

In unterschiedlichen Bewegungen resultierende Scherengestänge desselben Schleifentyps (Drachen)

■ 3.3 Scherengestänge als Elemente adaptiver Morphologien

Yenal Akgün, Feray Maden, Şebnem Gür, Gökhan Kiper, Koray Korkmaz,
Engin Aktaş, Müjde Yar Uncu

Zu allen Zeiten haben Menschen versucht, flexible Gebäude zu bauen, die sich ständig verändernden Anforderungen und Umweltbedingungen anpassen. Die Einbeziehung von Bewegung in die Architektur ist der Versuch, auf veränderliche Umstände mit neuen Lösungen zu reagieren. Das Konzept der Bewegung ist in der Tat nicht neu für die Architektur. Die Wurzeln gehen bis in die Antike zurück. Einfache, mit flexiblen Außenhäuten gebaute Nomadenzelte können als das erste Beispiel für adaptive Strukturen angesehen werden, die zum Schutz vor extremen Umweltbedingungen dienten.¹ Die zum Abdecken des Daches im Colosseum von Rom verwendeten Leinwandbahnen sind ein weiteres Beispiel. Sie bildeten Markisen, die nicht nur Sonnenschutz boten, sondern für die Zuschauer durch ihr Durchhängen zur Mitte hin auch eine Brise einfingen.²

Adaptive Dächer wurden in mobilen Theatern als Schutz vor Sonne und Regen verwendet, wenn auch die abgedeckte Fläche nicht größer als ein paar Quadratmeter war. Das Konzept von Bewegung in der Architektur spielte weiter eine wichtige Rolle während der Renaissance. Im 18. Jahrhundert fanden Markisenkonstruktionen in Europa weite Verbreitung. Im 19. Jahrhundert boten im Zuge der industriellen Revolution neue Baumaterialien wie Gusseisen, Stahl und Glas in Bezug auf Größe, Form und Funktion Möglichkeiten und Freiheiten, die zuvor unvorstellbar waren.³

Im 20. Jahrhundert wurden technologische Entwicklungen zu einem immer größeren Faktor, der neue Dimensionen für adaptive Konstruktionsformen erschloss. Entwicklungen in der rechnergestützten

Architektur und in der Materialwissenschaft etwa haben die Anwendung von adaptiven/expandierbaren Konstruktionen befördert. Die wachsende Relevanz solcher Konstruktionsformen aufgrund ihrer Vorteile im Vergleich zu herkömmlichen Bauweisen führte zur Entwicklung verschiedener Typen von adaptiven Konstruktionen.

Expandierbare Strukturen umfassen jeweils eine kompakte und eine entfaltete Form. Sie bestehen meist aus Baugruppen steifer, durch Gelenke verbundener Körper und erlauben geometrische Transformationen zur Erfüllung praktischer Anforderungen. Aufgrund ihrer Fähigkeit, ihre Form wiederholt von der einen zur anderen Konfiguration zu verändern, ist hier zusätzlich zum architektonischen und konstruktiven Entwurf die Kinematik beteiligt, ein Teilgebiet der Mechanik. Die Komplexität der Entwurfs-, Bau- und Konstruktionsprozesse für adaptive/expandierbare Gebäudeelemente erfordert eine interdisziplinäre Entwurfsmethodik mit neuartigen theoretischen Prinzipien und Analysemethoden.

Scherengestänge:

Anwendungen in der Architektur

Scherengestänge sind einer der häufigsten Typen adaptiver/expandierbarer Strukturen. Seit der griechischen und römischen Antike werden sie in Architektur und Bauwesen verwendet, etwa als expandierbare Dachstrukturen, für Schalen und im Möbeldesign. Scherengestänge sind weit verbreitet, weil sie sehr einfache Bewegungsprinzipien aufweisen und sowohl planare, balkenähnliche expandierbare Strukturen wie auch expandierbare räum-

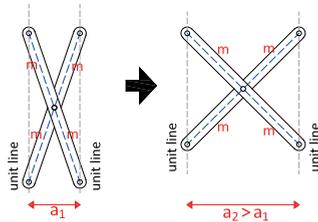
liche Schalen mit verschiedenen Geometrien ausbilden können.

