

2

Entwurf und Stabilisierung von Hallen und Geschossbauten

2.1 Einleitung

Das **Tragsystem** einer Stahlbau-Halle entsteht aus dem Zusammenbau von Profil-Stäben und Flachprodukten. Dieses Gerippe hat primär die Funktion, einwirkende Lasten aufzunehmen und in die Foundationen abzutragen. Im Weiteren muss die Befestigung von umhüllenden Elementen von Dach und Fassade sowie von inneren Abtrennungen gewährleistet sein. Unabhängig vom zu begrenzenden Volumen bestehen Tragstrukturen aus räumlichen Systemen, die sich unter Lasten dreidimensional verhalten. Hingegen wird der Ingenieur die Tragstruktur sowohl für das Konzept als auch die Bemessung in ebene Systeme der drei räumlichen Achsen aufteilen (Grundriss, Ansicht, Schnitt). Diese Vereinfachung ist bei den häufigsten Hallenkonstruktionen aus Sicht der Kalkulation, Fabrikation und Montage gerechtfertigt. Es gibt hingegen *echte* dreidimensionale Tragstrukturen, bestehend aus Wänden, Schalen, Zelten oder Membrane, welche aufgrund des dreidimensionalen Tragverhaltens grosse Spannweiten zu überbrücken vermögen.

In diesem Kapitel sollen verschiedene Konzepte von Hallentragsystemen aufgezeigt werden. Dabei werden lediglich die Haupttragstrukturen und Verbände behandelt. Konzepte der Sekundärstrukturen von Dach und Wand werden später im Kap. 3 vorgestellt. Hauptsächlich geht es um die Stabilisierung von Hallen und Geschossbauten (Abschn. 2.3 und 2.5). Die Spezialkonstruktionen von Shedbauten werden auch behandelt (Abschn. 2.4). Bezüglich Raumtragwerken (Abschn. 2.6) und besonderen Tragwerken (Abschn. 2.7) werden Beispiele aufgezeigt, ohne die Tragkonzepte immer detailliert darzustellen. Im Anhang A2.1 werden empirische Regeln zur Vordimensionierung aufgelistet. Weitere Hinweise befinden sich im angehängten Literaturverzeichnis [1–3] sowie im Kap. 1 des Buches.

2.2 Aus Ebenen gebildete Tragstrukturen

2.2.1 Form von Strukturen

Eine einfache Halle kann als *Schachtel* betrachtet werden (Bild 2.1a), welche aus sechs Flächen besteht. Die Stahlstruktur und die Eindeckungen werden aus dem

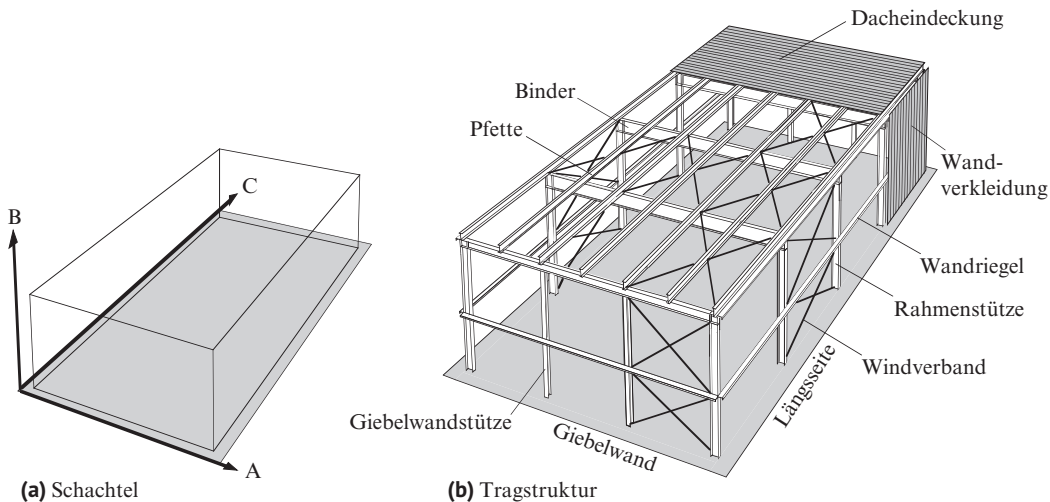


Bild 2.1 Beispiel einer einfachen Halle.

Dach und den vier Wänden gebildet, der Boden wird durch die Fundationen oder einen Unterbau verkörpert. Die Tragstruktur der „Schachtel“ wird in die drei Raumachsen aufgeteilt und besteht aus (Bild 2.1b): Binder und Stützen in Querrichtung (parallel, Ebene AB), dem Dach (parallel, Ebene AC) und den Längswänden (parallel, Ebene BC). Um die Stabilität dieser Schachtel zu gewährleisten, ist es nötig, dass jede der drei Richtungen in ihrer Ebene durch Verbände oder eine Rahmenwirkung stabil ist. Bild 2.1b zeigt das Beispiel des Tragsystems einer Halle, bestehend aus drei Rahmen (Binder und zwei Stützen) und den zwei Giebelwänden, auf welchen die Fassadenriegel und Dachpfetten befestigt sind. Auf diesen eindimensionalen Elementen sind schlussendlich die ebenen Eindeckungen von Dach und Fassade befestigt. Die Stabilität ist in diesem Beispiel durch Windverbände aus gekreuzten Diagonalstäben gewährleistet.

