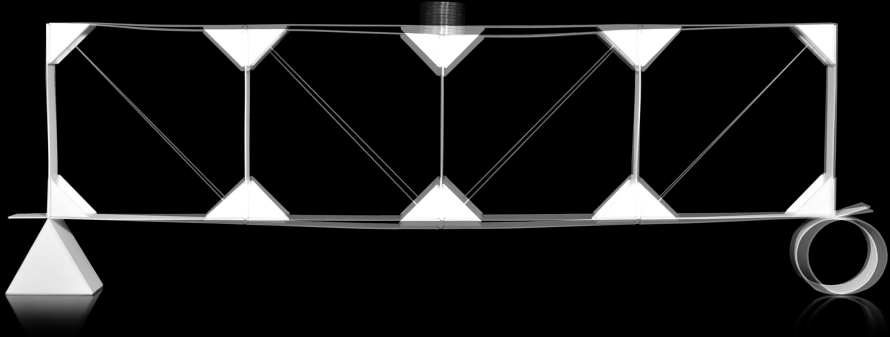


## 10. RAHMENTRÄGER

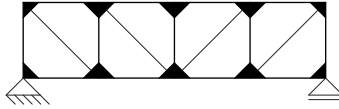


**Abbildung 57: Verformung eines Rahmenträgers mit zwei stabilisierenden Zugstäben**

Die Zugstäbe führen zu einer Stabilisierung der entsprechenden Rahmenfelder. Rahmenfelder ohne Zugstab zeigen große Verformungen infolge der Biegebeanspruchung.



## 10. RAHMENTRÄGER



**Abbildung 58: Verformung eines Rahmenträgers mit vier stabilisierenden Zugstäben**

Die Zugstäbe in allen vier Rahmenfeldern bewirken eine wesentlich geringere Verformung. Wie bei einem Fachwerk entstehen durch die Zugstäbe nicht verformbare Dreiecke, die zu einer Reduzierung der Biegebeanspruchung an den Rahmenknoten führen.

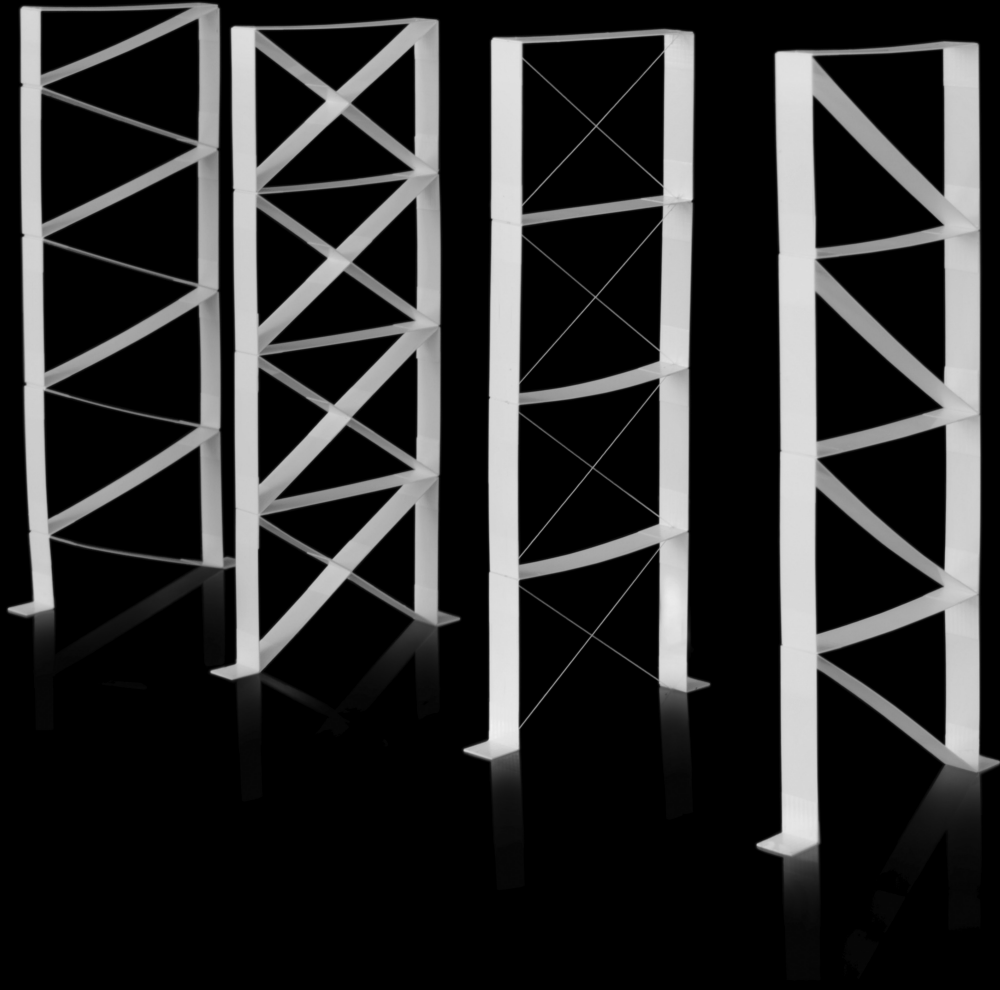


Abbildung 59: Tragwerksmodelle Fachwerkragarme

## 11. FACHWERKKRAGARM

---

Fachwerke bestehen aus der Zusammensetzung von Stäben, die durch Gelenke miteinander verbunden sind und ein formstabiles Dreieck bilden. Die Lastabtragung bei einem Fachwerk erfolgt durch Normalkräfte. Es treten daher nur Zug- und Druckkräfte auf.<sup>15</sup>

### **Bildbeschreibung**

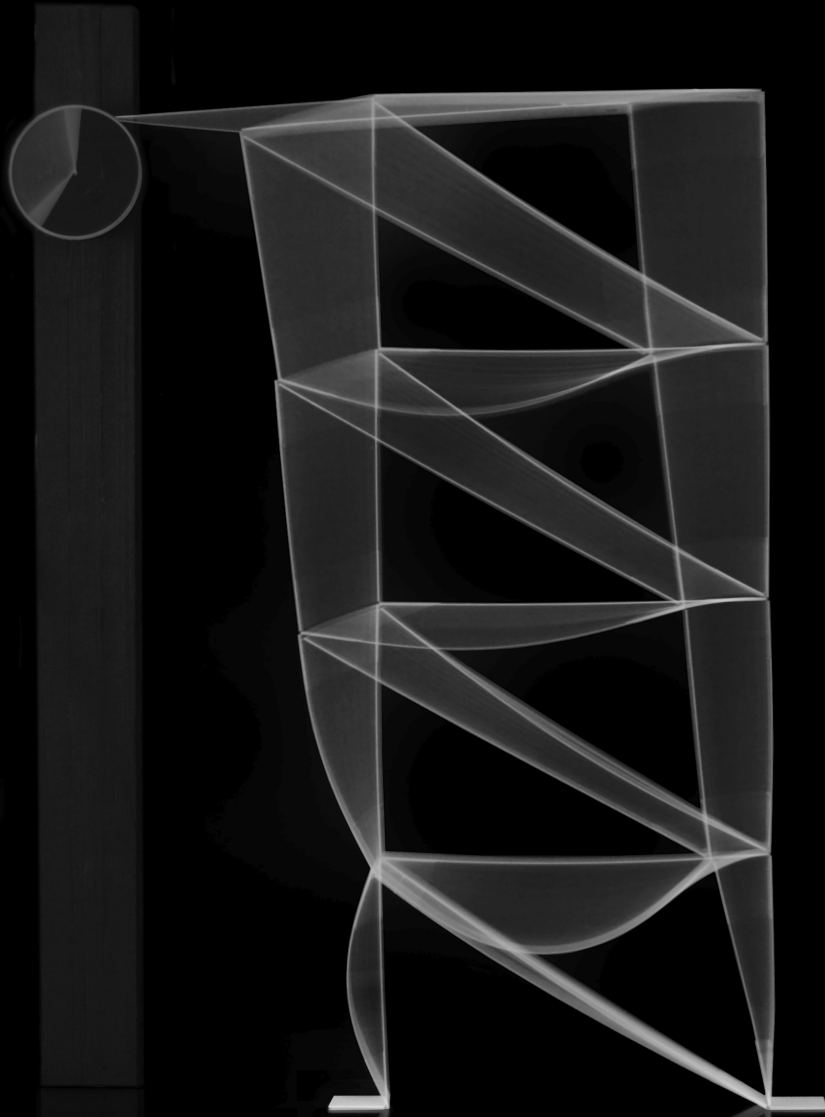
Die Bildserie zeigt unterschiedliche Bauarten von Fachwerkkragarmen. Die Verformungen unterscheiden sich abhängig von der Beanspruchung der Stäbe durch Zug- bzw. Druckkraft.

### **Modellbeschreibung**

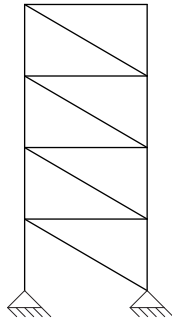
Alle Stäbe sind mit Gelenken verbunden. Die horizontale Lasteinwirkung erfolgt durch eine Spule, die von einem Servomotor gesteuert wird. Die Tragwerksmodelle bestehen aus 0,7 mm Polystyrol. Sie haben eine Höhe von 36 cm, eine Länge von 14 cm und eine Breite von 2 cm.

---

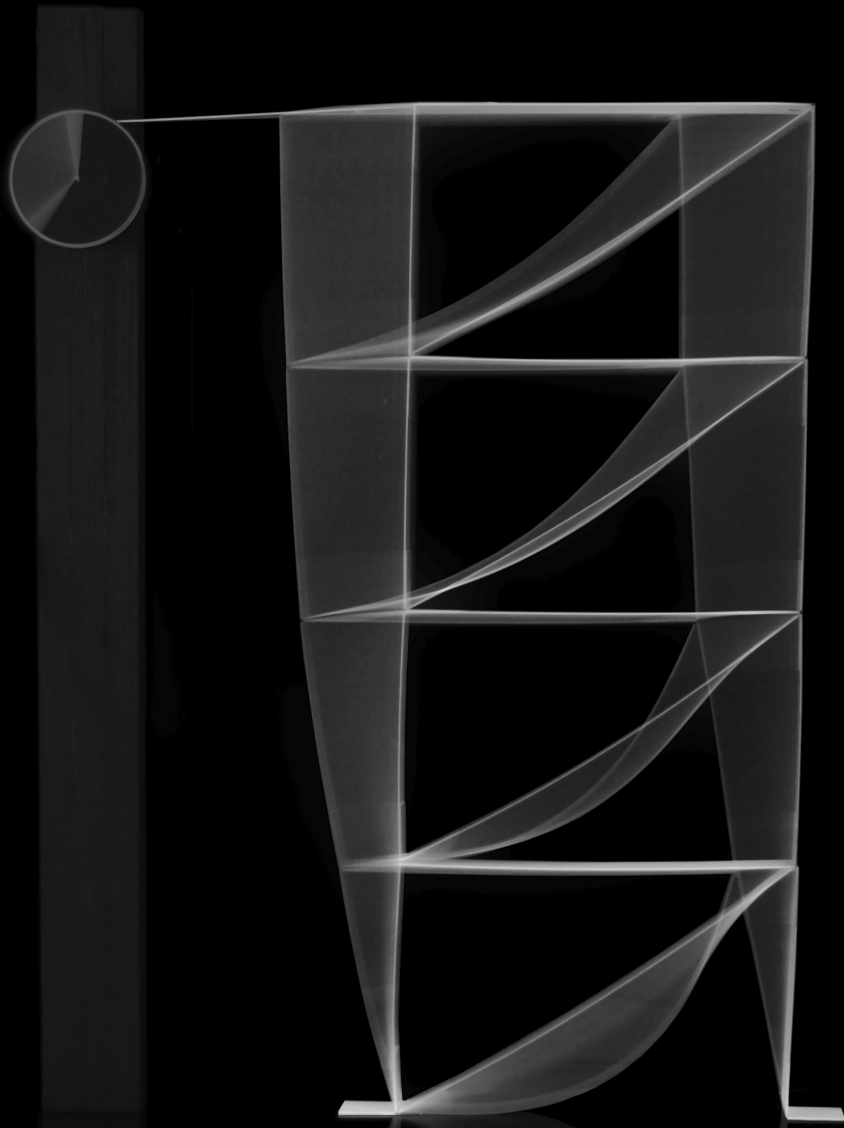
<sup>15</sup> Vgl. Block/Gengnagel/Peters 2013, 98.



