

## **Rechtzeitige Einbeziehung der Fertigungs- und Montageplanung in die Entwurfs- und Ausführungsplanung**

**Rüdiger Schidzig**

*SZG – Engineering, Nürnberg*

**Zusammenfassung:** Dieser Beitrag befasst sich mit der Diskussion der rechtzeitigen Einbeziehung der Fertigungs- und Montageplanung in die Entwurfs- und Ausführungsplanung anhand von ausgewählten Beispielen.

### **1 PROLOG**

Die nachfolgenden Ausführungen entstanden aus der durchlebten Erfahrung jüngerer und zum Teil noch laufender Bauprojekte und zeigen einen seit langem entwickelnden Trend in der ingenieurtechnischen Bearbeitung von Bauaufgaben auf, der ein konsequentes Umdenken und die Aufwertung ingenieurmäßigen Handelns in der Projektabwicklung erfordert. Bauherren, Bauindustrie, Planer und Ausführende erleben nach langen Jahren der Konjunkturschwäche unter dem aktuellen Bauboom eine Nachfrage an gut ausgebildeten Ingenieuren und die Notwendigkeit umfassenden Fachwissens und übergreifender guter Planung.

Wenn heute bereits wieder vermehrt die gute Ingenieurausbildung junger engagierter Ingenieure zu beobachten ist, so ist das Defizit durch Stellenabbau und Rückgang des Ingenieurwachstums der vergangenen Jahre nicht so schnell auszugleichen. Unter dem wirtschaftlichen Druck und dem enormen Preisverfall haben die Unternehmen und die im Baubereich tätigen Behörden ihren Weg durch Outsourcing ihrer technischen Abteilungen und Verlagerung des Ingenieur-Know-Hows in Ingenieurbüros gesucht, die bald unter noch größerem wirtschaftlichen Druck die entstandene Lücke sowohl personell und in Konsequenz auch fachlich nicht ausfüllen konnten. Baumaßnahmen sind durch Termin und Kostendruck geprägt und werden durch Vertragsmanagement gesteuert.

Die Bauentwürfe werden heute durch meist namhafte Architekturbüros mit der Unterstützung von Statik-erfahrenen Ingenieurbüros entwickelt. Planungen zur praktischen Umsetzung folgen erst im Nachlauf und werden in den Vergaben der Bauleistungen Unternehmen aufgedrückt, die unter dem Preisdruck diese Planungen mitmachen müssen.

Die scheinbar unbegrenzten Möglichkeiten heutiger Rechner und EDV-Software ermöglichen in der Architektur kühne und ästhetische Strukturen, im Industriebau wird die 3-D-Planung zur Aktivierung der letzten Systemreserven und zur Reduzierung der Tonnagen an Stahlkonstruktionen genutzt.

Bei der statischen Berechnung werden komplette Bauwerke in Programme wie R-Stab oder Sofistik „geklopft“. Systeme mit mehr als 1.000 Stäben und Knoten sind keine Seltenheit. An den Freiheitsgraden der Knoten und Stabenden wird im Entwurf so lange nachgebessert, bis das Rechenprogramm im Durchlauf nach Theorie 2. Ordnung gerade noch ein Gleichgewicht findet. Danach wird noch die Funktion Profilloptimierung aktiviert und das letzte aus dem theoretischen Modell herausgequetscht. Konstruktive Detaillösungen für die Ausführung und die Betrachtung funktionaler Belange sind selten geworden.

Konnte sich die Bauwirtschaft in der Vergangenheit darauf verlassen, dass Bauentwürfe auch bezüglich der Bauausführung durchdacht und bestenfalls sogar durchgeplant waren, so zeigt die Ausführungsplanung heute vermehrt Strukturen, die nur im dreidimensionalen Endzustand funktional und tragfähig sind.

Der Weg in den Endzustand erfolgt jedoch über Bauzustände und Fertigungseinheiten. Hierdurch werden Eigenspannungen und Tragsysteme in die Konstruktion eingepreßt, die oft deutlich von dem spannungsfreien Gesamtsystem des Bauentwurfs abweichen.

Die Folge bedeutet oft Umplanungen und Umbemessungen der Konstruktion die bis in die Korrektur der Lastannahmen, der statischen Lastabtragung, ggf. Fundamentierung und Gebrauchstauglichkeit gehen können.