Verglichen mit anderen Typen adaptiver Strukturen (Platten-, Streben-/Kabel- und Membranstrukturen) besitzen Scherengestänge ein einfaches System, da sie aus Scherenelementen zusammengesetzt sind. Zur Erstellung einer einfachen primären Schereneinheit verbindet man zwei steife Stangen an einem Zwischenpunkt durch eine Drehverbindung miteinander, die ihnen ein freies Rotieren um eine im rechten Winkel zu ihrer gemeinsamen Ebene verlaufenden Achse erlaubt. Planare und räumlich expandierbare Strukturen mit unterschiedlichen geometrischen Formen lassen sich durch Verbinden von Scheren miteinander an ihren Endknoten erzeugen. Um adaptive Strukturen zu erstellen, müssen eine Reihe geometrischer Prinzipien und bestimmte Bedingungen für die Aktivierbarkeit gegeben sein. Zum Verständnis dieser Prinzipien und Bedingungen werden zunächst gängige Entwurfsmethoden anhand der Literatur und anschließend zwei Entwurfsmethoden mit Anwendungen von Scherengestängen dargestellt.

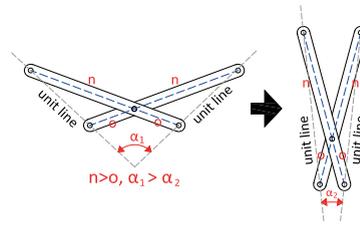
Entwurfsmethoden

Zum Entwerfen expandierbarer Scherengestänge gibt es im Prinzip zwei Methoden: die einheitenbasierte Methode und die Methode der Schleifenanordnung. Sie unterscheiden sich in ihren Ansätzen und Vorteilen. Beide sind auf planare Scherenbalken und Schalen anwendbar.

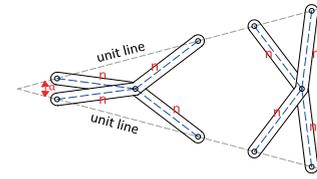
a. Translatorische Schereneinheit



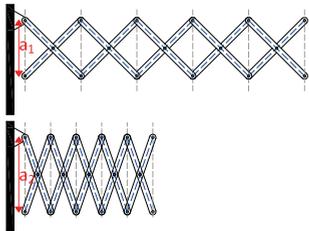
b. Polare Schereneinheit



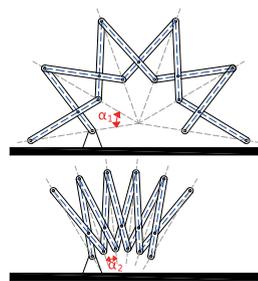
c. Gewinkelte Schereneinheit



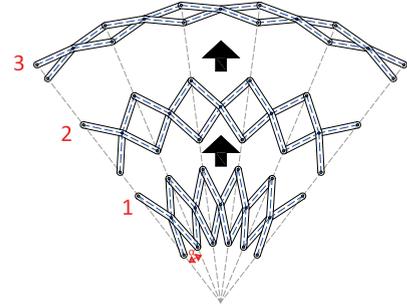
Translatorisches planares Scherengestänge



Polares planares Scherengestänge



Planares Scherengestänge mit abgewinkelter Schereneinheit



Häufige primäre planare Schereneinheiten und ihre Entfaltung

1. Einheitenbasierte Methode

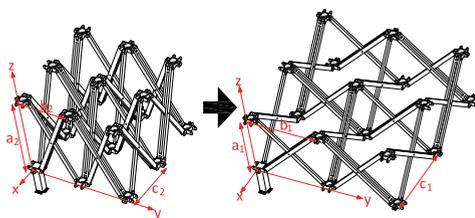
Die einheitenbasierte Methode („unit-based method“) ermöglicht die Erstellung eines expandierbaren Scherengestänges durch serielle Multiplikation einer Schereneinheit eines bestimmten Typs, wobei diese „primären Einheiten“ durch endseitige Gelenke miteinander verbunden werden. Die Scherengestänge lassen sich durch Vervielfältigung einer der primären Einheiten oder aber durch serielle Anordnung mehrerer, unter Verwendung von primären Einheiten erzeugten Teilgestängen erstellen. Auf diese Weise lassen sich verschiedene Scherengestänge mit unterschiedlichen Krümmungen generieren.