## 11. FACHWERKKAGARM

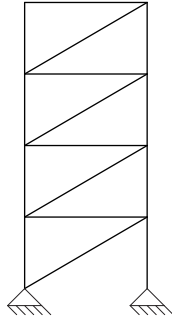


**Abbildung 60: Verformung eines Fachwerkkragarmes mit zugbeanspruchten, diagonalen Stäben**  
Unter horizontaler Lasteinwirkung entsteht eine Druckbeanspruchung der horizontalen und vertikalen Stäbe.  
Die zugbeanspruchten, diagonalen Stäbe weisen keine Verformungen auf.

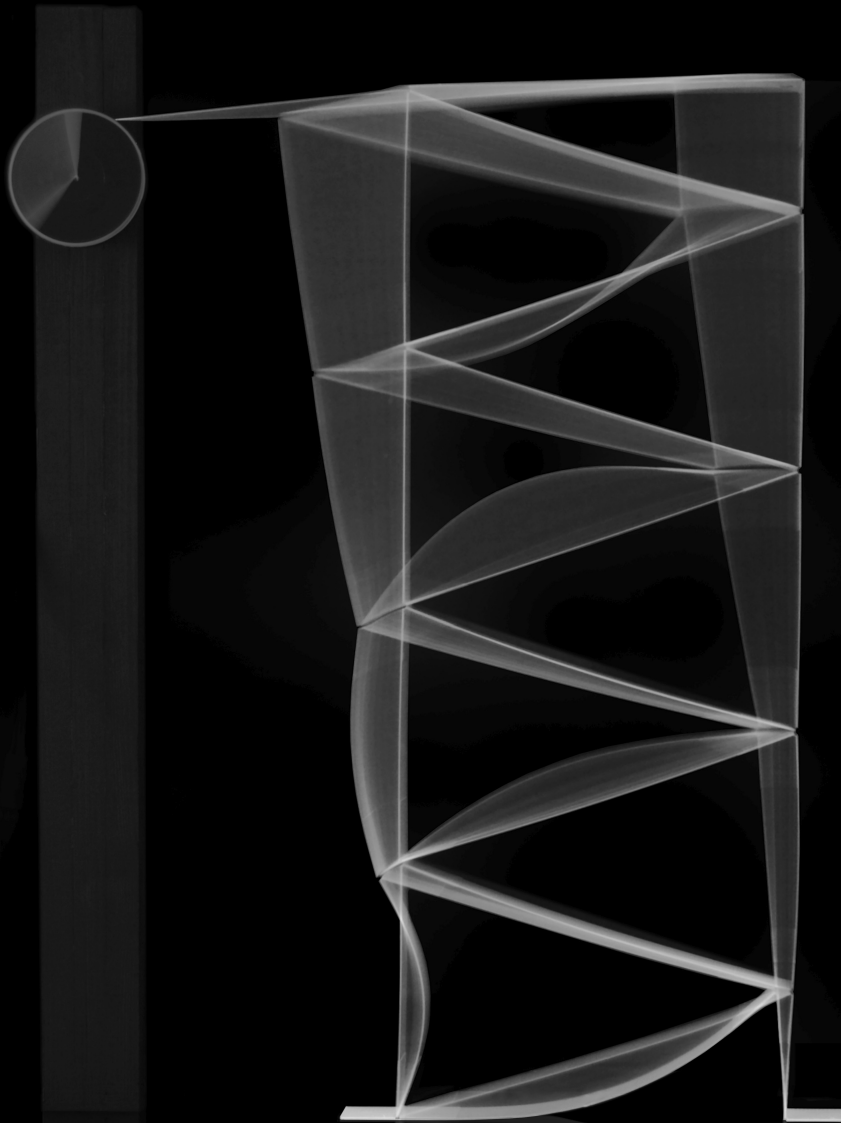




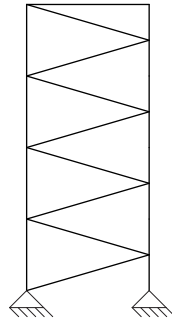
## 11. FACHWERKKAGARM



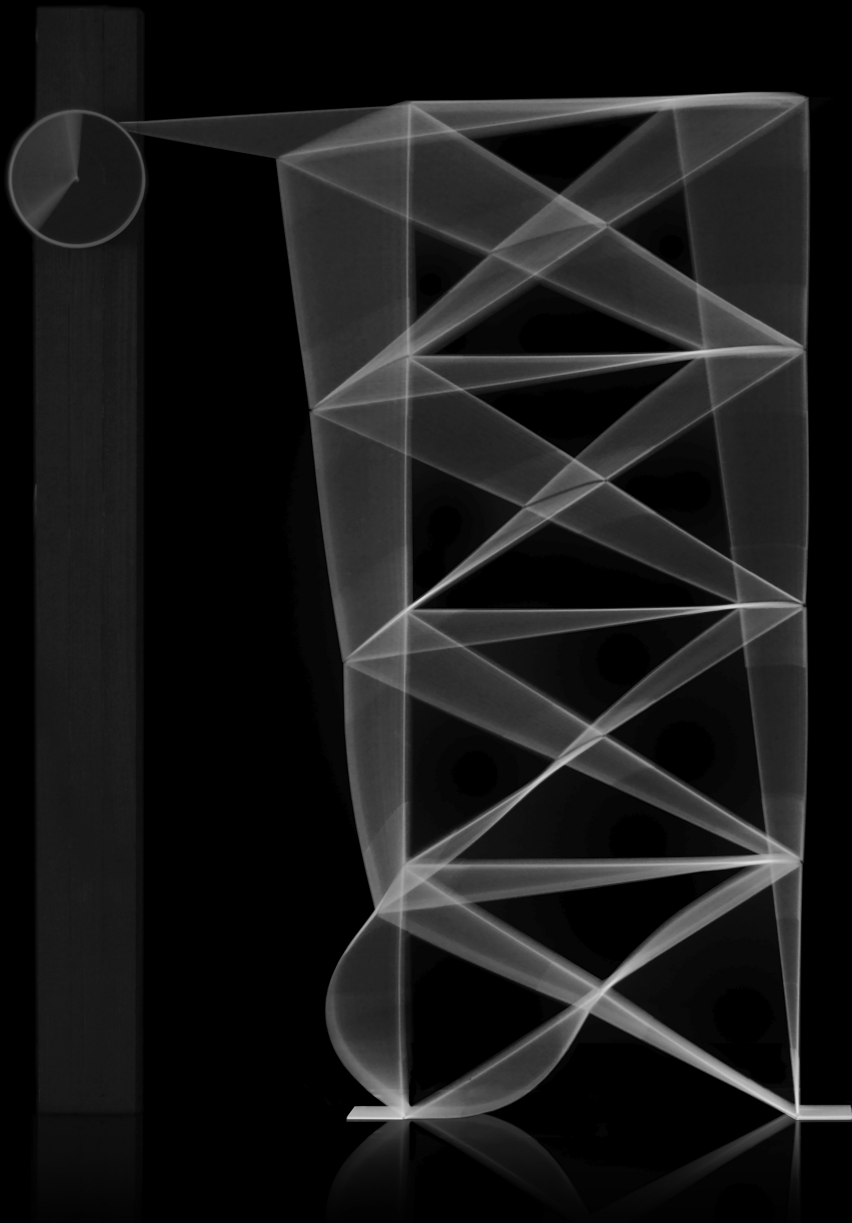
**Abbildung 61: Verformung eines Fachwerkkragarmes mit druckbeanspruchten, diagonalen Stäben**  
Das Fachwerk zeigt deutliche Verformungen der druckbeanspruchten, diagonalen Stäbe.  
Die Beanspruchung der diagonalen Stäbe steigt zum Auflager hin.



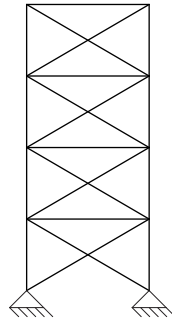
## 11. FACHWERKKAGARM



**Abbildung 62: Verformung eines Fachwerkkragarmes mit diagonal angeordneten Dreiecken**  
Die Beanspruchung der Stäbe ist abhängig von der Richtung der horizontal einwirkenden Kraft.  
Die diagonalen Stäbe werden entweder auf Druck oder auf Zug belastet.

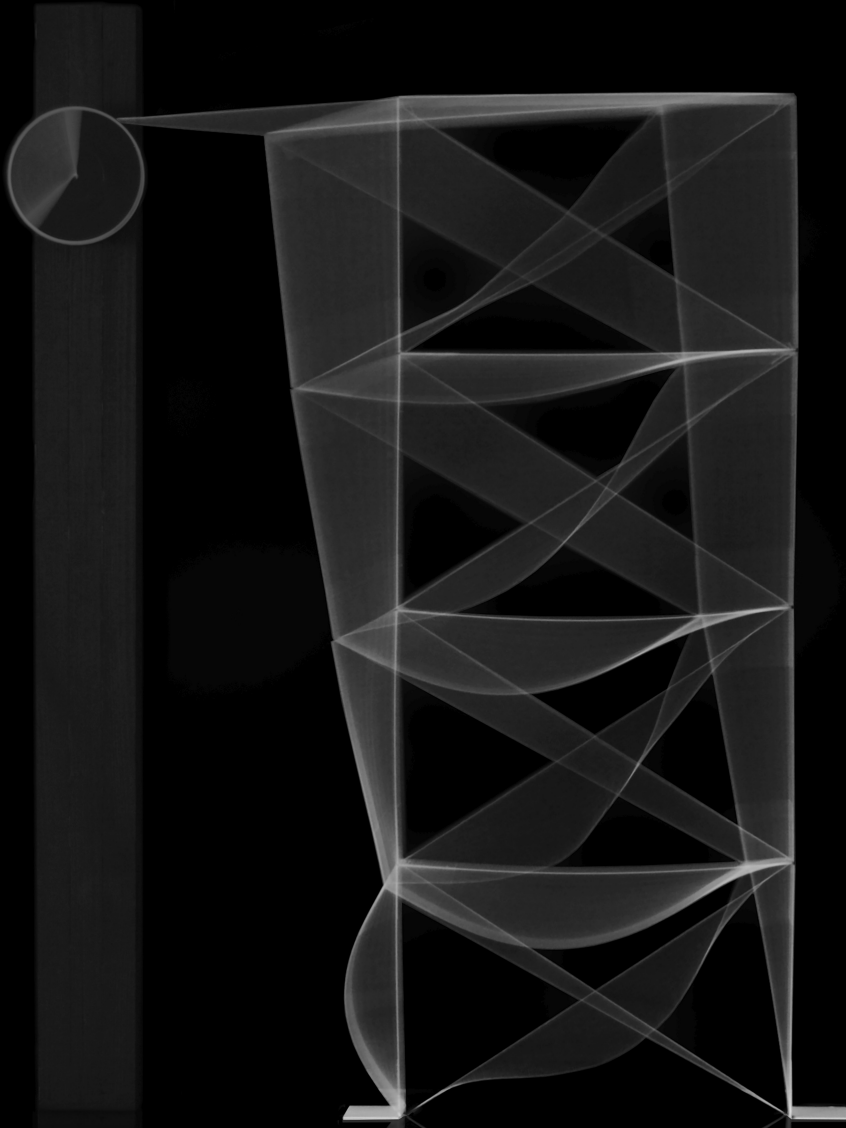


## 11. FACHWERKKAGARM

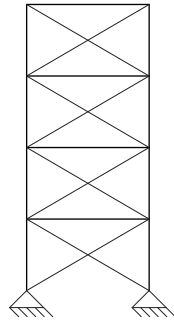


**Abbildung 63: Verformung eines Fachwerkkragarmes mit sich kreuzenden Druckstäben**

Das Fachwerk hat aufgrund der sich kreuzenden Stäbe eine hohe Steifigkeit. Infolge der einwirkenden Last entsteht ein Knickversagen der Stütze am linken Auflager.