Eine ursprünglich wirtschaftlich optimierte Planung und Ausschreibung entpuppt sich durch notwendige Korrekturen des Bauentwurfs nicht selten als Grundlage für geänderte Bauausführungen und Verlängerung der Ausführungstermine mit den damit verbundenen Folgekosten.

## **2 LASSEN SICH AUSFÜHRUNGSTECHNISCHE BELANGE IN DIE ENTWURFSPLANUNG INTEGRIEREN OHNE AUF EINE ANSPRUCHSVOLLE ARCHITEKTUR ODER OPTIMIERUNGEN ZU VERZICHTEN?**

Die Frage lässt sich nicht nur mit einem klaren „JA“ beantworten, sondern die Berücksichtigung ausführungstechnischer Belange ist zwingend erforderlich, wenn ein Entwurf auch wie geplant umgesetzt und die Ästhetik beibehalten werden soll.

Es ist ein Iterationsprozess. Jedes Bauwerk und sei es statisch noch so herausfordernd, hat einen Zweck zu erfüllen. Die Straßenbrücke nimmt den Verkehr auf, der Architekturbetonte Bau eines Verkaufshauses ist oft Show-Bühne für Ausstellungen und Spiegel von Lebensstil, Qualität und Exklusivität, der Anlagenbau ist rein funktional und soll möglichst flexibel für sich weiterentwickelnde Anlagentechnik anpassbar sein.

Die sich hieraus ergebenden Grundanforderungen sind in der Wahl des Tragwerks und der Baustoffe zu berücksichtigen. Der Konstrukteur macht sich bereits im Entwurf Gedanken über die Gebrauchstauglichkeit und Langlebigkeit des Bauwerks.

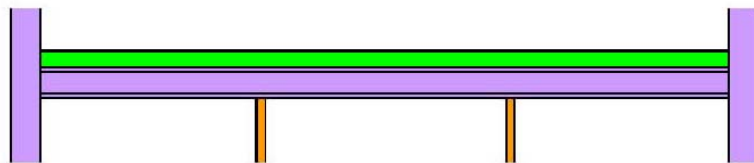
So ist es ohne weitere Erklärung für einen umsichtigen Konstrukteur selbstverständlich, z.B. bei notwendigen Baufugen die Ausbildung durch den kompletten Fugenverlauf zu betrachten, vom Tragwerk durch den Fassaden / Dachaufbau und ggf. der Haustechnik. Sind die Gewerke in der Planung jedoch getrennt oder verschiebt sich je nach Lösungsmöglichkeit der Aufwand an der Schnittstelle, so ist eine optimale Gesamtlösung nachträglich meist aufwendig nachzuholen.

### 3 BAU – UND MONTAGEZUSTÄNDE

Genauso wichtig ist die Herstellung und Errichtung.

Welche Bau- und Montagezustände durchläuft das Bauwerk. Welche Lasten treten dabei auf und welche statischen Systeme stellen sich dabei ein. Ist der in der statischen Berechnung gerne gewählte „schlanke“ Durchlaufträger konstruktiv für die Ausführung und funktionale Betrachtung tatsächlich die günstigste Wahl?

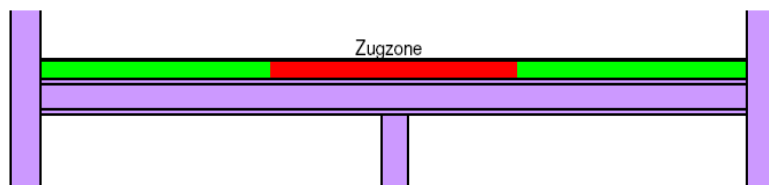
Anhand eines einfachen Parkhausträgers in Verbundbauweise lassen sich die Einflüsse unterschiedlicher Systeme und Herstellverfahren bis in die Auswirkungen auf die Gebrauchstauglichkeit demonstrieren, siehe Abb. 1-3.



Die Tragwirkung tritt mit sofortigem Verbund nach Wegnahme der Stützen ein.