Betrachten wir in groben Zügen verschiedene mögliche Tragsysteme, welche ausgehend von der Standardhalle aus Bild 2.1b für die Form eines Quaders vorgesehen werden können. In der ersten Lösung bestehen die Binder aus Walzprofilen. Bei grösseren Spannweiten werden diese Elemente durch Blechträger oder hohe Fachwerkträger ersetzt (Bild 2.2a). Wenn nun die Pfetten geneigt angeordnet werden, sodass ein Pfettenende auf dem Obergurt des Fachwerkes und das andere Ende auf dem Untergurt des benachbarten Fachwerkes aufliegt, erhalten wir eine Shedkonstruktion (Bild 2.2b). Eine andere Variante einer Shedkonstruktion besteht darin, die Fachwerke selber geneigt anzuordnen und sie paarweise zu einem Dreigurtbinde zu formen, welche auf einem Längsträger aufliegen. Falls die Füllglieder des Fachwerkes durch Profilbleche ersetzt werden, welche in den Gurtungen verbunden sind, erhalten wir die Konstruktion eines Falterwerkes (Bild 2.2d). Schlussendlich können die Fachwerke in Längs- und Querrichtung angeordnet werden und wir erhalten eine zweifach gerichtete Konstruktion als Raumfachwerk, bei welcher die Anzahl der Abstützungen wesentlich reduziert werden kann (Bild 2.2e).

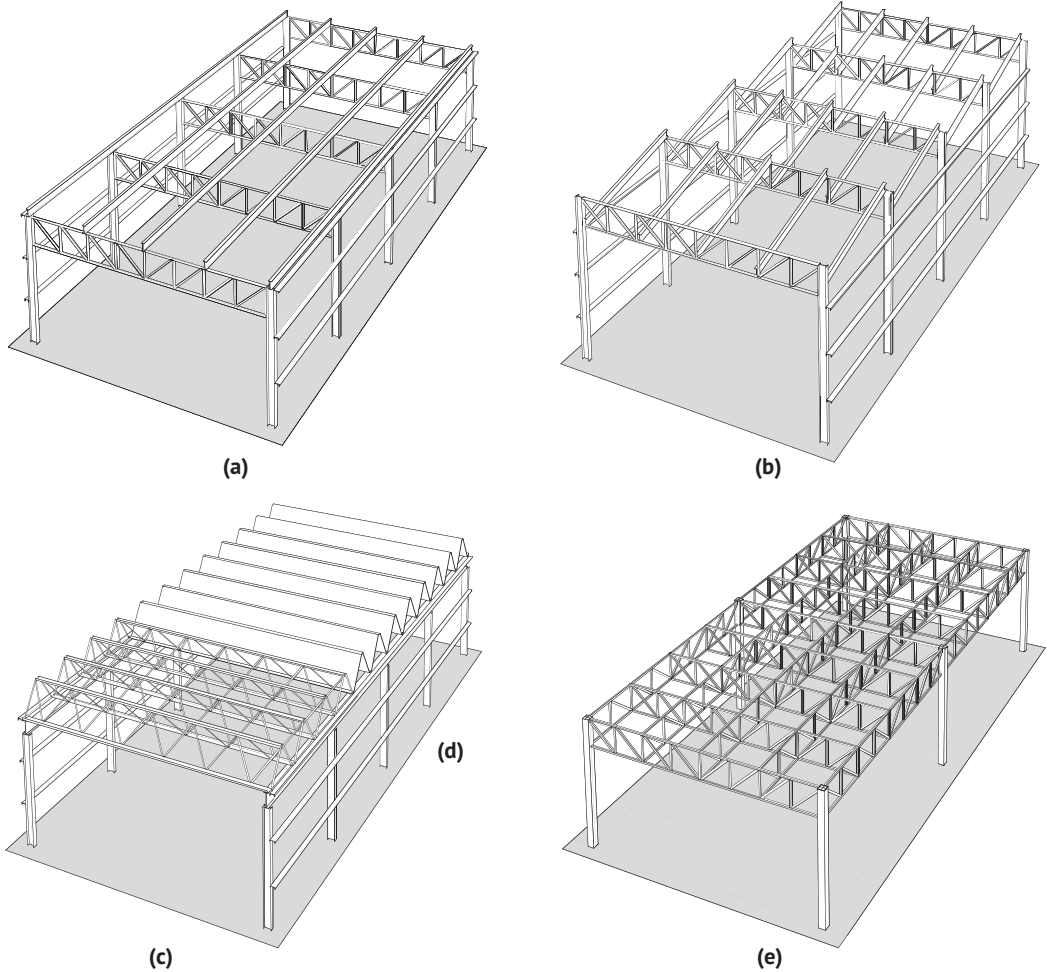


Bild 2.2 Verschiedene Tragstrukturen von Hallen.

2.2.2 Kraftverlauf und Zerlegung der Struktur

Um die Funktion der zugrunde gelegten Halle von Bild 2.1 zu veranschaulichen, zerlegen wir die Tragstruktur in ebene Flächen und beziehen die Abtragung von horizontalen und vertikalen Lasten ein.

Betrachten wir vorerst die auf das Dach wirkenden lotrechten Lasten, z. B. eine verteilte Last q , welche die Schneelast darstellt (Bild 2.3a). Diese Last wirkt via die Dachhaut auf die Pfetten, welche ihrerseits ihre Reaktionen auf die Binder abtragen. Letztere liegen auf den Stützen, welche die Lasten in die Fundationen abgeben; die vertikale Lastabtragung ist somit gegeben.