## 11. FACHWERKKAGARM



**Abbildung 64: Verformung eines Fachwerkkragarmes mit sich kreuzenden Zugstäben**  
Abhängig von der Richtung der einwirkenden Last werden die Zugstäbe zur Lastabtragung wirksam oder entlastet.

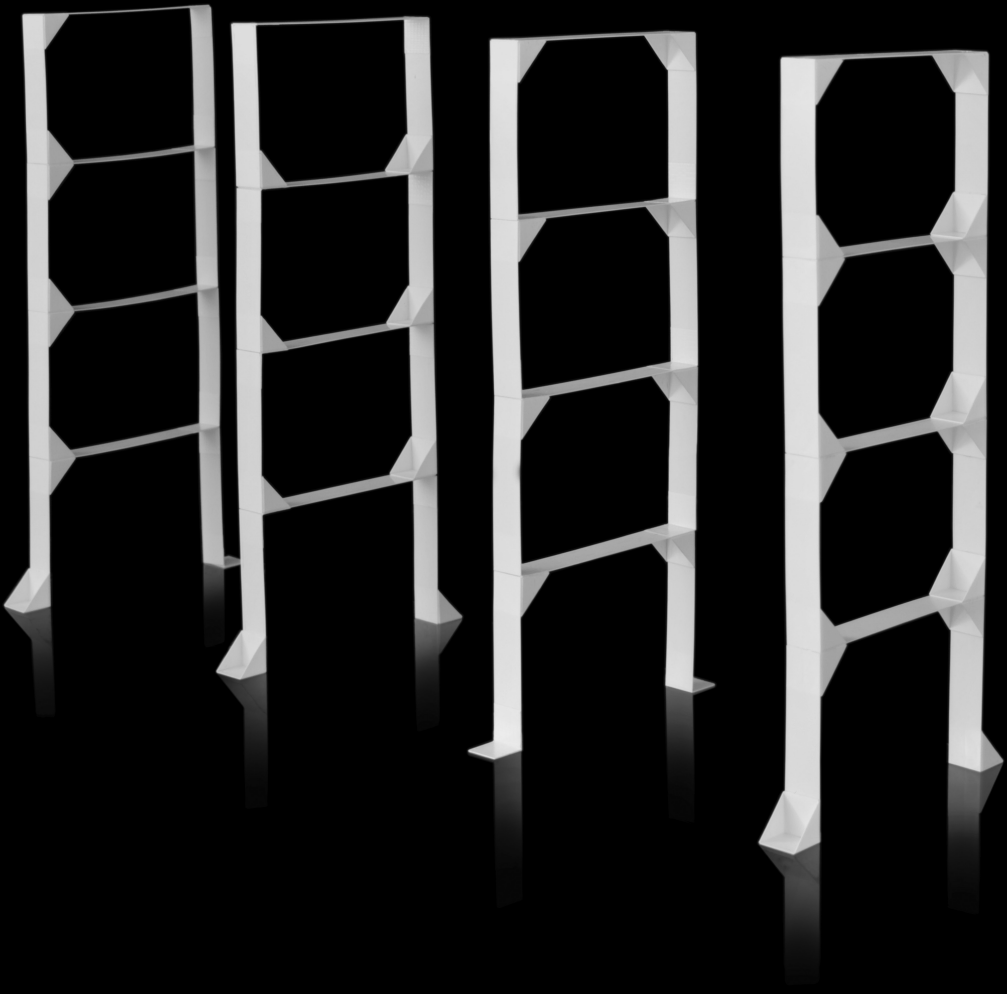


Abbildung 65: Tragwerksmodelle Stockwerkrahmen



## 12. STOCKWERKRAHMEN

---

Stockwerkrahmen bestehen aus der vertikalen Zusammensetzung von Rahmenelementen und werden beispielsweise als aussteifende Elemente in Hochhäusern verwendet. Bei einer horizontalen Lasteinwirkung steigt die Beanspruchung der Eckmomente zum Auflager hin.<sup>16</sup>

### **Bildbeschreibung**

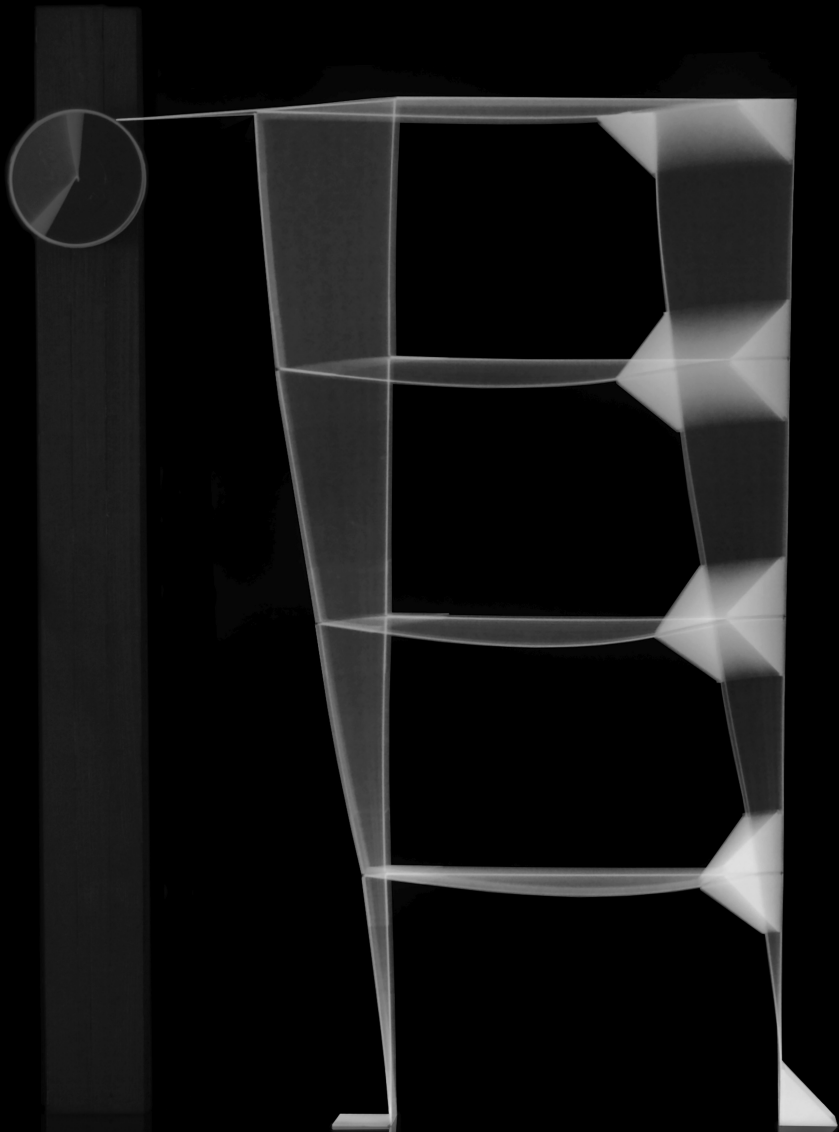
Die Bildserie zeigt unterschiedliche Bauarten von Stockwerkrahmen unter horizontaler Lasteinwirkung. Die Stockwerkrahmen werden aus einhüftigen Rahmenelementen, aus Zweigelenrahmen oder aus eingespannten Rahmenelementen zusammengesetzt. Am Beispiel eines Stockwerkrahmens aus eingespannten Rahmenelementen wird eine schrittweise Stabilisierung mit Zugstäben veranschaulicht.

### **Modellbeschreibung**

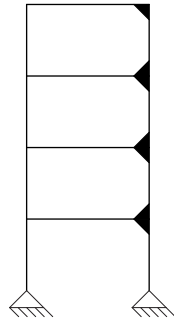
Die Auflager und Stäbe sind biegesteif miteinander verbunden oder als Gelenk ausgebildet. Die Horizontale Lasteinwirkung erfolgt durch eine Spule, die von einem Servomotor gesteuert wird. Die Tragwerksmodelle bestehen aus 0,7 mm Polystyrol. Sie haben eine Höhe von 36 cm, eine Länge von 14 cm und eine Breite von 2 cm.

---

<sup>16</sup> Vgl. Block/Gengnagel/Peters 2013, 107.

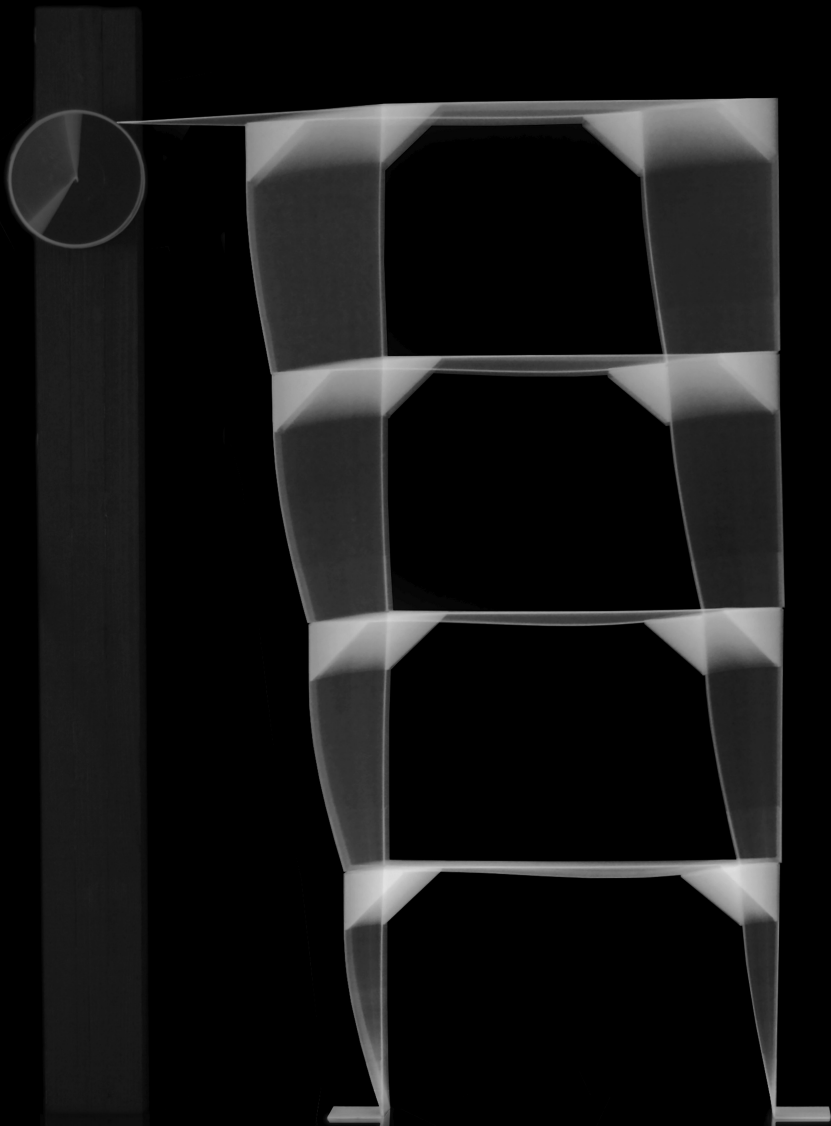


## 12. STOCKWERKRAHMEN

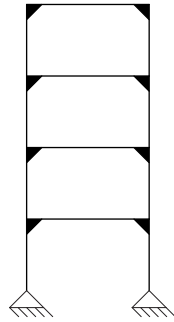


**Abbildung 66: Verformung eines Stockwerkrahmens aus einhüftigen Rahmenelementen**

Die mit Gelenken verbundenen vertikalen Stäbe weisen keine Verformungen auf. Die biegesteif miteinander verbundenen Stäbe bewirken eine einfache Krümmung der horizontalen Stäbe.

