



Produktionsplanung und Produktionssteuerung komplexer Baustellen

C. Gipperich, S. von Mammen

ZUSAMMENFASSUNG Die steigende Komplexität großer Bauprojekte erfordert eine Weiterentwicklung der Produktionsplanung und -steuerung im Bauwesen. Ausgehend vom Stand der Technik zur Terminplanung, Arbeitsvorbereitung, BIM, Lean Construction und bestehenden Simulationsansätzen werden die Anforderungen an ein dynamisch adaptives Produktionsmodell hergeleitet, das Bauwerk und Bauproduktion integriert in einem System abbildet. Der Beitrag entwickelt Transparenz und Simulationsfähigkeit als zentrale Systemeigenschaften. Transparenz wird durch die gemeinsame digitale Abbildung von Bauwerk und Bauproduktion mit Bauablauf, Ressourcen, Logistik und Bauzuständen ermöglicht. Simulationsfähigkeit erweitert diese Grundlage um die Möglichkeit, Ablaufvarianten, Störungen und Steuerungsmaßnahmen vor ihrer Umsetzung zu bewerten. Für die mögliche technische Umgebung solcher Produktionsmodelle werden Game-Engine-basierte Technologien eingeordnet. Mit dem Vierphasenmodell wird ein Ansatz zur bedarfsorientierten Vertiefung der Produktionsplanung und zur frühen Prüfung der Baubarkeit vorgestellt. Zudem wird ein Konzept für die integrative Kopplung von Bauwerksplanung und Produktionsplanung vorgelegt. Darauf aufbauend wird der Produktionsleitstand als konzeptionelles Zielbild einer zukünftigen Produktionssteuerung beschrieben. Digitale Produktionsplanung und -steuerung wird damit als Instrument verstanden, um komplexe Baustellen von einer reaktiven, improvisationsgeprägten Abwicklung hin zu einer vorausschauend geplanten und aktiv gesteuerten Produktion weiterzuentwickeln.

STICHWÖRTER

Produktionsplanung, Produktionssteuerung, Simulationsfähigkeit, BIM 4D

Production Planning and Control for Complex Construction Projects

ABSTRACT The increasing complexity of large construction projects requires the further development of production planning and control in the construction industry. Based on the state of the art in scheduling, work preparation, BIM, Lean Construction, and existing simulation approaches, the requirements for a dynamically adaptive production model are derived, integrating the structure and construction production within a single system. The paper develops transparency and simulation capability as central system properties. Transparency is enabled by the joint digital representation of the structure and construction production, including the construction sequence, resources, logistics, and construction states. Simulation capability extends this foundation by enabling process variants, disruptions, and control measures to be evaluated before implementation. Game-engine-based technologies are classified as a possible technical environment for such production models. The four-phase model is presented as an approach for demand-oriented refinement of production planning and early constructability assessment. In addition, a concept for the integrative coupling of building design and production planning is proposed. Building on this, the production control center is described as a conceptual target model for future production control. Digital production planning and control is thus understood as an instrument for developing complex construction sites from reactive, improvisation-driven project execution toward proactively planned and actively controlled production.

1 Einleitung und Problemstellung

Bauausführende Organisationen auf Bauherren- und Auftragnehmerseite stehen in den kommenden Jahren vor einem außergewöhnlich hohen Umsetzungsdruck. In nahezu allen Infrastrukturbereichen – Schiene, Straße, Energie, digitale Infrastruktur – sowie beim Hochbau treffen historisch hohe Investitions- und Sanierungsbedarfe auf begrenzte personelle und organisatorische Kapazitäten. Demografische Entwicklungen, insbesondere der Fach- und Führungskräftemangel, werden diese Situation weiter verschärfen [1-3]. Gleichzeitig sind bei komplexen Bau- und Infrastrukturprojekten wiederkehrend Termin- und Kostenüberschreitungen empirisch belegt [4, 5] und nicht zielgerechte Projektverläufe festgestellt [6]. Die überwiegend baubegleitende und

reaktiv geprägte Projektabwicklung stößt zunehmend an strukturelle Grenzen. Und trotz wachsender Verfügbarkeit digitaler Werkzeuge stagniert die Produktivität der Bauwirtschaft [1]. Die zentrale Ursache liegt weniger in einem Mangel an Technologien als vielmehr in den etablierten Planungs- und Steuerungslogiken für die Produktion. Insbesondere fehlt es an Ansätzen, welche die Bauvorhaben als steuerbare Produktionssysteme verstehen und eine vorausschauende Entscheidungsfindung ermöglichen.

Vor diesem Hintergrund greift der vorliegende Beitrag den Begriff der Produktionsplanung und -steuerung auf und entwickelt ihn als konzeptionellen Rahmen für einen möglichen Paradigmenwechsel: Bauvorhaben werden als dynamische, datenbasierte Produktionssysteme interpretiert, wobei Transparenz und Simulationsfähigkeit als zentrale Systemeigenschaften einer produkti-

ven, termin- und kostensicheren Realisierung herausgearbeitet werden.

Der Beitrag analysiert zunächst bestehende Ansätze der Produktionsplanung und -steuerung im Bauwesen und ordnet Terminplanung, Arbeitsvorbereitung, BIM-basierte Ablaufvisualisierung, Lean Construction sowie simulationsbasierte Ansätze hinsichtlich ihres Beitrags zu Transparenz und Simulationsfähigkeit ein. Daraus werden Anforderungen an ein Produktionsmodell abgeleitet, das Bauwerk, Bauablauf, Ressourcen, Logistik und Bauzustände integriert. Game-Engine-basierte Technologien werden als technische Umgebung für die interaktive Modellierung und Simulation solcher Produktionsmodelle präsentiert. Abschließend wird ein methodischer Ansatz zur digitalen Produktionsplanung entwickelt und ein Produktionsleitstand als konzeptionelles Zielbild einer zukünftigen adaptiven Produktionssteuerung beschrieben.

2 Stand der Technik

In diesem Abschnitt wird der Stand der Technik bei den etablierten Planungs- und Steuerungslogiken für die Produktion in der Baubranche zusammengefasst, um daraus die Anforderungen an eine digitale Produktionsplanung und -steuerung abzuleiten. Im Fokus der Betrachtungen stehen komplexe, langlaufende und logistisch anspruchsvolle Baustellen, insbesondere im Infrastrukturbau, etwa linienförmige Verkehrsinfrastrukturprojekte, Brücken- und Tunnelbaustellen oder Sanierungsmaßnahmen unter laufendem Betrieb.

2.1 Standardisierung als Grundlage von Digitalisierung und Produktivität

Die Entwicklungslogik „Standardisierung – Digitalisierung – Industrialisierung – Automatisierung“ bildet in vielen Industrien die Grundlage nachhaltiger Produktivitätssteigerungen [7]. Zunächst werden Produkte und Prozesse vereinheitlicht und digital abgebildet, um darauf aufbauend reproduzierbare industrialisierte Abläufe sowie – wo technisch und wirtschaftlich sinnvoll – deren teilweise oder vollständige Automatisierung umzusetzen. Auch für das Bauwesen wird Standardisierung als wesentliche Voraussetzung für Digitalisierung, Industrialisierung und Automatisierung etabliert. Während die Standardisierung von Bauteilen punktuell voranschreitet, wird die projektübergreifende Standardisierung von Bauprozessen, die den methodischen Kern der Leistungserbringung auf den Baustellen abbilden, erst in letzter Zeit als Voraussetzung für Digitalisierung, Industrialisierung und Automatisierung der Bauproduktion diskutiert [1, 8].

Bauabläufe, welche die projektspezifische zeitliche und ggfs. räumliche Anordnung der Aktivitäten beschreiben, werden überwiegend individuell geplant und ausgeführt. Bauleiter und Poliere stützen sich dabei auf persönliche Erfahrung und projektspezifische Lösungen. Eine systematische Erfassung und Anwendung erfolgreich erprobten Produktionswissens steht dabei nicht im Mittelpunkt – jede Baustelle wird weitgehend neu „erfunden“, anstatt auf standardisierte Prozessbausteine zurückzugreifen.

Die Standardisierung von Teilprozessen, Ressourcen und Geräten bietet hingegen mehrere Vorteile: Wiederkehrende Abläufe stabilisieren die Bauausführung und fördern Produktivitätsgewinne infolge wiederholter Ausführung identischer oder ähnlicher Tätigkeiten, die sogenannten Lernkurveneffekte. Die Planbarkeit

steigt, Improvisation sinkt und die Abhängigkeit von individueller Erfahrung wird reduziert. Einzelne Prozessabschnitte können protokolliert und möglichst allgemein formuliert hinterlegt und kontinuierlich weiterentwickelt werden. Dadurch wird Bauproduktion systemisch lernfähig, ermöglicht allgemeine Optimierungen und unternehmerische Spezialisierungen. Außerdem wird durch den Aufbau einer belastbaren Wissensbasis die Grundlage automatisierter Planungsansätze und KI-gestützter Verfahren geschaffen.

2.2 Produktionsplanung

In anderen Branchen ist eine entsprechende Standardisierung erfolgt, die eine systematische Produktionsplanung ermöglicht. Die Produktionsplanung umfasst die integrierte Planung von Prozessen, Ressourcen, Kapazitäten und Materialflüssen in einem Produktionssystem mit dem Ziel einer wirtschaftlichen, termingerechten und steuerbaren Leistungserbringung [9]. Sie schafft damit die Grundlage für eine wirksame Produktionssteuerung. Eine derart integrierte Planung ist im Bauwesen bisher nicht systematisch und flächendeckend eingeführt worden.

2.2.1 Terminplanung und Arbeitsvorbereitung

Hinsichtlich der Bauproduktion unterscheidet die Baupraxis zwischen Terminplanung und Arbeitsvorbereitung. Terminpläne – meist in Form von Balken-/Gantt- und Weg-Zeit-Diagrammen oder aus dem Lean Management bekannten Darstellungsformen – dienen primär der zeitlichen Strukturierung der Leistungen durch die Definition von Abhängigkeiten und der Ermittlung eines kritischen Pfades. Sie beruhen auf linearen Abhängigkeitslogiken von Aktivitäten, deren Dauer über Aufwandswerte beschrieben werden, die wiederum überwiegend auf baulichen oder ökonomischen Erfahrungswerten basieren [10]. Die Arbeitsvorbereitung konkretisiert den Terminplan erst nach Auftragserteilung und baubegleitend durch logistische Detailplanungen, Geräteeinsatz- sowie Ablaufkonzepte. In größeren Bauunternehmen bestehen hierfür häufig eigene organisatorische Einheiten, während in kleineren und mittleren Unternehmen entsprechende Aufgaben stärker durch Bauleitung und Poliere wahrgenommen werden.

Durch die verzögerte und nur abschnittsweise Konkretisierung der Planung trägt dieser Planungsansatz den tatsächlichen Produktionsbedingungen, Ressourcenkopplungen sowie Materialflüssen und der Logistik weder frühzeitig noch umfassend Rechnung, obwohl sie maßgeblichen Einfluss auf die Durchführung des Bauvorhabens haben. Das gilt insbesondere bei komplexen, langlaufenden Infrastrukturvorhaben. Die Umsetzbarkeit der Bauwerksplanung – in der Literatur als „Baubarkeit“ bzw. „Constructability“ [11] bezeichnet – wird ebenfalls häufig nur unzureichend überprüft, wodurch zwischen Bauwerksplanung und Produktionsplanung ein systematischer Bruch entsteht. Die baubegleitende Arbeitsvorbereitung berücksichtigt zudem nicht ausreichend langfristige Perspektiven, was Terminabweichungen, ineffiziente Ressourcennutzung und Nachtragsforderungen, sogenannte Bauablaufnachträge, strukturell begünstigt. Eine wesentliche Ursache hierfür liegt in der klassischen Trennung von Bauwerksplanung und Bauausführung. In konventionellen Projekt- und Vertragsmodellen wird die Produktionskompetenz der ausführenden Unternehmen häufig erst nach Abschluss wesentlicher Planungsentscheidungen eingebunden. Dadurch werden Bauverfahren, Bauzu-

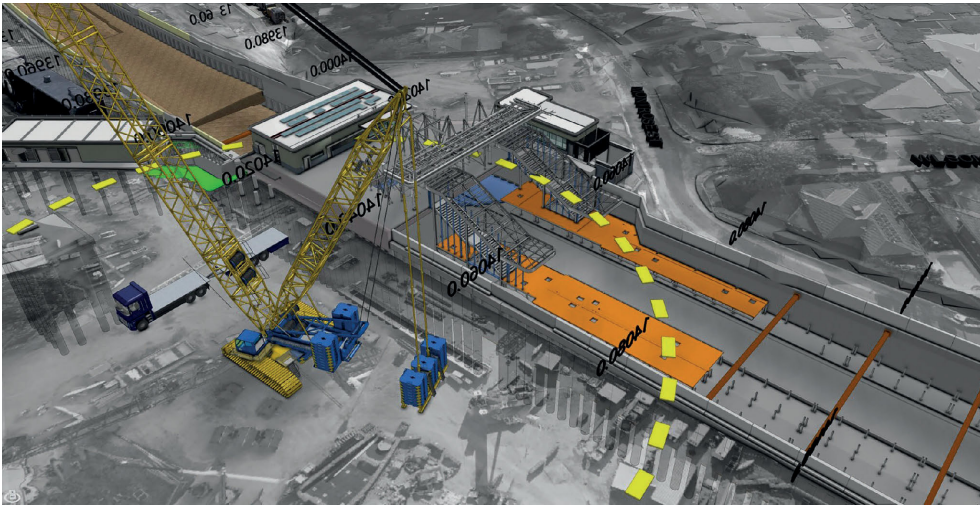


Bild 1. Dieser Screenshot einer marktführenden Software zeigt die Vertiefung einer Produktionsplanung bis auf Geräteebe.

Grafik: [17]

Fig. 1. This screenshot of a market-leading software application shows the refinement of production planning down to the equipment level. Source: [17]

stände, Logistik, Ressourcen und temporäre Randbedingungen nicht durchgängig als planungsprägende Größen behandelt. Produktionsplanung muss vielmehr möglichst reale Produktionsbedingungen einschließlich Ressourcen, Materialflüssen und Logistik antizipieren, integrieren sowie die Baubarkeit der Bauwerksplanung prüfen. Sie muss bereits in frühen Projektphasen ansetzen und den Betrachtungsrahmen von einer reinen Zeitstrukturierung hin zu einer proaktiven Prozessgestaltung erweitern – bei Bedarf bis auf Geräteebe.

2.2.2 BIM – 3D, 4D, 5D

Der in Normung und Literatur, zum Beispiel VDI 2552 Blatt 2 [12], definierte Ansatz für Building Information Modelling (BIM) über die Dimensionen Geometrie (BIM 3D), Zeit (BIM 4D) und Kosten (BIM 5D) soll diese Forderungen umsetzen helfen. Allerdings ist er gegenwärtig nur teilweise realisiert [13]. Während Bauteilinformationen weitgehend modellbasiert geometrisch und darüber hinaus mit Metadaten attribuiert konsistent vorliegen, erfolgt die Termin- und Ressourcenplanung weiterhin überwiegend mit konventionellen, wenn auch teilweise anhand semi-digitaler Tools/Methoden. Eine Reihe von Softwareanwendungen ermöglicht das Erstellen, Editieren und Exportieren von Balken- oder Weg-Zeit-Diagrammen. In anderen Softwareanwendungen können diese Daten nachgelagert mit Bauwerksmodellen verknüpft werden, indem Teile der Modelle mit einzelnen Zeitschritten assoziiert werden (z.B. [14-16]). Aus dieser Herangehensweise resultieren BIM-4D-Visualisierungen bestehender Ablaufplanungen.

Weitergehende Ansätze entstehen durch regelbasierte Kopplungen von Terminplänen und Bauwerksmodellen, bei denen zum Beispiel Mengenänderungen im Bauwerksmodell automatisiert in Aufwandswerte und Terminpläne überführt werden und Variantenanalysen erleichtern. Vereinzelt ist eine Vertiefung bis auf Geräteebe möglich [17]. Hier können Gerätemodelle in eine 3D-Umgebung integriert, Bewegungsbahnen definiert und mit Terminaktivitäten synchronisiert werden (Bild 1). Gleichwohl entstehen Bauabläufe und Aufwandswerte weiterhin auf Basis von Expertenschätzungen und werden erst anschließend zur Visualisierung oder Konsistenzprüfung importiert.

Zwischen der bauwerksbezogenen „System Breakdown Structure“ (BIM 3D) und der kostenorientierten „Cost Break-

down Structure“ (BIM 5D) besteht trotz der erläuterten 4D-Bauablaufvisualisierungen eine strukturelle Lücke (vgl. Bild 2): Die „Work Breakdown Structure“ (BIM 4D), also die Produktionsplanung des Bauvorhabens, erreicht nicht den Detaillierungsgrad und den Digitalisierungsgrad der „System Breakdown Structure“ (BIM 3D). Erst mit einer durchgängig datenbasierten, prozess- und ressourcenorientierten Produktionsplanung wäre die Grundlage für eine vollständig digitale und modellbasierte „Cost Breakdown Structure“ (BIM 5D) geschaffen.