Betrachten wir jetzt die Windlasten, welche von links seitlich auf die Fassade wirken (Bild 2.3b). Die Wandverkleidung stützt sich auf die horizontalen Wandriegel, welche ihre Reaktionen an die Hallenstützen abgeben. Somit beanspruchen die

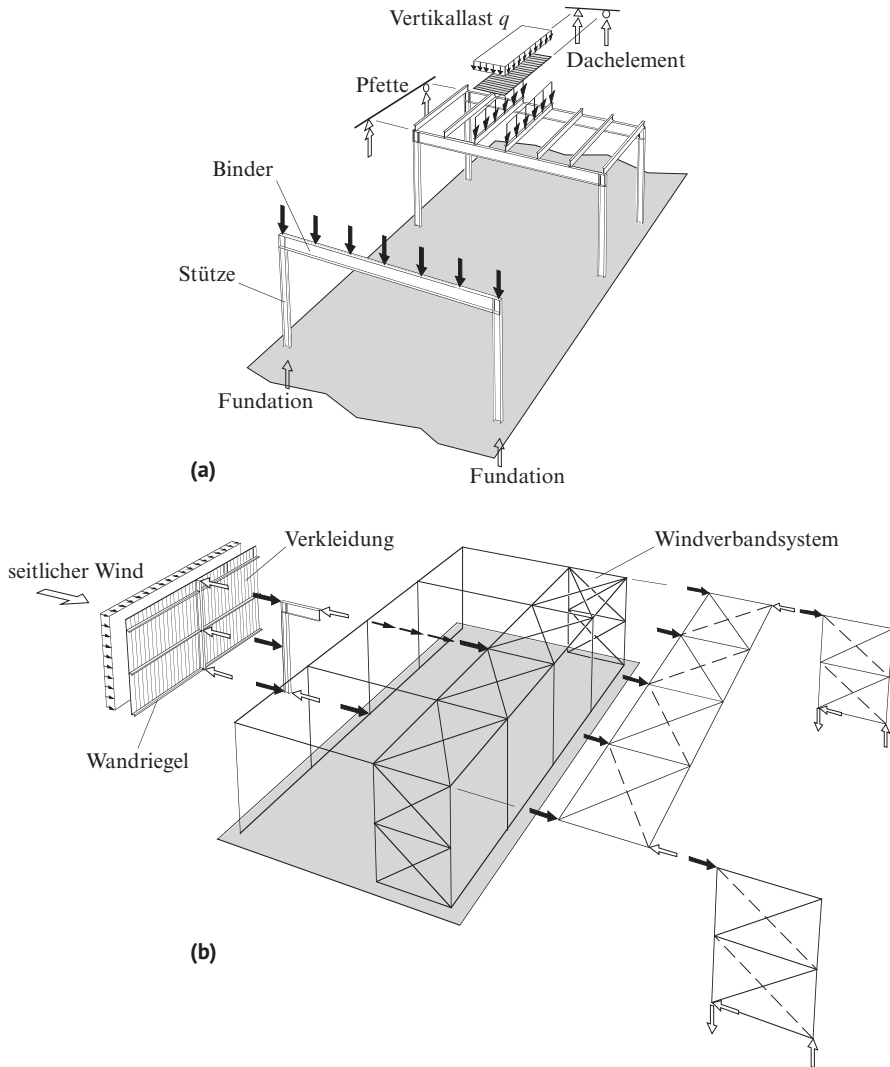


Bild 2.3 Vertikaler und horizontaler Kraftverlauf.

senkrecht auf die Längsseite der Halle wirkenden horizontalen Kräfte den Hallenrahmen seitlich. Letzterer muss also die Lasten in die Fundationen abtragen, wenn nötig mit einem Windverbandsystem (Abschn. 2.3).

Die gleiche Betrachtung kann für in Längsrichtung auf die Giebelwände wirkende Windlasten gemacht werden. In diesem Fall werden nun die Längswände beansprucht. Die Stabilisierung von Hallen wird in Abschn. 2.3 ausführlich behandelt.

Längsfassade. Die direkteste Art, diese Kräfte in die Giebelwandverbände zu leiten, ist ein horizontal liegender Windverband (Bild 2.33a).

Der in Bild 2.33b dargestellte geknickte Längsverband scheint nur auf den ersten Blick stabil, ist es aber tatsächlich nicht. Aufgrund der Änderungen der Ebene des Dachverbandes kann in Wirklichkeit die Kontinuität des Biegemomentes nur durch Torsion der vertikalen Teilflächen erreicht werden. Da aber diese Teilflächen eine vernachlässigbare Torsionssteifigkeit haben, verhalten sie sich wie ein Gelenk. Bild 2.33b zeigt das verformte Bild eines solchen Windverbandes im Grundriss aufgrund der Windeinwirkung. Man könnte dieses System durch Anordnung eines zweiten Zugbandes in der Ebene des inneren Gurtes stabil machen. Trotzdem bleibt die Struktur sehr weich und ineffizient. Sie bleibt ineffizient, auch wenn alle geneigten Ebenen des Daches ausgesteift werden. Die am meisten befriedigende Lösung bleibt diejenige mit dem horizontal verlaufenden Windverband von Bild 2.33a.