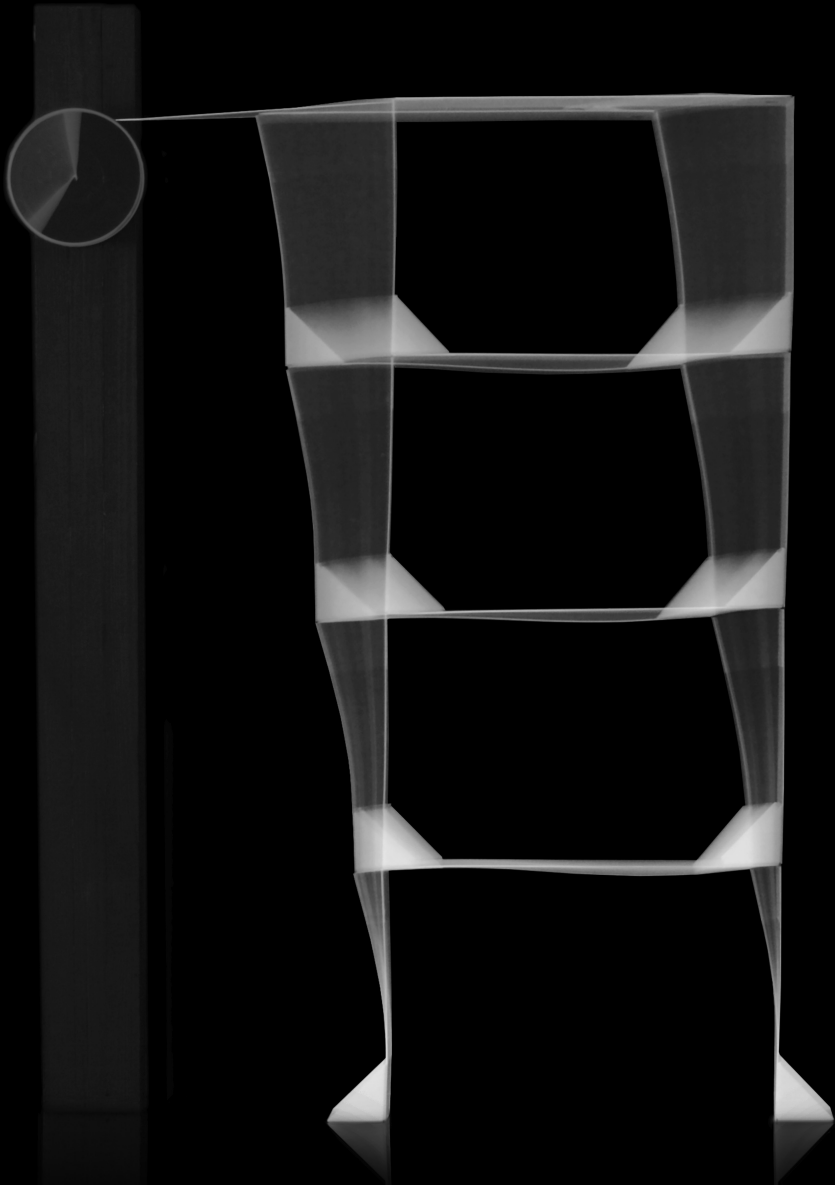


## 12. STOCKWERKRAHMEN

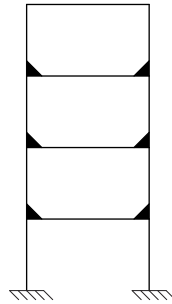


**Abbildung 67: Verformung eines Stockwerkrahmens aus Zweigelenrahmen**

Die Verformung zeigt eine einfache Krümmung der vertikalen Stäbe und eine wellenförmige Verformung der horizontalen Stäbe.

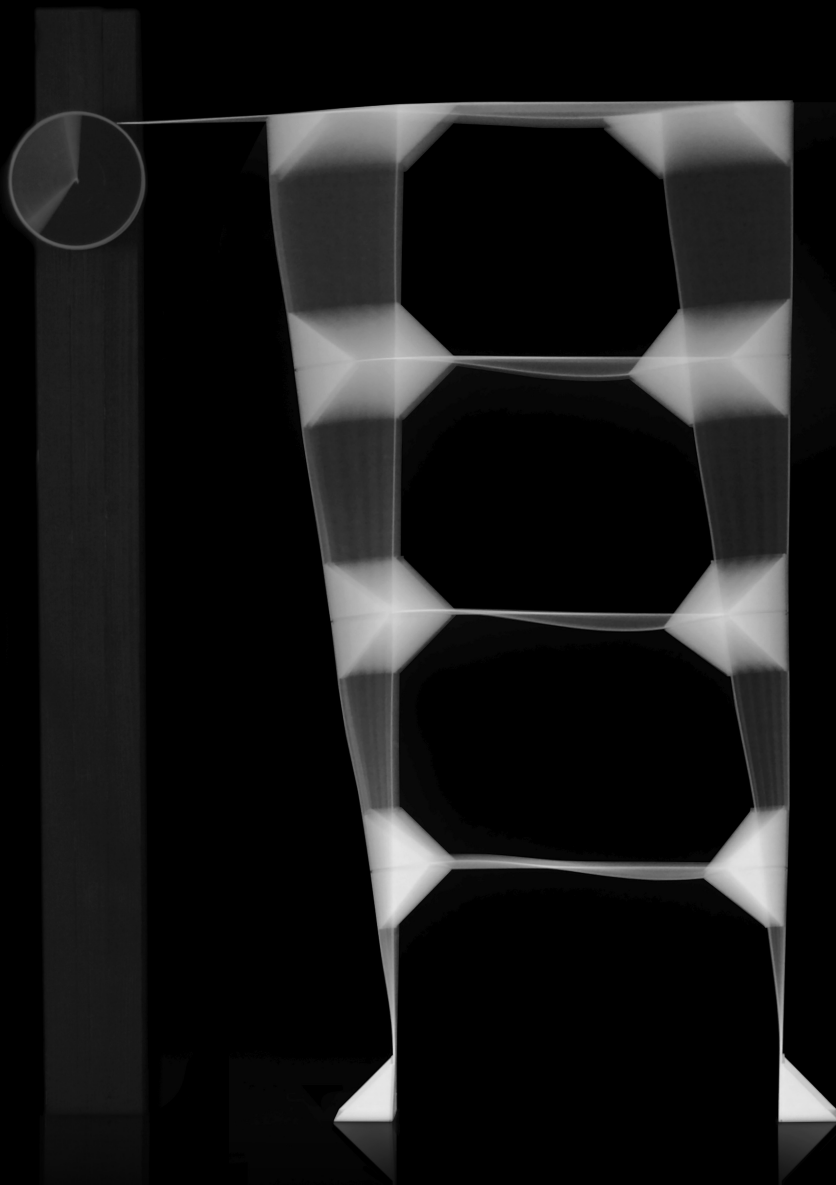


## 12. STOCKWERKRAHMEN



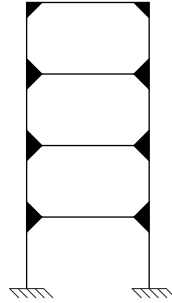
**Abbildung 68: Verformung eines Stockwerkrahmens aus umgekehrten Zweigelenrahmen**

Die Verformung zeigt eine einfache Krümmung der vertikalen Stäbe und eine wellenförmige Verformung der horizontalen Stäbe. Das Tragwerksmodell zeigt eine Umkehrung von Abbildung 67.

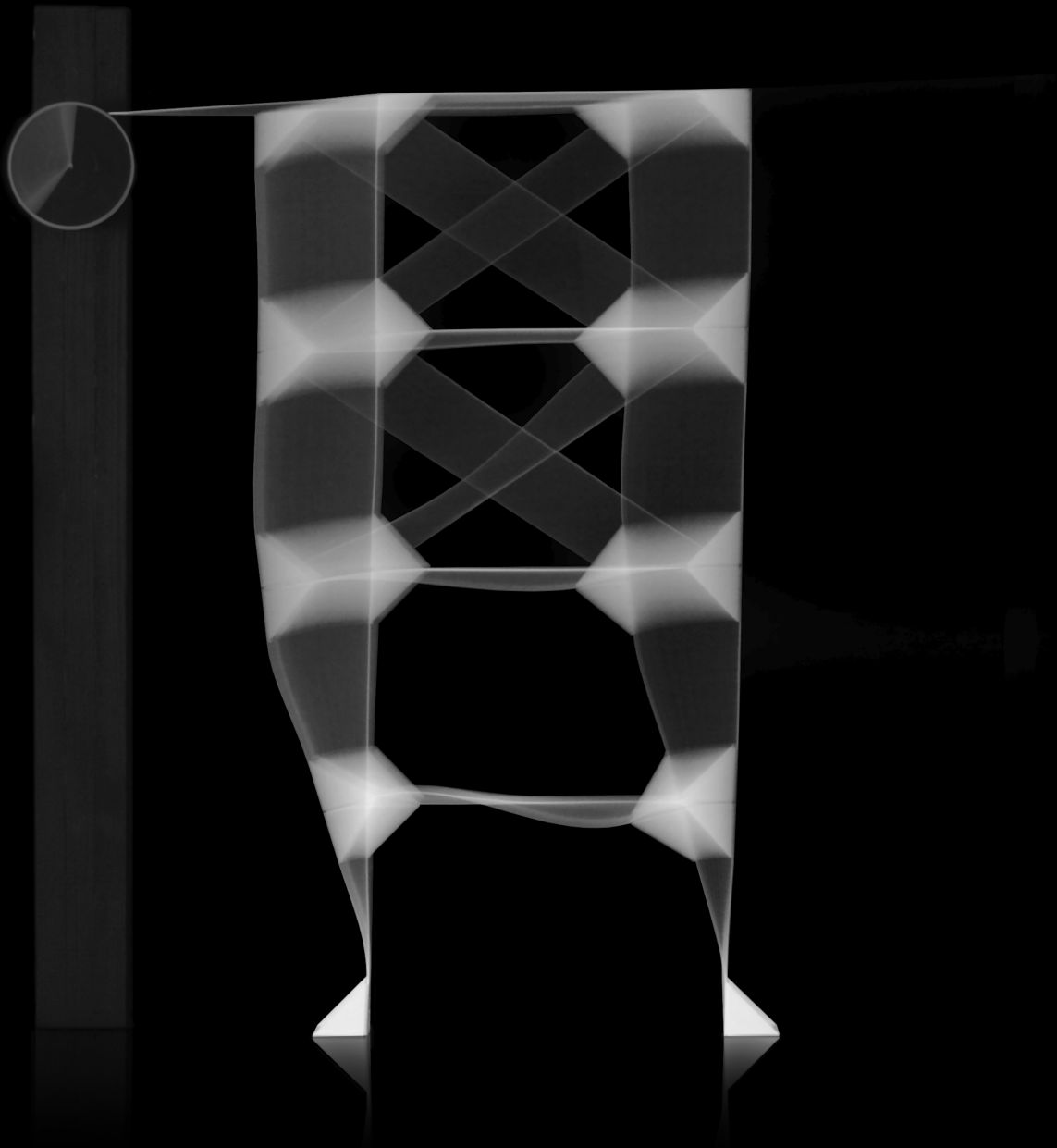




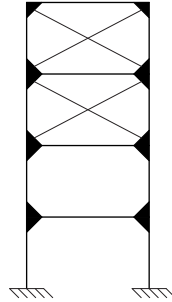
## 12. STOCKWERKRAHMEN



**Abbildung 69: Verformung eines Stockwerkrahmens aus eingespannten Rahmenelementen**  
Die biegesteife Verbindung von allen Stäben bewirkt eine Biegebeanspruchung von allen Rahmenelementen.