Diese Methode beruht auf den geometrischen Eigenschaften der primären Schereneinheiten. Alle Arten primärer Schereneinheiten verwenden eine imaginäre Linie, die „Einheitslinie“ zwischen den einander entsprechenden oberen und unteren Enden der Stangen. Wenn die Einheitslinien während des Entfaltungsprozesses parallel zueinander bleiben, erhält man eine „translatorische Schereneinheit“. Eine „polare Schereneinheit“ ergibt sich durch Verbinden zweier gerader Stangen mit Scherengelenken, die von den Mittelpunkten der Stangen wegweisen. In diesem Fall schneiden sich die Einheitenlinien in einem Punkt, und der Segmentwinkel (α) verändert

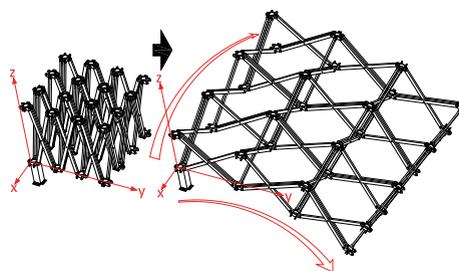
sich während der Entfaltung.⁴ Eine „abgewinkelte Schereneinheit“ erhält man durch Verbinden zweier abgelenkter Stangen mit einem Biege Winkel zwischen 90° und 180° anstelle von geraden Stangen; die Struktur wird radial entfaltet, und der Segmentwinkel (α) zwischen zwei Einheitslinien bleibt während der Entfaltung konstant.

Bei der einheitenbasierten Methode handelt es sich um einen induktiven Entwurfsprozess, der sehr effektiv ist in Fällen, wo die Zielgeometrie des Gestänges als Form klar definiert ist oder wo beabsichtigt wird, primäre planare oder räumlich expandierbare Geometrien zu erstellen, wie z. B. einen

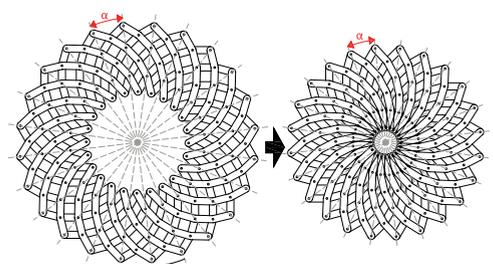
a. Translatorisches räumliches Scherengestänge



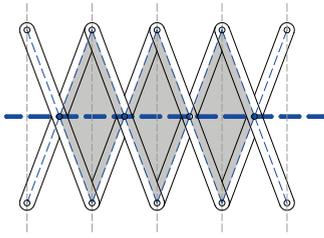
b. Polares räumliches Scherengestänge



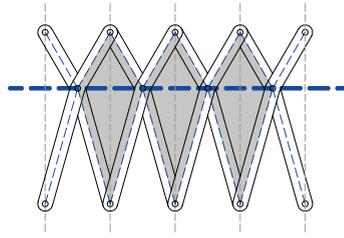
c. Planares, aus gewinkelter Schereneinheit abgeleitetes Scherengestänge



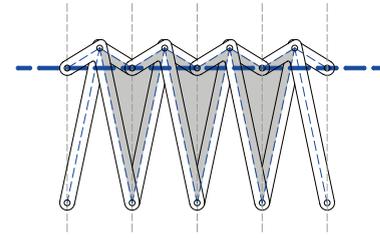
Räumliche und planare Scherengestänge und Entfaltungsbeispiel



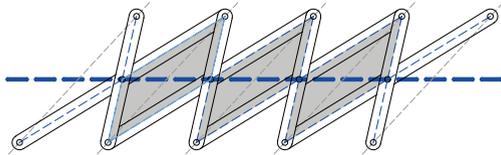
Rhombenschleifen



Drachenschleifen



Pfeilschleifen



Parallelogramm-Schleifen



Anti-Parallelogramm-Schleifen

Schleifentypen und sich aus diesen ergebende planare expandierbare Scherengestänge