2.5 Typische Tragstrukturen von Geschossbauten

2.5.1 Gelenkige Strukturen

Bild 2.34 zeigt die wesentlichen Elemente von Geschossbauten. Der Vergleich mit einer einfachen Halle (Bild 2.1) zeigt eine Analogie der beiden Typen. Die Hauptunterschiede betreffen die Anzahl von Querträgern sowie die Ausführung der horizontalen Verbände als Platten.

Bei diesen Konstruktionen sind alle Verbindungen zwischen den Tragelementen (Träger, Stützen) als Gelenke angenommen (Bild 2.35a). Die auf das Dach und die Böden wirkenden vertikalen Lasten werden über Biegeträger und Druckstützen in die Fundamente geleitet. Die horizontalen Lasten werden über die Böden (Träger und Platten) sowie durch vertikale Verbände im Inneren oder in der Fassade in die Fundamente geleitet. Diese Verbände sind Stahlfachwerke oder Betonscheiben.

Es gibt zwei Möglichkeiten für die Ausbildung der vertikalen Scheiben:

- Die Stützen sind durchlaufend und die Träger sind dazwischengespannte einfache Balken (Bild 2.35b).
- Die Träger sind durchlaufend und die Stützen sind auf jedem Stockwerk unterbrochen (Bild 2.35c).

Manchmal werden Systeme vorgesehen, wo sowohl die Stützen wie auch die Träger als Doppelträger durchlaufend sind. Die Träger werden beidseits der Stützen angeordnet und die Verbindung Träger–Stütze bleibt gelenkig.

Die Vorteile von gelenkigen Verbandssystemen sind:

- Knoten mit einfacher Konstruktion und einfacher Herstellung,
- rasche Montage der Konstruktion,
- einfache und auf Herstelltoleranzen unempfindliche Richtarbeiten,
- im Wesentlichen kompakte Stützen.

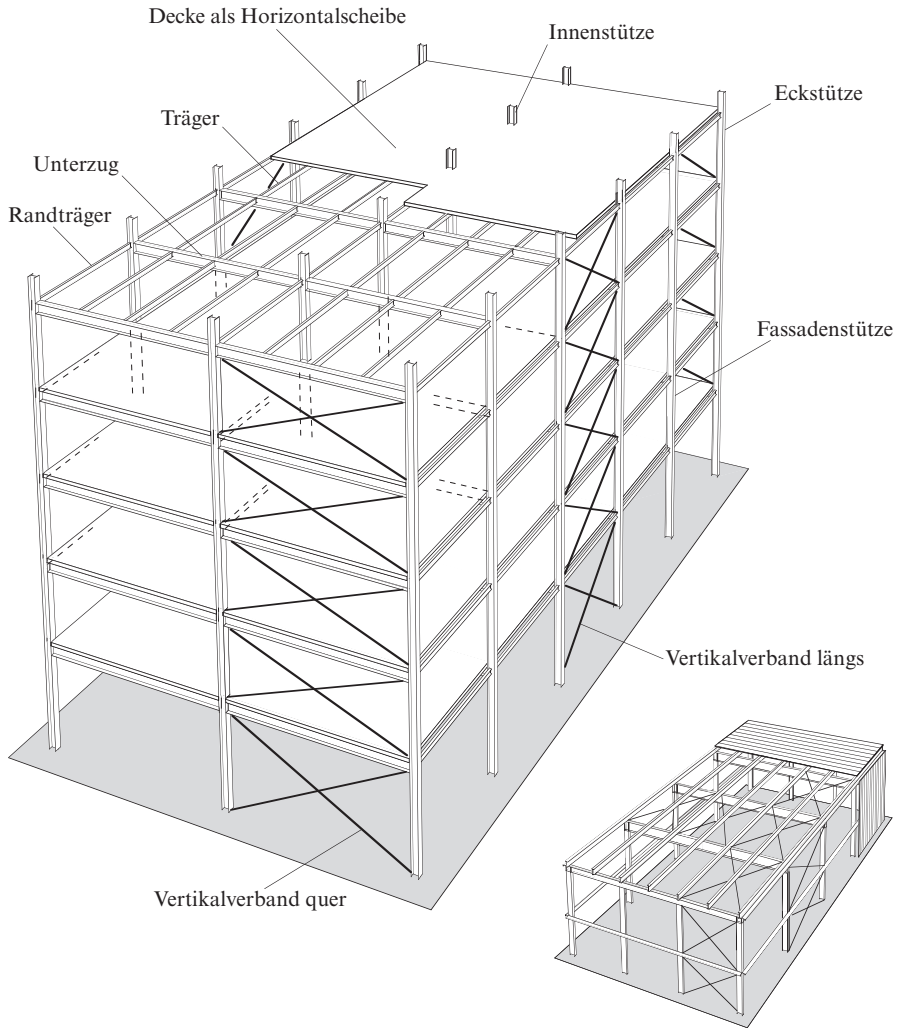


Bild 2.34 Konstruktionselemente eines Geschossbaus.

Die Nachteile sind:

- Träger als einfache Balken haben grosse Querschnitte oder sind durchlaufend als Doppelträger ausgeführt,
- die Durchleitung der Vertikallasten aus den Stützen durch die Bodenträger ist bei einer bestimmten Gebäudehöhe nicht mehr möglich,
- Verbandsstäbe können störend sein.