Wie bereits an anderer Stelle zum Beispiel für die Baulogistik [18] hergeleitet, ist ein Paradigmenwechsel erforderlich: Bauprozesse müssen in einem digitalen, simulationsfähigen Produktionsmodell generiert, validiert und optimiert werden, anstatt bestehende Terminplanungen lediglich zu visualisieren. Ein solches Modell schafft Transparenz über Bauzustände, Ressourcen, Logistik und räumliche Abhängigkeiten und bildet zugleich die Grundlage für simulationsgestützte Variantenbewertungen. Der Terminplan wird damit Ergebnis der Prozessmodellierung und -simulation und nicht deren Ausgangspunkt. Die Simulation von Bau- und Baulogistikprozessen ist dabei kein neues Forschungsfeld, sondern wurde national und international in unterschiedlichen Ansätzen bearbeitet, etwa zur Bauablaufsimulation, zur baulogistischen Ablaufplanung, zur Analyse von Materialflüssen und zur modellbasierten Bewertung von Bauablaufvarianten [19, 20]. Der Beitrag knüpft daran an, fokussiert jedoch nicht auf einzelne Simulationsverfahren, sondern auf Simulationsfähigkeit als zentrale Systemeigenschaft einer durchgängigen Produktionsplanung und -steuerung.

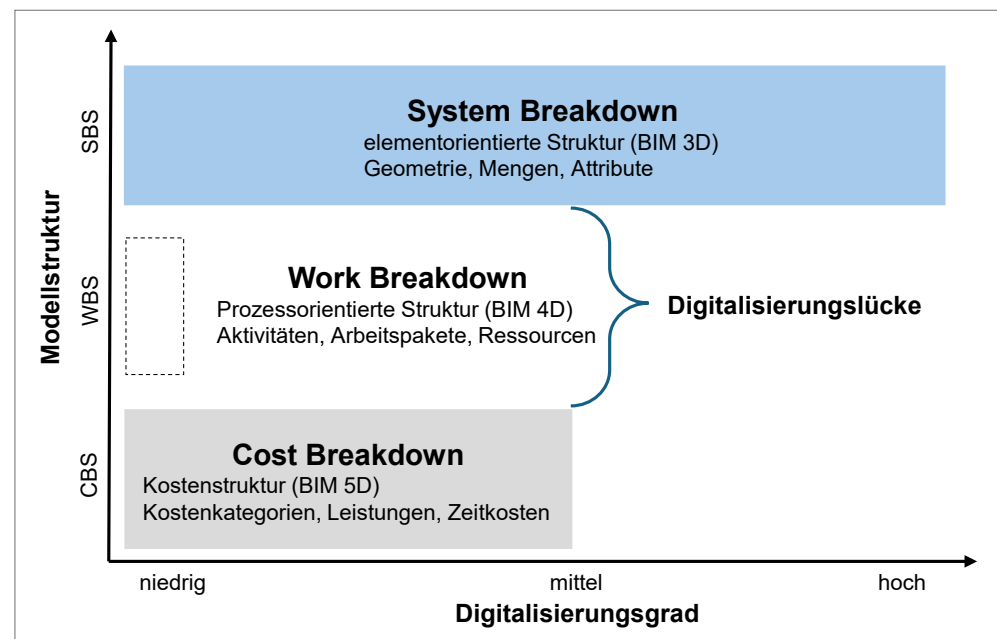
2.3 Baulogistik

Baulogistik hat die Aufgabe, alle für die Bauproduktion erforderlichen Ressourcen zur richtigen Zeit am richtigen Ort bereitzustellen und die hierfür notwendige Baustelleninfrastruktur zu planen [21]. Grundlage ist die Terminplanung mit den resultierenden Material- und Ressourcenströmen. Zuverlässigkeit, Detailgrad und Umfang der Terminplanung schlägt sich daher unmittelbar auf die Qualität der logistischen Planung nieder. Um unsichere Aufwandswerte zu kompensieren, wird häufig mit Reserven geplant, während, wie oben angeführt, eine vertiefte Ausarbeitung erst baubegleitend im Rahmen der Arbeitsvorbereitung erfolgt. Diese historisch gewachsene Trennung von Terminplanung, Ar-

Bild 2. Digitalisierungslücke zwischen System Breakdown Structure SBS (BIM 3D) und Cost Breakdown Structure CBS (BIM 5D) infolge einer fehlenden durchgängig datenbasierten Work Breakdown Structure WBS (BIM 4D).

Grafik: eigene Darstellung

Fig. 2. Digitalization gap between the System Breakdown Structure SBS (BIM 3D) and the Cost Breakdown Structure CBS (BIM 5D) resulting from the absence of a consistently data-driven Work Breakdown Structure WBS (BIM 4D). Source: own illustration



beitsvorbereitung und Baulogistik unterscheidet sich von industriellen Produktionssystemen, in denen Produktionsplanung grundsätzlich Prozesse, Ressourcen, Kapazitäten, Materialflüsse und Logistik integriert [20].

2.4 Integration von Bauwerksplanung und Produktionsplanung

Die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure HOAI [22] bildet in ihren Leistungsbildern primär die Planung des Bauwerks ab und nur untergeordnet die Erstellung von Terminplänen und die Dokumentation des Bauablaufs. Begriffe wie Produktionsplanung, Taktung oder Baulogistik sind dort nicht systematisch verankert. Zwar wurde der Grundgedanke der planungsbegleitenden Überprüfung der Baubarkeit bereits in den 1970er-Jahren entwickelt und in der Fachliteratur [11] wiederholt eingefordert, eine konsequente Integration in die Planungsprozesse ist jedoch bis heute nicht erfolgt. Die Verantwortung für die Produktionsplanung liegt weiterhin überwiegend bei der Ausführung, insbesondere bei Bauleitung und Arbeitsvorbereitung. Dies begünstigt eine baubegleitende Planung und erhöht die Anfälligkeit für Terminabweichungen und Nachträge.

Schlussfolgernd ist festzustellen, dass eine kontinuierliche Rückkopplung zwischen Bauwerks- und Produktionsplanung über alle Leistungsphasen hinweg erforderlich ist, um eine laufende Optimierung hinsichtlich Kosten, Terminen und baulicher Umsetzbarkeit zu ermöglichen.

2.5 Produktionssteuerung

Die zuvor beschriebenen Planungsmethoden und -werkzeuge bilden – vor dem Hintergrund der organisatorischen und vertraglichen Trennung von Planung und Ausführung – die Grundlage der Produktionssteuerung in der Ausführung. Die hohe Dynamik von Bauprojekten, die durch externe Störungen und einen kontinuierlichen Anpassungsbedarf der Produktionsplanung geprägt ist, stellt die zentrale Herausforderung dar. Abweichungen zum Beispiel von der prognostizierten Geologie, Witterungseinflüsse,

Planungsfehler oder ein häufig nur abstrakt definiertes Planungssoll führen die Systeme dabei oft an die Grenzen ihrer Anpassungsfähigkeit. Die Produktionssteuerung droht in der Folge von einem vorausschauenden Management zu einer reaktiven Improvisation zu werden.

2.5.1 Lean Construction, Taktplanung und Taktsteuerung

Lean Construction, insbesondere Taktplanung und -steuerung zählen derzeit zu den führenden Organisationsansätzen zur Strukturierung und kontinuierlichen Verbesserung von Bauprozessen, auch wenn diese bei Weitem nicht flächendeckend eingesetzt werden [23]. Sie übertragen Prinzipien industrieller Produktionssysteme auf die Baustelle und fördern insbesondere Transparenz, Teamorientierung und Prozessstabilität [10]. Lean-basierte Methoden fokussieren dabei primär die kommunikative Abstimmung von Leistungen sowie die verlässliche Koordination von Arbeitszusagen zwischen den Beteiligten. Die zugrunde liegenden Planungsinformationen werden häufig in abstrahierter Form, überwiegend aktivitäts- und zeitbasiert, über visuelle Planungselemente repräsentiert.

Mit zunehmender Projektkomplexität stößt diese Form der Repräsentation jedoch an Grenzen, da sie nur eingeschränkt geeignet ist, die tatsächliche Interdependenz von Bauprozessen, Ressourcen, Logistik und Bauzuständen transparent abzubilden oder belastbare simulationsgestützte Prognosen zu ermöglichen. Ein zukunftsorientierter Ansatz besteht daher darin, die organisatorischen Stärken von Lean Construction mit digitalen, datenbasierten Produktionsmodellen zu verbinden. Während Lean Construction insbesondere auf Prozessstabilität, Kollaboration, Flussorientierung, Taktung und verlässliche Abstimmung der Beteiligten abzielt [21, 23], ermöglichen digitale Produktionsmodelle eine systemische Beschreibung der Bauproduktion als vernetztes, dynamisches Gesamtsystem.

Tabelle 1. Kategorisierte Anforderungen an digitale Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme.
Table 1. Categorized requirements for digital production planning and control systems.

Handlungsfeld	Zentrale Anforderung
Strukturelle Anforderungen	
Standardisierung	Überführung von Bauprozessen in wiederverwendbare, datenbasierte und möglichst allgemein formulierte Prozessabschnitte.
Integriertes System für Produktionsmodellierung	Integration von Terminplanung, Arbeitsvorbereitung, Baulogistik und Ressourcen zu einer ganzheitlichen Produktionsplanung.
Integrierte Bauwerks- und Produktionsplanung	Verknüpfung von Produktionsmodellen, Bauwerksstruktur, Ressourcen und Bauzuständen in einem simulationsfähigen Produktionsmodell.
Kopplung von Bauwerks- und Produktionsplanung	Kontinuierliche Rückkopplung zwischen Bauwerks- und Produktionsplanung. Systematische Validierung der Baubarkeit in den Projektphasen.
Systemische Anforderungen	
Transparenz	Konsistente und entscheidungsorientierte Abbildung von Bauzuständen, Ressourcen, Logistik, räumlichen Abhängigkeiten und Prozesszusammenhängen.
Simulationsfähigkeit	Bewertung von Ablaufvarianten, Störungen und Steuerungsmaßnahmen vor ihrer Umsetzung.
Generative Prozessmodellierung	Modellbasierte Entwicklung von Bauabläufen und Prozessvarianten auf Grundlage von Bauwerksstruktur, Ressourcen, Logistik und Randbedingungen.
Dynamische Produktionssysteme	Berücksichtigung sich fortlaufend verändernder Systemzustände als Planungsgrundlage.
Adaptive Produktionssteuerung	Anpassungsfähige Fortschreibung der Produktionsplanung unter veränderlichen Projektbedingungen.

2.5.2 Produktionssteuerungssysteme aus anderen Branchen

Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme sind in Branchen wie der Automobil- oder Maschinenbauindustrie seit Jahren etabliert und basieren im Allgemeinen auf einem vorab definierten, räumlich fixierten und über längere Zeit stabilen Produktionssystem. Digitale Zwillinge fungieren dabei als weitgehend invariante Referenzmodelle, auf deren Grundlage Abläufe, Materialflüsse und Ressourceneinsatz geplant, analysiert und optimiert beziehungsweise Störungen verarbeitet werden [24].

In der Bauproduktion ist das Produktionssystem hingegen nicht invariant, sondern entsteht und verändert sich im Zuge des Produktionsprozesses. Produktionssystem (Baustelle) und Produkt (Bauwerk) fallen räumlich und funktional weitgehend zusammen. Mit fortschreitender Bauausführung verändern sich unter anderem Raumverfügbarkeit, Zugänglichkeiten, Logistikwege, Arbeitsbereiche sowie die Interaktionen zwischen Bauwerk, Ressourcen und Materialien. Das Produktionssystem stellt somit einen zeitabhängigen Systemzustand dar, der sich kontinuierlich aus dem Produktionsfortschritt ableitet. Produkt, Produktionsraum und Produktionsmittel sind dabei untrennbar miteinander verbunden und beeinflussen sich gegenseitig.

Diese Besonderheiten der Bauproduktion verdeutlichen, dass Konzepte der industriellen Produktionsplanung und -steuerung nur eingeschränkt übertragbar sind. Ansätze, die statische Systeme voraussetzen, stoßen bei der Abbildung komplexer Baustellen an strukturelle Grenzen. Digitale Produktionsplanung im Bauwesen erfordert Werkzeuge, die explizit auf die Co-Evolution von Produkt und sich fortlaufend veränderndem Produktionssystem ausgerichtet sind. Sie erfordert Planung, Simulation sowie Steuerung, die sich nicht nur auf Abläufe innerhalb eines Systems beziehen, sondern auch auf die Entwicklung des Systems selbst.

3 Anforderungskatalog für digitale Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme im Bauwesen

Aus der Analyse der bestehenden Planungs- und Steuerungsansätze ergeben sich Anforderungen auf zwei Ebenen. (1) Strukturelle Anforderungen betreffen die organisatorische und datenbezogene Zusammenführung bisher getrennt behandelter Planungsbereiche. Sie beschreiben, welche Elemente – etwa Terminplanung, Arbeitsvorbereitung, Baulogistik, Bauwerksstruktur, Ressourcen und Bauzustände – in einem digitalen Produktionsplanungssystem integriert werden müssen. (2) Systemische Anforderungen beschreiben demgegenüber die Fähigkeiten eines solchen Systems, dynamische Bauprozesse transparent abzubilden, modellbasiert zu entwickeln, zu simulieren, hinsichtlich ihrer Baubarkeit zu bewerten und bei veränderten Randbedingungen fortzuschreiben. **Tabelle 1** fasst diese Anforderungen zusammen.

Insgesamt wird deutlich, dass die digitale Produktionsplanung im Bauwesen über eine reine termin- und bauteilorientierte Ablaufplanung hinausgehen muss – hin zu einem konsistenten digitalen Modell des co-evolvierenden Produktionssystems mit höherer Realitätsnähe. Die daraus resultierende Nachvollziehbarkeit der Abhängigkeiten schafft Transparenz und bildet die Grundlage für fundierte Entscheidungen im Projektverlauf. Sie ermöglicht es, weiterhin den Menschen als zentrale Entscheidungsinstanz auch in den zunehmend komplexen Bauprojekten einzubinden.

Simulation wird in diesem Beitrag als zentrales Instrument der Produktionsplanung und -steuerung eingeordnet. Sie erlaubt es, unterschiedliche Systemperspektiven – insbesondere Ressourcen, Logistik, räumliche Abhängigkeiten und Ablaufstrukturen – in einem gemeinsamen Modell zusammenzuführen und Bauprozesse bereits vor ihrer Ausführung in verschiedenen Szenarien zu generieren, zu bewerten und zu optimieren.

Transparenz und Simulation sind als zentrale Systemeigenschaften der Produktionsplanung und -steuerung keine isolierten Eigenschaften, sondern aufeinander aufbauende Funktionen eines integrierten Ansatzes: Erst die strukturierte, konsistente und transparente Abbildung des Produktionssystems ermöglicht belastbare Simulationen; diese wiederum erweitern das Systemverständnis, indem sie Auswirkungen geplanter Eingriffe transparent machen.

4 Umsetzung simulationsfähiger Produktionsmodelle

Um die oben definierten Anforderungen zu erfüllen, müssen Bauexperten befähigt werden, Modelle zu definieren, Simulationen durchzuführen, zu evaluieren und die Modelle anzupassen. Um dabei möglichst zielführend Exploration und Entscheidungsfindung zu unterstützen, müssen diese Funktionalitäten in Echtzeit, interaktiv zur Verfügung gestellt werden [25]. Game-Engine-basierte Technologien, wie sie unter anderem in [26] im Zusammenhang mit der Bauwirtschaft erwähnt werden, ermöglichen, diese anwendungsspezifischen Ansprüche umzusetzen, indem sie verschiedene informationsverarbeitende Subsysteme integrieren – etwa für die grafische Darstellung virtueller Welten, die Interaktion mit Modellgegenständen und ihrer Simulation entsprechend naturgesetzlicher Regeln. Werden damit Bauprozesse visualisiert, wie sie auch auf der Baustelle beobachtet werden können, reduziert sich die erforderliche Transferleistung für den Anwender. Die dargestellten Vorgänge werden unmittelbar verstanden, die kognitive Last sinkt, und Entscheidungen über Anpassungen der Abläufe können auf einer besser nachvollziehbaren Basis getroffen werden.

Grundlage hierfür ist die Fähigkeit zur realitätsnahen Modellierung des Produktionssystems und der weitgehenden Annäherung an die tatsächlichen Bedingungen der Bauausführung. Bauwerk, Ressourcen und Umgebungsbedingungen lassen sich in einem gemeinsamen digitalen Produktionsmodell integrieren und werden so den Anforderungen aus der Co-Evolution von Produkt und Produktionssystem gerecht. Damit kann die Bauwerksplanung nicht nur geometrisch dargestellt, sondern mit produktionsbezogenen Informationen wie Bauzuständen, Zugänglichkeiten, Ressourcen, Logistik und temporären Randbedingungen verknüpft werden. Auf dieser Grundlage wird die frühe Prüfung der Baubarkeit unterstützt, da Auswirkungen planerischer Entscheidungen auf die spätere Ausführung bereits im Modell sichtbar werden.