planaren Bogen, einen linearen Balken oder eine kuppelförmige Schale. Der spanische Architekt Emilio Pérez Piñero ist ein Pionier in der Verwendung der einheitenbasierten Methode für expandierbare Scherengestänge in der Architektur. Er hat zahlreiche Kuppeln und räumliche Gitter für mobile Theater, Pavillons und Ausstellungsgebäude entwickelt.⁵ In der Nachfolge Piñeros haben Félix Escrig Pallares und seine Kollegen das Thema erweitert und geometrische Bedingungen für die Anwendung von Scherengestängen aus translatorischen und polaren Schereneinheiten präsentiert. Sie entwickelten neue kugelförmige Gitterstrukturen und mehrere Typen expandierbarer Scherenstrukturen, einschließlich vierseitig expandierbarer Schirmstrukturen, expandierbarer polyedrischer Strukturen und kompakt gefalteter zylindrischer, sphärischer und geodätischer Strukturen.^{6,7}

Chuck Hoberman gelang mit der „gewinkelten Schereneinheit“ eine bemerkenswerte Erfindung im Bereich der Scherengestänge. Sie erweitert deren Anwendungsbereich, indem ein Entfalten des Gestänges vom Rand auf den Mittelpunkt hin möglich wird, sodass eine Öffnung im Mittelpunkt entsteht.^{8,9} Unter Verwendung des gewinkelten Elements entwarf er den Hoberman-Bogen, die Iris-Kuppel und eine Anzahl weiterer Strukturen.

Viele andere Wissenschaftler, unter ihnen Zhong You und Sergio Pellegrino¹⁰ sowie Charis Gantes¹¹, haben

die Hauptprinzipien und geometrischen Eigenschaften und Formbeschränkungen von planaren und räumlichen expandierbaren Scherengestängen erläutert.

2. Methode der Schleifenanordnung

Ein anderer Ansatz zum Definieren expandierbarer Scherengestänge ist die Methode der Schleifenanordnung („loop assembly method“). Diese Methode ermöglicht mehrere Kombinationen verschiedener Schleifen und gewünschter Geometrien, was eine praktische Möglichkeit zum Entwerfen von Scherengestängen mit freien Kurvenformen bietet. Anstatt die jeweils erforderlichen Gliedlängen und -winkel einzeln zu berechnen, wird ein Schleifentyp ausgewählt und die gewünschte Anzahl von Schleifen auf der Kurve ausgerichtet. In einem weiteren Schritt werden die Glieder und die primären Schereneinheiten bestimmt, indem man den Rändern der Schleifen folgt. Auf diese Weise sind der oder die primären Einheitentypen ein Ergebnis dieses Prozesses, nicht dessen anfänglicher Input.

