



## Semantische Modellbildung in der Bauforschung

### Fachspezifische Anforderungen an virtuelle 3D-Modelle



Abb. 1: Durch 3D-Modelle werden nicht mehr existierende Raumgefüge erlebbar und überprüfbar, hier ein transloziertes Ausstattungsstück in seinem ursprünglichen Kontext innerhalb von St. Lorenz in Nürnberg [Nöbauer / Schalk 2020].

---

<b>Leitung:</b>	Prof. Dr.-Ing. Stefan Breitling, Dr.-Ing. Tobias Arera-Rütenik
<b>Bearbeitung:</b>	Anna Nöbauer M.A., Anna Luib M.A., Dipl.-Ing. Angel Menargues M.A., Patrick Schalk M.Eng.
<b>Partner:</b>	Institut für Informationssysteme und Softwaretechnik (IFIS) der Universität Passau
<b>Laufzeit:</b>	seit 2018
<b>Finanzierung:</b>	Bundesministerium für Bildung und Forschung, KDWT-Eigenmittel

---

Die Nutzung modellierter 3D-Darstellungen gehört auch in den Fächern, die sich mit Objekten des kulturellen Erbes befassen, inzwischen zum Alltag. In aller Regel dienen sie der Präsentation von Forschungsergebnissen für eine erweiterte Fachcommunity oder zur Vermittlung von Inhalten an eine breitere Öffentlichkeit (Abb. 1).

Demgegenüber verwendet die Bauplanung 3D-Modelle zwar auch zu reinen Darstellungs- und Vermittlungszwecken, beispielsweise zur Überprüfung von Entwurfsentscheidungen oder als gemeinsame Diskussionsgrundlage mit den Bauherren, ihr Anwendungsbereich ist aber inzwischen unter dem Label des sogenannten *Building Information Modelling (BIM)* weit enger mit dem Entwurfs- und Planungsprozess verzahnt. Einzelne Komponenten des Modells werden hierbei mit Informationen verschiedener Gewerke sowie mit Parametern für die halbautomatische Aktualisierung der Geometrie verknüpft. Das Ziel ist die Zusammenführung aller relevanten Daten in ein und derselben Planungsgrundlage und damit eine entscheidende Verbesserung des kollaborativen Arbeitens im Planungs- und Bauprozess, aber auch die Fortschreibbarkeit des Informationsbestands im Laufe der Gebäudebewirtschaftung.

In den Geisteswissenschaften, insbesondere in den textorientierten Fächern zeichnen sich seit mehreren Jahrzehnten unter dem Label der sogenannten *Digital Humanities* oder auch *e-Humanities* im gewissen Sinne ähnliche Tendenzen ab. XML-basierte Auszeichnungsstandards des „klassischen“ Internets oder Graphentechnologien des sogenannten „Semantic Web“ haben die Erschließung von Daten für die Analyse mit algorithmischen Methoden, eine verbesserte Anschlussfähigkeit von Forschungsergebnissen oder die eng vernetzte, kollaborative und disziplinenübergreifende Kontextualisierung von Informationen zum Ziel. Inzwischen hat die Arbeitsweise längst auch ihren Weg in die Musik- und Bildwissenschaften oder auch die Archäologie gefunden und wird folglich immer öfter als *digitale Geistes- und Kulturwissenschaften* bezeichnet.

Die historische Bauforschung sieht sich als Schnittstellendisziplin, die sowohl der wissenschaftlichen Analyse in den kulturhistorischen Fächern als auch der Planung für die praktische Umsetzung von Maßnahmen Grundlagen liefert. Durch die Ausdifferenzierung der Denkmalfächer finden zunehmend mehr Informationen von der geisteswissenschaftlichen Geschichtsforschung bis hin zu naturwissenschaftlichen Materialanalysen in den Bauwerkserfassungen Eingang. Solche Dokumentationen enthalten zudem eine große Vielfalt multimodaler Darstellungsmethoden wie die Einzelblätter sogenannter Raumbücher, Plan-

zeichnungen unterschiedlicher Maßstäbe und Genauigkeitsstufen, Listen, Skizzen, Kartierungen diverser Inhalte und schließlich auch 3D-Modelle. Bei alledem zählt zu den wesentlichen Qualitätsmerkmalen die möglichst dicht vernetzte Kontextualisierung dieser Daten am Gesamtgebäude und darüber hinaus. Um die Relevanz der Dokumentationen der Bauforschung möglichst effizient in Planungsprozesse einzubinden und um wichtige Erkenntnisse für die kulturhistorische Forschung weiterhin verwertbar zur Verfügung zu stellen, wird im Sinne der Zukunftssicherung des Faches die Nutzung der Leistungsmerkmale von BIM-Systemen auf der einen Seite und semantischer Technologien auf der anderen zunehmend eine ernstzunehmende Aufgabe, die weit über reine Präsentationszwecke hinausgeht. Weil der Arbeitsbereich Bauforschung – Baugeschichte – Bauernhalt am KDWT bezüglich des Personals auf eine den begrenzten Zeitrahmen von klassischen Drittmitteln hinausgehende Dauerfinanzierung zurückgreifen kann, hat sich die Abteilung zum Ziel gesetzt, diese Aufgabe langfristig zu begleiten. Anlass dafür bilden verschiedene abgeschlossene und laufende Vorhaben, die die Modellbildung mehr oder weniger berühren, zuletzt ein BMBF-gefördertes Verbundprojekt (siehe dazu *Die Nürnberger Großkirchen*, 18–23).