2.5.2 Tragstrukturen mit zentralem Kern

Bei der Planung der Nutzflächen werden bei Geschossbauten im Kern des Gebäudes Serviceräume ohne Tageslichtbedarf (Archive, sanitäre Anlagen usw.) sowie

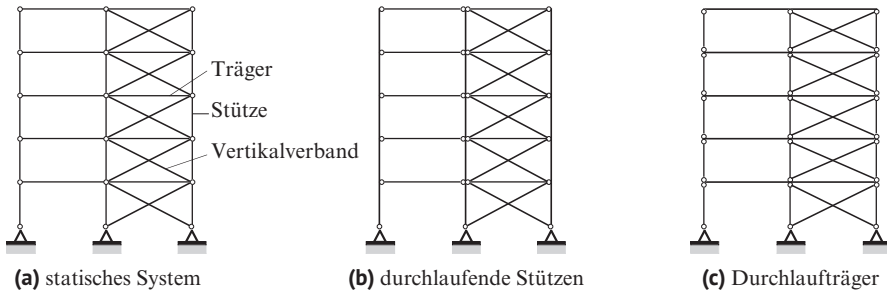


Bild 2.35 Gelenkige und ausgefachte Strukturen.

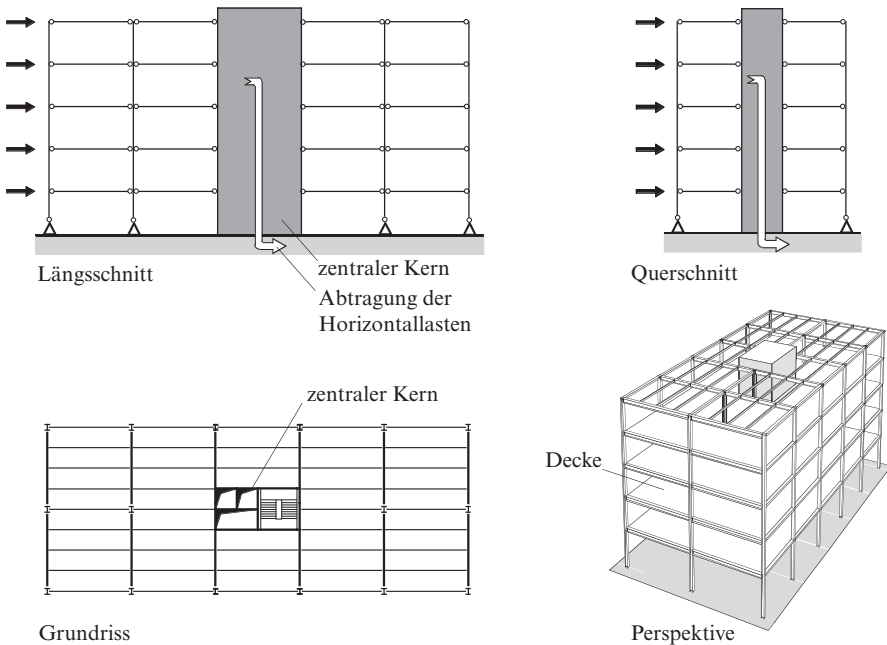


Bild 2.36 Gelenkige Strukturen mit zentralem Kern.

vertikale Erschliessungen (Treppen, Lifte) und Energieträger (technische Fallschächte) angeordnet. Es ist möglich, diese Einrichtungen in Stahlbeton vorzusehen und dabei eine sehr steife vertikale Konstruktion (zentraler Kern) auszubilden (Bild 2.36). Dieser Kern dient dazu, alle horizontalen Lasten aus den Decken und horizontalen Verbänden aufzunehmen. Der zentrale Kern wirkt somit als in den Fundationen oder den Unterbauten eingespannter Kragarm, der auf Biegung und Querkraft, bei exzentrischer Anordnung im Grundriss eventuell auf Torsion beansprucht ist. Die Stahlkonstruktion selbst (Träger und Stützen) nimmt also nur vertikale Kräfte auf. Die Anschlüsse dieser Teile (Sekundärträger, Hauptträger, Stützen) werden gelenkig vorgesehen. Abhängig von den Gebäudeabmessungen ist es denkbar, zwei Kerne oder eine Kombination eines zentralen Kerns und Vertikalverbänden in der Fassade vorzusehen.

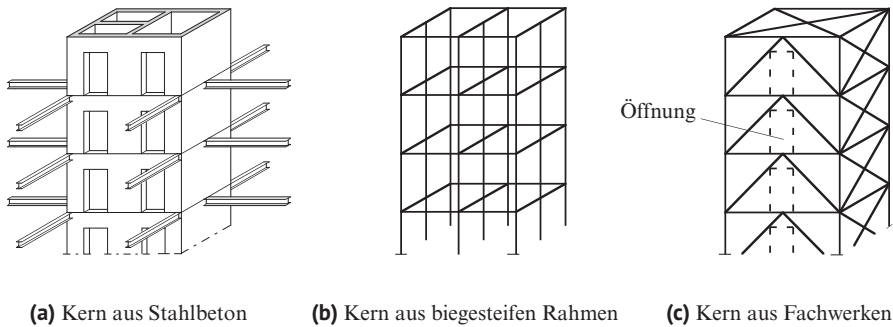


Bild 2.37 Kerne gelenkiger Strukturen.