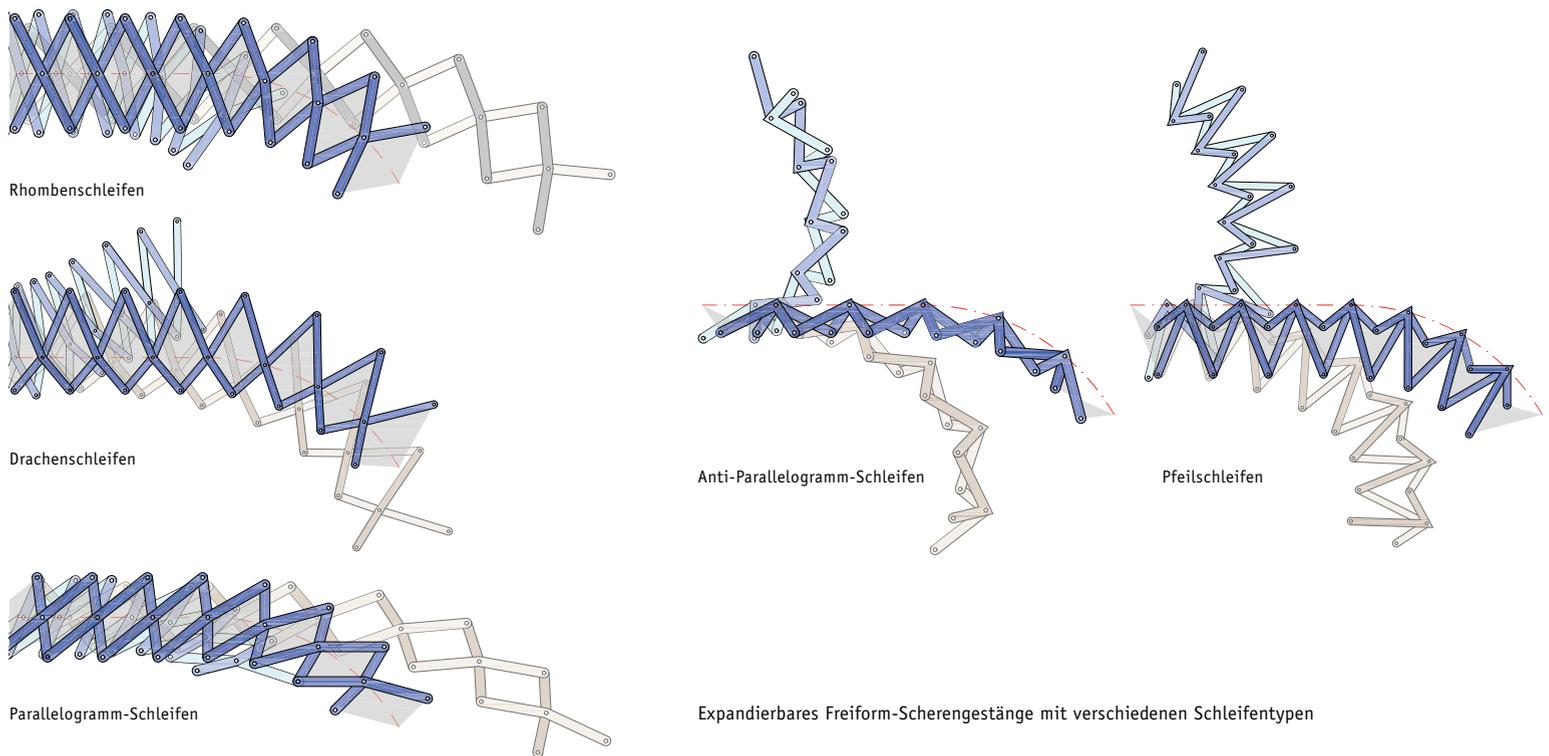
Diese Methode wurde zuerst von Chuck Hoberman verwendet. Er beschrieb die Weise, in der identische gewinkelte Elemente als Paar angeordnet werden, um gewinkelte Scherenpaare zu bilden, als Mechanismen, die er „loop assemblies“ nannte. In einer späteren Phase beschrieb er in einem am Massachusetts Institute of Technology (MIT) gehaltenen Vor-

trag seine Konstruktion expandierender Polygone als eine Baugruppe aus „hinged rhombs“, mit Scharnieren versehenen Rhomben.

Die Schleifenanordnungen werden aus vierseitigen Schleifen gebildet, dies sind die einfachsten beweglichen Schleifen. Vierseiter heißen je nach ihrer Geometrie „Rhombus“, „Drachen“, „Pfeil“, „Parallelogramm“ und „Anti-Parallelogramm“. Wenn alle vier Paare der vierseitigen Schleife von gleicher Länge sind, bezeichnet man diese als Rhombus. Wenn die beiden benachbarten Paare gleich sind, erhält man einen Drachen. Ein konkaver Drachen ist ein Pfeil. Ein Parallelogramm ist ein konvexer Vierseiter, bei dem die paarweise gegenüberliegenden Seiten parallel und gleich lang sind; ein Anti-Parallelogramm ist ein Vierseiter, bei dem jedes Paar gegenüberliegender Seiten gleich, aber nicht parallel zu den anderen beiden Seiten ist. Durch Zusammenbauen solcher Schleifen erhält man expandierbare planare oder räumliche Scherengestänge oder Schalen.

Verschiedene Schleifentypen lassen sich auf dieselbe beabsichtigte Geometrie anwenden. Wie oben beschrieben, kann man verschiedene Arten von Schleifen entlang einer Linie anordnen, während sich die primäre Schereneinheit und die Entfaltungsgeometrie je nach der Geometrie des Schleifentyps unterscheiden.

Durch Verwendung verschiedener Schleifentypen sind planare Freiformgeometrien erreichbar. In die-



sem Fall sind die Entfaltungsgeometrien vollkommen unterschiedlich. Die Methode der Schleifenanordnung hängt nicht von der Komplexität der beabsichtigten Form ab, sondern kann an jede Art planar expandierbarer Strukturen angepasst werden. Die beste Vorgehensweise besteht im Entwerfen der Bewegung während der Expansion oder aber in einer intuitiven Bestimmung, welche Art Bewegung und Schleife am besten zum beabsichtigten Entwurf passt.