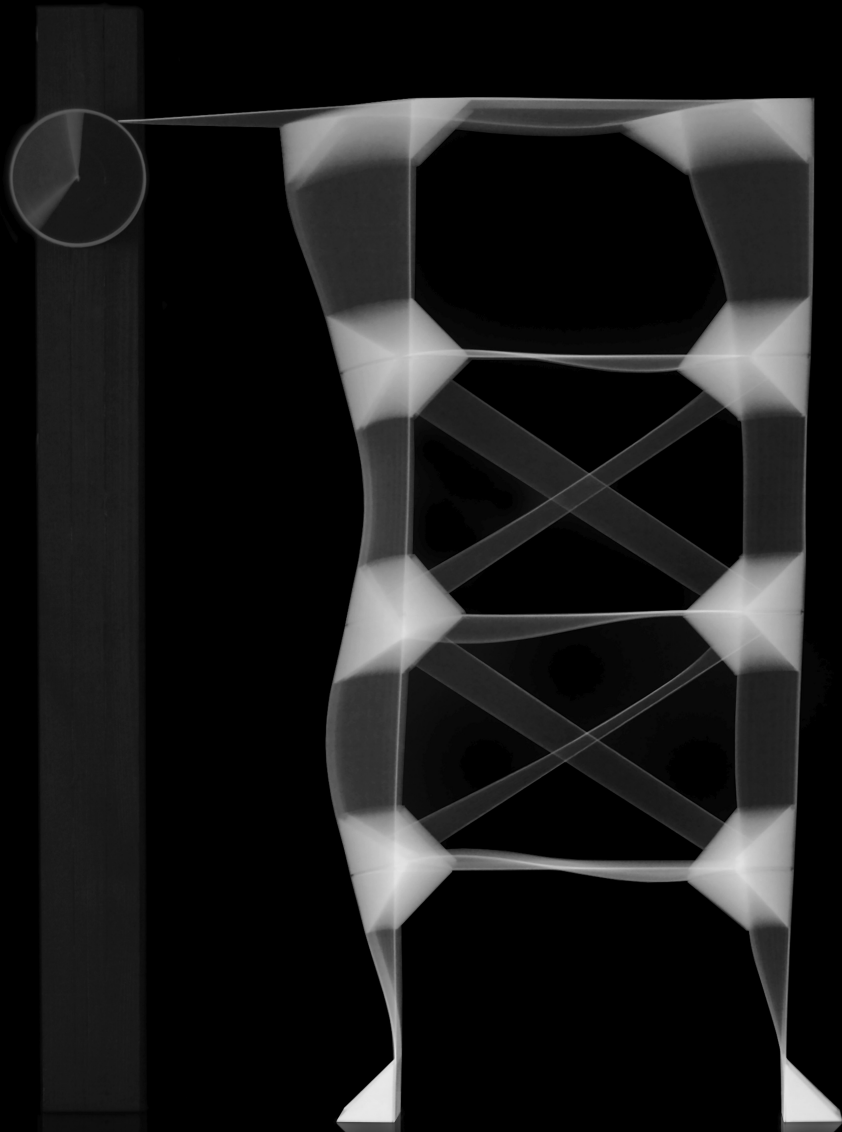


## 12. STOCKWERKRAHMEN

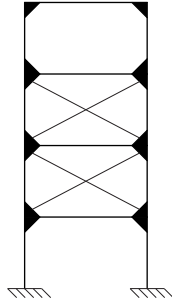


**Abbildung 70: Verformung eines Stockwerkrahmens aus eingespannten Rahmenelementen mit zwei stabilisierenden Rahmenfeldern**

Die Rahmenfelder mit Zugstäben weisen geringe Verformungen auf. Rahmenfelder ohne Zugstäbe zeigen große Verformungen aufgrund der Biegebeanspruchungen.

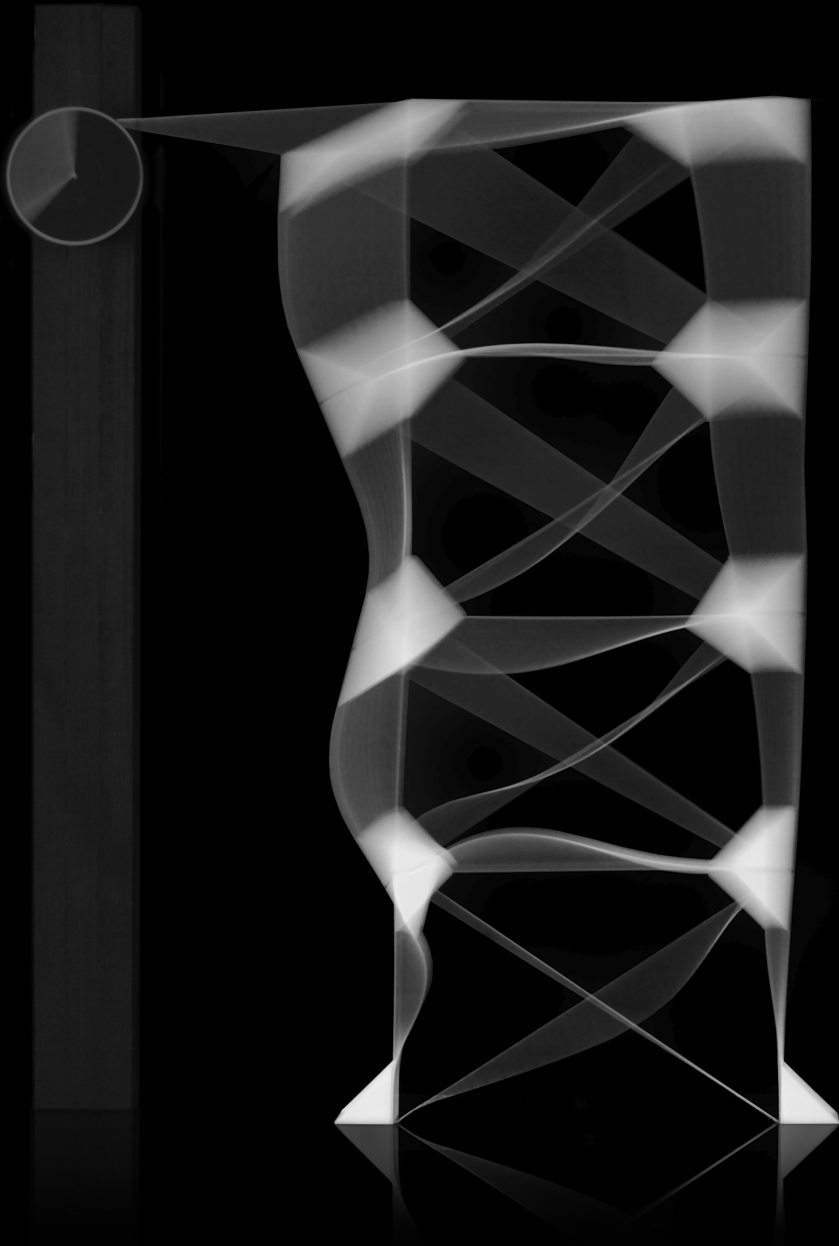


## 12. STOCKWERKRAHMEN

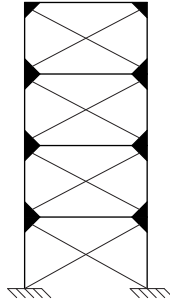


**Abbildung 71: Verformung eines Stockwerkrahmens aus eingespannten Rahmenelementen mit zwei stabilisierenden Rahmenfeldern**

Ausgehend von Abbildung 70 werden zwei Felder in der Mitte des Stockwerkrahmens stabilisiert.



## 12. STOCKWERKRAHMEN



**Abbildung 72: Verformung eines Stockwerkrahmens aus eingespannten Rahmenelementen mit vier stabilisierenden Rahmenfeldern**

Der Stockwerkrahmen weist im Vergleich zu Abbildung 66-71 eine wesentlich höhere Stabilität auf. Durch die Anordnung der Zugstäbe entstehen wie bei einem Fachwerk nicht verformbare Dreiecke.

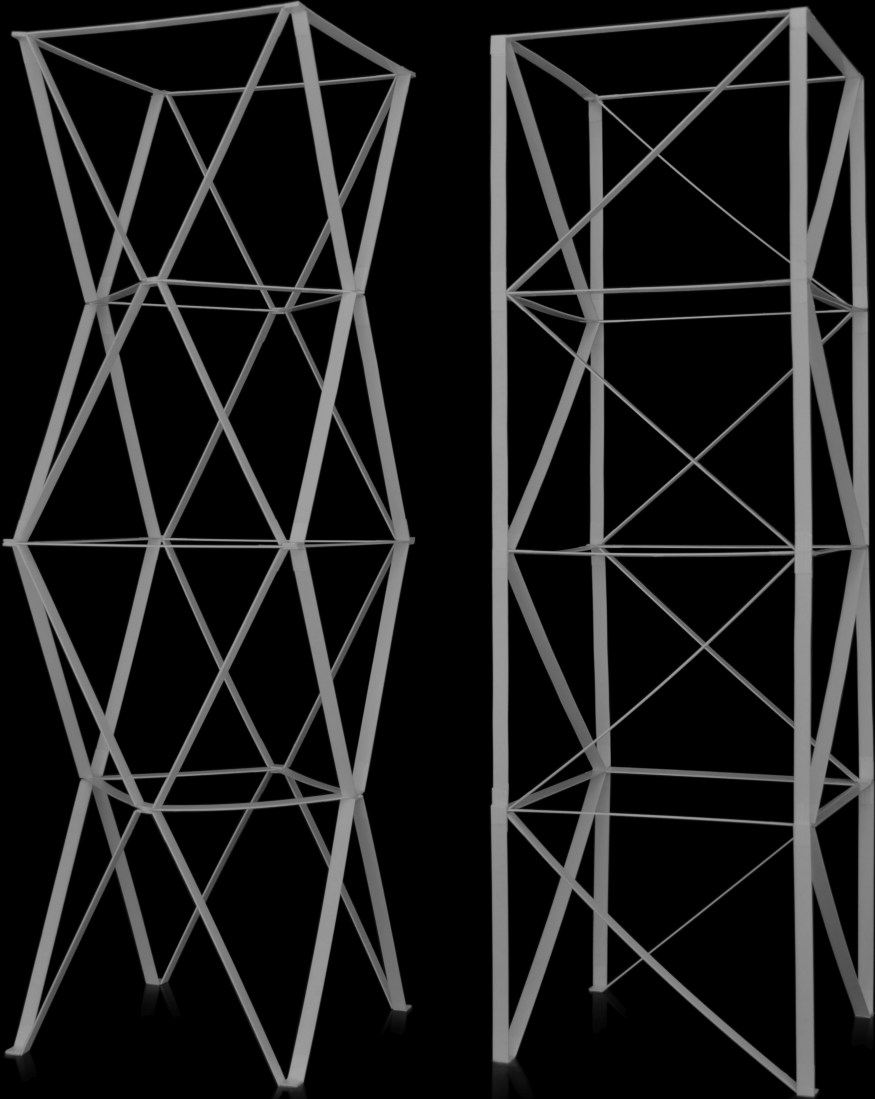


Abbildung 73: Tragwerksmodelle Fachwerkrohren



## 13. FACHWERKRÖHRE

---

Die Fachwerkröhre ist ein Aussteifungskonzept zur horizontalen Lastabtragung von hohen Bauwerken. Mit zunehmender Bauhöhe ist eine hohe Steifigkeit der Tragkonstruktion erforderlich.<sup>17</sup>