Der Vorteil von Betonkernen ist ihre grosse Steifigkeit (Bild 2.37a). Die Masstoleranzen und das Schwinden des Betons, das unterschiedliche zeitliche Verhalten von Stahl und Beton ergeben Befestigungsprobleme zwischen Kern und der ihn umgebenden Stahlkonstruktion. Deshalb ist es auch möglich, den Kern vollständig in Stahl zu konstruieren, sei es als mehrstöckige Rahmen (Bild 2.37b) oder als Fachwerke (Bild 2.37c). Die Montage solcher Kerne ist schneller, der Nachteil ist, dass die vertikalen Scheiben aus ihrer Ebene weniger steif sind als Betonwände; dieser Umstand ist für hohe Gebäude zu beachten (horizontale Auslenkung). Die Aspekte des Brandschutzes sind zudem genau zu untersuchen. Es ist auch denkbar, gemischte Kerne als Kombination aus Betonwänden und vertikalen Stahlverbänden vorzusehen.

Um die horizontale Auslenkung an der Spitze von Hochhäusern aus Windeinwirkung (Bild 2.38a) zu reduzieren, braucht es ein wirkungsvolles System. Es geht dabei darum, die Aussenstützen mit einem Fachwerksystem im obersten Geschoss an den Kern zu verbinden und somit an der Gesamtsteifigkeit des Gebäudes zu beteiligen (Hutfachwerk, auch Outrigger-System; Bild 2.38b). Das statische System besteht somit aus dem eingespannten Kragarm (Kern) und einer mit diesem Kern steif verbundenen Traverse (Hutfachwerk), die durch Zugbänder (Aussenstützen) mit dem Boden verbunden ist. Es ist auch möglich, diese Konstruktion zwischen Kern und Aussenhülle auf verschiedenen Zwischengeschossen anzuordnen.

Abgehängte Konstruktionen

Eine abgehängte Konstruktion kann als Spezialfall einer gelenkigen Konstruktion mit zentralem Kern betrachtet werden (Bild 2.39).

Konkret geht es um eine Anzahl Geschosse, welche an ein Hutfachwerk ähnlich der Ausführung von Bild 2.38b aufgehängt sind. Die Auflagerreaktionen der Geschossdecken werden durch Zugstangen nach oben geführt und durch das massive Hutfachwerk an den Kern abgegeben. Im Erdgeschoss schafft man stützenfreie Zonen. Die Bauarbeiten beginnen mit dem Betonkern und werden mit der Montage der Stahlkonstruktion des Hutfachwerkes ab der Spitze des Gebäudes fortgesetzt. Die weiteren Bauelemente werden danach von oben nach unten angehängt. Deshalb müssen die Bodenplatten aus montagetechnischen Gründen eine ausreichende Biegesteifigkeit haben.

3

Pfetten und Fassaden-Unterkonstruktionen

3.1 Einleitung

Pfetten und Fassaden-Unterkonstruktionen sind sekundäre Tragelemente und Bestandteil der Eindeckungen von Gebäuden. Ihre Hauptfunktion besteht darin, die auf Dach und Wand einwirkenden Lasten auf die Haupttragelemente abzutragen. Konstruktive Details von Dach- und Wandeindeckungen können den einschlägigen Produktinformationen entnommen werden. Die Anwendung von hohen Trapezprofilblechen kann je nach statischem Konzept der Dachkonstruktion die Pfetten ersetzen und somit die Abtragung der Dachlasten von Rahmen zu Rahmen übernehmen.

Das Kapitel ist der Bemessung dieser Sekundärelemente gewidmet. Die Basis dazu bildet die Theorie über Biege- und Druckstäbe im *TGC Band 10, Kap. 5 und 6*. Im nachfolgenden Abschn. 3.2 wird die Dimensionierung der Pfetten (Bauteile im Dach) und im Abschn. 3.3 diejenige der Riegel und Fassadenstützen (Bauteile der Fassaden-Konstruktion) aufgezeigt. In jedem dieser beiden Abschnitte werden die Tragfunktion, die betreffenden Einwirkungen und die Gefährdungsbilder bezüglich der statischen Systeme und der Auswirkungen dargelegt. Danach werden die Berechnung der Querschnittswiderstände, der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit geführt. Abschliessend werden im Abschn. 3.4 einige numerische Berechnungsbeispiele von Pfetten und Fassadentragstrukturen gezeigt.

3.2 Pfetten

3.2.1 Funktion der Pfetten

Die Pfetten stützen die Dach-Tragbleche und übertragen die auf das Dach wirkenden Lasten auf die Haupttragstruktur einer Halle. Sie sind parallel zur Längsseite der Halle beziehungsweise in Firstrichtung angeordnet. In der Regel sind sie im gleichen Abstand angeordnet. Firstpfetten bei geneigten Dächern sollen miteinander verbunden werden. Pfetten als Bestandteil eines Dachverbandes (Gurte, Pfosten) müssen speziell dimensioniert und allenfalls verstärkt werden. Traufpfetten können gleichzeitig die Rolle eines Fassadenriegels übernehmen und müssen somit auch

