

1 Einleitung

Ein gedankliches Modell zu analysieren, formulieren und letztlich zu konkretisieren, bedarf komplexer Vorgänge und Entscheidungen. Wenngleich sich diese, in Wechselbeziehung stehenden Abläufe mit dem Ziel, etwas zu **machen** oder **herzustellen**, nur schwer in Diagrammen festhalten lassen, müssen dennoch Lösungen gesucht und entwickelt werden sowie Prozesse im Voraus gedanklich festgehalten, dargestellt und erklärt werden.¹ Im Bauwesen, wo Materialien zu Strukturen angeordnet werden, bezeichnet man diese Prozesse für gewöhnlich als Entwerfen, Planen und Konstruieren.

Der Begriff des **Bauens** steht dabei für den im Entwurfs-, Planungs- und Konstruktionsprozess entwickelten Weg zur Materialisierung von Gedankenmodellen. Das Bauwerk entspricht demzufolge einem erdachten und materialisierten Gebilde. Im vorliegenden Buch wird das Bauen daher als **materielles Gestalten der Umwelt** verstanden und der Beschreibung der verwendeten Materialien der entsprechende Umfang eingeräumt.

Die Gesetze des Bauens allein auf die Überwindung von Material und Methode zu reduzieren, ist wenig zielführend. Der grundsätzliche Einfluss von Herstellungs- und Montagefragen auf die Festlegung des bestgeeigneten Bau- oder Tragwerkstypus sollte jedoch nicht unterschätzt werden. Es ist daher sinnvoll, die Technologie des Bauens als fundamentale Erwerbsquelle zu betrachten, die mit jeder wiederholten Anwendung reicher wird.²

1.1 Zur Bedeutung von Herstellung und Montage

Die Errichtung eines Bauwerks macht vielschichtige Überlegungen hinsichtlich Methoden, Verfahren und Umsetzung der erforderlichen Arbeitsschritte notwendig. Ziel dieser Überlegungen ist die Schaffung qualitativ hochwertiger Bauwerke und die Realisierung kurzer Errichtungszeiten. Erreicht werden kann dies durch einen hohen Grad an Bauteil-Vorfertigung und die Entwicklung effizienter Montagekonzepte.

In den verschiedenen Projektphasen jeweils die besten Entscheidungen hinsichtlich der Optimierung von Zeit, Aufwand und Energie treffen zu können, setzt umfangreiches Fachwissen und Erfahrung voraus. Der wirkungsvollen Zusammenarbeit aller an der Planung und Ausführung beteiligten Fachleute kommt dabei eine bedeutende Rolle zu. Sie alle sind

maßgeblich an der Umsetzung des materiellen Gestaltens beteiligt.

Angesichts der fortschreitenden Material- und Bauteilentwicklung im Bauwesen gewinnt die Kenntnis um Fertigungs- und Fügetechniken der Werkstoffe und deren bautechnische Vorgaben für den planenden Ingenieur und Architekten zunehmend an Bedeutung. Die Herstellung und die Montage können demzufolge als Kernprozesse in der Entwicklung von Tragsystemen betrachtet werden.

Das Beachten von Aspekten der Herstellung und Montage hat eine lange Tradition in der Bauteilplanung. Im Stahl-, Holz- und Fertigteil-Massivbau wird die Gestaltung von Bauteilen neben der architektonischen Formulierung und den statisch-konstruktiven Bedingungen auch von Grundsätzen der Fertigungs- und Montagetechnik wesentlich mitbeeinflusst. Die Bauteile werden im Werk vorbereitet, teilweise vormontiert, nummeriert und zur Baustelle befördert, wo sie durch weitere Vormontagen zu Montageeinheiten zusammengefügt werden.

Im Bereich der Membrantragwerke, einem Spezialgebiet des Ingenieurbaus, wo textile Konstruktionen aus Geweben und Seilen große Spannweiten überdachen, ist dies ebenfalls gängige Praxis in der Bauausführung. Eine Ursache dafür liegt in den hohen Anforderungen an die Herstellung und Prüfung der Werkstoffe, die eine bauseitige Fertigung unmöglich machen und eine besondere Montagetechnik verlangen.