### **Bildbeschreibung**

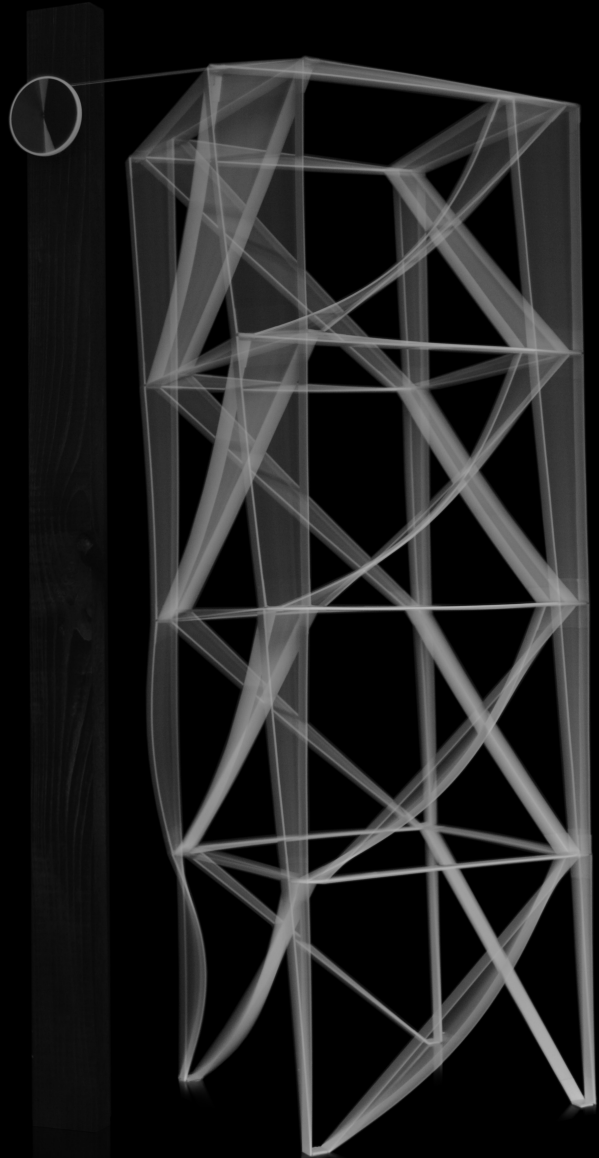
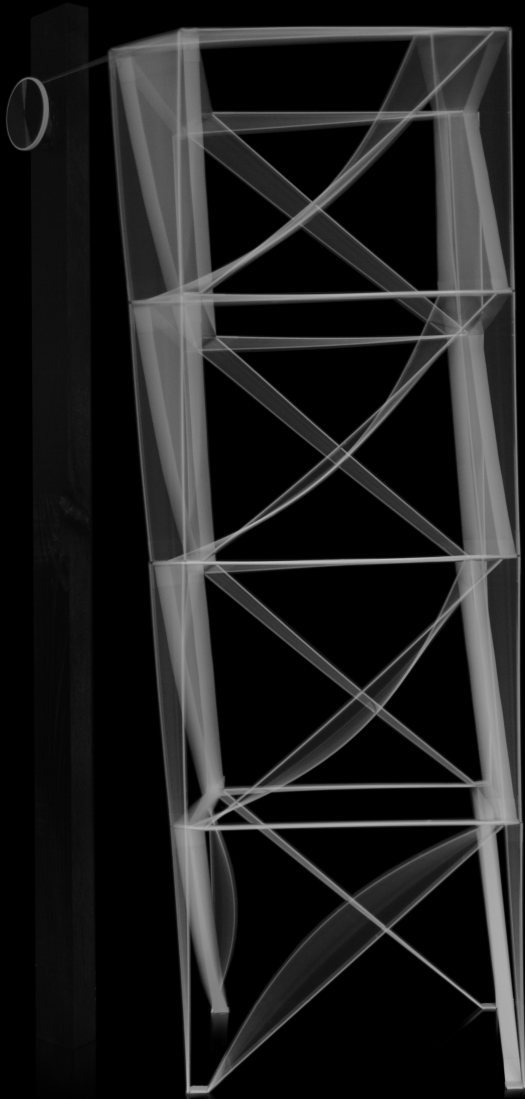
Die Bildserie zeigt drei Bauarten einer Fachwerkröhre. Die Verformung erfolgt durch eine horizontale Lasteinwirkung, die exzentrisch am Tragwerk befestigt ist und eine Torsionsbeanspruchung zur Folge hat. Die Bildserie besteht aus jeweils zwei Ansichten eines Tragwerksmodells, um die Wirkungsweise der räumlichen Lastabtragung zu veranschaulichen.

### **Modellbeschreibung**

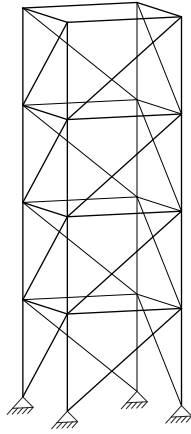
Alle Stäbe sind mit Gelenken verbunden. Die horizontale Lasteinwirkung erfolgt durch eine Spule, die von einem Servomotor gesteuert wird. Die Tragwerksmodelle bestehen aus 1,0 mm Polystyrolstreifen mit einer Breite von 1 cm. Sie haben eine Höhe von 64 cm und eine Grundfläche von 20 x 20 cm.

---

<sup>17</sup> Vgl. Block/Gegnagel/Peters 2013, 149-151.

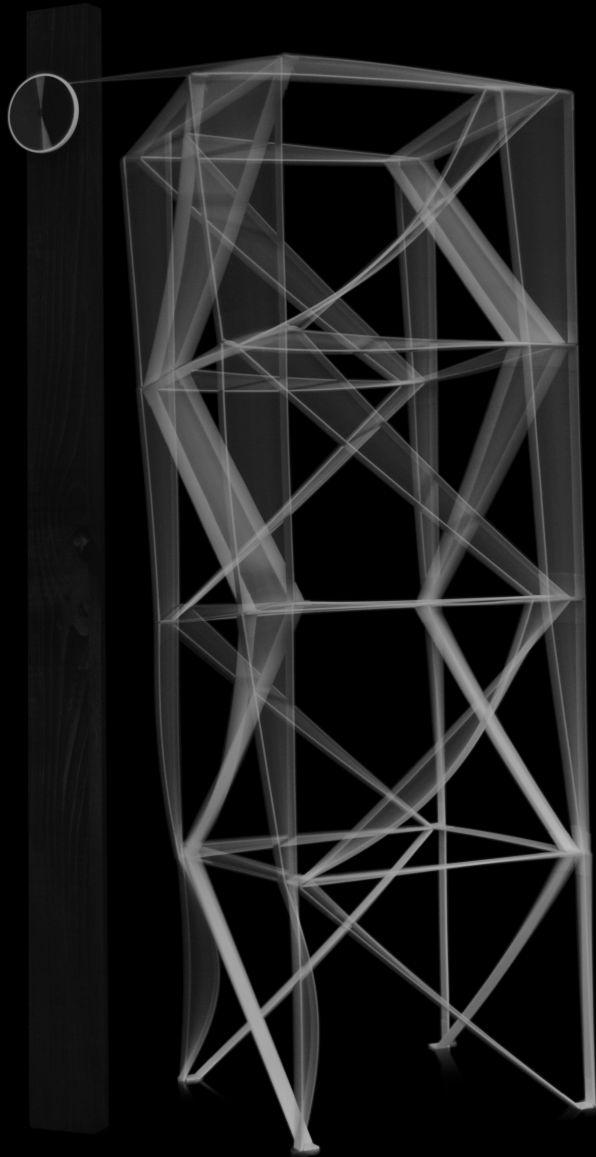
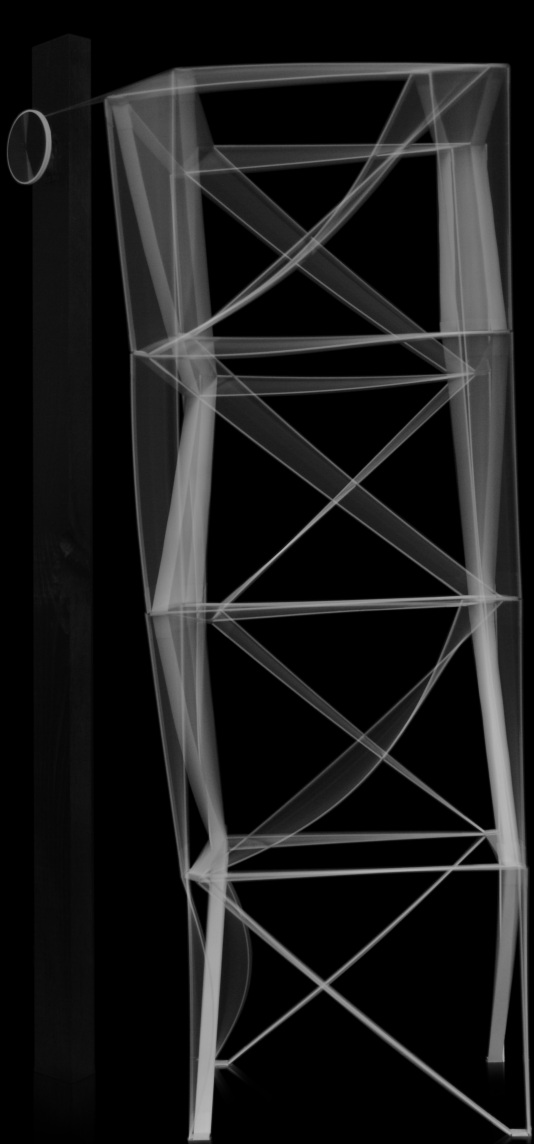


### 13. FACHWERKRÖHRE

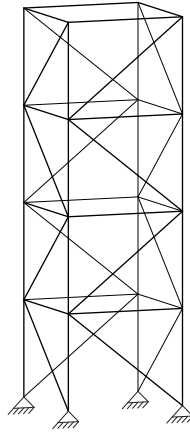


**Abbildung 74: Verformung einer Fachwerkröhre mit diagonalen Druckstäben**

Die Fachwerkröhre besteht aus ebenen Fachwerken mit parallel angeordneten, diagonalen Druckstäben. Die Verformung zeigt an zwei Seiten der Fachwerkröhre eine Druckbeanspruchung der diagonalen Stäbe.

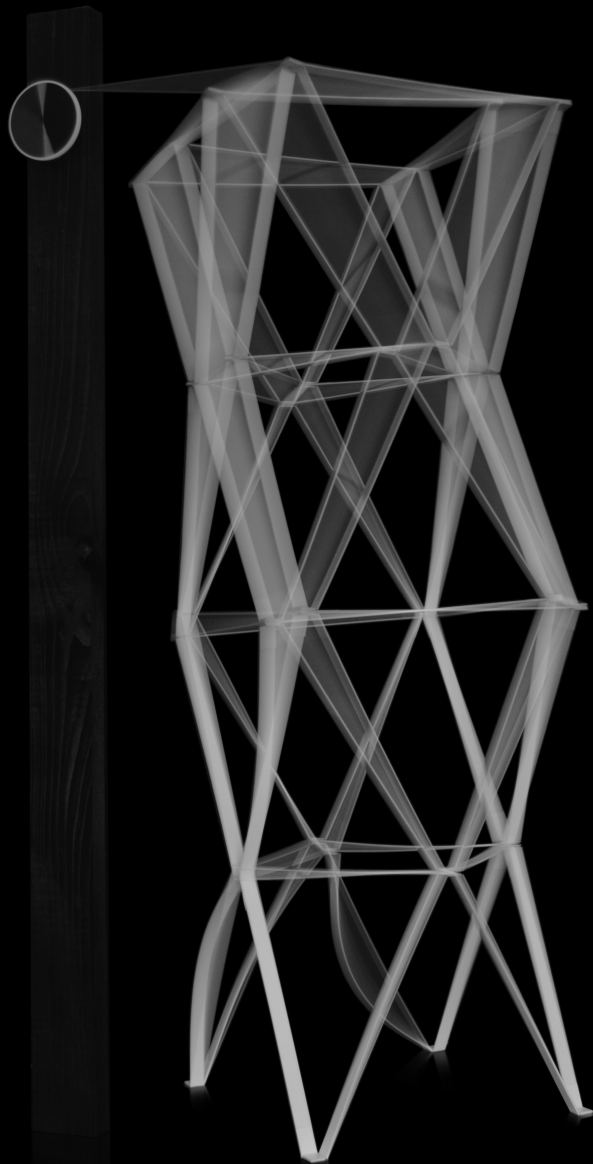
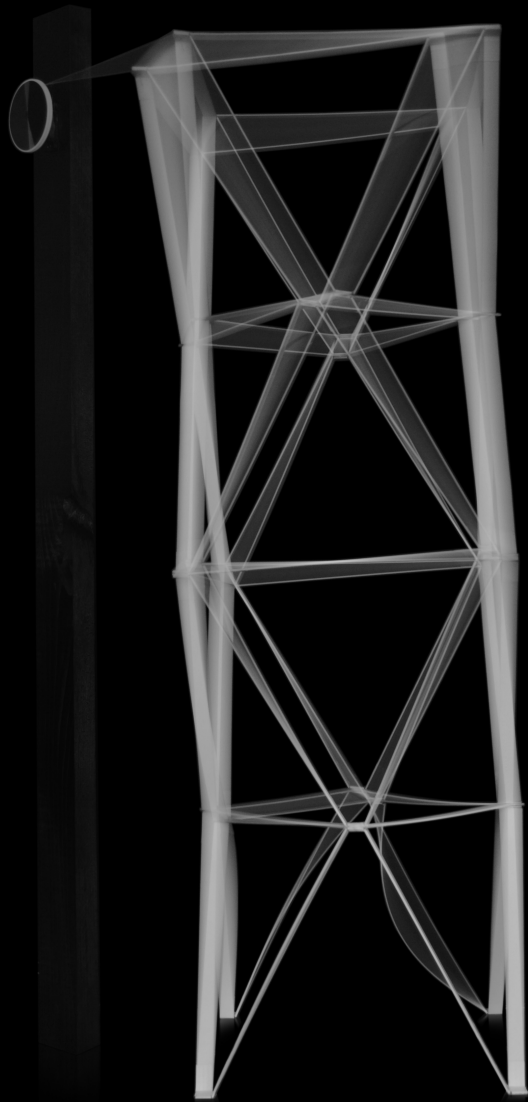


### 13. FACHWERKRÖHRE

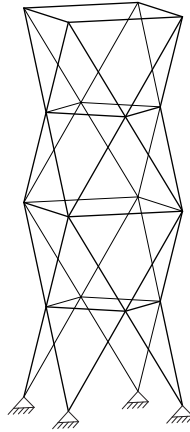


**Abbildung 75: Verformung einer Fachwerkröhre mit diagonalen Druckstäben**

Ausgehend von Abbildung 74 besteht die Fachwerkröhre aus ebenen Fachwerken mit abwechselnd entgegengesetzt angeordneten, diagonalen Druckstäben.