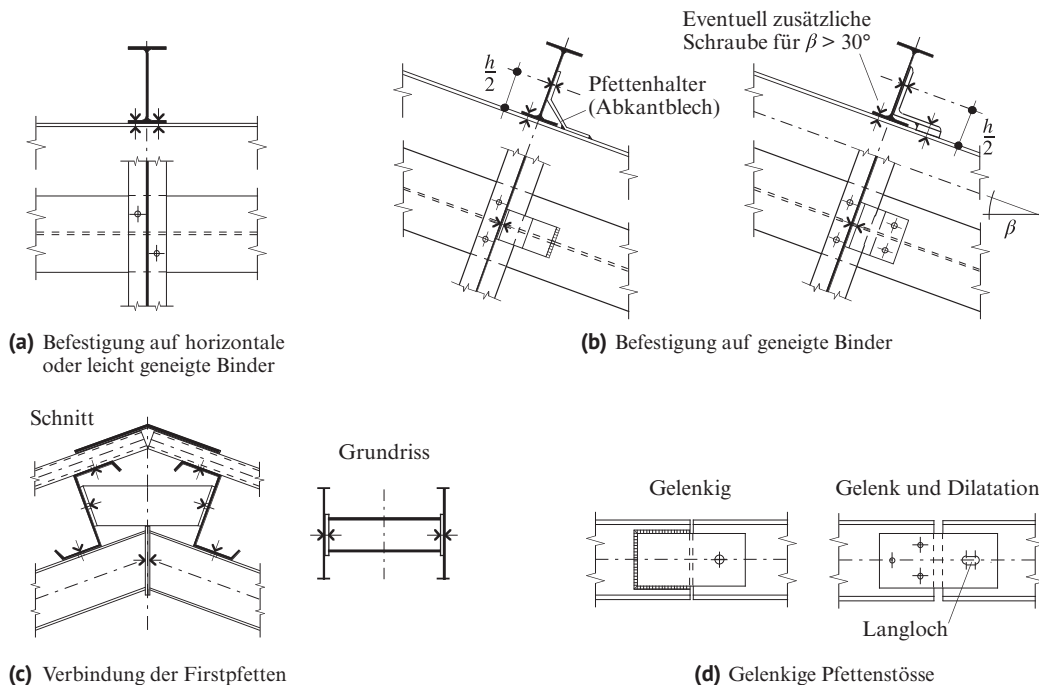


Bild 3.1 Beispiele von Pfettenbefestigungen.

horizontale Windlasten auf die Fassade übernehmen. Bild 3.1 zeigt verschiedene Befestigungsmöglichkeiten auf dem Binder.

3.2.2 Einwirkungen und Gefährdungsbilder

Pfetten übernehmen die folgenden Lasten:

- Eigengewicht der Pfette g_a ,
- Gewicht der Dacheindeckung g_{fin} ,
- Schnee q_s ,
- Wind q_w ,
- abgehängte Lasten q_{susp} oder Q_{susp} .

Die Gravitationskräfte (Eigengewicht, Schnee, abgehängte Lasten) wirken lotrecht, die Windlasten (Sog und Druck) wirken rechtwinklig zur Dachebene. Bei einem Flachdach wirken alle Lasten lotrecht und parallel zum Pfettensteg (Bild 3.2a). Bei einem geneigten Dach können die Pfetten vertikal (Bild 3.2b und Bild 3.3a) oder geneigt (Bild 3.2c und Bild 3.3b,c) angeordnet werden, wobei hier immer ein Teil der Lasten quer zum Pfettensteg wirkt.

Bei einem Flachdach sind die Pfetten auf Biegung um eine Hauptachse und bei geneigten Dächern auf schiefe Biegung um die beiden Hauptachsen beansprucht. Im Weiteren kann in beiden Fällen gleichzeitig eine Normalkraft vorhanden sein,

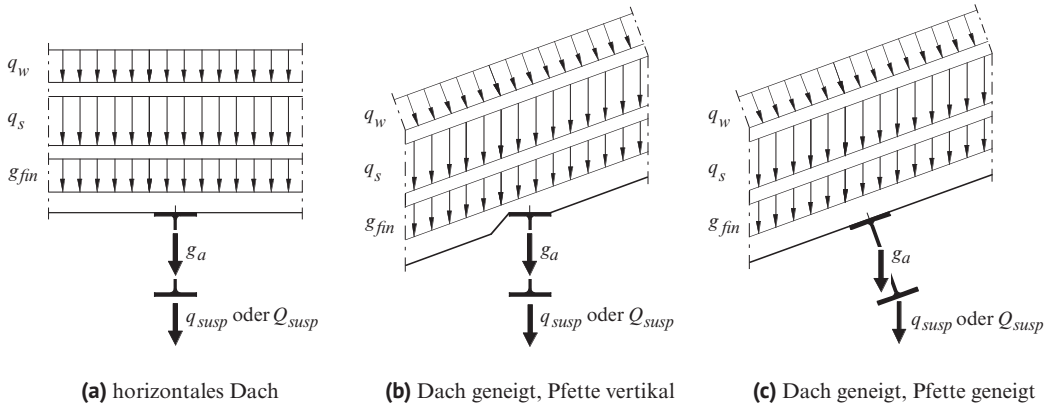


Bild 3.2 Kräfte auf Pfetten.