Membrantragwerke werden aufgrund ihrer äußeren Form und ihres geringen Gewichts den weitgespannten, leichten Flächentragwerken zugeordnet. Hinsichtlich ihres Tragverhaltens unterscheiden sie sich von konventionellen Tragwerken vor allem dadurch, dass äußere Kräfte ausschließlich durch Zugkräfte umgelenkt werden. Man bezeichnet sie daher auch als Formaktive Zugsysteme. Bei entsprechender Materialwahl, Krümmung und Krafteinleitung entspricht ihre Strukturform im Idealfall genau dem Kräfteverlauf.³

Als textile Flächenelemente kommen bei mechanisch gespannten Membrantragwerken vor allem beschichtete Gewebe zum Einsatz. Zur Verbesserung ihrer Werkstoffeigenschaften werden sie aus Materialien unterschiedlicher Stofflichkeit zusammengesetzt. Die als linienförmige Tragelemente eingesetzten Seile und deren Anschlüsse werden aus Funktionsgründen ebenfalls aus mehreren Teilelementen industriell gefertigt.

¹ Ferguson, E. S. (1993)

² Buckminster Fuller, R. (1973)

³ Engel, H. (1997)

Die zugbeanspruchten Flächen- und Randelemente besitzen eine vernachlässigbare Biegesteifigkeit, sie gelten als biege- weiche Werkstoffe. Ihre geometrische Anordnung und Aus- bildung als Tragelement, die im Bauteil herrschenden Kraft- verhältnisse und vor allem das Vermögen des Materials, ver- hältnismäßig große Verformungen zuzulassen, werfen bei der Entwicklung eines Membrantragwerks zwingend die Frage nach der „Baubarkeit“ eines solchen Tragwerksentwurfs auf.

Neben den örtlichen Bedingungen auf der Baustelle und der Wahl der geeigneten Mittel sind es vor allem die Grundsätze der Konstruktionsmethodik zur Montage der zugbeanspruch- ten Tragelemente, die auf den Kenntnissen des strukturellen Aufbaus und des mechanischen Materialverhaltens der verwen- deten Werkstoffe beruhen und eine entsprechende Umsetzung des gewählten Montageverfahrens ermöglichen.

Anders als bei konventionellen Bauverfahren, wo die Montage durch additive Aneinanderreihung einzelner Bauelemente er- folgt, kann bei Membrantragwerken erst durch das Einleiten von Kräften in die Linien- und Flächenelemente ausreichend Steifig- keit im Tragelement und im Tragsystem aufgebaut werden.

Das auf Membrantragwerke anzuwendende Montageverfah- ren unterliegt daher in entscheidendem Maße der Fertigungs- qualität der eingesetzten Materialien. Urform-, Umform- und vor allem Fügeverfahren stehen in starker Wechselwirkung mit der Montagetechnik und bilden ein wichtiges Optimierungs- potenzial für den Realisierungsprozess zum Bau eines solchen Tragwerks.

1.2 Problemstellung, Zielsetzung und Aufbau des Buches

Das jahrtausendealte Thema des Bauens mit Membranflächen wurde in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts erneut aufgegriffen. In Europa waren es vor allem Ingenieure, Archi- tekten und Naturwissenschaftler um den deutschen Architek- ten Frei Otto, die im Rahmen des von 1970 bis 1985 wirken- den Sonderforschungsbereichs 64 in Stuttgart mit zahlreichen wissenschaftlichen Kooperationen im In- und Ausland einen wesentlichen Beitrag zur Erforschung und Entwicklung weit- gespannter Flächentragwerke geleistet haben. Nicht uner- wähnt sollen auch die Unternehmen bleiben, die diese Ent- wicklungen unterstützt haben.

Seit dieser Zeit gibt es im Membranbau eine stetige Weiter- entwicklung. Der Einsatz computergestützter Berechnungs- verfahren zu Fragen der Formfindung und Statik dünnwan- diger Flächen sowie die Entwicklung neuer Werkstoffe und Verbindungsmittel ermöglichen heute unter Berücksichtigung

grundlegender Parameter ein weitgehend systematisches Entwickeln dieser textilen Konstruktionen. Will man heute jedoch Antworten zu Fragen der baupraktischen Umsetzung von Membrantragwerken, erhält man diese fast ausschließ- lich über Projektberichte, in denen der Zusammenbau auf der Baustelle sehr verkürzt beschrieben wird. Ausnahmen davon bilden einige wenige, der einschlägigen Fachwelt präsentierte Beispiele.