Der Verbundquerschnitt hat eine hohe Anfangssteifigkeit und somit geringe Anfangsdurchbiegungen.  
Die Langzeitverformungen aus Kriechen und Schwinden sind schwer beherrschbar.  
Beim Freisetzen der Unterstützungen wird der Beton quer zum Träger stark belastet.

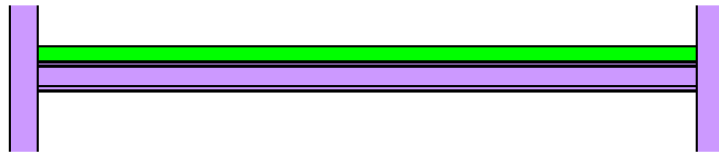
Abbildung 1: Verbundträger als Einfeldträger zum Betonieren unterjocht



Die Verbundtragwirkung wird nur in den Druckzonen ausgenutzt.

Die Ribbildung in der Zugzone des Betons wird durch Kriechen und Schwinden langfristig vergrößert

Abbildung 2: Verbundträger als Durchlaufträger



Das Gewicht des Frischbetons wird alleine von den Stahlträgern getragen.  
Die Stahlträger werden wegen der großen Durchbiegungen infolge des Betongewichtes stark überhöht.  
Lediglich die Verkehrslasten werden durch die Verbundtragwirkung aufgenommen.  
Der Beton bleibt auch langfristig nahezu Rissefrei. Die Gebrauchstauglichkeit ist deutlich verbessert,  
Die Bemessung der Grenztragfähigkeit des Verbundquerschnitts führt zu gleichen Traglasten wie  
bei dem unterjochten Einfeldträger mit sofortigem Verbund.  
Die großen Auflagerdrehwinkel während des Betonierprozesses sind konstruktiv zu ermöglichen

Abbildung 3: Verbundträger als Einfeldträger ohne Unterstützung beim Betonieren

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz eines Verbundträgers ist der VFT- Brückenträger, siehe Abb. 4-6:



Abbildung 4: Versetzen von VFT-Brückenträgern



Abbildung 5: Der VFT-Brückenträger mit werkseitig aufbetonierter und im Bauzustand mittragender Verbundplatte. Die Verbundplatte dient als Schalung und wird mit Ortbeton ergänzt.



Abbildung 6: Koppelung zweier VFT-Brückenträger zu einem Durchlaufträger. Der Stoßbereich über dem Mittelauger wird später als Auflagerquerträger in Beton ausgeführt und vergossen.

Im Anlagenbau ergeben sich sehr oft Zwischenzustände durch das Einheben von Anlagenteilen oder ganzer Komponenten während der Bauphase.

So müssen Rahmensysteme oft für den Einhub der Komponenten offen bleiben, siehe Abb. 7-8.



Abbildung 7: Anlagenteile werden auf Konstruktionsteilen temporär abgestellt, die im Endzustand diese Lasten nicht tragen brauchen.



Abbildung 8: Das Tragsystem hat in Zwischenzuständen bereits die Lasten aus dem Silo aufzunehmen. Weitere Einflüsse der Montage auf die grundsätzliche Systemwahl und statische Berechnung.



Abbildung 9: Fachwerkbrücke im Bauzustand auf Rüsttürmen



Abbildung 10: Transportabmessungen bestimmen Montageeinheiten

Aus jeder Montagetechnik entstehen Bauzustände. Unter Bauzuständen sind alle Zwischenzustände bei der Errichtung eines Bauwerks zu verstehen, die einen Bau- bzw. Leistungsabschnitt beschreiben, der für sich standsicher sein muss.