Über die reine Darstellung hinaus ermöglichen Game-Engine-basierte Anwendungen die Navigation in Zeit und Raum innerhalb eines virtuellen Produktionsmodells und unterstützen die Festlegung verschiedener Ereignisse, wie bspw. der Anlieferung von Material, dem Verbauen einzelner Bauteile und dadurch insgesamt die Generierung von Bauabläufen in den verschiedenen über die Zeit entstehenden Bauzuständen. Das unmittelbare Feedback durch die Visualisierung der entsprechenden Prozesse in ihrer Gesamtschau, aus verschiedenen Sichten und zu verschiedenen Zeitpunkten, ermöglicht die Analyse alternativer Handlungsoptionen unter variierenden Randbedingungen. Varianten können bewertet und potenzielle Konflikte bereits vor der Ausführung erkannt werden. Zugleich können veränderte Randbedingungen und Systemzustände in das Modell zurückgespielt werden, sodass Produktionsplanung nicht als einmalige Festlegung, sondern als

fortschreibbarer Steuerungsprozess verstanden wird. Produktionsplanung entwickelt sich dadurch zu einem antizipierenden Instrument der Projektsteuerung.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist die Möglichkeit zur Digitalisierung und Skalierung von Produktionswissen. Validierte, wohldokumentierte Prozesse können als allgemeines Prozessmuster erkannt, gespeichert und projektübergreifend angewendet werden. Dadurch entsteht eine wachsende Wissensbasis, die Standardisierung unterstützt und zugleich die Grundlage für automatisierte sowie KI-gestützte Planungsansätze bildet. Digitale Produktionsplanung entwickelt sich damit zu einem lernfähigen System und eröffnet die Perspektive zum Aufbau umfangreichen Domänenwissens.

Trotz dieser technologischen Möglichkeiten bleibt der Mensch zentrale Entscheidungsinstanz. Game-Engine-basierte Anwendungen erweitern die Analyse- und Erkenntnisfähigkeit der Projektbeteiligten, ersetzen jedoch nicht deren Bewertungskompetenz. Sie schaffen Transparenz und Simulationsfähigkeit und wirken folglich als strukturelle Grundlage einer verbesserten Produktionslogik.

5 Methodische Umsetzung

5.1 Produktionsplanung

Technologische Innovationen und organisatorische Prozesse entwickeln sich idealerweise wechselseitig weiter. Die größten Produktivitätsgewinne entstehen dort, wo sich beide Elemente komplementär verstärken und im Sinne einer Co-Evolution gemeinsam weiterentwickelt werden.

In mehreren jüngeren Infrastrukturprojekten – etwa im Umfeld der Deutschen Bahn – kommen inzwischen interaktive Simulations- und Planungssysteme zur Anwendung, die eine modellgestützte und störungsrobuste Produktionsplanung ermöglichen (Bild 3). Die dargestellte Benutzeroberfläche führt räumliche Planungsgrundlagen und Bauwerksmodelle mit den zeitlichen Abläufen der Produktion zusammen. Im dargestellten Beispiel sind unter anderem Gelände- und Bauwerksmodelle, Lage- und Trasseninformationen, temporäre Bauzustände sowie Baugeräte mit den zugehörigen Prozessabläufen in einer Zeitleiste, unten im Bild dargestellt, verknüpft. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse bilden einen wichtigen Bezugsrahmen für die nachfolgenden Überlegungen.

5.1.1 Validierung der Baubarkeit

Die Zielsetzungen und Vorgehensweisen der digitalen Produktionsplanung hängen stark vom Zeitpunkt der Betrachtung im Planungsprozess ab. Viele Projekte, die aufgrund langer Planungslaufzeiten noch mit konventionellen Methoden entwickelt wurden, werden zunächst hinsichtlich ihrer Baubarkeit validiert. Dazu müssen die vorliegenden Planungsstände der geometrischen Planung (Bauwerke) und der Produktionsplanung (Terminpläne etc.) zunächst in einer digitalen Planungsumgebung modelliert werden. Für die Bauwerksmodelle sind nicht zwingend BIM-Modelle erforderlich. Oft reicht die vereinfachte, an den Detaillierungsgrad der Produktionsplanung angepasste rein geometrische Abbildung, die auch mit frei zugänglicher 3D-Modellierungs- und Animationsprogrammen [28] mit geringem Aufwand umgesetzt werden kann. Ggfs. vorhandene BIM-Modelle des Bauwerkes können erweitert werden, um, mit Verhaltenslogik assoziiert, zum

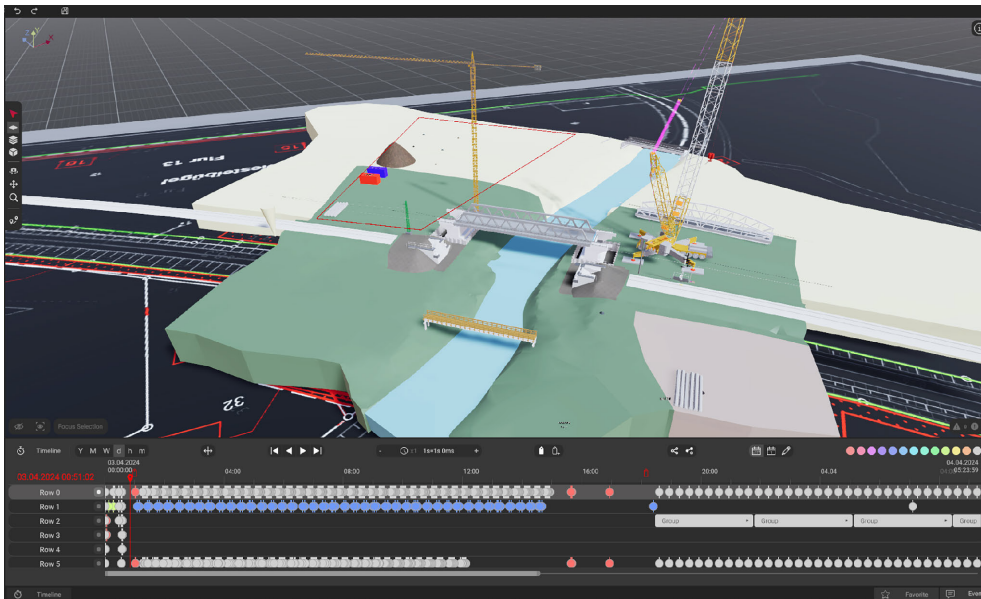


Bild 3. Beispiel einer interaktiven Simulations- und Planungssoftware zur Planung der Eisenbahnüberführung „Else“ der DB InfraGo. Grafik: [27]

Fig. 3. Example of interactive simulation and planning software for planning the „Else“ railway overpass of DB InfraGO. Source: [27]

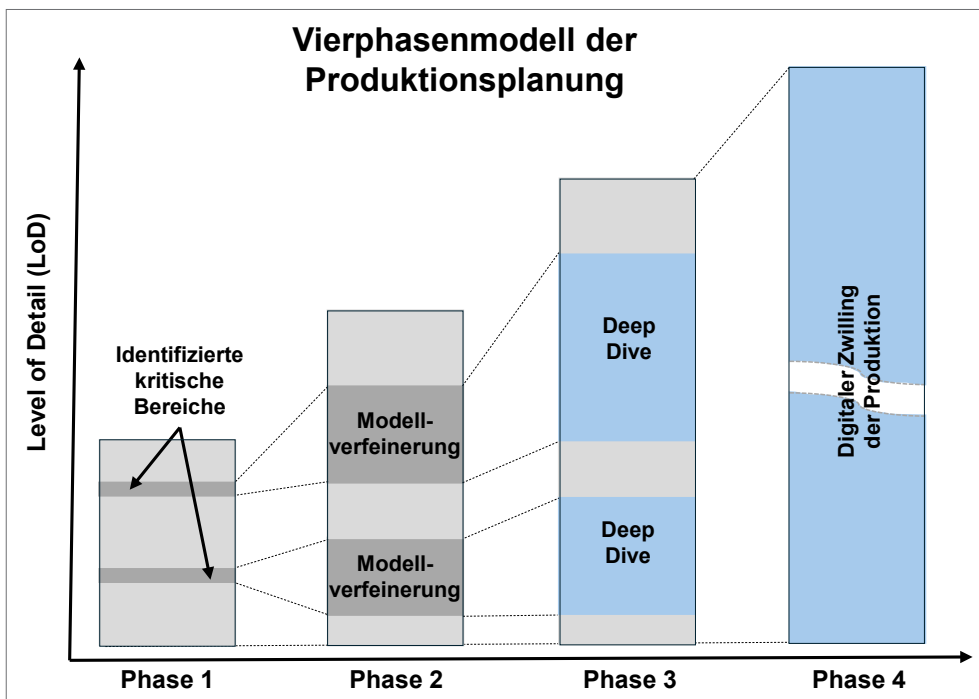


Bild 4. Vierphasenmodell der Produktionsplanung. Grafik: eigene Darstellung

Fig. 4. Four-phase model of production planning. Source: own illustration

Beispiel logistische Prozesse abbilden zu können. Für die weitere digitale Realisierung eines Bauprojekts wird, wie nachfolgend beschrieben, nach dem sogenannten Vierphasenmodell vorgefahren.

5.1.2 Vierphasenmodell

Eine digitale Produktionsplanung erfordert keine vollständige Durchdringung aller Bauprozesse bis auf Geräteebe von Beginn an. Sie folgt vielmehr – analog zur Planungssystematik der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure HOAI [22] – dem Prinzip einer schrittweisen, bedarfsorientierten Detaillierung. Das Vierphasenmodell gemäß **Bild 4** beschreibt die Verdichtung der digitalen Produktionsplanung von der strukturellen Prozesssicht (Meilensteinplanung) bis zur simulativen Abbildung auf Geräteebe.

Phase 1 bildet den Einstieg in die modellbasierte Produktionsplanung und schafft zunächst Transparenz auf der strukturellen Ebene der Rahmenterminplanung (Meilensteinplanung). Digitale Bauwerksmodelle werden in ihren räumlichen Kontext eingebettet und mit Rahmenterminplänen verknüpft. Es entsteht ein visuell erfahrbares und simulationsfähiges Prozessmodell, das die Bauabfolge in räumlicher und zeitlicher Logik abbildet („Was soll wann grob passieren?“). Kritische Abhängigkeiten, unplausible Ablaufannahmen sowie projektspezifische Risiken werden frühzeitig erkennbar und Optimierungspotenziale, unterstützt durch Simulationen mit hohem Abstraktionsgrad, gehoben. Stehen noch keine Rahmenterminpläne zur Verfügung, können diese aus Bauwerksstruktur, Bauabschnitten, groben Bauverfahren, räumlichen Abhängigkeiten und wesentlichen Randbedingungen abgeleitet und simulativ plausibilisiert werden.

Phase 2 dient der gezielten Vertiefung von identifizierten kritischen Bereichen, jedoch weiter auf der Ebene der Ablaufplanung. Statt das Gesamtprojekt vollständig zu detaillieren, konzentriert sich die Modellierung auf komplexe Bauzustände, Schnittstellen oder risikobehaftete Bauphasen. Weiteres Ziel ist die Validierung zentraler Aufwandswerte sowie die frühzeitige Prüfung der Baubarkeit mit möglichen Rückwirkungen auf die geometrische Planung auf der Ebene eines verringerten Abstraktionsgrades („Was soll wann passieren?“).

Phase 3 umfasst sogenannte „Deep Dives“ zur vollständigen Validierung angesetzter Aufwandswerte und der Baubarkeit. In ausgewählten Prozessabschnitten wird bis auf Geräte- und Ressourcenniveau verfeinert. Bauhilfsmittel, Logistikflächen und Platzbedarfe können integriert betrachtet und realitätsnah simuliert werden („Was soll wann wie passieren?“). Validierte Abläufe lassen sich anschließend als Referenzprozesse übertragen und unterstützen so die Standardisierung der Produktionsplanung.

Phase 4 beschreibt die maximale Planungstiefe im Sinne eines umfassenden digitalen Zwillings der Bauproduktion auf Geräteebe. Aufgrund des hohen Modellierungsaufwands und häufig noch unvollständiger Bauwerksplanungen ist dieses Niveau derzeit nur eingeschränkt umsetzbar und wirtschaftlich darstellbar. Perspektivisch bilden jedoch Bibliotheken standardisierter Prozessbeschreibungen, oder Templates, sowie KI-gestützte Modellierungsansätze eine Grundlage für Planung in beliebiger Detaillierungstiefe. Das ist wiederum Voraussetzung für eine automatisierte und datengetriebene Gerätesteuerung.

Das Vierphasenmodell strukturiert damit die progressive Verdichtung der Produktionsplanung und ermöglicht einen wirtschaftlich kontrollierten Übergang von der frühen Prozesssicht bis zur Detailplanung auf Geräteebe.

5.1.3 Integration von Bauwerksplanung und Produktionsplanung

Eine ingenieurtechnisch besonders wirkungsvolle Vorgehensweise besteht darin, die Produktionsplanung frühzeitig und iterativ mit der Bauwerksplanung zu entwickeln. Die Modellierung der Produktion wird dabei nicht erst auf Basis bestehender Terminpläne initiiert, sondern von Beginn der Planung an eingesetzt, um Baubarkeit, Ablauflogik und Ressourcenerfordernisse kontinuierlich im jeweils erreichten Detaillierungsgrad zu überprüfen.

Hierdurch entsteht eine systematische Rückkopplung zwischen Bauwerks- und Produktionsplanung: Planungsentscheidungen werden früh hinsichtlich ihrer baulichen Umsetzbarkeit validiert, notwendige Anpassungen können unmittelbar in den weiteren Planungsprozess einfließen. Der seit den 1970er-Jahren formulierte Grundgedanke der Baubarkeit [11] wird damit konsequent in einen digitalen und iterativen Planungsansatz überführt.

Ein entsprechender Ansatz zur methodischen Kopplung von Bauwerksplanung/SBS und Produktionsplanung/WBS wird in Bild 5 gezeigt. Dabei wird die Struktur der HOAI-Leistungsphasen LPH 1-5 als Ordnungsrahmen genutzt und um eine parallele produktionstechnische Betrachtungsebene ergänzt. Die Inhalte der Bauwerksplanung/SBS sind in der Abbildung bewusst verdichtet; termin- und bauzeitbezogene Aussagen werden nicht isoliert der Bauwerksplanung zugeordnet, sondern als Ergebnis der Kopplung mit der Produktionsplanung/WBS verstanden. Die Darstellung beschränkt sich auf die Phase vor Beginn der Bauausführung, da hier die Produktionsplanung als planungsbegleitende



Bild 5. Iterative Kopplung von Bauwerksplanung/SBS und Produktionsplanung/WBS in den HOAI-Leistungsphasen 1-5. Grafik: eigene Darstellung
Fig. 5. Iterative coupling of building design/SBS and production planning/WBS in HOAI service phases 1-5. Source: own illustration

Aufgabe betrachtet wird. Die mit „(a)“ gekennzeichneten produktionsplanerischen Leistungen stellen keine bestehenden HOAI-Grundleistungen dar, sondern beschreiben ergänzende Leistungsbestandteile einer phasenbegleitenden Produktionsplanung; sie werden daher als eigenständige Planungsleistungen vorgeschlagen. Innerhalb jeder Leistungsphase erfolgen insbesondere die Prüfung der grundsätzlichen Baubarkeit, die Berücksichtigung bauzeitlicher und logistischer Restriktionen sowie die Optimierungen hinsichtlich Zeit, Kosten, Nachhaltigkeit und Ressourceneinsatz. Ziel ist es, die spätere Bauausführung bereits in den frühen Planungsphasen zu antizipieren und mit der Bauwerksplanung rückzukoppeln.

Durch diese Kopplung entsteht in jeder Leistungsphase ein integrierter Planungsprozess, der die traditionell häufig nachlaufende Produktionsplanung durch Rückkopplungsschleifen innerhalb der Leistungsphasen ersetzt. Bauwerks- und Produktionsplanung validieren und optimieren sich dabei wechselseitig. Baubarkeit ist damit keine nachgelagerte Prüfgröße mehr, sondern entwickelt sich zu einer frühen Entwurfsvariablen.

Auf diese Weise kann die grundsätzliche Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit bauwerksbezogener Entwurfsentscheidungen frühzeitig überprüft und der Produktionsprozess schrittweise an den jeweiligen Planungsfortschritt angepasst werden. Dies reduziert das Risiko späterer Umplanungen und ermöglicht es, in jeder Planungsphase belastbare Aussagen zur Umsetzung zum Beispiel komplexer Infrastrukturmaßnahmen zu treffen.