### 13. FACHWERKRÖHRE



**Abbildung 76: Verformung einer Fachwerkröhre aus räumlich zusammengesetzten Dreiecken**  
Die Fachwerkröhre weist im Vergleich zu Abbildung 74 und 75 eine hohe Steifigkeit auf. Die größten Verformungen entstehen an den unteren Stäben auf der Rückseite der Fachwerkröhre.

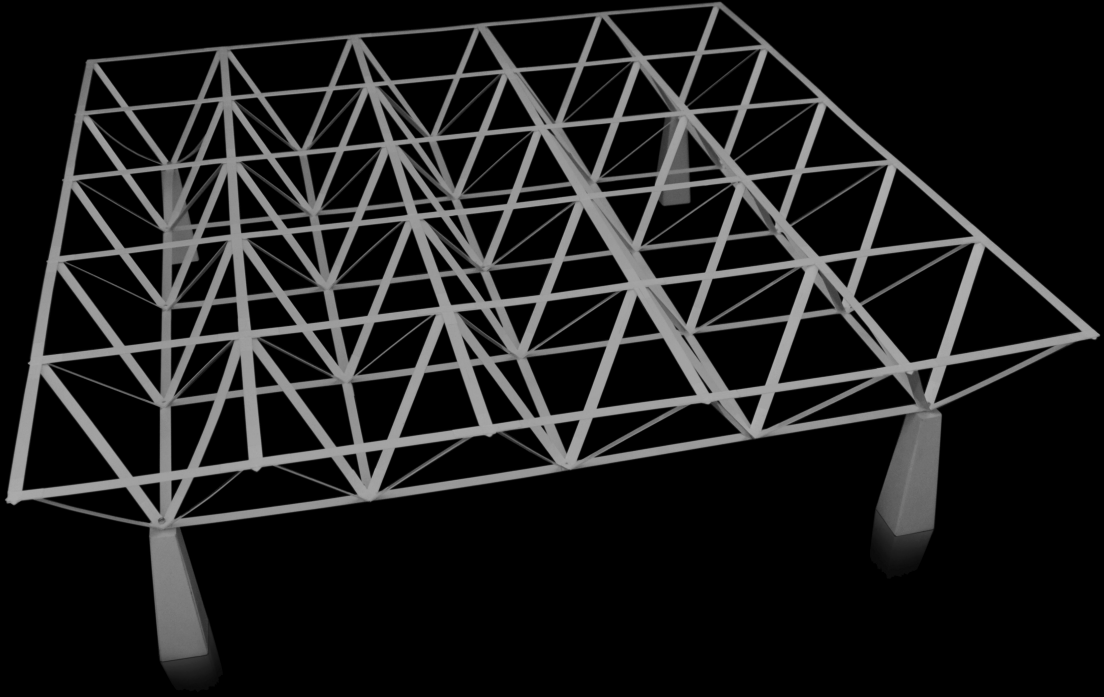


Abbildung 77: Tragwerksmodell Raumdachwerke



## 14. RAUMFACHWERKE

---

Raumfachwerke bestehen aus der Addition von räumlich zusammengesetzten Dreiecksmaschen. Jeder Stab gehört mindestens zwei Fachwerken in einer Ebene an. Ein Modulsystem kann aus der Aneinanderreihung von Tetraedern oder Oktaedern bestehen.<sup>18</sup>

### **Bildbeschreibung**

Die Bildserie veranschaulicht die Verformung von einem Raumfachwerk bei vertikaler Lasteinwirkung mit unterschiedlichen Auflagerpositionen.

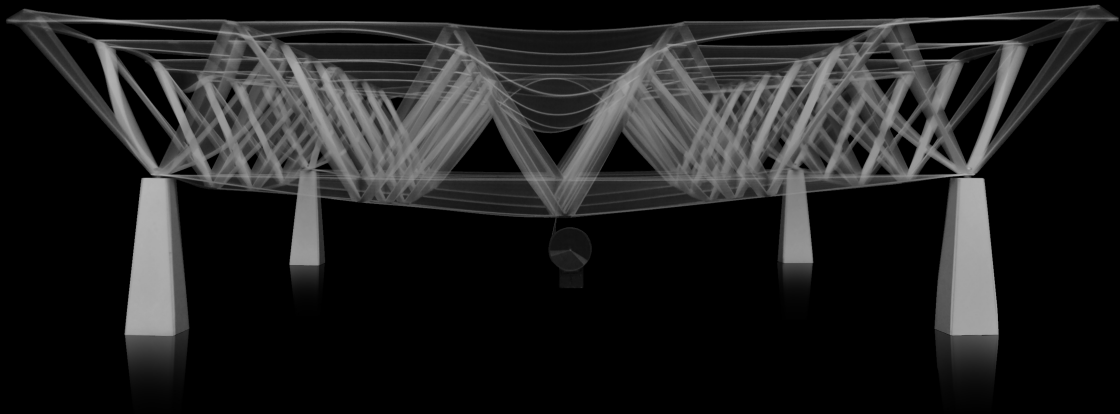
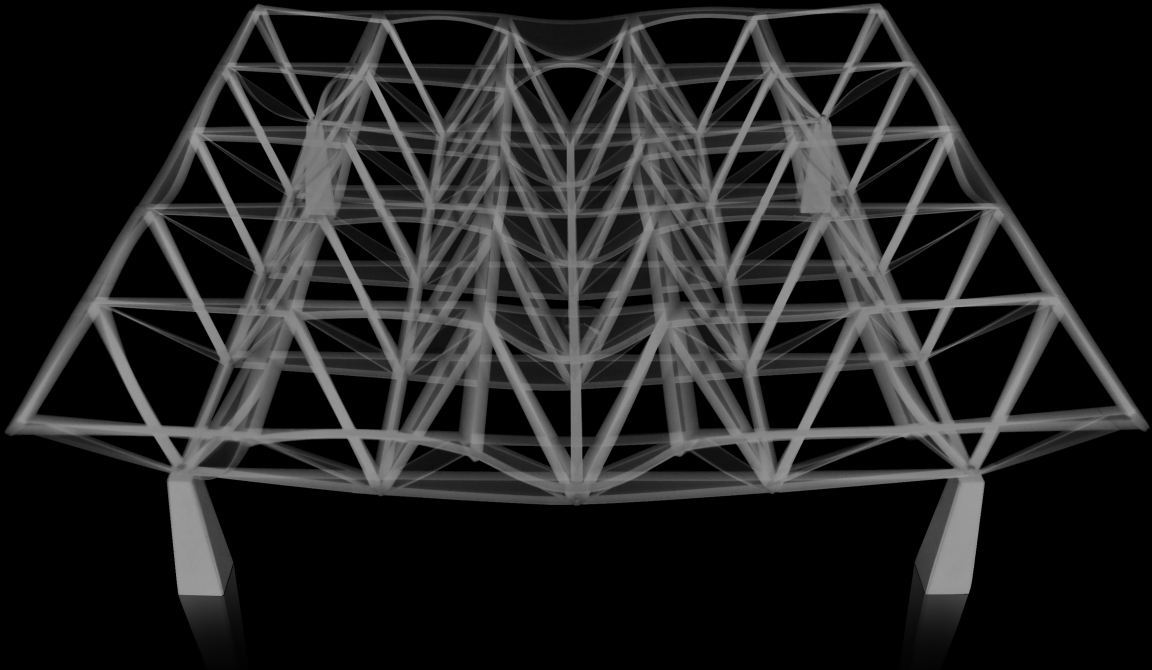
Die Beanspruchung der Stäbe und die Verformung des Raumfachwerks unterscheiden sich abhängig von der Position der Auflager.

### **Modellbeschreibung**

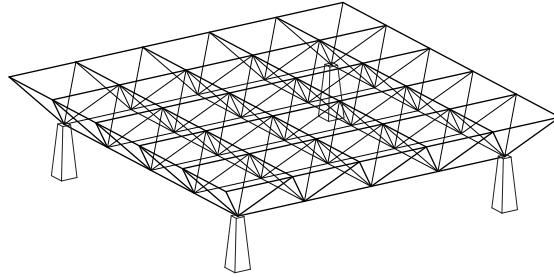
Alle Stäbe sind mit Gelenken verbunden. Die vertikale Lasteinwirkung erfolgt durch eine Spule, die von einem Servomotor gesteuert wird. Die Tragwerksmodelle bestehen aus 1,0 mm Polystyrolstreifen mit einer Breite von 1 cm. Sie haben eine Höhe von ca. 13 cm und eine Grundfläche von 86 x 86 cm.

---

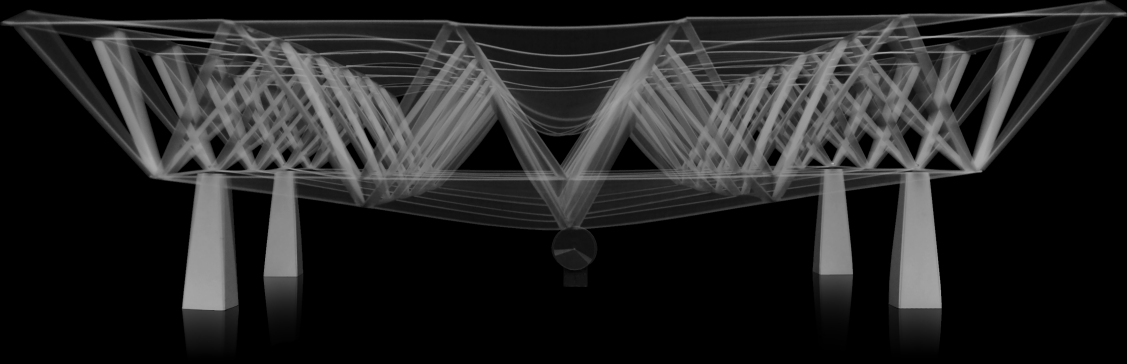
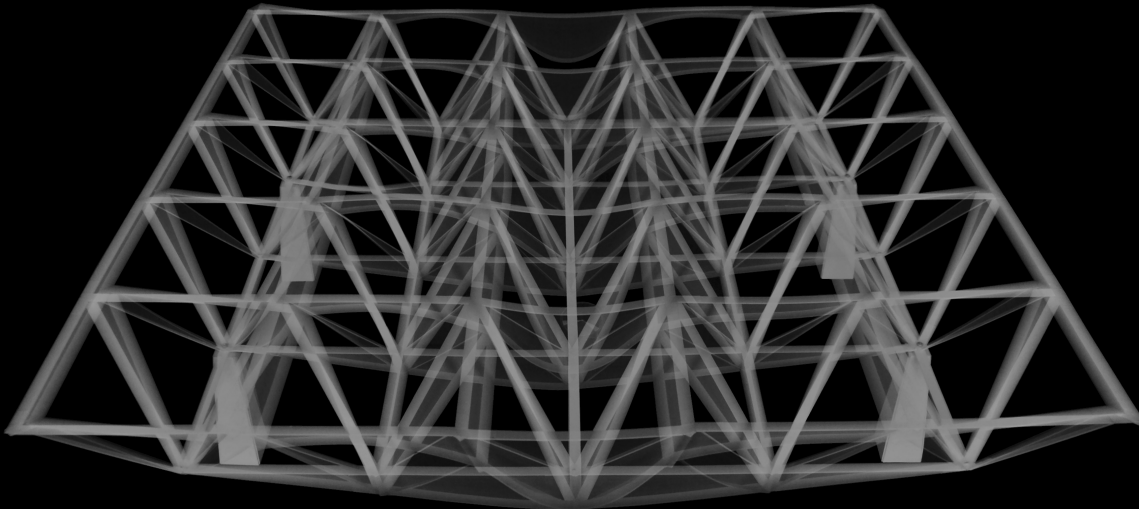
<sup>18</sup> Vgl. Eisele 2014, 41-42.