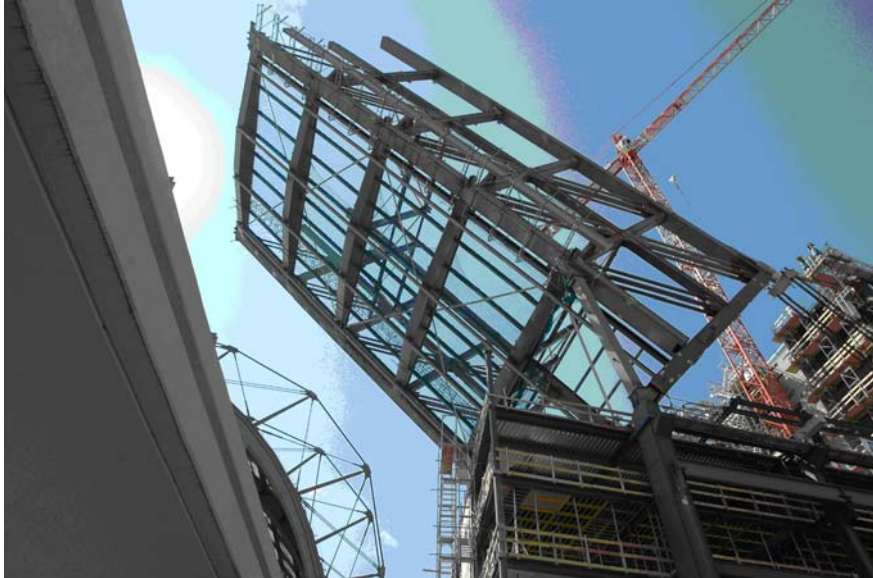


Abbildung 11: Umklappen der Bügelbauten beim Lehrter Bahnhof



Abbildung 12: Einschwimmen einer Bogenbrücke über den Main

Diese Untersuchungen sollten grundsätzlich zu einer umfassenden Tragwerksplanung gehören und sind von dem aufstellenden Statiker bereits im Entwurf und im Basic Engineering zu erbringen.



Abbildung 13: Beispiel für einen Bauzustand: Verschiebung einer Stahlskelettkonstruktion

Die reinen Montagezustände, die sich z. B. durch das Aufrichten und Einbauen eines vormontierten Fachwerkträgers ergeben, sind temporäre Beanspruchungen, die aus der eingesetzten Hebetchnik und manuellen Anwendung durch das Montagepersonal entstehen. Diese Zustände, die ebenfalls sehr komplex sein können und in der Ausbildung der Konstruktionsteile berücksichtigt sein müssen, gehören in die Montagenachweise und Montageanweisungen und sind i. d. R. durch das für die Montageplanung verantwortliche Unternehmen zu erbringen. Erfordern diese Nachweise jedoch Eingriffe in die konstruktive Ausbildung, so sind sie rechtzeitig in der Werkstattplanung vorzunehmen und die Rückwirkungen ggf. in der Ausführungsplanung nachzuführen.

Ein nicht zu unterschätzender Aspekt der Systemwahl ist die Flexibilität für spätere Änderungen in den Funktionsanforderungen.

Geht einer Brücke in der Regel eine langfristige und sorgfältige Planung voraus, lebt der Industrie- aber vor allem der Anlagenbau mit einer permanenten oft sogar baubegleitenden Funktionsplanung. Anlagenkomponenten werden bis zuletzt auf den neuesten Stand gebracht. Die Tragstruktur des Stahlbaus ist den Komponenten anzupassen. Lasten, Lasteinleitungsstellen und Trägerlagen ändern sich und erfordern oft sogar mehrfache Anpassungen noch im oder nach dem Montageprozess.

Wurden hier ungeschickte „optimierte“ vielleicht auch noch räumlich integrierte Systeme gewählt, so ist der Änderungsumfang meist enorm und steht in keinem Verhältnis zu dem auslösenden Ereignis, oft nur einer kleinen Verschiebung einer Anlagenkomponente.

Es empfiehlt sich, die Haupttragstrukturen von den Funktionsebenen zu trennen und die Funktionsebenen flexibel anpassbar und unabhängig zu gestalten.



Abbildung 14: Beispiel Montagezustand: Absteifung des Fachwerkträgers auf dem Lehrgerüst

#### 4 WERKSTATTGERECHTE AUSFÜHRUNGSPLANUNG

Der in der werkstattmäßigen Fertigung erforderliche Aufwand hängt bereits wesentlich von den in der Entwurfs- und Ausführungsplanung gewählten statischen Systemen ab.

Im Zeitalter der uneingeschränkten elektronischen Berechnungen werden gerne komplexe Strukturen gewählt. Im Stabwerksprogramm ist es nur ein Knotenpunkt an dem ohne weiters viele Stäbe angreifen können. Die Stabrandbedingungen sind meist auch noch „räumlich biegesteif“ mit in allen Richtungen gesperrten Freiheitsgraden vorinstalliert. Der Rechenlauf ermöglicht in kürzester Zeit Schnittgrößen in allen Beanspruchungsrichtungen.