5.2 Produktionssteuerung

Auch wenn eine verbesserte Produktionsplanung bereits zu höherer Stabilität in der Bauausführung führt, lassen sich die vol-

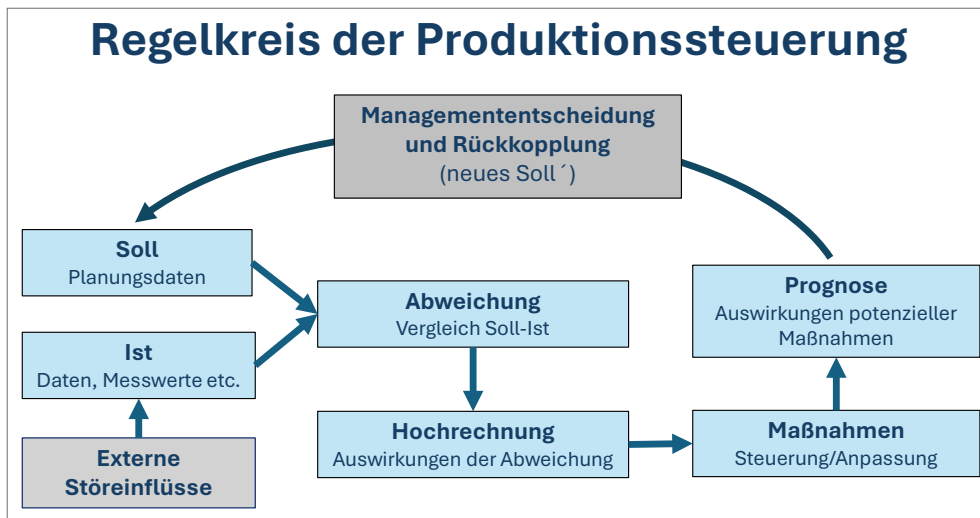


Bild 6. Regelkreis der Produktionssteuerung.
 Grafik: eigene Darstellung
 Fig. 6. Control loop of production management.
 Source: own illustration

len Produktivitätspotenziale erst durch eine Produktionssteuerung erschließen. Die Notwendigkeit, Planung und Steuerung antizipativ auszurichten, entspricht einem zentralen Managementgrundsatz aktiv gesteuerter Bauprojekte: Communicate – Collect Information – Anticipate – Act.

Eine Produktionssteuerung, die nicht primär auf das Reagieren auf Störungen basierend auf den Erfahrungen der Bauleitung angewiesen ist, sondern datenbasiert antizipierend agiert, setzt ein hinreichend detailliertes Soll-Modell der Produktion voraus. Dieses muss in kurzen Intervallen mit dem aufgrund externer Einflüsse oder planerischer Abweichungen veränderten Ist-Zustand abgeglichen werden. Daraus entsteht ein Regelkreis, der in **Bild 6** dargestellt ist. Die oben genannte Echtzeitfähigkeit interaktiver Simulationen bedient auch diesen Anspruch. Simulationsfähige Werkzeuge ermöglichen es, die Auswirkungen von Abweichungen im Rahmen einer Hochrechnung frühzeitig zu erkennen und deren Konsequenzen über den weiteren Bauverlauf hinweg abzuschätzen. Dadurch entsteht eine datenbasierte Grundlage für die Entwicklung und Bewertung geeigneter Steuerungsmaßnahmen im Rahmen einer Prognose. Transparenz unterstützt dabei ein schnelles Managementverständnis, während Simulation die ingenieurtechnische Erarbeitung und Bewertung von Handlungsoptionen sowie deren wirtschaftliche Einordnung erlaubt. Das angepasste „neue Soll“ wird anschließend in die Produktion zurückgeführt und iterativ fortgeschrieben. Damit ist der für eine vorausschauende, agierende Steuerung der Bauproduktion erforderliche Regelkreis etabliert.

Für die Funktion dieses Regelkreises ist eine maximale Datentiefe bei den Ist-Daten nicht zwingend erforderlich. Hochgranulare Maschinendaten sind dabei häufig weniger zielführend als ein konsistentes, entscheidungsorientiertes Informationsniveau. Der Detaillierungsgrad von Soll- und Ist-Modellen sollte sich daher konsequent am wirtschaftlichen Nutzen und dem tatsächlichen Entscheidungsbedarf orientieren. Die organisatorische Umsetzung dieses Regelkreises erfolgt im Konzept des digitalen Produktionsleitstands.

5.3 Produktionsleitstand als integriertes Steuerungssystem

Der zuvor beschriebene Regelkreis erfordert eine organisatorische Verankerung und Operationalisierung im Projektmanage-

ment der Baustelle. Während für Qualität und Kosten bereits branchenspezifische regelkreisähnliche Strukturen existieren, fehlt bislang und in Analogie zur in Abschnitt 2.2.2, Bild 2 dargestellten Digitalisierungslücke ein funktionaler Steuerungskreis für die Produktion – mit der Folge reaktiv gesteuerter Bauabläufe.

Digitale Produktionsleitstände, wie sie in anderen Industrien etabliert sind, bieten ein geeignetes Referenzmodell. Übertragen auf die Bauproduktion entsteht das Konzept eines integrierten Steuerungssystems, welches Qualität, Kosten und Produktion über einen kontinuierlichen Soll-Ist-Abgleich verbindet und eine datenbasierte, adaptive Steuerung ermöglicht. Grundlage ist die Verknüpfung von Bauwerksplanung (BIM 3D – SBS), Produktionsplanung (BIM 4D – WBS) und Kostenplanung (BIM 5D – CBS) innerhalb eines Regelkreises für die Planung, wie sie in **Bild 7** im linken Teil abgebildet ist. Erst ihr Zusammenwirken schafft eine belastbare Steuerungslogik.

Der Produktionsleitstand basiert dann auf drei eng getakteten Regelkreisen: Qualität (Abgleich zwischen Bauwerksmodell und realisiertem Bauzustand), Kosten (Gegenüberstellung kalkulierter Kosten mit den Ist-Kosten) und Produktion (Steuerung von Terminen, Ressourcen und Logistik auf Basis aktueller Ist-Daten). Hieraus können zugleich zentrale Projektdokumentationen wie As-built-Modelle, abrechnungsrelevante Daten und automatisierte Baudokumentationen abgeleitet werden.

Erste Elemente eines digitalen Produktionsleitstands werden derzeit, aufbauend auf einen prototypischen Einsatz beim Koralmtunnel, beim Ausbau des Semmering-Basistunnels umgesetzt. Dort erfolgt die Steuerung der Nachunternehmerleistungen über ein zentrales, digital gestütztes Dispositionssystem, in dem Arbeitsaufträge räumlich und zeitlich verortet sind, über eine Online-Plattform bidirektional kommuniziert werden und logistische Abläufe koordiniert werden. Die systematische Verknüpfung von Produktionsplanung und Materialbereitstellung mit den über einen Leitstand zentral gesteuerten gleisgebundenen Transportprozessen ermöglicht einen kontrollierten und transparenten Bauablauf. Auch wenn diese Ansätze noch keinen vollständig integrierten Produktionsleitstand darstellen, zeigen die prototypischen Umsetzungen, dass zentrale Elemente des beschriebenen Steuerungskonzepts bei hochkomplexen Infrastrukturprojekten praktisch erprobt sind. **Bild 8** zeigt die Visualisierung einer Leitstandumgebung als konzeptionelles Zielbild. Die dargestellten Dashboard-, Modell- und Steuerungsansichten für die Regelkreise Quali-

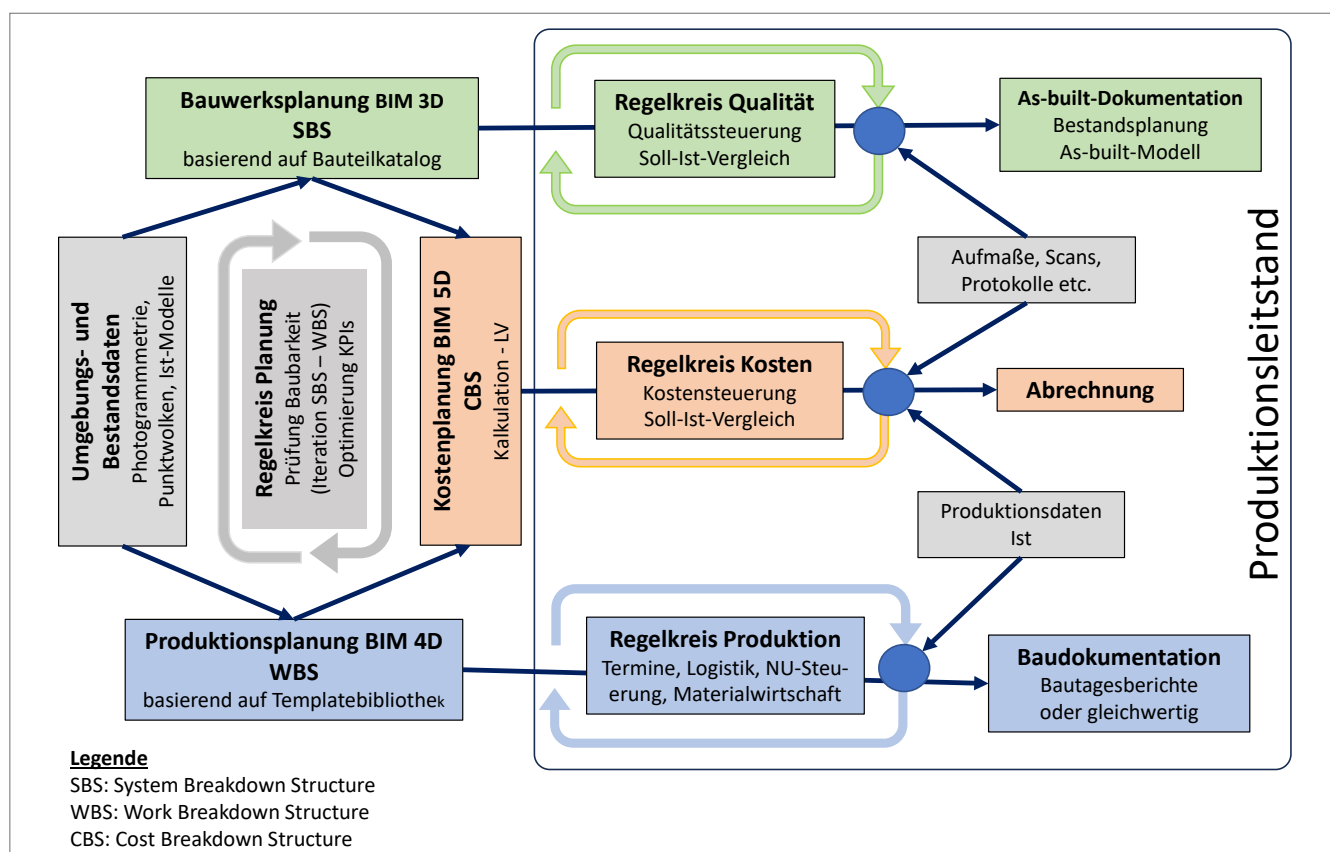


Bild 7. Konzept eines integrierten Produktionsleitstands. Grafik: eigene Darstellung
 Fig. 7. Concept of an integrated production control center. Source: own illustration

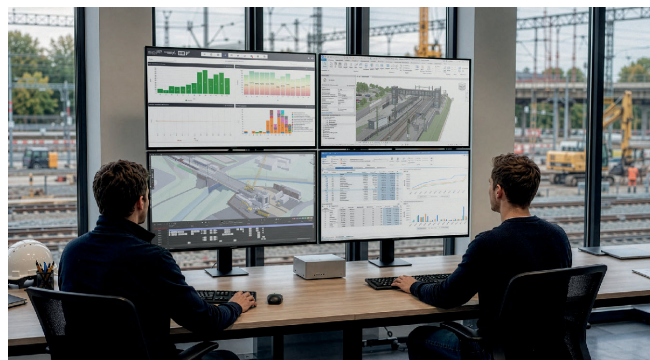


Bild 8. Visualisierung des Konzepts einer Leitstandumgebung zur integrierten Produktionsplanung und -steuerung mit Dashboard-, Modell- und Steuerungsansichten. Konzeptionelle Darstellung, erstellt mit KI-Unterstützung und redaktionell überarbeitet. Grafik: [27]
 Fig. 8. Visualization of the concept of a control room environment for integrated production planning and control with dashboard, model, and control views. Conceptual representation, created with AI support and editorially revised. Source: [27]

tät, Kosten und Produktion dienen der Veranschaulichung der integrierten Informationsbasis.

Organisatorisch kann der Leitstand räumlich auf der Baustelle oder dezentral im Sinne eines „virtuellen Leitstandes“ implementiert werden; entscheidend ist ein durchgängiger Informationsfluss zwischen den Regelkreisen. Gleichzeitig verändern sich die Rollen auf der Baustelle: Steuerungsfunktionen können zunehmend zentralisiert werden, während sich die Bauleitung stärker auf die operative Produktionsführung konzentriert. Der Produkti-

onsleitstand steht exemplarisch für den eingangs beschriebenen Paradigmenwechsel der Bauindustrie.

6 Fazit und Ausblick

Die digitale Produktionsplanung und -steuerung markiert einen strukturellen Wandel der Bauproduktion. Der Beitrag zeigt, dass komplexe Baustellen nicht allein durch Terminplanung, Arbeitsvorbereitung oder modellbasierte Visualisierung beherrscht werden können. Erforderlich sind vielmehr Transparenz und Simulationsfähigkeit als zentrale Systemeigenschaften eines digitalen Produktionsmodells, das Bauwerk, Bauablauf, Ressourcen, Logistik und Bauzustände integriert.

BIM wird damit nicht mehr ausschließlich als Planungsinstrument verstanden, sondern entfaltet seine Wirkung zunehmend in der Ausführungsphase – BIM kommt verstärkt und systematisch auf der Baustelle an und wird im Kernprozess der Baustellenwertschöpfung operativ wirksam. Die digitale Produktionsplanung und -steuerung kann vor diesem Hintergrund als wesentliches Instrument verstanden werden, um Bauprojekte von einer reaktiven, improvisationsgeprägten Abwicklung hin zu einer vorausschauend geplanten und aktiv gesteuerten Produktion weiterzuentwickeln. In kollaborativen Vertragsmodellen kann sie zudem die Vertragsabwicklung unterstützen, indem Transparenz, frühzeitige Risikoidentifikation und gemeinsame Entscheidungsgrundlagen gestärkt werden. Das Aufwand-Nutzen-Verhältnis hängt wesentlich von Komplexität, Projektdauer, Schnittstellendichte und logistischen Randbedingungen ab. Der Modellierungsaufwand steigt mit der erforderlichen Planungstiefe und ist daher

projektspezifisch gegen den erwarteten Nutzen abzuwägen. Besonders naheliegend erscheint der Einsatz bei komplexen, langlaufenden Infrastrukturprojekten mit hohen Termin-, Logistik- und Schnittstellenrisiken. Das Vierphasenmodell unterstützt diese Abwägung, indem nicht das Gesamtprojekt von Beginn an maximal detailliert modelliert werden muss, sondern zunächst Transparenz auf einer geeigneten Abstraktionsebene geschaffen und nur entscheidungsrelevante Bereiche vertieft simuliert werden. Die Standardisierung wiederkehrender Prozessmuster bildet dabei eine Voraussetzung für industrialisierte sowie perspektivisch automatisierte Bauverfahren. Die entstehenden Prozessdaten bilden wertvolles Domänenwissen und eröffnen Potenziale für künftige KI-gestützte Planungs- und Steuerungsansätze, die Produktionsstrategien unter variablen Rahmenbedingungen analysieren und fortlaufend verbessern können. Der Produktionsleitstand beschreibt hierfür ein konzeptionelles Zielbild: Er verbindet Produktionsplanung, Qualität, Kosten und Ausführung in einem integrierten Steuerungssystem und macht die Auswirkungen von Abweichungen und Steuerungsmaßnahmen nachvollziehbar. Die digitale Produktionsplanung und -steuerung ist damit ein zentraler Baustein, um die Produktivitätsdefizite der Branche durch eine veränderte Produktionslogik zu adressieren. Ihr Nutzen liegt insbesondere darin, Bauprozesse früher transparent, simulierbar und entscheidungsfähig zu machen.