Im Rahmen der Methode der Schleifenanordnung kann selbst eine einzelne bestimmte Art von Schleife verschiedene Arten geometrischen Verhaltens bieten. So können z. B. Drachenschleifen von identischer Größe an Sonnenschutzstrukturen mit unterschiedlichen Anordnungsvariationen angebracht werden. Obwohl die Schleifengeometrie identisch ist, unterscheiden sich die sich daraus ergebenden primären Schereneinheiten sowie die Entfaltungsgeometrien erheblich voneinander.

Fazit

Scherengestänge sind in der Lage, verschiedene expandierbare Strukturen zu bilden. Architekten können diese Arten von Gestängen vorteilhaft dazu einsetzen, adaptive, bewegliche, transformierbare Schalenstrukturen und entfaltbare balkenähnliche Strukturen zu entwerfen. Produktdesigner können sie sich ebenfalls zunutze machen.

Hier wurden zwei unterschiedliche Methoden vorgestellt, um die grundlegenden Entwurfsansätze zu vermitteln. Die einheitenbasierte Methode ist sehr effektiv für primäre Geometrien wie z. B. Kuppel, Bogen, Kreis oder Linie, indem serielle Vervielfältigungen und Anordnungen eines der hier präsentierten Schereneinheiten-Typs verwendet werden. Die Methode der Schleifenanordnung eignet sich besser, wenn die Endform – gleich ob orthogonale oder freie Form – der zentrale Ausgangspunkt ist. In diesem Falle ist es, im Gegensatz zur einheitenbasierten Methode, nicht erforderlich, sich zu Beginn für einen bestimmten Schereneinheiten-Typ und dessen Dimensionsbeschränkungen zu entscheiden. Designer können einen Typ und eine Anzahl von Schleifen auswählen und dann die Schereneinheiten definieren, indem sie den Schleifenrändern folgen. Da die Entfaltbarkeit bei Anwendung dieser Methode sichergestellt ist, steht es dem Architekten frei, sich für denjenigen Schleifentyp zu entscheiden, der sich am besten für die Funktionalität und Ästhetik des Entwurfs eignet. Bei der einheitenbasierten Methode sind alle Schleifenalternativen zu Scherenstrukturen zusammenbaubar, ihre möglichen Bewegungen lassen sich in kurzer Zeit testen und bewerten, wohingegen diese Methode auf die eine und einzige für eine bestimmte Einheit mögliche Bewegungsart begrenzt ist.

- 1 Tzonis, A.; Lefeuvre, L., *Movement, Structure and the Work of Santiago Calatrava*, Basel, 1995.
- 2 Zuk, W.; Clark, R. H., *Kinetic Architecture*, New York, 1970.
- 3 Hitchcock, H. R., *Architecture: Nineteenth and Twentieth Centuries*, New Haven und London, 1987.
- 4 Maden, F.; Korkmaz, K.; Akgün, Y., „Review of Planar Scissor Structural Mechanisms: Geometric Principles and Design Methods“, *Architectural Science Review*, 54 (3), 2011, S. 246 – 257.
- 5 Piñero, E. P., „Project for a Mobile Theatre“, *Architectural Design*, 12, 1961, S. 570.
- 6 Escrig, F., „Expandable Space Structures“, *Space Structures Journal*, 2 (1), 1985, S. 79 – 91.
- 7 Escrig, F.; Valcárcel J. P., „Geometry of Expandable Space Structures“, *International Journal of Space Structures*, 8, 1993, S. 71 – 84.
- 8 Hoberman, C., *Reversibly expandable doubly-curved truss structure*, United States US49422700A, 1990.
- 9 Hoberman, C., *Mechanical Invention through Computation – Mechanism Basics. MIT Class 6.S080 Lecture notes* (2013), S. 37–47, http://courses.csail.mit.edu/6.S080/lectures/02_all.pdf
- 10 You, Z.; Pellegrino, S., „Foldable Bar Structures“, *International Journal of Solids and Structures*, 15 (34), 1997, S. 1825 – 1847.
- 11 Gantes, C., *Expandable Structures: Analysis and Design*, Boston, 2001.