Bei der konstruktiven Umsetzung zeigen sich jedoch die Folgen:

Sind die Hauptprofile noch biegesteif durchzubinden, müssen auch alle abgehenden Profile biege- und torsionssteif angeschlossen werden. Kommen hier mehr als 4 Stäbe zusammen oder treten schiefe Winkel auf, beginnt bereits die Herausforderung des Konstrukteurs. Aus dem „idealen“ Knoten wird eine räumlich ausladende Konstruktion. Die Übereinstimmung der Randbedingungen für die Stabanschlüsse mit dem Rechenmodell bedarf bereits einer Überprüfung, siehe Abb. 15.

Der werkstattmäßige Herstellungsaufwand, solche Knotenverbindungen zu fertigen, sprengt jeden vorkalkulierten Stundenbedarf ebenso wie auch die Fehleranfälligkeit steigt. Das lange Zeit verbreitete Verhalten, aufwendig geplante Konstruktionsteile im Ausland fertigen zu lassen, ist längst keine Lösung mehr. Die Produktionskosten qualitativ akzeptabler

Betriebe im Ausland haben das inländische Niveau bereits eingeholt und die Kapazitäten sind ausgeschöpft.

Räumliche Schrägschnitte an Profilen sind unter normalen Sägen und Sägebohranlagen nicht herstellbar. Kleinste Winkelfehler bedeuten Klaffungen an Kopfplattenanschlüssen. Die Möglichkeiten zum Toleranzausgleich sind meist auf Futterbleche beschränkt.

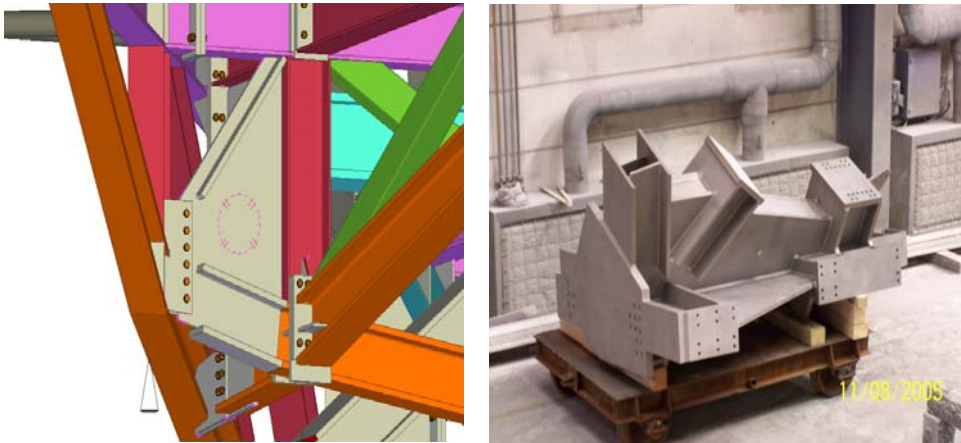


Abbildung 15: Beispiele für komplexe räumliche Anschlußkonstruktionen

Entwickelt der Tragwerksplaner bereits im Entwurf fertigungs- und montagegerechte Knotenausbildungen, so kann er die Stabendbedingungen bereits in der Ausführungsstatik richtig berücksichtigen. Auch ein erfahrener Statiker wird dabei den „klassischen“ Einfeldträger schätzen lernen und Profilgrößen auf einander abstimmen.

Umgekehrt ist bei der Einführung von Gelenken in der Konstruktion aber auch darauf zu achten, dass sich die Gelenkwirkung auch einstellen kann. Treten wie in dem Beispiel des Parkdeckträgers große Drehwinkel auf, ist auch sicher zu stellen, dass keine Zwangsspannungen entstehen und z.B. Fahnenbleche aufreißen oder Schrauben überbeansprucht werden.