LITERATUR

- [1] Melzner, J.; Helbing, R.: Baubetrieb im Wandel: Strategien für das Bauwesen von morgen. In: Bauingenieur 100 (2025), Heft 07-08, S. 204-213. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-07-08-38.
- [2] Arndt, W.-H.; Schneider, S.: Investitionsbedarfe für ein nachhaltiges Verkehrssystem: Schwerpunkt kommunale Netze. Deutsches Institut für Urbanistik, 2023.
- [3] Dullien, S.; Gerards Iglesias, S.; Hüther, M. et al.: Herausforderungen für die Schuldenbremse: Investitionsbedarfe in der Infrastruktur und für die Transformation. IMK Policy Brief, 2024.
- [4] Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.: Brancheninfo Bau. Produktivität im Baugewerbe – ein statistischer Befund. Berlin 06.12.2024 www.bauindustrie.de/fileadmin/bauindustrie.de/Zahlen_Fakten/BrancheninfoBau/BIB_-_Produktivitaet_im_Bauhauptgewerbe.pdf [Zugriff 16.02.2026].
- [5] Kostka, G.; Anzinger, N.: Großprojekte in Deutschland – Zwischen Ambition und Realität. Hertie School of Governance, Berlin, 2015.
- [6] Hoffmann, W.; Körkemeyer, K.: Zum Umgang mit der Komplexität von Baustellen – Ergebnisse einer Expertenbefragung. In: Bauingenieur 93 (2018), Heft 9, S. 347-354. doi.org/10.37544/0005-6650-2018-09-47.
- [7] Meyer, O.; Böll, M.; Legat, C.: Status and Future Prospects of the Standardization Framework Industry 4.0: A European Perspective. In: Borangiu, T.; Trentesaux, D.; Leitão, P. et al. (eds.): Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future. In: SOHOMA 2024. Studies in Computational Intelligence, Vol 1197. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-031-85316-6_5
- [8] Bundesverband Bausoftware e.V. (BVBS) (2024): Whitepaper: Die digitale Transformation der Baubranche. Bundesverband Bausoftware e.V., Oktober 2024.
- [9] Schuh, G. et al.: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. In: Schuh, G.; Stich, V. (eds.): Produktionsplanung und -steuerung 1. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg (2012). doi.org/10.1007/978-3-64225423-9_2.
- [10] Kochendörfer, B.; Liebchen, J. H.; Viering, M. G.: Bau-Projekt-Management – Grundlagen und Vorgehensweisen. 6. aktualisierte Auflage. Springer Verlag, Wiesbaden, 2021. doi.org/10.1007/978-3-658-34080-3.
- [11] Samimpey, R.; Saghatforoush, E.: A Systematic Review of Prerequisites for Constructability Implementation in Infrastructure Projects. In: Civil Engineering Journal, Vol. 6 (2020), Iss. 3, pp. 576-590. doi.org/10.28991/cej-2020-03091493.
- [12] VDI 2552 Blatt 2: Building Information Modeling – Begriffe. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI), Düsseldorf, 2018.
- [13] Mellenthin Filardo, M.; Melzner, J.; Lammert, A. et al.: Kosten-Nutzen-Analyse der BIM-Methode: Eine vergleichende Fallstudie. In: Bauingenieur 100 (2025), Heft 11. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-11-48.
- [14] Autodesk Inc.: Autodesk Navisworks. Software zur Koordination, 4D-Simulation und Analyse von Bauprojekten. San Rafael, CA (USA), 2024. www.autodesk.com [Zugriff am: 13.02.2026].
- [15] thinkproject: VDC MANAGER. www.thinkproject.com [Zugriff am: 21.02.2026].
- [16] RIB Software GmbH: RIB 4.0. www.rib-software.com [Zugriff am: 21.02.2026].
- [17] Bentley Systems Inc.: SYNCHRO Software für digitale Bauabwicklung. www.bentley.com [Zugriff am: 21.02.2026].
- [18] Fischer, A.: Simulationsgestützte Digitale Zwillinge in der Baulogistik – Ein Lösungsansatz zur virtuellen Optimierung von Bauprozessen. Technische Universität München, 2025.
- [19] Berner, F.; Habenicht, I.; Kochkine, V. et al.: Simulation in der Fertigungsplanung von Bauwerken. In: Bauingenieur 88 (2013), Heft 2, S. 89-97.
- [20] Ismail, A.: BIM Integrated and Reference Process-based Simulation System for Construction Project Planning. Technische Universität Dresden, Dissertation, 2022, nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-798907.
- [21] GLCI – German Lean Construction Institute (Hrsg.): Lean-Logistik-Leitfaden. 2. Auflage, Berlin 2025. glci.de/wp-content/uploads/2025/11/GLCI-Lean-Logistik-Leitfaden-2.-Auflage.pdf [Zugriff 16.02.2026].
- [22] Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI): Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen vom 10. Juli 2013 (BGBl. I S. 2276), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2636), in Kraft getreten am 1. Januar 2021.
- [23] Backhaus, J. O.; Dahm, M. H.: Einblick in den Stand der Implementierung von Lean Construction Ansätzen in ausgewählten deutschen Bauunternehmen – Ergebnisse einer qualitativen Studie. In: Bauingenieur 95 (2020) Heft 2, S. 64-72. doi.org/10.37544/0005-6650-2020-02-56.
- [24] Salz, C.; Burr, J.; Hertzog, S.: Digitale Zwillinge für die Produktion. Industry 4.0 Science 41 (2025), Heft 3, S. 6-12. doi.org/10.30844/I4SD.25.3.6
- [25] Vetter, A.; von Mammen, S.: The Interactive Retrodution Cycle: Amplifying Cognitive Focus in Complex Simulations. In: 2025 29th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT), Prague, Czech Republic, 2025. IEEE. doi.org/10.1109/DS-RT68115.2025.11186011
- [26] Haghsheeno, S.; Deubel, M.; Spenner, L.: Digitale Technologien und deren Wertschöpfungspotentiale für die Bauwirtschaft. In: Bauingenieur 94 (2019), Heft 2, S. 45-55. doi.org/10.37544/0005-6650-2019-02-31.
- [27] Building Information Innovator GmbH (BII GmbH): Next level simulation. www.bii-gmbh.com/ [Zugriff 04.02.2026].
- [28] Blender Foundation: Blender 5.0. www.blender.org [Zugriff am 04.02.2026].

**Prof. Dr.-Ing.
Christof Gipperich**

gipperich@hochschule-bc.de
Hochschule Biberach
Karlstraße 6-11, 88400 Biberach

**Prof. Dr.
Sebastian von Mammen**

sebastian.von.mammen@uni-wuerzburg.de
Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Sanderring 2, 97074 Würzburg

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

Vorschau 10.2026



Das Wohnprojekt Xylino im niederländischen Almere wurde vollständig aus Furnierschichtholz geplant und ausgeführt.

Foto: geWOONhout, Koopmans Bouwgroep, Metsä Group, Fotograf: Marnix Klooster

Klimagerechtes nachhaltiges Bauen

Andere Länder setzen längst klare Rahmenbedingungen für nachhaltiges Bauen. Warum Deutschland trotz hoher technischer Kompetenz nur langsam vorankommt und welche Aufgaben auf Bauingenieurinnen und Bauingenieure zukommen.

Konstruktiver Stahl- und Holzbau

Das Wohnprojekt Xylino in Almere (Niederlande) zeigt, wie industriell gefertigter, modularer Holzbau den Herausforderungen des europäischen Wohnungsmarkts begegnen kann.

IMPRESSUM

Bauingenieur

ISSN 0005-6650, 101. Jahrgang 2026

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Christian Glock (Sprecher)
Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion,
Rheinland-Pfälzische Technische Universität
Kaiserslautern-Landau (RPTU)
Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dietmar Adam
Institut für Geotechnik, TU Wien
Prof. Dr.-Ing. habil. Sven Klinkel
Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik
RWTH Aachen
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Melzner
Professur Baubetrieb und Bauverfahren,
Bauhaus-Universität Weimar
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Hartmut Pasternak
Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau
Brandenburgische Universität (BTU)

Alle Hauptaufsätze sind durch die
Herausgeber begutachtet und rezensiert.

Organschaft

Der Bauingenieur ist offizielle Organzeitschrift
der VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik.

Redaktion

Michael Heeg, Chefredakteur
Telefon: +49 211 6103-508
mheeg@vdi-fachmedien.de
Dipl.-Phys.-Ing. Udo Schnell
Redaktionsleitung VDI Fachmedien
Telefon: +49 211 6103-104
uschnell@vdi-fachmedien.de
Anne Katrin Sarrazin, Redaktionsassistentin
Telefon: +49 211 6103-171
asarrazin@vdi-fachmedien.de

Autorenhinweise/Veröffentlichungsgrundlagen:
www.bauingenieur.de

Pressemitteilungen bitte an

bauingenieur@vdi-fachmedien.de

Verlag

VDI Verlag GmbH & Co. KG
Unternehmen für Fachinformationen
VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf
Postfach 10 10 22, 40001 Düsseldorf
Commerzbank AG
SWIFT/BIC-Code: DRES DE FF 300,
IBAN: DE69 3008 0000 0212 1724 00

Geschäftsführung

Beatrice Gerner

Layout

Alexander Reiß

Leitung Media Sales

Petra Seelmann-Maedchen
Telefon: +49 211 6188-191
pmaedchen@vdi-nachrichten.com

Anzeigenverkauf

Verlagsbüro Siegfried Pachinger
Telefon: +49 521 977998-80
Fax: +49 521 977998-90
sven.pachinger@verlagsbuero-pachinger.de

Es gilt der Anzeigentarif Nr. 55
vom 1. Januar 2026.

Vertrieb und Leserservice

Leserservice VDI Verlag
65341 Eltville
Telefon: +49 6123 9238-202
Fax: +49 6123 9238-244
vdi-verlag@vuser-service.de

Bezugspreis

10 Ausgaben jährlich
(davon 1/2 und 7/8 als Doppelausgabe)
Jahresabonnement: € 573,- (E-Paper € 491,-)
VDI-Mitglieder: € 515,70 (E-Paper € 441,90)
nur für persönliche Mitglieder
Studenten: € 142,- (E-Paper € 123,-)
gegen Studienbescheinigungen
Preise Inland inkl. MwSt., Ausland exkl. MwSt.
zzgl. Versandkosten (Inland: € 18,-,
Ausland: € 40,-, Luftpost auf Anfrage)
Einzelheft: € 59,- inkl. MwSt. zzgl. Versandkosten

Die Mindestlaufzeit beträgt 12 Monate.
Im Anschluss an die Mindestlaufzeit ist das
Abonnement jeweils zum Monatsende
kündbar.

Druck

Möller Pro Media GmbH
Zeppelinstraße 6, 16356 Ahrensfelde

Copyright

Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen
Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich
geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen
Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne
Zustimmung des Verlages unzulässig und
strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen,
Übersetzungen, Mikroverfilmungen
und die Einspeicherung und Verarbeitung in
elektronischen Systemen. Für unverlangt
eingesandte Manuskripte kann keine Gewähr
übernommen werden.

Weitere Informationen:
www.bauingenieur.de

Auflage IVW-geprüft





Production Planning and Control for Complex Construction Projects

C. Gipperich, S. von Mammen

ABSTRACT The increasing complexity of large construction projects requires the further development of production planning and control in the construction industry. Based on the state of the art in scheduling, work preparation, BIM, Lean Construction, and existing simulation approaches, the requirements for a dynamically adaptive production model are derived, integrating the structure and construction production within a single system. The paper develops transparency and simulation capability as central system properties.

Transparency is enabled by the joint digital representation of the structure and construction production, including the construction sequence, resources, logistics, and construction states. Simulation capability extends this foundation by enabling process variants, disruptions, and control measures to be evaluated before implementation. Game-engine-based technologies are classified as a possible technical environment for such production models. The four-phase model is presented as an approach for demand-oriented refinement of production planning and early constructability assessment. In addition, a concept for the integrative coupling of building design and production planning is proposed. Building on this, the production control centre is described as a conceptual target model for future production control. Digital production planning and control is thus understood as an instrument for developing complex construction sites from reactive, improvisation-driven project execution toward proactively planned and actively controlled production.

KEYWORDS

Production planning, production control, simulation capability, BIM 4D

Produktionsplanung und Produktionssteuerung komplexer Baustellen

ZUSAMMENFASSUNG Die steigende Komplexität großer Bauprojekte erfordert eine Weiterentwicklung der Produktionsplanung und -steuerung im Bauwesen. Ausgehend vom Stand der Technik zur Terminplanung, Arbeitsvorbereitung, BIM, Lean Construction und bestehenden Simulationsansätzen werden die Anforderungen an ein dynamisch adaptives Produktionsmodell hergeleitet, das Bauwerk und Bauproduktion integriert in einem System abbildet. Der Beitrag entwickelt Transparenz und Simulationsfähigkeit als zentrale Systemeigenschaften. Transparenz wird durch die gemeinsame digitale Abbildung von Bauwerk und Bauproduktion mit Bauablauf, Ressourcen, Logistik und Bauzuständen ermöglicht. Simulationsfähigkeit erweitert diese Grundlage um die Möglichkeit, Ablaufvarianten, Störungen und Steuerungsmaßnahmen vor ihrer Umsetzung zu bewerten. Für die mögliche technische Umgebung solcher Produktionsmodelle werden Game-Engine-basierte Technologien eingeordnet. Mit dem Vierphasenmodell wird ein Ansatz zur bedarfsorientierten Vertiefung der Produktionsplanung und zur frühen Prüfung der Baubarkeit vorgestellt. Zudem wird ein Konzept für die integrative Kopplung von Bauwerksplanung und Produktionsplanung vorgelegt. Darauf aufbauend wird der Produktionsleitstand als konzeptionelles Zielbild einer zukünftigen Produktionssteuerung beschrieben. Digitale Produktionsplanung und -steuerung wird damit als Instrument verstanden, um komplexe Baustellen von einer reaktiven, improvisationsgeprägten Abwicklung hin zu einer vorausschauend geplanten und aktiv gesteuerten Produktion weiterzuentwickeln.

1 Introduction and Problem

Construction organisations on both the client and contractor sides will face an exceptionally high implementation pressure over the coming years. Across virtually all infrastructure sectors – including rail, roads, energy, and digital infrastructure – as well as in building construction, historically high levels of investment and refurbishment demand coincide with limited human and organisational capacities. Demographic developments, particularly the shortage of skilled professionals and experienced managers, are expected to further exacerbate this situation [1-3]. At the same time, recurring schedule delays and cost overruns have been empirically documented in complex construction and infrastructure projects [4, 5], and project delivery has repeatedly

been shown to deviate from its intended objectives [6]. The predominantly reactive approach to project delivery, which is largely focused on the construction phase itself, is increasingly reaching its structural limits. Moreover, despite the growing availability of digital tools, productivity in the construction industry has stagnated [1]. The primary cause lies less in the lack of available technologies than in the established planning and control paradigms governing construction production. In particular, approaches that interpret construction projects as controllable production systems and support anticipatory decision-making remain largely absent.

Against this background, the present paper revisits the concept of production planning and production control and develops it as a conceptual framework for a potential paradigm shift.

Construction projects are interpreted as dynamic, data-driven production systems, with transparency and simulation capability identified as the key system properties required for productive, schedule-reliable, and cost-efficient project delivery.

The paper first analyses existing approaches to production planning and production control in construction and classifies scheduling, construction planning, BIM-based process visualisation, Lean Construction, and simulation-based approaches with regard to their contribution to transparency and simulation capability. Based on this analysis, requirements are derived for a production model that integrates the constructed asset, construction processes, resources, logistics, and construction states. Game-engine-based technologies are then presented as the technical environment for the interactive modelling and simulation of such production models. Finally, a methodological approach to digital production planning is developed, and a production control centre is described as the conceptual target model for future adaptive production control.

2 State of the Art

This section summarises the current state of the art in established planning and production control approaches within the construction industry in order to derive the requirements for digital production planning and production control. The discussion focuses on complex, long-duration, and logistically demanding construction projects, particularly in infrastructure construction projects, such as linear transport infrastructure projects, bridge and tunnel construction, and refurbishment projects carried out under continued operation.

2.1 Standardisation as the Foundation of Digitalisation and Productivity

The development sequence of standardisation – digitalisation – industrialisation – automation forms the basis for sustainable productivity improvements in many industries [7]. Products and processes are first standardised and digitally represented, thereby creating the foundation for reproducible industrialised workflows and, where technically and economically feasible, their partial or complete automation. The construction industry likewise recognises standardisation as a key prerequisite for digitalisation, industrialisation, and automation. While the standardisation of structure components is progressing in specific areas, the cross-project standardisation of construction processes – which represent the methodological core of project execution on construction sites – has only recently begun to be discussed as a prerequisite for the digitalisation, industrialisation, and automation of construction production [1, 8].

Construction processes, which define the project-specific temporal and, where applicable, spatial sequence of activities, are still predominantly planned and executed individually. Site managers and foremen rely primarily on personal experience and project-specific solutions. The systematic capture and application of successfully validated production knowledge is generally not a central focus. As a result, each construction project is largely “reinvented” rather than being based on standardised process modules.

By contrast, the standardisation of subprocesses, resources, and equipment offers several advantages. Recurrent workflows

stabilise project execution and promote productivity gains through the repeated performance of identical or similar activities, resulting in the well-established learning curve effects. Planning reliability increases, improvisation is reduced, and dependence on individual experience decreases. Individual process segments can be documented, stored in a generalised form wherever possible, and continuously refined. As a result, construction production becomes systematically capable of organisational learning, enabling continuous optimisation and strategic specialisation. Furthermore, the establishment of a robust knowledge base provides the foundation for automated planning approaches and AI-assisted methods.

2.2 Production Planning

In other industries, such standardisation has already been achieved, enabling systematic production planning. Production planning comprises the integrated planning of processes, resources, capacities, and material flows within a production system, with the objective of ensuring economical, schedule-compliant, and controllable project execution [9]. It therefore provides the foundation for effective production control. Such an integrated approach to planning has not yet been introduced systematically or on a broad scale within the construction industry.

2.2.1 Scheduling and Construction Planning

Regarding construction production, industry practice distinguishes between scheduling and construction planning. Schedules – typically represented as bar (Gantt) charts, time-distance diagrams, or visual planning formats known from Lean Construction – primarily serve to structure project activities over time by defining dependencies and identifying the critical path. They are based on linear dependency relationships between activities, the durations of which are determined using effort estimates that are themselves derived predominantly from construction-related or economic experience [10]. Construction planning further develops the schedule only after contract award and throughout project execution by providing detailed logistics planning, equipment deployment concepts, and construction process concepts. In larger construction companies, these tasks are often carried out by dedicated organisational units, whereas in small and medium-sized enterprises they are typically undertaken by site managers and foremen.

Because planning is refined only gradually and at a relatively late stage, this planning approach fails to consider actual production conditions, resource interdependencies, material flows, and logistics early enough and in sufficient detail, despite their significant influence on project execution. This limitation is particularly evident in complex, long-duration infrastructure construction projects. The feasibility of the structural design – in the literature referred to as constructability [11] – is likewise often assessed only to a limited extent, resulting in a systematic disconnect between structural design and production planning. Furthermore, construction planning carried out during project execution does not adequately account for long-term planning perspectives, thereby increasing the likelihood of schedule deviations, inefficient resource utilisation, and contractual claims arising from disruptions to the construction process. One of the

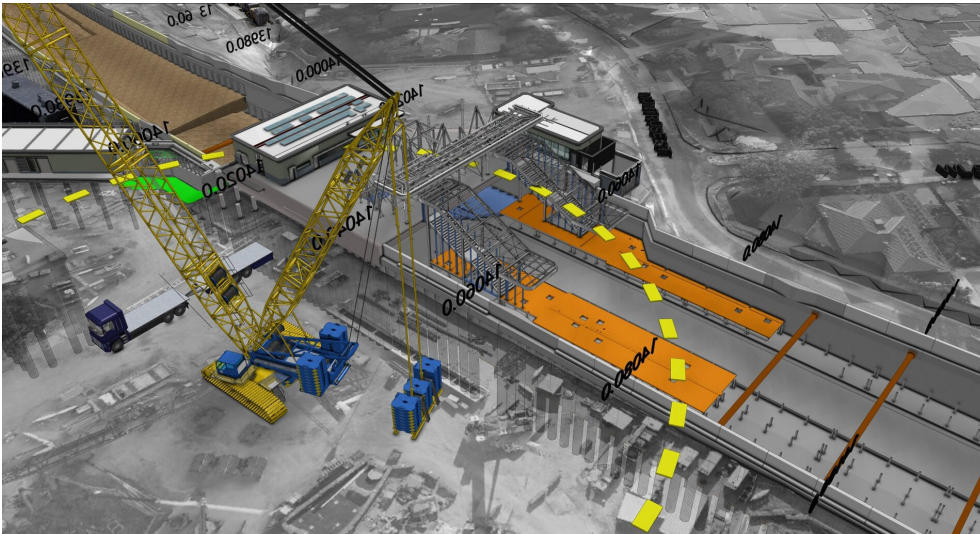


Fig. 1. This screenshot of a market-leading software application shows the refinement of production planning down to the equipment level. *Source: [17]*
Bild 1. Dieser Screenshot einer marktführenden Software zeigt die Vertiefung einer Produktionsplanung bis auf Geräteebene.
Grafik: [17]

principal reasons for this lies in the traditional separation between structural design and construction execution. In conventional project delivery and contractual models, the production expertise of the executing contractor is frequently incorporated only after the major design decisions have already been completed. As a consequence, construction methods, construction states, logistics, resources, and temporary boundary conditions are not consistently treated as design-defining parameters. Instead, production planning must anticipate and integrate realistic production conditions – including resources, material flows, and logistics – and evaluate the constructability of the structural design. It must therefore commence in the early project phases and extend the planning perspective from the mere scheduling of activities towards the proactive design of production processes, where appropriate down to the level of individual equipment.

2.2.2 BIM – 3D, 4D, 5D

The Building Information Modelling (BIM) approach, as defined in standards and the literature, for example in VDI 2552 Part 2 [12], seeks to address these requirements through the dimensions of geometry (BIM 3D), time (BIM 4D), and cost (BIM 5D). However, this approach has so far been implemented only to a limited extent [13]. While structure component information is now largely represented consistently in digital models, combining geometric descriptions with associated metadata, scheduling and resource planning continue to rely predominantly on conventional methods, albeit increasingly supported by semi-digital tools and workflows. A range of software applications enables the creation, editing, and export of bar (Gantt) charts and time–distance diagrams. In subsequent software environments, these planning data can be linked to digital structure models by associating model elements with individual time steps (e.g. [14–16]). This approach results in BIM 4D visualisations of existing construction schedules.

More advanced approaches employ rule-based links between schedules and digital structure models. For example, changes in quantities within the structure model can be translated automatically into revised effort estimates and updated schedules, thereby facilitating the evaluation of alternative planning

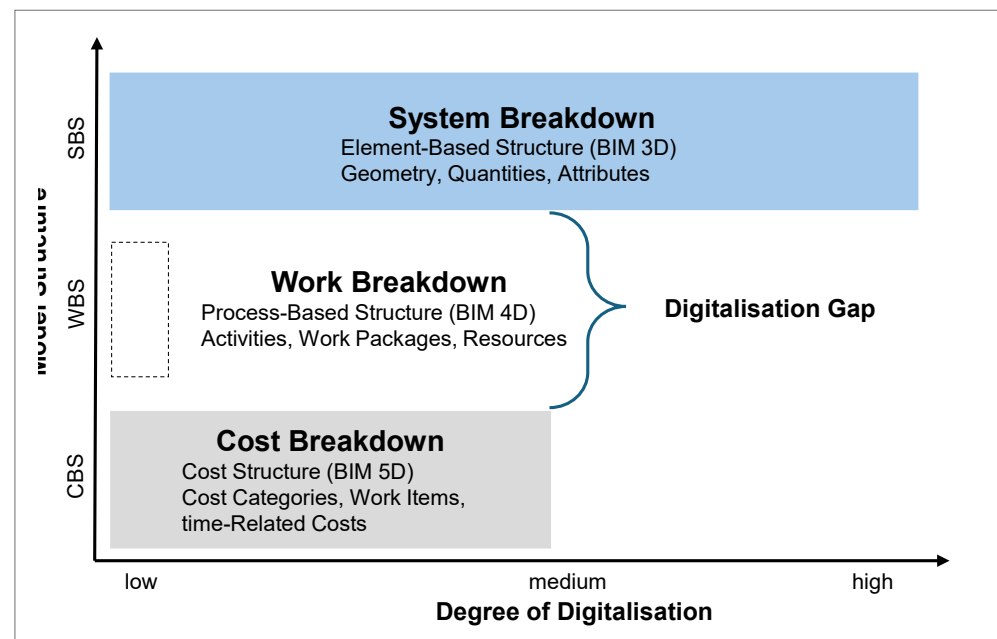
scenarios. In isolated cases, this integration can be extended to the level of individual construction equipment [17]. Equipment models can then be incorporated into a three-dimensional environment, and movement trajectories can be defined and synchronised with scheduled activities (**Figure 1**). Nevertheless, construction processes and effort estimates are still generated primarily on the basis of expert judgement and are only subsequently imported for visualisation or consistency checking.

Despite the BIM 4D construction process visualisations described above, a structural gap remains between the asset-oriented System Breakdown Structure (BIM 3D) and the cost-oriented Cost Breakdown Structure (BIM 5D) (see **Figure 2**). The Work Breakdown Structure (BIM 4D) – representing the production planning of the construction project – does not yet achieve the same level of detail or the same degree of digitalisation as the System Breakdown Structure (BIM 3D). Only a fully data-driven, process- and resource-oriented approach to production planning would provide the foundation for a completely digital and model-based Cost Breakdown Structure (BIM 5D).

As previously demonstrated elsewhere, for example in the context of construction logistics [18], a paradigm shift is required: construction processes must be generated, validated, and optimised within a digital, simulation-capable production model, rather than merely visualising existing construction schedules. Such a model provides transparency regarding construction states, resources, logistics, and spatial interdependencies, while simultaneously forming the basis for simulation-based evaluation of alternative production scenarios. The construction schedule thus becomes the result of process modelling and simulation rather than their starting point.

The simulation of construction and construction logistics processes is not a new field of research. It has been addressed nationally and internationally through a variety of approaches, including construction process simulation, construction logistics planning, the analysis of material flows, and model-based evaluation of alternative construction scenarios [19, 20]. Building on this body of work, the present paper does not focus on individual simulation techniques. Instead, it identifies simulation capability as the key system property of an integrated approach to production planning and production control.

Fig. 2. Digitalisation gap between the System Breakdown Structure SBS (BIM 3D) and the Cost Breakdown Structure CBS (BIM 5D) resulting from the absence of a consistently data-driven Work Breakdown Structure WBS (BIM 4D). *Source: own illustration*
 Bild 2. Digitalisierungslücke zwischen System Breakdown Structure SBS (BIM 3D) und Cost Breakdown Structure CBS (BIM 5D) infolge einer fehlenden durchgängig datenbasierten Work Breakdown Structure WBS (BIM 4D).
 Grafik: eigene Darstellung



2.3 Construction Logistics

The purpose of construction logistics is to ensure that all resources required for construction production are available at the right place and at the right time, while planning the construction site infrastructure necessary to support this process [21]. The basis for construction logistics is the project schedule together with the resulting material and resource flows. Consequently, the reliability, level of detail, and completeness of the schedule have a direct impact on the quality of logistics planning. To compensate for uncertain effort estimates, planning is frequently based on contingencies, while, as outlined above, detailed planning is typically developed only during project execution as part of construction planning. This historically evolved separation of scheduling, construction planning, and construction logistics differs fundamentally from industrial production systems, where production planning inherently integrates processes, resources, capacities, material flows, and logistics [20].

2.4 Integration of Structural Design and Production

The German Fee Structure for Architects and Engineers (HOAI) [22] primarily focuses on the design of the structure within its defined scope of services, while addressing scheduling and the documentation of construction progress only to a limited extent. Concepts such as production planning, takt planning, and construction logistics are not systematically embedded within the HOAI. Although the fundamental concept of continuously assessing constructability alongside the design process was already introduced in the 1970s and has repeatedly been advocated in the literature [11], its consistent integration into planning processes has not been achieved to date. Responsibility for production planning therefore remains largely with the construction phase itself, particularly with site management and construction planning. This promotes a reactive approach to planning during project execution and increases the susceptibility to schedule deviations and contractual claims.

It can therefore be concluded that continuous feedback between structural design and production planning throughout all project phases is required to enable ongoing optimisation with respect to cost, schedule, and constructability.

2.5 Production Control

The planning methods and tools described above form the basis of production control during project execution, particularly in the context of the organisational and contractual separation between design and construction. The principal challenge arises from the highly dynamic nature of construction projects, which are characterised by external disruptions and a continuous need to adapt production planning. Deviations from predicted ground conditions, adverse weather, design errors, or a planning baseline that is often defined only in abstract terms frequently push existing systems to the limits of their adaptability. As a consequence, production control risks evolving from proactive management into reactive improvisation.

2.5.1 Lean Construction, Takt Planning and Takt Control

Lean Construction, particularly Takt Planning and Takt Control, currently represents one of the leading organisational approaches for structuring and continuously improving construction processes, although it is by no means applied across the industry as a whole [23]. It transfers principles from industrial production systems to the construction site and, in particular, promotes transparency, collaboration, and process stability [10]. Lean-based methods primarily focus on the collaborative coordination of work and the reliable management of commitments between project participants. The underlying planning information is typically represented in an abstract form, predominantly based on activities and time, using visual planning techniques.

As project complexity increases, however, this form of representation reaches its limits, as it is only partially capable of transparently representing the actual interdependencies between

Table 1. Categorised requirements for digital production planning and control systems.
Tabelle 1. Kategorisierte Anforderungen an digitale Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme.

Category	Key Requirement
Structural Requirements	
Standardisation	Transformation of construction processes into reusable, data-driven, and broadly applicable process modules.
Integrated Production Modelling System	Integration of scheduling, construction planning, construction logistics, and resources into an integrated production planning system.
Integrated Structural Design and Production Planning	Integration of production models, the structure, resources, and construction states within a simulation-capable production model.
Coupling of Structural Design and Production Planning	Continuous feedback between structural design and production planning. Systematic constructability assessment throughout the project phases.
Systemic Requirements	
Transparency	Consistent and decision-oriented representation of construction states, resources, logistics, spatial dependencies, and process interrelationships.
Simulation Capability	Evaluation of construction process alternatives, disruptions, and control actions before implementation.
Generative Process Modelling	Model-based generation of construction processes and process alternatives based on the structure, resources, logistics, and boundary conditions.
Dynamic Production Systems	Consideration of continuously evolving system states as the basis for production planning.
Adaptive Production Control	Adaptive updating of production planning in response to changing project conditions.

construction processes, resources, logistics, and construction states or of enabling reliable simulation-based predictions. A future-oriented approach therefore lies in combining the organisational strengths of Lean Construction with digital, data-driven production models. While Lean Construction primarily aims to improve process stability, collaboration, flow orientation, takt planning, and the reliable coordination of project participants [21, 23], digital production models enable a systemic representation of construction production as an interconnected and dynamic production system.

2.5.2 Production Control Systems in Other Industries

Production planning and production control systems have been well established for many years in industries such as automotive and mechanical engineering. They are generally based on a predefined, spatially fixed, and long-term stable production system. In such environments, digital twins serve as largely invariant reference models on which production processes, material flows, and resource utilisation can be planned, analysed, and optimised, while also supporting the management of operational disruptions [24].

In construction production, however, the production system is not invariant. Instead, it emerges and continuously evolves as an integral part of the production process itself. The production system (the construction site) and the product (the structure) largely coincide both spatially and functionally. As construction progresses, factors such as the availability of space, site accessibility, logistics routes, work areas, and the interactions between the structure, resources, and materials continuously change. Consequently, the production system represents a time-dependent system state that evolves continuously as a function of production progress. The product, the production

environment, and the means of production are therefore inseparably linked and mutually influence one another.

These characteristics of construction production demonstrate that concepts of industrial production planning and production control can only be transferred to construction to a limited extent. Approaches that assume static production systems reach structural limits when applied to the representation of complex construction projects. Digital production planning in construction therefore requires tools that are explicitly designed to accommodate the co-evolution of the product and its continuously evolving production system. It requires planning, simulation, and control that address not only the processes taking place within a production system, but also the continuous evolution of the production system itself.

3 Requirements for Digital Production Planning and Production Control Systems in Construction

The analysis of existing planning and production control approaches gives rise to requirements at two distinct levels. (1) Structural requirements concern the organisational and data-driven integration of planning domains that have traditionally been treated separately. They define which elements – including scheduling, construction planning, construction logistics, structural design, resources, and construction states – must be integrated within a digital production planning system. (2) Systemic requirements, by contrast, describe the capabilities that such a system must provide in order to represent dynamic production processes transparently, develop them on the basis of digital models, simulate them, evaluate their constructability, and continuously update them in response to changing boundary conditions. **Table 1** summarises these requirements.

Overall, it becomes evident that digital production planning in construction must extend beyond the mere scheduling of activities and the sequencing of structure components towards a consistent digital model of the co-evolving production system with a higher degree of fidelity to reality. The resulting traceability of dependencies creates transparency and provides the foundation for well-informed decision-making throughout the project lifecycle. In doing so, it enables human decision-makers to remain at the centre of the decision-making process, even in increasingly complex construction projects.

Within the context of this paper, simulation is regarded as the central instrument of production planning and production control. It enables different system perspectives – particularly resources, logistics, spatial interdependencies, and process structures – to be integrated within a common production model, allowing construction processes to be generated, evaluated, and optimised across alternative scenarios before they are executed.

Transparency and simulation capability are not regarded as isolated properties of production planning and production control, but as complementary system properties of an integrated approach. Only a structured, consistent, and transparent representation of the production system provides the basis for reliable simulation. Simulation, in turn, extends the understanding of the production system by making the consequences of planned interventions transparent before they are implemented.

4 Implementation of Simulation-Capable Production Models

To satisfy the requirements defined above, construction professionals must be enabled to create production models, perform simulations, evaluate their results, and iteratively refine the underlying models. To support exploration and decision-making as effectively as possible, these functionalities must be provided interactively and in real time [25]. Game-engine-based technologies, as discussed for example in the context of construction by [26], provide the technical foundation for meeting these application-specific requirements by integrating a range of information-processing subsystems, including graphical rendering of virtual environments, interaction with digital model elements, and their simulation in accordance with physical principles. When construction processes are visualised in a manner that corresponds to the activities observed on site, the cognitive effort required to interpret the model is substantially reduced. The represented processes become more intuitive to understand, cognitive load decreases, and decisions regarding modifications to construction processes can be made on a more comprehensible basis.

A prerequisite for this approach is the capability to model the production system with a high degree of fidelity to reality and to approximate actual construction conditions as closely as possible. The structure, resources, and environmental conditions can be integrated within a common digital production model, thereby addressing the requirements arising from the co-evolution of the product and the production system. Consequently, the structural design can be represented not only geometrically but also enriched with production-related information, such as construction states, accessibility, resources, logistics, and temporary boundary conditions. On this basis, the early

assessment of constructability is supported, as the consequences of design decisions for subsequent construction execution become visible already within the production model.

Beyond visualisation alone, game-engine-based applications enable navigation through both time and space within a virtual production model. They support the definition of production events, such as material deliveries or the installation of individual structure components, thereby facilitating the generation of construction processes across the different construction states that evolve over time. Immediate visual feedback on the resulting production processes, viewed from different perspectives and at different points in time, enables the evaluation of alternative courses of action under varying boundary conditions. Different scenarios can be assessed, and potential conflicts identified before construction begins. At the same time, changing boundary conditions and evolving system states can be fed back into the production model, transforming production planning from a one-off planning activity into a continuously evolving production control process. In this way, production planning develops into an anticipatory instrument for project control.

A further significant advantage lies in the ability to digitalise and scale production knowledge. Validated and well-documented processes can be identified as reusable process patterns, stored, and applied across multiple projects. This creates a continuously expanding knowledge base that supports standardisation while simultaneously providing the foundation for automated and AI-assisted planning approaches. Digital production planning thereby evolves into a learning system and opens up the prospect of establishing comprehensive domain knowledge.

Despite these technological possibilities, human expertise remains the central decision-making authority. Game-engine-based applications enhance the analytical and cognitive capabilities of project participants but do not replace their professional judgement. They provide transparency and simulation capability and thereby constitute the structural foundation for an improved production logic.

5 Methodological Approach

5.1 Production Planning

Technological innovation and organisational processes ideally evolve in a mutually reinforcing manner. The greatest productivity gains are achieved where both elements complement one another and are developed jointly through a process of co-evolution.

In several recent infrastructure projects – particularly within the context of Deutsche Bahn – interactive simulation and planning systems have already been deployed that enable model-based and disruption-resilient production planning (Figure 3). The user interface shown integrates spatial planning data and digital structure models with the temporal dimension of production processes. In the example presented, terrain and structural models, site layouts and alignment information, temporary construction states, and construction equipment are linked with their corresponding process sequences through the timeline displayed at the bottom of the figure. The insights gained from these applications provide an important point of reference for the methodological considerations presented in the following sections.

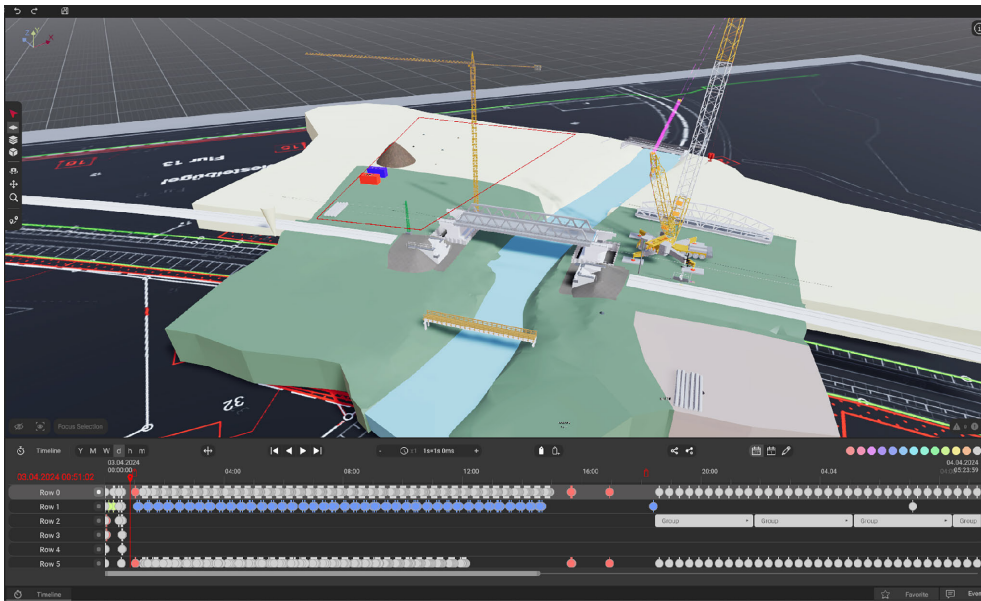


Fig. 3. Example of interactive simulation and planning software for planning the “Else” railway overpass of DB InfraGO.

Source: [27]

Bild 3. Beispiel einer interaktiven Simulations- und Planungssoftware zur Planung der Eisenbahnüberführung „Else“ der DB InfraGO.

Grafik: [27]

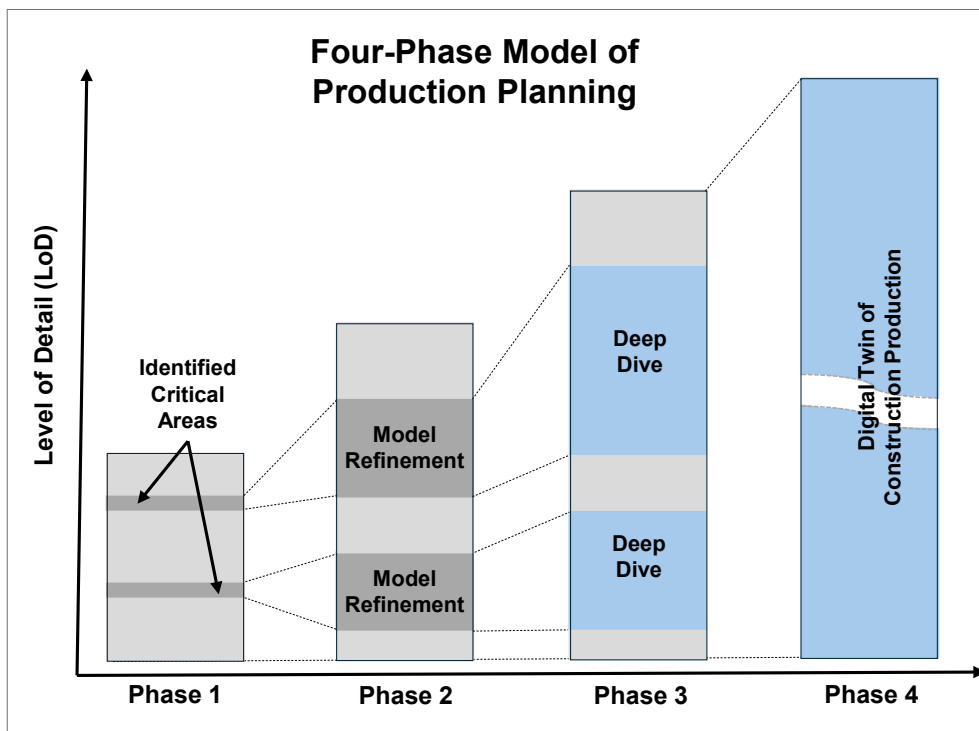


Fig. 4. Four-phase model of production planning.

Source: own illustration

Bild 4. Vierphasenmodell der Produktionsplanung.

Grafik: eigene Darstellung

5.1.1 Constructability Assessment

The objectives and methodological approach of digital production planning depend strongly on the stage reached within the planning process. Many projects that were originally developed using conventional methods due to their long planning periods are initially subjected to a constructability assessment. For this purpose, the available planning information relating to both the structural design (structures) and the production planning (schedules, etc.) must first be represented within a digital planning environment. BIM models are not a prerequisite for this purpose. In many cases, a simplified purely geometric representation, adapted to the required level of detail of the production planning, is sufficient and can be created with

comparatively little effort using freely available 3D modelling and animation software [28]. Where BIM models of the structure already exist, they can be extended and enriched with behavioural logic in order to represent, for example, construction logistics processes. The subsequent digital implementation of a construction project then follows the Four-Phase Model, as described below.

5.1.2 Four-Phase Model

Digital production planning does not require all construction processes to be modelled down to the level of individual equipment from the outset. Instead, it follows the principle of progressive, demand-driven refinement, analogous to the

planning methodology defined by the German Fee Structure for Architects and Engineers (HOAI) [22]. The Four-Phase Model shown in **Figure 4** describes the progressive refinement of digital production planning, from a structural process perspective (milestone planning) to a simulation-capable representation at the level of individual construction equipment.

Phase 1 represents the entry point into model-based production planning and initially establishes transparency at the structural level of the master schedule (milestone planning). Digital structural models are embedded within their spatial context and linked to master schedules. The result is a visually accessible and simulation-capable production model that represents the construction sequence in both its spatial and temporal logic (“What should happen, and roughly when?”). Critical dependencies, implausible sequencing assumptions, and project-specific risks become visible at an early stage, while opportunities for optimisation can be identified through simulations at a high level of abstraction. Where no master schedule is yet available, it can be derived from the structural breakdown, construction sections, high-level construction methods, spatial dependencies, and the principal boundary conditions, before being plausibility-checked through simulation.

Phase 2 focuses on the targeted refinement of previously identified critical areas while remaining at the level of construction scheduling. Rather than detailing the entire project, modelling is concentrated on complex construction states, interfaces, or high-risk construction phases. A further objective is the validation of key effort estimates and the early assessment of constructability, including potential feedback to the structural design at a reduced level of abstraction (“What should happen, and when?”).

Phase 3 comprises so-called deep dives for the comprehensive validation of effort estimates and constructability. Selected process sections are refined down to the level of individual equipment and resources. Temporary works, logistics areas, and space requirements can be considered in an integrated manner and simulated with a high degree of fidelity to reality (“What should happen, when, and how?”). Once validated, these production processes can be transferred as reference processes, thereby supporting the standardisation of production planning.

Phase 4 represents the highest level of planning detail, corresponding to a comprehensive digital twin of construction production at the equipment level. Owing to the considerable modelling effort involved and the fact that structural designs are often still incomplete, this level of detail is currently feasible only to a limited extent and is not yet economically viable in most projects. In the longer term, however, libraries of standardised process descriptions (templates), together with AI-assisted modelling approaches, provide the foundation for production planning at virtually any required level of detail. This, in turn, constitutes a prerequisite for automated and data-driven equipment control.

The Four-Phase Model therefore structures the progressive refinement of production planning and enables an economically controlled transition from an early process perspective to detailed planning at the level of individual equipment.

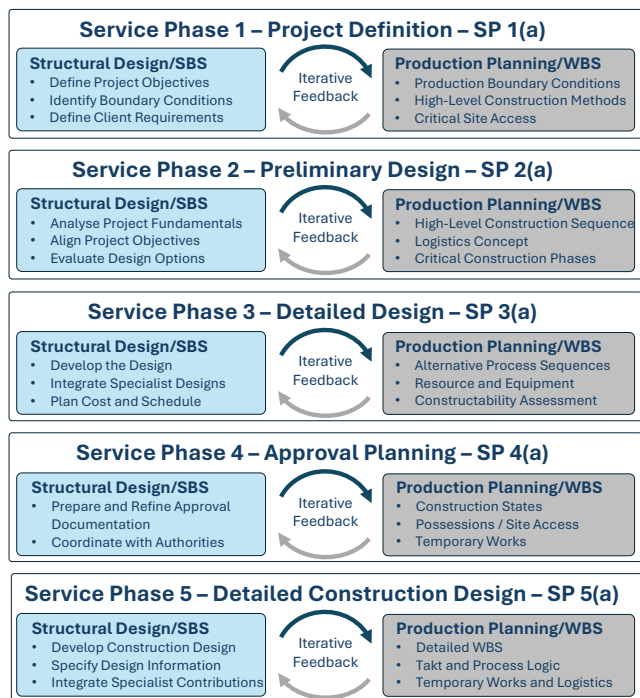


Fig. 5. Iterative coupling of building design/SBS and production planning/WBS in HOAI service phases 1-5. *Source: own illustration*

Bild 5. Iterative Kopplung von Bauwerksplanung/SBS und Produktionsplanung/WBS in den HOAI-Leistungsphasen 1–5. *Grafik: eigene Darstellung*

5.1.3 Integration of Structural Design and Production

A particularly effective engineering approach is to develop production planning at an early stage and iteratively in parallel with structural design. Rather than being initiated only on the basis of existing schedules, production modelling is introduced from the very beginning of the planning process in order to continuously assess constructability, process logic, and resource requirements at the respective level of planning detail achieved.

This establishes a systematic feedback control loop between structural design and production planning. Design decisions are validated at an early stage with regard to their constructability, allowing any necessary modifications to be incorporated directly into the subsequent planning process. In this way, the fundamental concept of constructability, first formulated in the 1970s [11], is consistently translated into a digital and iterative planning approach.

A methodological approach for coupling structural design/System Breakdown Structure (SBS) with production planning/Work Breakdown Structure (WBS) is illustrated in **Figure 5**. The structure of the HOAI service phases (LPH 1–5) is used as the organisational framework and complemented by a parallel production engineering perspective. For the sake of clarity, the structural design/SBS content shown in the figure has been deliberately condensed. Statements relating to scheduling and construction duration are not assigned exclusively to the structural design process but are instead regarded as the result of its integration with production planning/WBS. The illustration is intentionally limited to the period prior to the commencement of construction, as production planning is considered a planning activity that accompanies the design process. The production

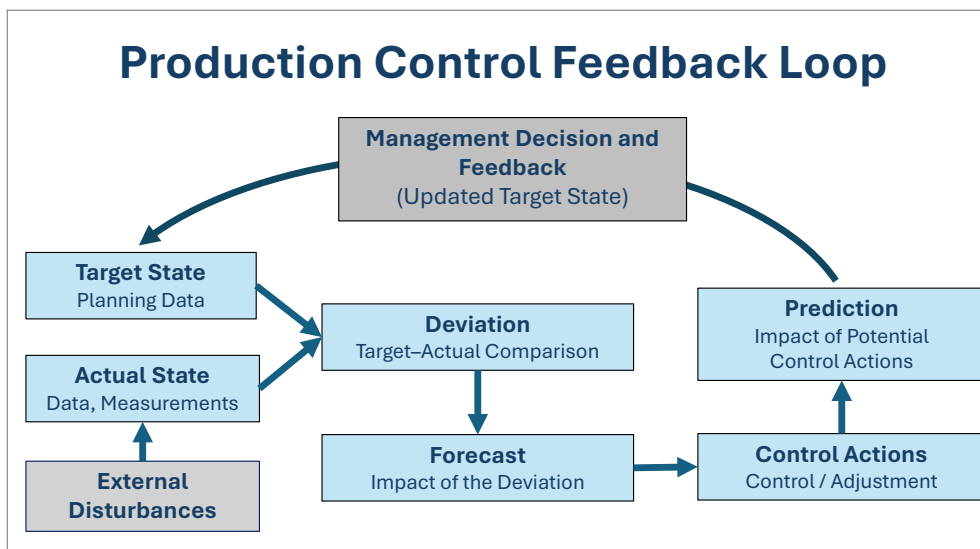


Fig. 6. Production control feedback loop. *Source: own illustration*
 Bild 6. Regelkreis der Produktionssteuerung.
 Grafik: eigene Darstellung

planning activities marked “(a)” do not form part of the existing core services defined by the HOAI but represent additional planning activities associated with continuous production planning throughout the design process. They are therefore proposed as an independent category of planning services. Within each service phase, particular emphasis is placed on the assessment of fundamental constructability, the consideration of construction-time and logistical constraints, and the optimisation of schedule, cost, sustainability, and resource utilisation. The objective is to anticipate future construction execution already during the early design phases and to continuously feed these findings back into the structural design process.

This coupling establishes an integrated planning process within each service phase, replacing the traditionally sequential production planning approach with iterative feedback control loops embedded throughout the design process. Structural design and production planning continuously validate and optimise one another. Consequently, constructability is no longer regarded as a downstream verification criterion but instead becomes an early design variable.

This approach enables the fundamental feasibility and economic viability of design decisions to be assessed at an early stage, while allowing the production process to be progressively adapted to the current level of planning maturity. As a result, the risk of subsequent redesign is reduced, and robust assessments of the implementation of, for example, complex infrastructure projects can be provided throughout every stage of the planning process.

5.2 Production Control

Although improved production planning already contributes to greater stability during construction execution, the full productivity potential can only be realised through effective production control. The need to align planning and control in an anticipatory manner reflects a fundamental management principle for proactively managed construction projects: Communicate – Collect Information – Anticipate – Act.

Production control that does not primarily rely on reacting to disruptions based on the experience of site management, but instead operates in a data-driven and anticipatory manner,

requires a sufficiently detailed target model of the production system. This target model must be compared at short intervals with the actual system state, which continuously changes as a result of external influences or deviations from the original planning assumptions. The resulting feedback control loop is illustrated in **Figure 6**. The real-time capability of interactive simulation, described above, directly supports this requirement. Simulation-capable tools enable the consequences of deviations to be identified at an early stage through predictive simulation and allow their effects on the subsequent course of construction to be assessed. This establishes a data-driven basis for developing and evaluating appropriate control actions as part of a forecasting process. Transparency supports a rapid understanding of the current production situation, while simulation enables the engineering-based development and evaluation of alternative courses of action together with their economic assessment. The updated target state is subsequently fed back into the production system and continuously refined. In this way, the feedback control loop required for proactive production control is established.

The effective operation of this feedback control loop does not necessarily require highly detailed as-built data. In many cases, highly granular machine data are less valuable than a consistent level of information that is directly relevant to decision-making. The level of detail of both the target and actual production models should therefore be determined consistently by their economic value and the specific decision-making requirements. The organisational implementation of this feedback control loop is realised through the concept of the digital Production Control Centre.

5.3 The Production Control Centre as an Integrated Control System

The feedback control loop described above requires organisational embedding and operational implementation within the construction project management process. While industry-specific feedback control structures already exist for quality and cost management, an equivalent functional control loop for production is still lacking. This reflects the digitalisation gap discussed in Section 2.2.2 (Figure 2) and results in

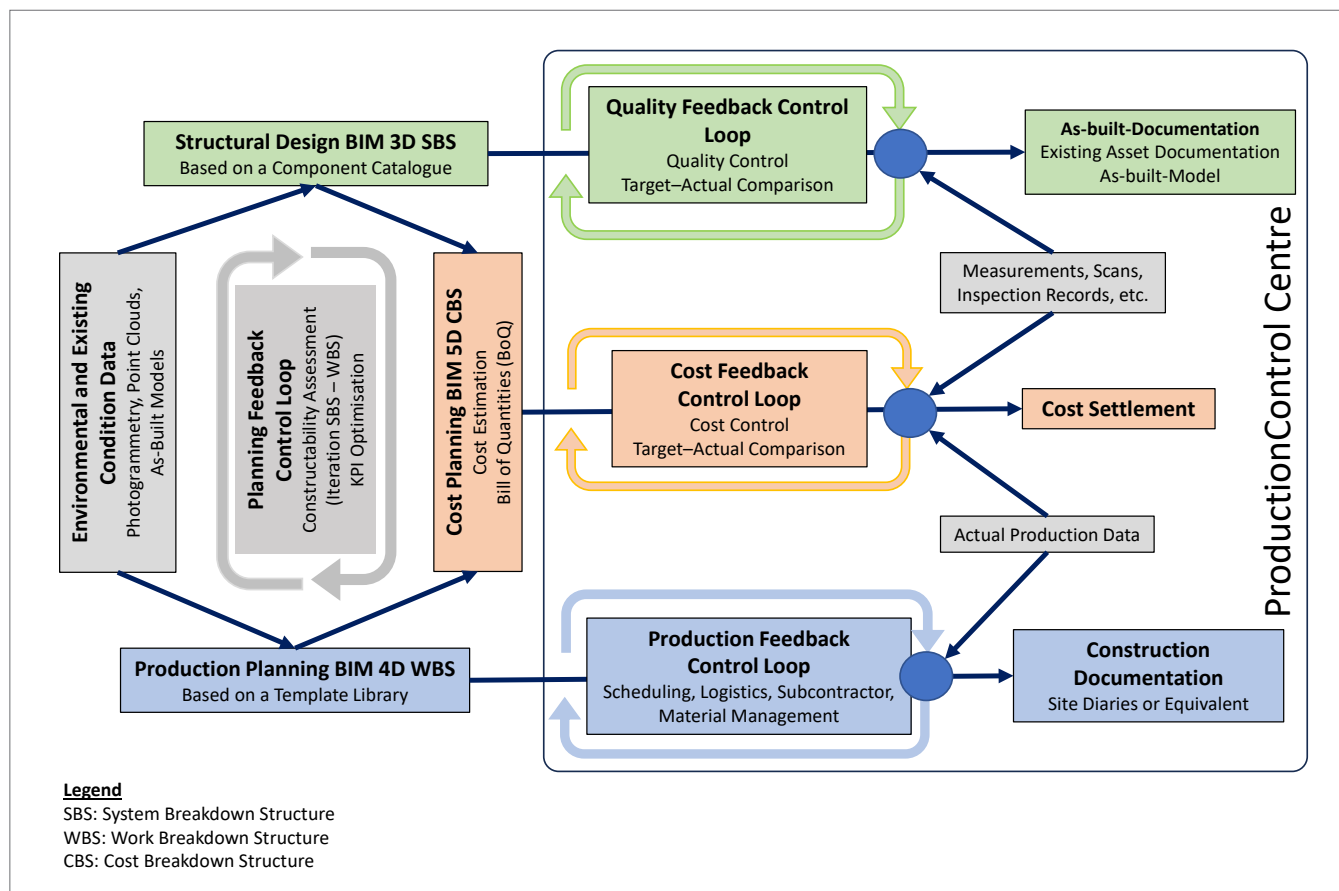


Fig. 7. Concept of an integrated production control centre. Source: own illustration
 Bild 7. Konzept eines integrierten Produktionsleitstands. Grafik: eigene Darstellung

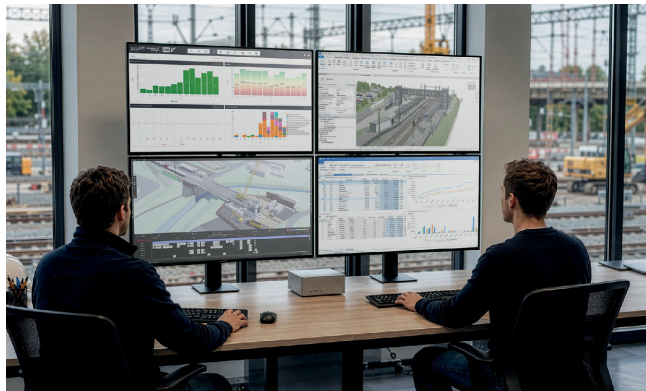


Fig. 8. Visualization of the concept of a control room environment for integrated production planning and control with dashboard, model, and control views. Conceptual representation, created with AI support and editorially revised. Source: [27]
 Bild 8. Visualisierung des Konzepts einer Leitstandumgebung zur integrierten Produktionsplanung und -steuerung mit Dashboard-, Modell- und Steuerungsansichten. Konzeptionelle Darstellung, erstellt mit KI-Unterstützung und redaktionell überarbeitet. Grafik: [27]

production processes that are predominantly controlled in a reactive rather than a proactive manner.

Digital production control centres, as established in other industries, provide an appropriate reference model. Applied to construction production, they give rise to the concept of an integrated control system that combines quality, cost, and production through continuous target-actual comparison, thereby

enabling data-driven and adaptive production control. This concept is founded on the integration of structural design (BIM 3D – SBS), production planning (BIM 4D – WBS), and cost planning (BIM 5D – CBS) within the planning feedback control loop illustrated on the left-hand side of **Figure 7**. Only the interaction of these three planning domains establishes a robust control logic.

The Production Control Centre is based on three tightly coupled feedback control loops: quality (comparison of the structural model with the realised construction state), cost (comparison of estimated and actual costs), and production (control of schedule, resources, and logistics based on current as-built data). At the same time, these integrated control loops provide the basis for generating key project deliverables, including as-built models, cost-relevant documentation, and automated construction records.

Initial elements of a digital Production Control Centre are currently being implemented during the fitting-out of the Semmering Base Tunnel, building on a prototype first deployed at the Koralm Tunnel. In this environment, subcontractor activities are coordinated through a centrally managed digital dispatching system in which work orders are assigned to specific locations and time windows, communicated bidirectionally via an online platform, and linked to coordinated logistics processes. The systematic integration of production planning and material supply with rail-bound transport operations centrally coordinated through the control centre enables construction activities to be executed in a controlled and transparent manner.

Although these implementations do not yet constitute a fully integrated Production Control Centre, they demonstrate that key elements of the proposed control concept have already been validated under practical conditions in highly complex infrastructure projects. **Figure 8** illustrates a conceptual vision of such a Production Control Centre. The dashboard, production model, and control interfaces shown for the quality, cost, and production feedback control loops are intended to illustrate the integrated information environment that underpins the proposed concept.

From an organisational perspective, the Production Control Centre may be implemented either as a physical facility on the construction site or as a decentralised, virtual control centre. The decisive factor is not its physical location but the continuous flow of information between the individual feedback control loops. At the same time, roles and responsibilities on the construction site begin to evolve. Control functions can increasingly be centralised, while site management is able to focus more strongly on the operational management of construction production. In this respect, the Production Control Centre exemplifies the paradigm shift in the construction industry outlined at the beginning of this paper.

6 Conclusions and Outlook

Digital production planning and production control represent a structural transformation of construction production. This paper has shown that complex construction projects cannot be managed solely through scheduling, construction planning, or model-based visualisation. Instead, transparency and simulation capability are required as the key system properties of a digital production model that integrates the structure, construction processes, resources, logistics, and construction states.

Within this context, BIM is no longer understood solely as a design tool but increasingly unfolds its full potential during the construction phase. BIM is progressively and systematically becoming an operational component of construction site activities and is beginning to support the core value-creating processes of project delivery. Against this background, digital production planning and production control can be regarded as a key instrument for transforming construction projects from a reactive, improvisation-driven mode of execution towards proactively planned and actively controlled production. Within collaborative contractual models, they can also support project delivery by increasing transparency, enabling the early identification of risks, and establishing a shared basis for decision-making.

The relationship between modelling effort and economic benefit depends primarily on project complexity, project duration, the density of interfaces, and logistical constraints. As the modelling effort increases with the required level of planning detail, it must be evaluated against the expected benefits on a project-specific basis. The proposed approach appears particularly well suited to complex, long-duration infrastructure projects characterised by significant scheduling, logistics, and interface risks. The Four-Phase Model supports this evaluation by avoiding the need to model the entire project at maximum detail from the outset. Instead, transparency is first established at an appropriate level of abstraction, while only decision-critical areas are subsequently refined through detailed simulation.

The standardisation of recurring production patterns constitutes a prerequisite for industrialised and, in the longer term, automated construction methods. The resulting process data represent valuable domain knowledge and create the foundation for future AI-assisted planning and production control approaches capable of analysing and continuously improving production strategies under changing boundary conditions. The Production Control Centre represents the corresponding conceptual vision. It integrates production planning, quality, cost, and construction execution within a unified control system and makes the consequences of deviations and control actions transparent. Digital production planning and production control therefore constitute a key building block for addressing the construction industry's productivity deficit through a fundamentally different production logic. Their principal benefit lies in making construction production transparent, simulation-capable, and proactively controllable from the earliest stages of the project lifecycle.

REFERENCES

- [1] Melzner, J.; Helbing, R.: Baubetrieb im Wandel: Strategien für das Bauen von morgen. In: *Bauingenieur* 100 (2025), Heft 07-08, S. 204-213. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-07-08-38.
- [2] Arndt, W.-H.; Schneider, S.: Investitionsbedarfe für ein nachhaltiges Verkehrssystem: Schwerpunkt kommunale Netze. Deutsches Institut für Urbanistik, 2023.
- [3] Dullien, S.; Gerards Iglesias, S.; Hüther, M. et al.: Herausforderungen für die Schuldenbremse: Investitionsbedarfe in der Infrastruktur und für die Transformation. IMK Policy Brief, 2024.
- [4] Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.: Brancheninfo Bau. Produktivität im Baugewerbe – ein statistischer Befund. Berlin 06.12.2024 www.bauindustrie.de/fileadmin/bauindustrie.de/Zahlen_Fakten/BrancheninfoBau/BIB_-_Produktivitaet_im_Bauhauptgewerbe.pdf [Zugriff 16.02.2026].
- [5] Kostka, G.; Anzinger, N.: Großprojekte in Deutschland – Zwischen Ambition und Realität. Hertie School of Governance, Berlin, 2015.
- [6] Hoffmann, W.; Körkemeyer, K.: Zum Umgang mit der Komplexität von Baustellen – Ergebnisse einer Expertenbefragung. In: *Bauingenieur* 93 (2018), Heft 9, S. 347-354. doi.org/10.37544/0005-6650-2018-09-47.
- [7] Meyer, O.; Böll, M.; Legat, C.: Status and Future Prospects of the Standardization Framework Industry 4.0: A European Perspective. In: *Borangiu, T.; Trentesaux, D.; Leitão, P. et al. (eds.): Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future. In: SOHOMA 2024. Studies in Computational Intelligence*, Vol 1197. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-031-85316-6_5
- [8] Bundesverband Bausoftware e.V. (BVBS) (2024): Whitepaper: Die digitale Transformation der Baubranche. Bundesverband Bausoftware e.V., Oktober 2024.
- [9] Schuh, G. et al.: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. In: *Schuh, G.; Stich, V. (eds.): Produktionsplanung und -steuerung 1. VDI-Buch*. Springer, Berlin, Heidelberg (2012). doi.org/10.1007/978-3-64225423-9_2.
- [10] Kochendörfer, B.; Liebchen, J. H.; Viering, M. G.: Bau-Projekt-Management – Grundlagen und Vorgehensweisen. 6. aktualisierte Auflage. Springer Verlag, Wiesbaden, 2021. doi.org/10.1007/978-3-658-34080-3.
- [11] Samimpey, R.; Saghatforoush, E.: A Systematic Review of Prerequisites for Constructability Implementation in Infrastructure Projects. In: *Civil Engineering Journal*, Vol. 6 (2020), Iss. 3, pp. 576-590. doi.org/10.28991/cej-2020-03091493.
- [12] VDI 2552 Blatt 2: Building Information Modeling – Begriffe. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI), Düsseldorf, 2018.
- [13] Mellenthin Filardo, M.; Melzner, J.; Lammert, A. et al.: Kosten-Nutzen-Analyse der BIM-Methode: Eine vergleichende Fallstudie. In: *Bauingenieur* 100 (2025), Heft 11. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-11-48.
- [14] Autodesk Inc.: Autodesk Navisworks. Software zur Koordination, 4D-Simulation und Analyse von Bauprojekten. San Rafael, CA (USA), 2024. www.autodesk.com [Zugriff am: 13.02.2026].
- [15] thinkproject: VDC MANAGER. www.thinkproject.com [Zugriff am: 21.02.2026].
- [16] RIB Software GmbH: RIB 4.0. www.rib-software.com [Zugriff am: 21.02.2026].

- [17] Bentley Systems Inc.: SYNCHRO Software für digitale Bauabwicklung. www.bentley.com [Zugriff am: 21.02.2026].
- [18] Fischer, A.: Simulationsgestützte Digitale Zwillinge in der Baulogistik – Ein Lösungsansatz zur virtuellen Optimierung von Bauprozessen. Technische Universität München, 2025.
- [19] Berner, F.; Habenicht, I.; Kochkine, V. et al.: Simulation in der Fertigungsplanung von Bauwerken. In: Bauingenieur 88 (2013), Heft 2, S. 89-97.
- [20] Ismail, A.: BIM Integrated and Reference Process-based Simulation System for Construction Project Planning. Technische Universität Dresden, Dissertation, 2022, nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-798907.
- [21] GLCI – German Lean Construction Institute (Hrsg.): Lean-Logistik-Leitfaden. 2. Auflage, Berlin 2025. glici.de/wp-content/uploads/2025/11/GLCI-Lean-Logistik-Leitfaden-2.-Auflage.pdf [Zugriff 16.02.2026].
- [22] Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI): Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen vom 10. Juli 2013 (BGBl. I S. 2276), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2636), in Kraft getreten am 1. Januar 2021.
- [23] Backhaus, J. O.; Dahm, M. H.: Einblick in den Stand der Implementierung von Lean Construction Ansätzen in ausgewählten deutschen Bauunternehmen – Ergebnisse einer qualitativen Studie. In: Bauingenieur 95 (2020) Heft 2, S. 64-72. doi.org/10.37544/0005-6650-2020-02-56.
- [24] Salzig, C.; Burr, J.; Hertzog, S.: Digitale Zwillinge für die Produktion. Industry 4.0 Science 41 (2025), Heft 3, S. 6-12. doi.org/10.30844/I4SD.25.3.6
- [25] Vetter, A.; von Mammen, S.: The Interactive Retrodution Cycle: Amplifying Cognitive Focus in Complex Simulations. In: 2025 29th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT), Prague, Czech Republic, 2025. IEEE. doi.org/10.1109/DS-RT68115.2025.11186011
- [26] Haghsheeno, S.; Deubel, M.; Spenner, L.: Digitale Technologien und deren Wertschöpfungspotentiale für die Bauwirtschaft. In: Bauingenieur 94 (2019), Heft 2, S. 45-55. doi.org/10.37544/0005-6650-2019-02-31.

[27] Building Information Innovator GmbH (BII GmbH): Next level simulation. www.bii-gmbh.com/ [Zugriff 04.02.2026].

[28] Blender Foundation: Blender 5.0. www.blender.org [Zugriff am 04.02.2026].

**Prof. Dr.-Ing.
Christof Gipperich**

gipperich@hochschule-bc.de
Biberach University of Applied Sciences
Karlstraße 6-11, 88400 Biberach

**Prof. Dr.
Sebastian von Mammen**

sebastian.von.mammen@uni-wuerzburg.de
Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Sanderring 2, 97074 Würzburg

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

ingenieur.de

Weil Verstehen wichtiger ist denn je.

Neue
Newsletter
Kostenfrei
abonnieren!



Die Welt verändert sich rasant. Technologien, Märkte und Arbeitswelten gleich mit. Wer den Überblick behalten will, braucht Orientierung. Mit den neuen Newslettern von ingenieur.de liefern wir fundierte Informationen, praxisnahe Einordnungen und Hintergründe zu aktuellen Entwicklungen für Ingenieurinnen und Ingenieure.

Kompakt. Relevant. Kostenfrei.

[ingenieur.de/newsletter-uebersicht](https://www.ingenieur.de/newsletter-uebersicht)



Jetzt Bauingenieur abonnieren: 20% Rabatt erhalten

10
Ausgaben
pro Jahr



Sie wollen als Ingenieur oder Ingenieurin immer auf dem neuesten Stand sein, wenn es um zukunftsweisende und einzigartige Fachinformationen für die Planung und Ausführung aktueller Bauprojekte für das gesamte Bauingenieurwesen geht? Dann abonnieren Sie jetzt die Zeitschrift Bauingenieur, Organ des VDI-Fachbereichs Bautechnik. **Auf das Jahresabo erhalten Sie im ersten Jahr 20% Rabatt – statt 573,00 EUR zahlen Sie nur 458,40 EUR zzgl. 18,00 EUR Versandkosten innerhalb Deutschlands!**¹⁾



Technikwissen für Ingenieur*innen - jetzt abonnieren:

T +49 6123 9238-202
E vdi-verlag@vuservice.de
vdi-verlag.de

¹⁾
Angebot nur gültig für
Neu-Abonnenten und
Neu-Abonnentinnen.