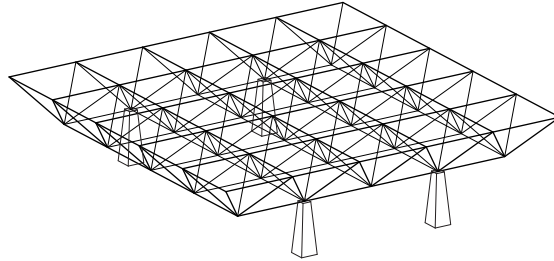
## 14. RAUMFACHWERKE



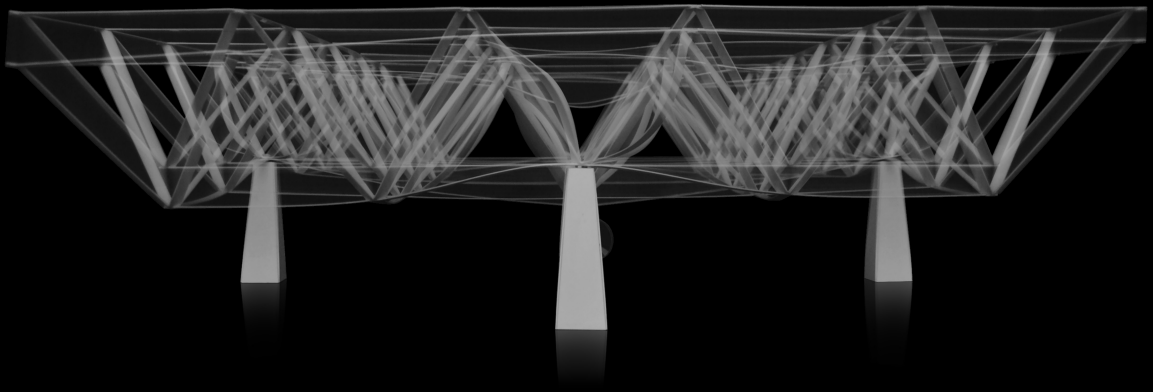
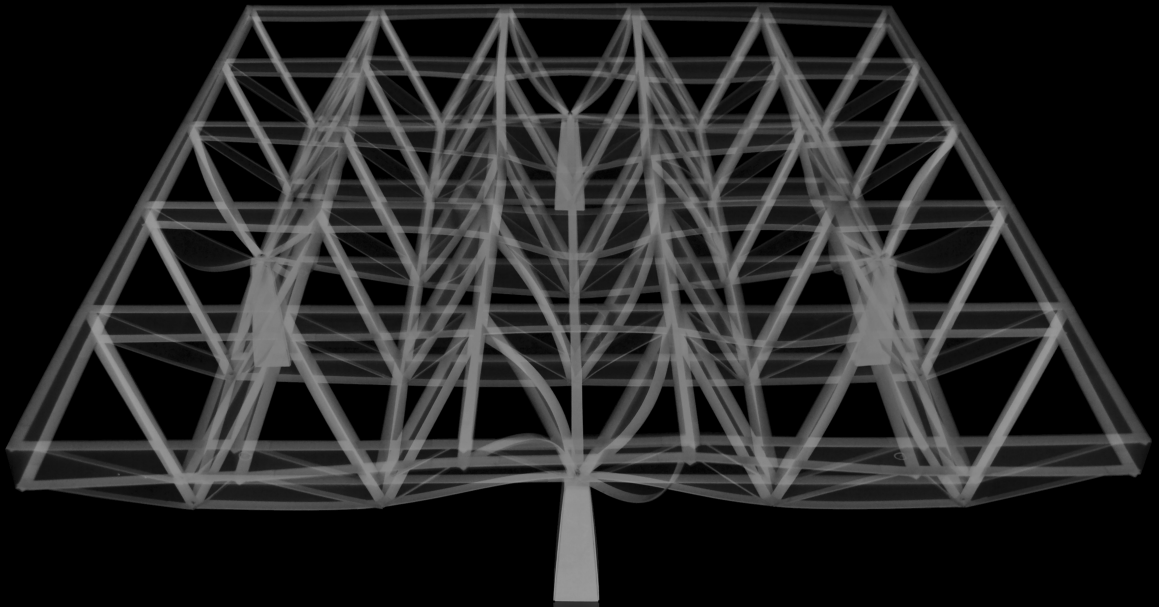
**Abbildung 78: Verformung eines Raumfachwerkes mit gleichmäßig verteiltem Auflager**  
Die Verformung zeigt eine gleichmäßige Krümmung, die entlang von zwei Achsen erfolgt.



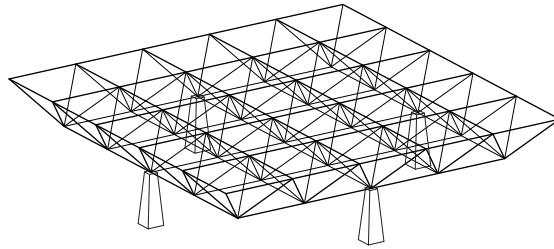
## 14. RAUMFACHWERKE



**Abbildung 79: Verformung eines Raumfachwerkes mit ungleichmäßig verteiltem Auflager**  
Die Verformung zeigt eine Krümmung die überwiegend entlang einer Achse verläuft.



## 14. RAUMFACHWERKE



**Abbildung 80: Verformung von eines Raumfachwerkes mit Auflager in der Feldmitte**  
Die Verformung zeigt eine wellenförmige Krümmung durch ein Absenken der auskragenden Ecken.





## 15. SCHLUSSWORT

---

Die in dieser Arbeit dargestellten Tragwerksmodelle zeigen einen wesentlichen Teil der grundlegenden Tragwerkselemente, um für Studierende einen Überblick zu schaffen und die Bildung eines „statischen Gefühls“ zu fördern. Mit dieser Arbeit wird jedoch kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, die Möglichkeiten einzelne Tragwerkselemente in unterschiedlichen Varianten zu kombinieren sind zu weitreichend.

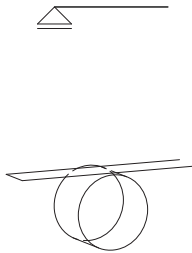
Darüber hinaus sollen vor allem Anreize geschaffen werden, die hier angeführten Modelle nachzubilden oder als Ergänzung zu dieser Arbeit weitere Modelle zu entwerfen und zu bauen. Die Besonderheit von Tragwerksmodellen besteht darin, Erfahrungen unmittelbar am Modell sammeln zu können und eine Interaktion am Modell zu ermöglichen. Durch die fotografische Methode wird die Veranschaulichung verdeutlicht, die Grundlage bildet jedoch das Tragwerksmodell.

# 16. ANHANG

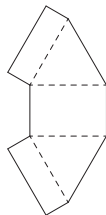
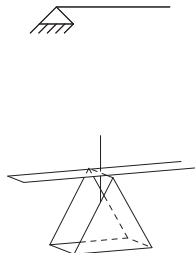
---

## Symbole:

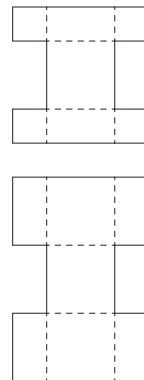
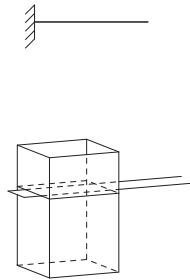
*Rollager*  
 verschiebliches und  
 verdrehbares Auflager  
 (1-wertiges Auflager)



*Kipplager*  
 verdrehbares Auflager  
 (2-wertiges Auflager)



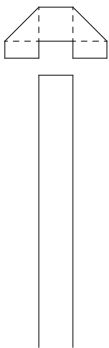
*Einspannung*  
 nicht verschiebliches  
 und nicht verdrehbares  
 Auflager  
 (3-wertiges Auflager)



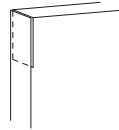
*verdrehbares Auflager*  
 verdrehbares Auflager  
 (2-wertiges Auflager)



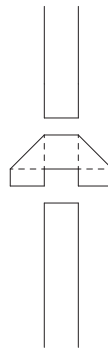
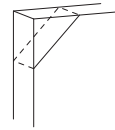
**Einspannung**  
 nicht verschiebliches  
 und nicht verdrehbares  
 Auflager  
 (3-wertiges Auflager)



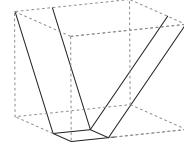
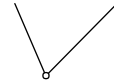
**gelenkige Ecke**  
 verdrehbare Verbindung



**biegesteife Ecke**  
 nicht verdrehbare  
 Verbindung



**gelenkige Ecke**  
 verdrehbare Verbindung  
 bei räumlichen  
 Tragwerken



### Literaturverzeichnis:

Block, Philippe/ Gengnagel, Christoph/ Peters, Stefan: Faustformel. Tragwerksentwurf, München 2013

Eisele, Johann. Grundlagen der Baukonstruktion. Tragsysteme und deren Wirkungsweise, 2. Auflage, Berlin 2014

Elser, Oliver/ Schmal, Peter Cochola: Das Architekturmodell. Werkzeug Fetisch kleine Utopie, Zürich 2012

Engel, Heinrich: Tragsysteme - Structure Systems, Stuttgart 1967

Frei, Otto u. a.: Natürliche Konstruktionen. Formen u. Strukturen in der Natur u. Technik u. Prozesse ihrer Entstehung, 2. Auflager, Stuttgart 1985

Führer, Wilfried/ Ingendaaij, Susanne/ Stein, Friedhelm: Der Entwurf von Tragwerken. Hilfen zur Grstaltung und Optimierung, Köln 1995

Gaß, Siegfried: Experimente. Physikalische Analogmodelle im architektonischen Entwerfen, Stuttgart 1990

Graefe, Rainer (Hg.): Zur Geschichte des Konstruierens, Stuttgart 1989

Künzle, Otto: Demonstrationen an Tragwerksmodellen. 2. Auflage, Zürich 2001

Krauss, Franz/ Führer, Wilfried/ Neukäter, Hans Joachim: Grundlagen der Tragwerkslehre. Bd. 1, Köln <sup>11</sup>2010

Krauss, Franz/ Führer, Wilfried/ Neukäter, Hans Joachim: Grundlagen der Tragwerkslehre. Bd. 2, Köln <sup>7</sup>2011

Mark, Robert (Hg.): Vom Fundament zum Deckengewölbe. Großbauten und ihre Konstruktion von der Antike zur Renaissance, Basel 1995

Mann, Walther: Tragwerkslehre in Anschauungsmodellen. Statik und Festigkeitslehre und ihre Anwendung auf Konstruktionen, Stuttgart 1985

Polónyi, Stefan: ... mit zaghafter Konsequenz. Aufsätze und Vorträge zum Tragwerksentwurf 1961-1987, Braunschweig 1987

Siegel, Curt: Strukturformen der modernen Architektur. 2. Auflage, München 1965

### **Quellenangabe aus dem Internet:**

Institut für Tragwerksentwurf, Technische Universität Graz:  
<http://www.ite.tugraz.at/index.php?page=209>  
Zugriff: 10.12.2019

### **Bildnachweis:**

S. 12 Grafik: Thomas Ochensberger, 2020

In Anlehnung an: Block, Philippe/ Gengnagel, Christoph/ Peters, Stefan: Faustformel. Tragwerksentwurf, München 2013, 90-91

Abb. 1-80 Bilder: Thomas Ochensberger, 2018-2020

S. 178-179 Grafik: Thomas Ochensberger, 2020

In Anlehnung an: Block, Philippe/ Gengnagel, Christoph/ Peters, Stefan: Faustformel. Tragwerksentwurf, München 2013, 230