Die fertigungsgerechte Konstruktion kann durch gleichmäßige Profilwahl unterstützt werden. Durch gleiche Profilhöhen verspringen die Systemlinien nicht. Anschlüsse lassen sich standardisieren. Wird vielleicht geringfügig mehr Tonnage bei den Profilen benötigt, so zahlt sich diese Investition durch vereinfachten Fertigungs- und Montageaufwand und kürzere Ausführungszeiten mehrfach wieder aus. Zudem können günstigere Materialkosten bei der Abnahme von Walzmengen gegenüber Kleinmengen vom Lager genutzt und Lieferzeiten verkürzt werden.

Allein auf Minimierung der Tonnage getrimmte Statik führt nicht automatisch zu günstigen Baukosten. Erhöht sich der Aufwand in der Realisierung komplizierter Einzeldetails, geht der Serieneffekt verloren und führt zu höheren Herstellungskosten und nicht selten gerät der komplette Terminplan aus dem Takt.



Abbildung 16: Einfacher Anschluss eines Einfeldträgers mit Fahnenblech



Abbildung 17: Flanschbiegung aus ungewollter Zwangseinspannung

Im nachfolgenden Ausbau setzt sich der Einfluss fort, wenn Trägerbreiten nicht konstant sind oder Untergurte höhenmäßig ständig verspringen und die Haustechnik um ausladende Knotenverbindungen herumkonstruiert werden muss; von unterschiedlichem oder ungünstigem Verformungsverhalten ganz zu schweigen.

Mängel in der Ausführung und Störungen im Bauablauf sind nicht meistens auf unzureichende oder einseitige Planungen zurückzuführen.

## 5 SCHLUSSBEMERKUNGEN

Gutes Konstruieren erfordert Erfahrung, übergreifende Erfahrung über die Funktionsanforderungen, Bauverfahren und Baustoffe, die Statik, Herstellung und Montage. Fachwissen über angrenzende Gewerke ist unumgänglich.

Die Erfahrung wächst stetig mit jeder neuen Aufgabe. Große, anspruchsvolle Bauaufgaben erfordern zur Bewältigung der anstehenden Leistungen oft über lange Jahre angesammeltes Fachwissen.

Die 3-D Konstruktions- und Statikprogramme werden wegen der speziellen Anwendung und schnellen Entwicklung aber auch unter dem Kostendruck meist von jungen Ingenieuren bedient. Die Rechenergebnisse sind bei sehr komplexen Strukturen nur noch durch Vergleichsrechnungen zu beurteilen.

Durch die sowohl zeitliche wie auch räumliche Trennung zwischen der Entwurfs- und Ausführungsplanung einerseits und der praktischen Umsetzung mit der Werkstatt- und Montageplanung andererseits, findet der für eine gelungene Gesamtplanung erforderliche Austausch von Know How immer seltener statt.

Gehemmt wird der Dialog zusätzlich durch meist unterschiedliche kommerzielle Ausrichtungen und Aufgabenstellungen.

Um für die Zukunft dem Anspruch moderner Architektur, qualitativ hochwertiger Bauausführung und kurzen Bauzeiten gerecht zu werden, ist ein Umdenken und Zusammenrücken unter den Bau- und Planungsbeteiligten erforderlich.

Den Leistungen der Ingenieure in der Planung und Ausführung ist wieder mehr Bedeutung einzuräumen. Die Notwendigkeit hierzu ist von den Planungsstellen und ausführenden Unternehmen bereits erkannt. Der Austausch von Wissen und die Ausbildung an Hochschulen und Universitäten sind in der Praxis fortzuführen und von den Verbänden, der Industrie und die Behörden vermehrt zu fördern.

Wenn die „Kunst“ des Bauens gepflegt wird, behalten unsere Bau- und Stahlbauwirtschaft und die Berufe des Bauingenieurs und des Architekten eine erstrebenswerte Zukunft. Unsere Bauwirtschaft kann hierdurch Ihre Spitzenstellung an Technologie und Anerkennung festigen und ausbauen.

Um dem Titel dieses Aufsatzes gerecht zu werden möchte ich mit folgendem Leitspruch schließen, den ich seit Beginn meiner Ingenieurkarriere zu respektieren gelernt habe:

*„ Mit der statischen Berechnung kannst du beweisen, dass du gut konstruiert hast.“*

## **6 DANKSAGUNG:**

Herzlichen Dank an die Firmen Donges und Max Bögl für die freundliche Bereitstellung der Fotos.