Ziel des vorliegenden Buches ist daher die systematische Untersuchung des gegenwärtigen Standes der Technik im Realisierungsprozess des Bauens weitgespannter, leichter Flächentragwerke.

Die Orientierung an der realen Konstruktion und deren Errich- tung soll grundsätzliche Zusammenhänge erkennen lassen, wie die Vorgänge Fertigen, Zubringen und Fügen ineinanderfließen und Optimierungspotenziale für den Planungsprozess bilden können. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Beleuchtung der Wechselwirkungen zwischen der Fertigung der einzelnen Materialien, deren mechanischem Verhalten als Werkstoff und dem anzuwendenden Montageverfahren.

Eine Methodenlehre zur Herstellung und Montage von Mem- brantragwerken ist nicht Gegenstand dieses Buches. Sie stellt auch keine rein kompulatorische Beschreibung dieser Techno- logien dar. Den Schwerpunkt bildet vielmehr die Vergegen- wärtigung der komplexen Einflussbereiche, Abhängigkeiten und Zusammenhänge zwischen der Planung und der Real- isierung von Membrantragwerken, wobei auf analytische Fragen der Formfindung und ökonomische Aspekte hinsicht- lich Ressourcenplanung, Kapazitätsmanagement und Kalku- lationsfragen nur bedingt eingegangen werden kann.

Das Buch ist in seinem Aufbau in zwei Hauptteile gegliedert. Im ersten Hauptteil wird über Tragelemente bildende Materi- alien und deren Herstellungsverfahren berichtet. Gliederungs- kriterium dafür ist eine bauteilorientierte Einteilung nach Geometrie und Funktion der Tragelemente. Ausgehend vom stofflichen und strukturellen Aufbau der Materialien werden die verwendeten Werkstoffarten beschrieben und deren Ferti- gungsprozesse erläutert. Überlegungen zu deren Funktion als Tragelement und den prinzipiellen Zusammenhängen aus den Anforderungen von Geometrie und Tragverhalten des Trag- werks fließen ebenso beispielhaft ein wie Erläuterungen zu dessen Zusammenbau.

Zur Verdeutlichung des komplexen Materialverhaltens be- schichteter Gewebe werden die grundlegenden mechani- schen Eigenschaften der überwiegend eingesetzten Gewebe- typen zusammenfassend beschrieben und die Kriterien zur Zuschnittsermittlung und deren Einfluss auf die baupraktische

Umsetzung dargestellt. Ferner werden Möglichkeiten zur Ausführung von Flächenverbindungen, Randausbildungen und Anschlüssen an andere Bauteile besprochen und diese exemplarisch veranschaulicht.

Der zweite Hauptteil des Buches behandelt die Montage von Membrantragwerken und deren Tragelementen. Ausgehend von der planenden Vorausschau des Bauablaufs werden die wichtigsten Montagemittel dargestellt. Der Schwerpunkt liegt hier auf der Beschreibung der Spanngeräte und Spannvorrichtungen für Seile und Membranen. Aufbauend auf die das Montageprinzip beeinflussenden Parameter werden Verfahren zur Errichtung von Membrantragwerken vorgestellt und Montageoperationen systematisch untersucht. Dabei werden die für das einzelne Verfahren jeweils charakteristischen Montageschritte beschrieben und zeichnerisch dargestellt. Ergänzt wird dies durch Abbildungen von Montagearbeiten an umgesetzten Tragwerken.

Schließlich werden der Prozess der Montagedurchführung und die Vorgänge an der Baustelle beschrieben. Von den Vorbereitungsarbeiten und der Vormontage über das Einheben, Einhängen und Vorspannen werden die wesentlichen Abläufe zur Montage der Tragelemente erläutert. Den Schwerpunkt bilden hier die Verfahren zur Krafteinleitung in die Membranfläche. Im letzten Abschnitt findet sich schließlich eine zusammengefasste Übersicht der Methoden und Verfahren zur Messung von Seil- und Membrankräften.

Mit einer abschließenden Diskussion wird zu offenen Fragen Stellung genommen und ein Ausblick über mögliche künftige Entwicklungen gegeben.