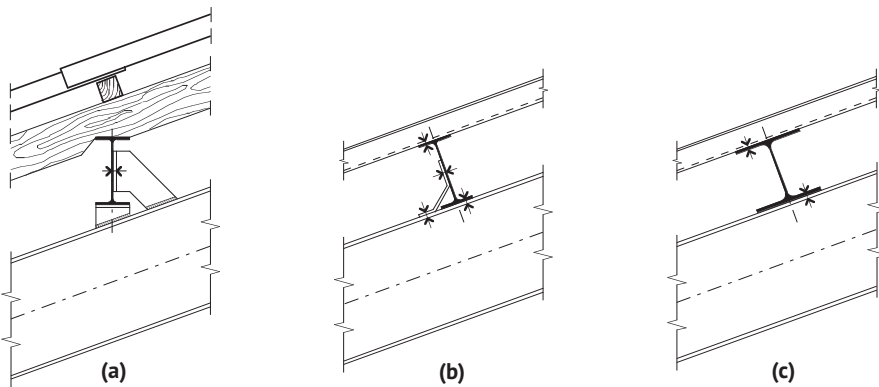


Bild 3.3 Befestigung von Pfetten auf geneigten Dächern.

wenn die Pfetten Bestandteil eines Windverbandes sind oder als seitliche Halterung eines Tragelementes dienen (z. B. Rahmenbinder).

Gefährdungsbilder und zugehörige Lasten sind in der Tabelle 3.1 zusammengestellt.

Tab. 3.1 Mögliche Gefährdungsbilder und Lastfälle für den Tragsicherheitsnachweis.

Gefährdungsbild	Nr.	Lastfälle		Veränderliche Lasten		
		Ständige Lasten	Nutzlast	Schnee	Wind	
Nutzlast	1	$g_a + g_{fin}$	Leiteinwirkung	—		Begleiteinwirkung
Schnee	2	$g_a + g_{fin}$	—	Leiteinwirkung		Begleiteinwirkung
Wind	3	$g_a + g_{fin}$	—	Begleiteinwirkung		Leiteinwirkung
Windsog	4	$g_a + g_{fin}(\gamma_{G,inf})$	—	—		Leiteinwirkung

Der Fall 1 entspricht beispielsweise einem begeh- oder befahrbaren Dach, als Ausstellungsfläche oder als Helikopterplattform. In den anderen Fällen (ohne Nutzlast) sind die Dächer nur für Unterhaltsarbeiten begehbar. Diese Nutzlast von 0.4 kN/m^2 gemäss Norm SIA 261 ist in der Regel einzurechnen. Im Fall 2 kann der Wind vernachlässigt werden, sofern Sog vorherrscht; der Fall 3 kann zutreffen bei geeigneten Pfetten oder wenn diese ein Bestandteil eines Verbandes sind; im Fall 4 haben wir Windsog auf dem Dach und deshalb muss das Eigengewicht mit dem Lastbeiwert $\gamma_{G,inf} = 0.8$ berücksichtigt werden.

3.2.3 Statische Systeme

Für statische Systeme von Pfetten gibt es mehrere Möglichkeiten: einfacher Balken, Gelenkträger (oder Gerberträger) und Durchlaufträger.

Der *einfache Balken* (Bild 3.4a) hat eine grössere Bauhöhe und schlechtere Materialausnutzung infolge der grösseren Durchbiegungen und wird deshalb auf dem Binder aufliegend selten eingesetzt. Die Verwendung als Teil eines Dachfachwerkes ist denkbar (mit grösserem Profilquerschnitt). Hingegen sind für eingesattelte Pfetten mit an der Oberkante bündigen Flanschen von Pfette und Binder einfache Balken eine sinnvolle Lösung; hier lassen sich gelenkige Anschlüsse mit sogenannten „Fahnenblechen“ auch montage-technisch wirtschaftlich ausführen.

Der *Gelenkträger* (Bild 3.4b) hat im Gegensatz zum Stahlbau beim Holzbau noch heute seine Bedeutung. Eine intelligente Anordnung der Gelenke erlauben einerseits einen Momentenausgleich der Stützen- und Feldmomente und andererseits die Deformationen des statisch bestimmten Systems in der Größenordnung eines Durchlaufträgers zu erreichen. Mit Bezug auf die plastische Bemessung im Stahlbau sind allerdings die Vorteile von Gelenkträger illusorisch. Die heutigen Möglichkeiten von geschraubten und geschweissten Verbindungen erlauben eine einfachere Ausführung von Durchlaufträgern als früher. Im Weiteren muss festgehalten werden, dass für dieses statisch bestimmte System ein Ausfall einer einzigen Pfette (Brand, Explosion) das Versagen der gesamten Dachkonstruktion zur Folge haben kann.

Der *Durchlaufträger* ist das am meisten verbreitete System. Die Pfetten können auf die gesamte Hallenlänge durchlaufend sein (Bild 3.4c); sie können abhängig von den Fabrikations- (bis 18 m) oder Transportlängen (bis 30 m) auf zwei oder drei Felder ausgelegt sein (Bild 3.4d). Die Konstruktionsdetails von Bild 3.4e zeigen verschiedene Varianten: Gelenke über den Auflagern (Detail 1), Gelenke im Feld (Detail 2), den biegesteifen Stoss eines Durchlaufträgers (Detail 3).

Im Falle von Durchlaufträgern über zwei oder drei Felder empfiehlt es sich, die Pfetten versetzt auf den Bindern anzuordnen wie in Bild 3.5 dargestellt (Beispiel mit Zweifeldträgern). Dadurch wird die Summe der Auflagerkräfte der Pfetten auf benachbarte Binder praktisch gleich.

Bei Mehrfeldträgern mit gleichen Spannweiten sind die Reaktionen auf das erste Innenaufleger grösser als auf die weiteren Innenaufleger. Es können folgende Massnahmen getroffen werden: