

Integriertes multidimensionales AEC-Produktmodell für das leitstandbasierte Baustellenmanagement großer Infrastrukturvorhaben

Thilo Brüggemann

Institut für Entwerfen und Bautechnik (IEB), Fachgebiet Building Lifecycle Management (BLM),
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
thilo.brueggemann@kit.edu

Kurzfassung: Der folgende Beitrag beschäftigt sich mit dem Entwurf eines konsolidierten multidimensionalen AEC-Produktmodells als integraler Bestandteil eines zentralen Baustellenleitstands für die Unterstützung von Planung, Steuerung und Überwachung großer Infrastrukturvorhaben sowie der Konzeption, Konfiguration und technischen Integration seiner systemischen Schnittstellen. Das „Integrierte Produktmodell Tiefbau (IPT)“ soll georeferenzierte Geometrien, Massen und Mengen sowohl des Planungs-, als auch des Ausführungsgegenstands mit allen kontextrelevanten semantischen Zusatzinformationen in verschiedenen, teilweise parallelen zeitlichen Horizonten sowie in multiskaliger Granularität kontinuierlich über den gesamten Fertigungsplanungs- und Ausführungsprozess hinweg abbildbar machen.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Große Infrastrukturvorhaben wie Trassenbauprojekte weisen aufgrund einer Vielzahl indeterministischer Einflussgrößen sowie eines komplexen logistischen Zusammenspiels der partizipierenden Akteure ein hohes Maß an systemischer Emergenz und Dynamik auf, weswegen während ihrer Planung, Steuerung und Ausführung eine kontinuierliche Abstimmung der Prozesse erforderlich ist. Diese wird jedoch nicht selten durch mehrstufige Subunternehmerbeziehungen, zahlreiche Medienbrüche sowohl zwischen, als auch innerhalb von Planung und Ausführung sowie oft unvollständigen, fehlerhaften oder fehlenden Informationen zu Baufortschritt und -qualität erschwert, was letztlich in einer mangelhaften Auslastung der lokal verfügbaren personellen und maschinellen Ressourcen resultiert. Während in der Planung mittlerweile in großem Umfang IT-Lösungen zum Einsatz gebracht werden, bestehen in der Steuerungs- und Ausführungsphase trotz eines permanenten Informations- und Koordinierungsbedarfs diesbezüglich noch immer erhebliche Defizite. (RÜPPEL 2007, GÜNTNER & BORRMANN 2011)

1.2 Autonome Steuerung in der Baustellenlogistik

Der Lösungsansatz des im Rahmen des Technologieprogramms „AUTONOMIK“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Verbundprojekts „AutoBauLog – Autonome Steuerung in der Baustellenlogistik“ (BMW 2011) für

eine signifikante und ökonomisch nachhaltige Steigerung der Effizienz großer Infrastrukturvorhaben liegt in der Anpassung und Übertragung neuester informationstechnologischer Entwicklungen im Bereich autonomer Steuerungssysteme sowie geeigneter IKT-Konzepte der „Digitalen Fabrik“ auf das Management und die Fertigungsprozesse im Tiefbau. Das Vorhaben fokussiert dabei vor allem die folgenden konkreten Forschungsziele (VDI 2008, AUTOBAULOG 2011):

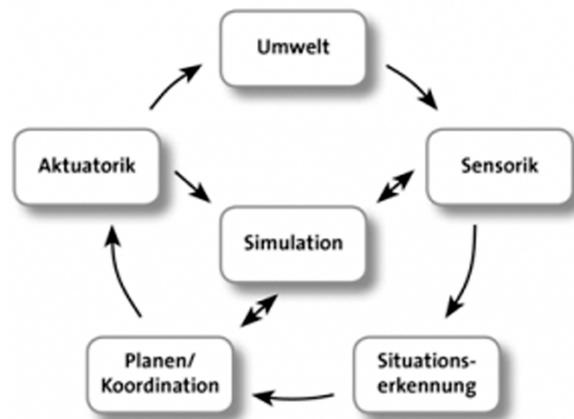


Abbildung 1: Der AutoBauLog Regelkreis (AUTOBAULOG 2011)

- (Teil-)Autonome Maschinensteuerung. Ausstattung des Baumaschinenpools mit dezentraler softwarebasierter Intelligenz, zentral vernetzten Kommunikationssystemen, 3D-Sensorik zur Erkennung von geometrischen und qualitativen Soll-/Ist-Abweichungen sowie satellitengestützten 3D-Positionierungs- bzw. Steuerungssystemen.
- Befähigung von Baumaschinen zur antizipativen Operationssimulation sowie zur autonomen Teambildung, d.h. zur interaktiven Koordination, Auftragsdekomposition in Teilaufträge (Aufgaben) und Kollaboration mittels eines repräsentierenden Multiagenten-Softwaresystems.
- Virtual-Reality- bzw. Augmented-Reality-unterstützte Überwachung und Steuerung der Bauabläufe in Echtzeit durch eine fortlaufende Abbildung des Planungsgegenstands¹ sowie des Ausführungsgegenstands² und der maschinenbasierten Bauprozesse inklusive aller temporären Ist-Zustände, prospektiver Simulation und historischer Dokumentation über einen zentralen IT-basierten Baustellenleitstand.

¹ *Planungsgegenstand*: Entspricht dem letzten Planungsstand der finalen geometrischen und physischen bzw. qualitativen Ausprägungen des Bauwerks inklusive der lokalen Topografie und Geologie sowie der Typologie eines ggf. vorhandenen Gebäude- oder Infrastrukturbestands. Beinhaltet zudem die Topologie einer statischen Zonierung.

² *Ausführungsgegenstand*: Die geometrischen und qualitativen Ausprägungen aller temporären und finalen Objekte sowohl des Bauwerks als auch der Baustelle inklusive der lokalen Topografie und Geologie sowie der Typologie eines ggf. vorhandenen Gebäude- oder Infrastrukturbestands mit allen zum Fertigungsprozess benötigten semantischen Zusatzinformationen. Beinhaltet zudem die Topologie der dynamischen Zonierung zur Adressierung bzw. Lokalisierung von Vorgängen des referenzierenden Prozessmodells.

- Integrierte Produktdatenmodelle zur fortlaufenden Repräsentation und Versionierung der Ist- und Sollzustände des Planungs- und Ausführungsgegenstands (integriertes Produktmodell) sowie der Prozessinformationen (integriertes Prozessmodell) auf zentraler Leitstandebene.

1.3 Integrierte Produktmodelle

In der „Digitalen Fabrik“ der Fertigungsindustrie dienen integrierte Produktmodelle der ganzheitlichen systemischen Abbildung aller relevanten Informationen zum Produkt über dessen gesamten Lebenszyklus (Entwurf – Fertigung – Nutzung – Instandsetzung – Rückführung) hinweg (ISO 2004). Dies beinhaltet ebenso Informationen über produktbezogen zu erbringende Leistungen sowie die dazu einzubringenden oder einzusetzenden sekundären Ressourcen. Ihre integrierende Funktion äußert sich zum einen durch eine enge bidirektionale Verzahnung von Planungs-, Steuerungs- und Ausführungsebene. Zum anderen können durch die transzyklisch fortlaufende Anwendung standardisierter Produktmodelle Medienbrüche zwischen den beteiligten Fachdomänen eliminiert sowie Redundanzen und Inkonsistenzen weitestgehend vermieden werden.

In der Bauwirtschaft und dabei insbesondere im Tiefbau wurde dieser Integrationsstand bislang noch nicht erreicht (GÜNTNER & BORRMANN 2011). Zwar existieren bereits einige etablierte und kontinuierlich fortgeführte AEC-Produktmodellstandards, bspw. *IFC*, *IFC-Bridge*, *LandXML*, *OKSTRA* oder *CityGML*. Diese, auch als AEC-, Bauwerks- oder Stadtmodelle bezeichneten Beschreibungsverfahren adressieren jedoch lediglich die Kontexte spezifischer Fachdomänen (bspw. Hochbau, Hochbaugewerke, Brückenbau, Trassenplanung oder Stadt- und Regionalplanung) und fokussieren dabei vor allem die Entwurfsebene des Produkts bzw. Bauwerks, ohne integrale Aspekte und Faktoren abbilden oder verknüpfen zu können, die den Fertigungsprozess betreffen. Somit sind diese Modelle in ihrer gegenwärtigen Form für den Anforderungskontext der Baustellenlogistik ungeeignet.

Die Aufgabe des BLM im Kontext des Vorhabens AutoBauLog besteht somit in der Konzeption und Bereitstellung eines konsolidierten transzyklischen Produktmodells als integraler Bestandteil des zentralen Baustellenleitstands sowie der Definition, Konfiguration und technischen Integration seiner Schnittstellen innerhalb des projektierten Gesamtsystems. Das „*Integrierte Produktmodell Tiefbau (IPT)*“ soll georeferenzierte Geometrien, Massen und Mengen sowohl des Planungs-, als auch des Ausführungsgegenstands mit allen kontextrelevanten semantischen Zusatzinformationen in verschiedenen, teilweise parallelen zeitlichen Horizonten sowie in multiskaliger Granularität kontinuierlich über den gesamten Planungs- und Ausführungsprozess hinweg formal konsistent abbildbar machen. Das IPT soll dabei selbst keine Vorgänge des Fertigungsprozesses beschreiben, ist jedoch eng mit einem entsprechenden korrelierenden Bauprozessmodell zu verknüpfen.

2 Konzept

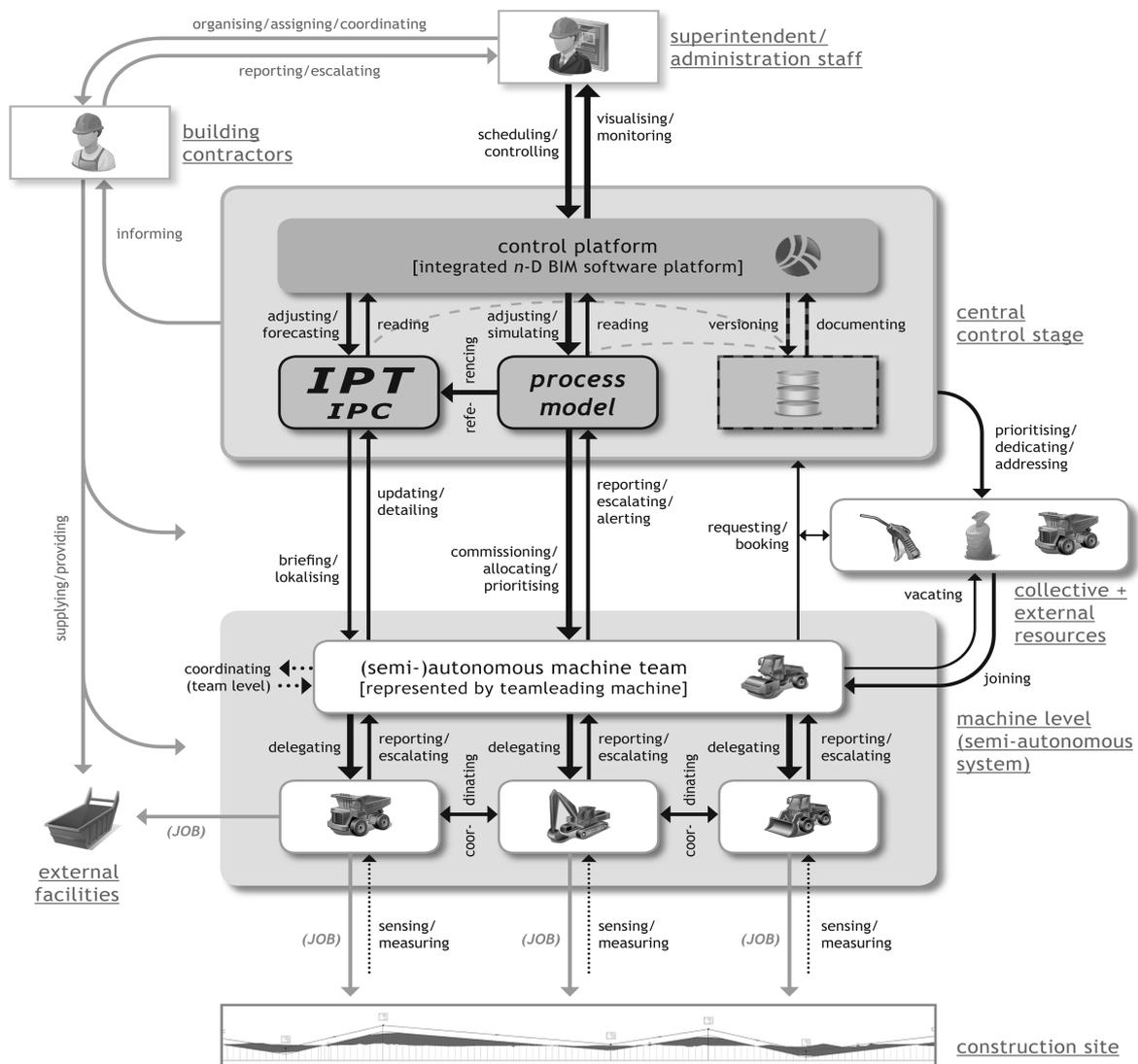


Abbildung 2: Das IPT (engl. IPC) im Kontext AutoBauLog

2.1 Harmonisierung der Plandaten und -modelle

Zu Beginn einer Trassenbaumaßnahme liegen Plandaten und -modelle unterschiedlicher inhaltlicher Fokusse in größtenteils heterogenen formalen Beschreibungsverfahren vor. Das Szenario definiert dazu den folgenden Informationseingang als relevant:

- Der Urzustand der lokal beplanten Topografie wird mittels eines *Digitalen Geländemodells (DGM)* vorgehalten. Das DGM wird als reines 2,5D-Oberflächenmodell durch triangulierte 3D-Geokoordinaten beschrieben.
- Zur Beschreibung der örtlichen Bodenschichten bzw. Geologie liegen einzelne Bodenprofilaten vor, die aus regelmäßigen Bohrproben entlang des geplanten Trassenverlaufs resultieren.
- Für einen ggf. existierenden Gebäude- oder Anlagenbestand entlang des geplanten Trassenverlaufs liegen 2D- bzw. 3D-Plandaten vor.

- Die Baustellenperipherie (Straßennetz, Katasterdaten) wird durch herkömmliche kartografische 2D-Plandaten beschrieben.
- Der finale Planungsgegenstand ist mittels 2D-Plandaten zu Lage, Gradienten und Querprofilen abgebildet. Da ihre logische Kombination implizit ein 3D-Modell des Trassenentwurfs beschreibt, wird hierbei auch von „2½D-Planung“ gesprochen.

Um diese Eingangsdaten systemisch integrierbar zu machen, müssen sie zunächst formal analogisiert und inhaltlich harmonisiert werden. Aus den 2,5D-Plandaten des Planungsgegenstands wird ein explizites 3D Building Information Model (BIM) erzeugt, dem über Objektattribuierung relevante semantische Zusatzinformationen aus der Fertigungsplanung hinzugefügt werden können. Die qualitative Beschreibung der Objektklassen (bspw. Bodensorten und Baustoffe) erfolgt dabei über eine Referenzierung separater Typologiedatenbanken auf Leitstandebene. Analog zum Planungsgegenstand wird aus den heterogenen Urmodellen durch georeferenziertes Mapping der Partialmodelle auf Basis des DGM sowie linearer axialer Interpolation und transaxialer Extrapolation der Bodenprofile ein konsolidiertes, jedoch noch unscharfes 3D Modell des Ausgangszustands generiert. 2D-/2,5D-Plandaten eines Gebäude- oder Infrastrukturbestands müssen dabei ggf. in einem Zwischenschritt zu 3D-Bauwerksmodellen zusammengeführt werden. Das Szenario geht davon aus, dass zwischen dem konsolidierten Ur- und finalem Sollmodell keine Inkonsistenzen auftreten, da das erste finale Bauwerksmodell bereits auf den selben Urmodellen basiert. Gemäß Anforderungsdefinition des Projektkonsortiums erfolgt die formale Repräsentation der dreidimensionalen Objektgeometrie im konsolidierten Modell mittels *Boundary Representation (b-rep)*, wobei Volumenkörper durch die Topologie der beschreibenden Geokoordinaten mittels Knoten-Kanten-Flächen-Graphen abgebildet werden.

Die Synthese der eingehenden Partialmodellstrukturen zu einem konsolidierten Urmodell erfolgt mittels eines Integrators. Im richtungsweisenden Projekt ForBAU wurde für den Trassenbau bereits eine Softwarelösung entwickelt, die aus konsistenten 2,5D-Plandaten integrierte 3D-Volumenmodelle erzeugt (GÜNTNER & BORRMANN 2011).

2.2 Hierarchie und Granularität

Dem AutoBauLog-Projektszenario liegt eine systemische Hierarchie zugrunde (vgl. Abb. 3). Um die Kapazitäten der Baustelle optimal auszulasten und den kritischen Pfad des strategischen Rahmenterminplans nicht zu gefährden, erfolgt die vertikale Organisation der autonomen bzw. teilautonomen hierarchischen Instanzen (Leitstand, Baumaschinenteam, Baumaschine) entsprechend des Prinzips „Delegieren–Eskalieren“. Dabei werden terminierte Verrichtungsaufträge nach unten übergeben. Kann die adressierte Instanz den Auftrag mit den ihr dazu zur Verfügung stehenden Kompetenzen und Ressourcen nach eigener, simulativ-vorausschauender Prognose möglicherweise jedoch nicht innerhalb der vorgegebenen Zeitspanne erfüllen, muss der Vorgang zur Reorganisation der Prozesse nach oben eskaliert werden.

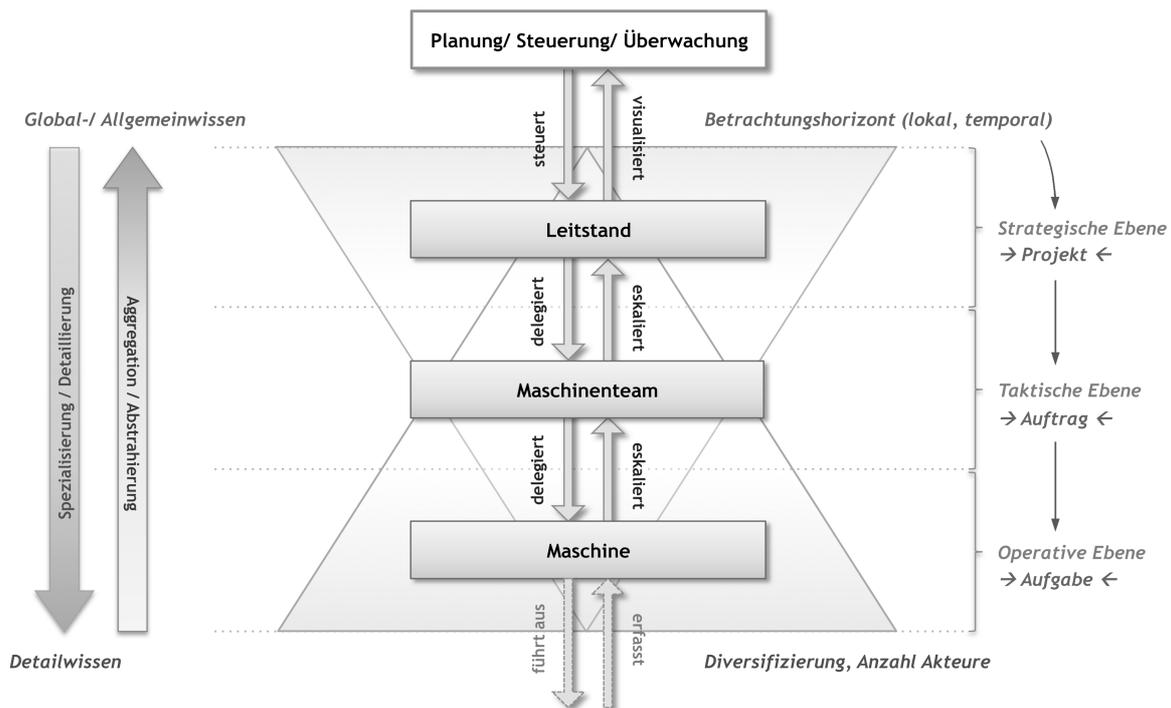


Abbildung 3: Systemische Hierarchie des Ausführungsgegenstands

Gemäß dieser Systemik nimmt die funktionale Diversifizierung und Spezialisierung sowie die lokale und temporale Fokussierung der Akteure von der strategischen zur operativen Ebene sukzessive zu. Da das hierbei angereicherte spezifische operative Detailwissen bei der deduktiven Informationsreaggregation aufgrund einer obligatorischen situativen Irrelevanz sowie zugunsten der technischen Performanz jedoch wieder auf eine gröbere Granularität abstrahiert werden muss, ist für die geometrische Repräsentation des Ausführungsgegenstands im IPT eine multiskalige Darstellung in verschiedenen kohärenten Detaillierungsgraden (*LoD – Level of Detail*) erforderlich. Diese werden voraussichtlich wie folgt differenziert:

- *LoD 0*: Entspricht einem DGM mit 2,5D-Flächen, bspw. zur Abbildung von Baustraßen, Deponie-, Service-, Sperr- und Sozialflächen sowie Massenkörpern medialer Ressourcen, einem Mapping der direkten Peripherie etc.
- *LoD 1*: 3D-Hüllenmodell, bspw. zur dynamischen Zonierung des Ausführungsgegenstands für die Verortung und Ressourcen-Allokation von Aufträgen.
- *LoD 2*: Differenziertes Building Information Model, bspw. zur Dokumentation von Aufgaben sowie zur Abbildung des Bauwerks auf Bauteilebene.

2.3 Zonierung

Zur groben geometrischen und prozessualen Gliederung des Ausführungsgegenstands lässt sich aus der Topologie des finalen Planungsgegenstands (*Bauwerk – Teilbauwerk – Bauwerksteil* bzw. *Station – Baulos – LV-Position – Gewerk*) eine statische Zonierung ableiten, welche über den gesamten Bauablauf unverändert erhalten bleibt. Zur dreidimensionalen Lokalisierung von Aufträgen sowie zur Allokation der zur

Ausführung einzusetzenden Ressourcen wird hingegen eine temporäre dynamische Zonierung des IPT benötigt. Diese verortet mittels *b-reps* den sog. Auftragsgegenstand, der bei der Maschinenteam-internen Koordination – entsprechend des LoD-Konzepts und analog zur Dekomposition eines Auftrags in konkretisierte Aufgaben – weiter in detailliertere Aufgabengegenstände zerlegt werden kann.

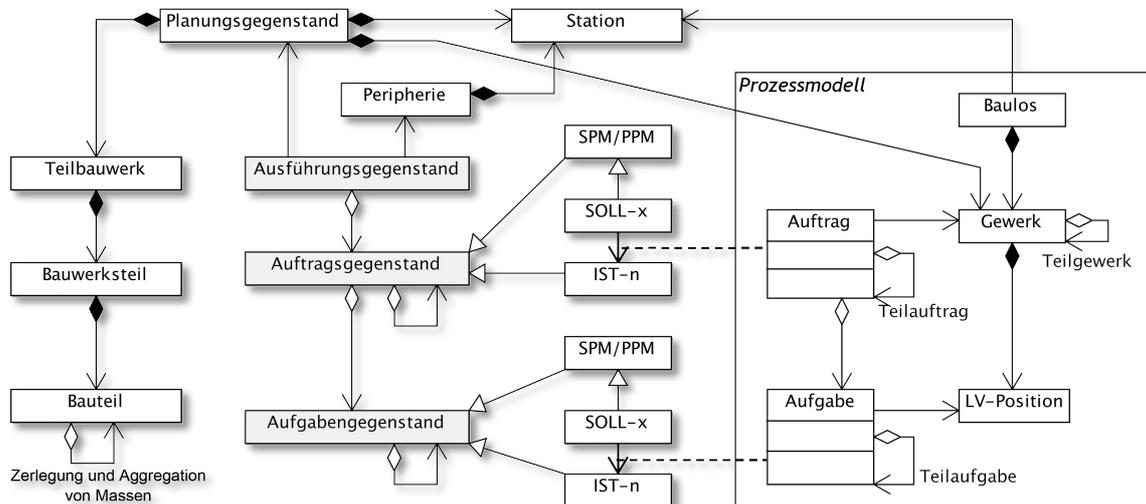


Abbildung 4: Zonierungstopologie des Auftragsgegenstands

Ferner dient die dynamische Zonierung der geometrischen Beschreibung und Identifizierung von Massenkörpern bei der Prozessdokumentation. Da im Trassenbau und insbesondere im Erdbau hauptsächlich Schüttgut verarbeitet wird, ist eine lokale Abgrenzung einzelner Bauteilkomponenten selten möglich. Zusammenhängende Volumenkörper identischer Boden- oder Baustoffsorten werden im IPT aus diesem Grund geometrisch zusammengefasst. Eine räumliche Teilung oder Addition homogener Werkstoffvolumina kann entsprechend durch eine Dekomposition bzw. Aggregation ihrer beschreibenden Zonierungsobjekte abgebildet werden. Eine Transformation durch Einbringung und Durchmischung verschiedener Stoffe wird hingegen durch eine irreversible Komposition beschrieben, wobei das generierte Volumenobjekt die resultierende Baustoffsorte in der Typologiedatenbank referenziert.

2.4 Zeithorizonte

Basierend auf der Spezifikation der Planungs- und Ausführungsprozesse im Vorhabenskontext bildet das IPT divergente Zustände simultan in verschiedenen Zeithorizonten ab (vgl. Abb. 5). Das initiierte Modell repräsentiert zunächst entsprechend des Informationseingangs den lokalen Urzustand (IST_0) sowie den finalen Zielzustand ($SOLL_{FINAL}$). Während des Fertigungsprozesses werden sukzessive alle temporären Zwischen-Istzustände durch partielle Arbeitsfortschrittsmodelle (IST_N) beschrieben. Ihre Aktualisierung wird entweder durch Störfälle ausgelöst, die eine Reorganisation des Bauablaufs erfordern, oder erfolgt bei Abschluss bzw. Eskalation eines Auftrags, wobei der aktualisierte Zustand zur fortlaufenden retrospektiven Dokumentation des Bauablaufs (WAR_N) versioniert wird. Das Szenario sieht vor, dass

zur Auftragsdefinition auf Leitstandebene mehrere prognostizierte Varianten prospektiver Auftrags-Fertigungszustände simuliert werden ($SOLL_X$). Die situativ optimalste Simulationsvariante ($SOLL_N$) wird schließlich an die Maschinenebene delegiert. Dabei wird der Auftragsgegenstand jedoch nicht explizit beschreiben, sondern ergibt sich implizit aus dem geometrischen und qualitativen Delta zwischen formuliertem Soll- und aktuellem Istzustand der adressierten Zonierung (vgl. Abb. 4).

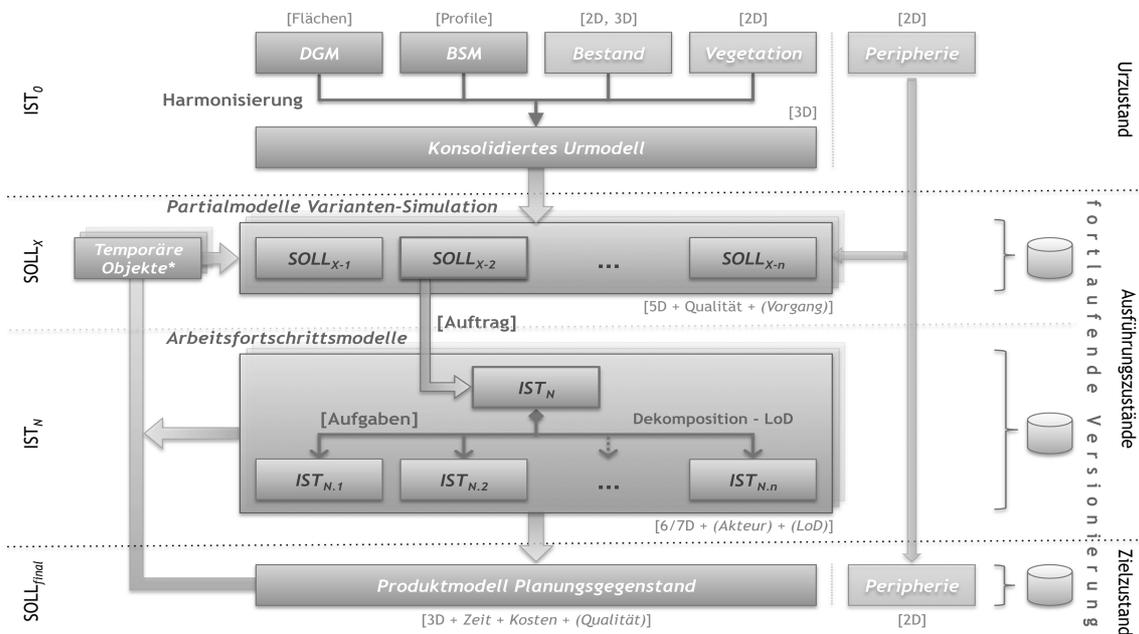


Abbildung 5: Partialmodelle des IPT

2.5 Technische Integration und Schnittstellen

Das IPT stellt eine integrale Komponente des projektierten zentralen IT-Baustellenleitstands dar und ist mit einem korrelierenden Bauprozessmodell assoziiert (vgl. Abb. 2), welches die Vorgänge und Termine des Bauablaufs beschreibt und Aufträge an die autonome Maschinenebene formuliert. Die Lokalisierung eines Auftrags sowie die Allokation einzusetzender bzw. zu verarbeitender medialer Ressourcen erfolgt dabei mittels einer unidirektionalen Referenzierung auf das IPT (*Prozessmodell: Auftrag_X → IPT: SOLL_X-Partialmodell*). Aufgabengegenstände werden hingegen nicht auf Leitstandebene formuliert, jedoch subsequent von der Maschinenebene dorthin rapportiert.

Die zentrale Komponente des Leitstands bildet eine im Projektvorhaben vom Konsortialpartner RIB konzipierte Softwareplattform, welche die Methoden und Konzepte von BIM- und ERP-Lösungen zusammenführt. Sie dient der lokal konzentrierten Planung, Steuerung und Überwachung aller Bauabläufe, wobei zur Visualisierung auch VR- bzw. AR-Systeme zum Einsatz gebracht werden sollen. Dazu fungiert sie als Integrator der Produktmodelle und wickelt über einen integrierten Model Server ebenso deren fortlaufende Versionierung zur lückenlos rückverfolgbaren Dokumentation der Baustelle ab.

3 Implementierung

Zur Implementierung des logischen IPT-Entwurfs wurden verschiedene Produktmodellstandards hinsichtlich ihrer Eignung und Erweiterbarkeit untersucht. Dabei hat sich das für Vermessungs- und Tiefbauanwendungen bereits etablierte Dateiformat *LandXML* als grundsätzlich am besten geeignet erwiesen. Aufgrund konkreter technischer Anforderungen im Vorhabenskontext wurde jedoch das proprietäre Austauschformat Format *CPI* des Konsortialpartners RIB für eine partielle Implementierung des IPT festgelegt.

4 Fazit und Ausblick

In den ersten Phasen des iterationszyklisch organisierten AutoBauLog-Verbundprojekts wurde das Evaluierungsszenario mehrfach angepasst und zugunsten der Fokussierung priorisierter Themenfelder gemäß Bottom-up-Methodik zunächst auf einen operativen Teilausschnitt des avisierten ganzheitlichen Ansatzes beschränkt. Aus diesem Grund lassen sich das Konzept des strategischen Baustellen-Leitstands und damit der skizzierte Entwurf des IPT bislang noch nicht vollständig technisch integrieren und überprüfen, da eine isolierte Betrachtung partieller Teilausschnitte aufgrund der Nichtbeachtung zahlreicher systemischer Wechselwirkungen zu wenige verifizierbare bzw. verwertbare Erkenntnisse für die Modellbildung und -integration liefert. Als größte Hürde hinsichtlich der Umsetzung integrierter Leitstand-Produktmodelle lassen sich jedoch bereits zu diesem Zeitpunkt die sehr hohen Anforderungen bzgl. erforderlicher technischer Kapazitäten erkennen. Hier ist vor allem ein extrem hohes zu erwartendes Datenaufkommen zu nennen, das auch bei entsprechendem Aufwand einer technischen Realisierung gegenwärtig noch sehr lange Verarbeitungszeiten verursachen würde.

5 Referenzen

AUTOBAULOG (2011). AutoBauLog – Autonome Steuerung in der Baustellenlogistik. WEB: www.autobaulog.de.

BMWI – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.) (2010). AUTONOMIK – Autonome und simulationsbasierte Systeme für den Mittelstand. WEB: www.autonomik.de.

GÜNTNER W. A., BORRMANN A. (Hrsg.) (2011). Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen – Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

ISO 10303-1 (2004). Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange. Genf, Internationale Organisation für Normung (ISO).

RÜPPEL U. (Hrsg.) (2007). Vernetzt-kooperative Planungsprozesse im Konstruktiven Ingenieurbau – Grundlagen, Methoden, Anwendungen und Perspektiven zur vernetzten Ingenieurkooperation. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

VDI (Hrsg.) (2008). VDI-Richtlinie 4499 Blatt 1 – Digitale Fabrik – Grundlagen. Düsseldorf, Verein Deutscher Ingenieure (VDI)