### Die Geometrie – eine Frage der Genauigkeit

Grundsätzlich lassen sich zwei Arten von 3D-Darstellungen unterscheiden, die in der historischen Bauforschung Anwendung finden:

- 3D-Oberflächenmodelle, die durch automatisiertes Vermaschen von photogrammetrisch oder mit 3D-Scannern erstellten Punktwolken generiert werden;
- 3D-Volumenmodelle, die mehr oder weniger von Hand in entsprechender Software nach und nach aufgebaut sind.

Während erstere als „objektives“ Aufmaßprodukt angesprochen werden können, weil ihre Geometrie weitgehend automatisiert mithilfe von Geräten und Algorithmen aufgenommen wird, benötigen letztere durch händisches Abstrahieren und Nachmodellieren wesentlich mehr Eingriffe durch den menschlichen Geist und weisen entsprechend einen deutlich höheren Grad an „Subjektivität“ auf (siehe dazu auch: *Baudokumentation am KDWT*, Berichte des KDWT 1, S. 48–51). Auch wenn dieser Umstand zunächst den Anschein hat, sich nachteilig auf wissenschaftliches Arbeiten im Allgemeinen auszuwirken, stellt eine differenziertere Hinterfragung des Begriffes „Genauigkeit“ die

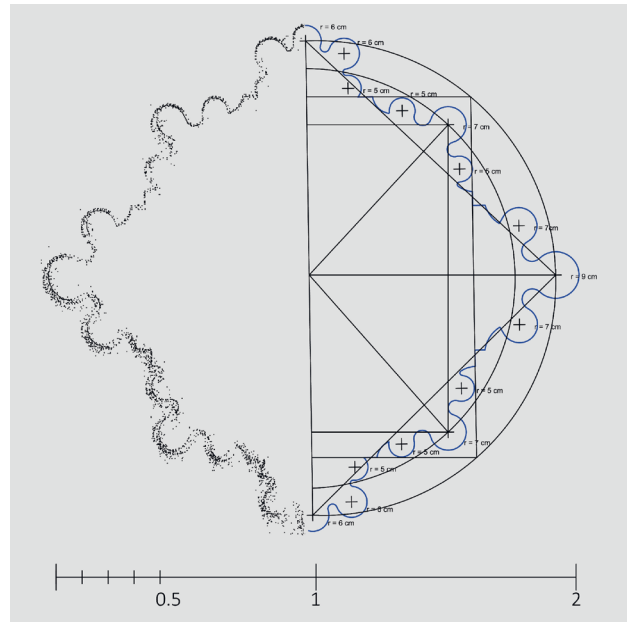


Abb. 2: Die unscharfe Punktwolke eines Pfeilergrundrisses des terrestrischen Laserscanners wird bauteilgerecht nachkonstruiert und so selbst zum Träger erweiterter Informationen [Nöbauer / Salzer 2020].

Vorteile von Volumenmodellen heraus. Bei Oberflächenmodellen ist die Lagegenauigkeit einzelner Punkte von den Geräteeigenschaften sowie seinem Abstand zum Objekt abhängig und etwa gleichmäßig verteilt. Bei Volumenmodellen hingegen definiert sich diese Genauigkeit durch eine Abwägung zwischen Aufwand sowie Zielstellung und kann lokal verschieden ausfallen. Verformungen des Bauwerks fließen dabei zwar nur bedingt in die Darstellung ein. Jede übernommene Abweichung und jede Entscheidung bezüglich der Detailtiefe ist hier aber stets eine bewusste Entscheidung. Durch Weglassen von Unwesentlichem, Hervorheben bzw. Ausdifferenzieren von Aussagekräftigem sowie bauteilgerechtes Konstruieren ist die händische Erstellung von Volumenmodellen ein umfassender Akt der Interpretation und damit eine Bewertung der Relevanz von einzelnen Inhalten der schier unüberschaubaren Masse von Informationen am historischen Sachzeugnis (Abb. 2). Der Spitzbogen eines Maßwerkfensters ist eben keine Ansammlung nicht miteinander in Beziehung stehender Punkte im Raum, sondern ein abgegrenztes, an einer Bogenlinie extrudiertes Profil mit klar definiertem Mittelpunkt, Radius und Winkel. Der Vorteil von Volumenmodellen liegt also weniger in der Präzision der Lage einzelner Punkte, sondern in der semantischen Genauigkeit, der Informationsdichte bzw. der visuellen Klarheit und Lesbarkeit. Die Modellbildung wird so selbst zum Akt des Erkenntnisgewinns.

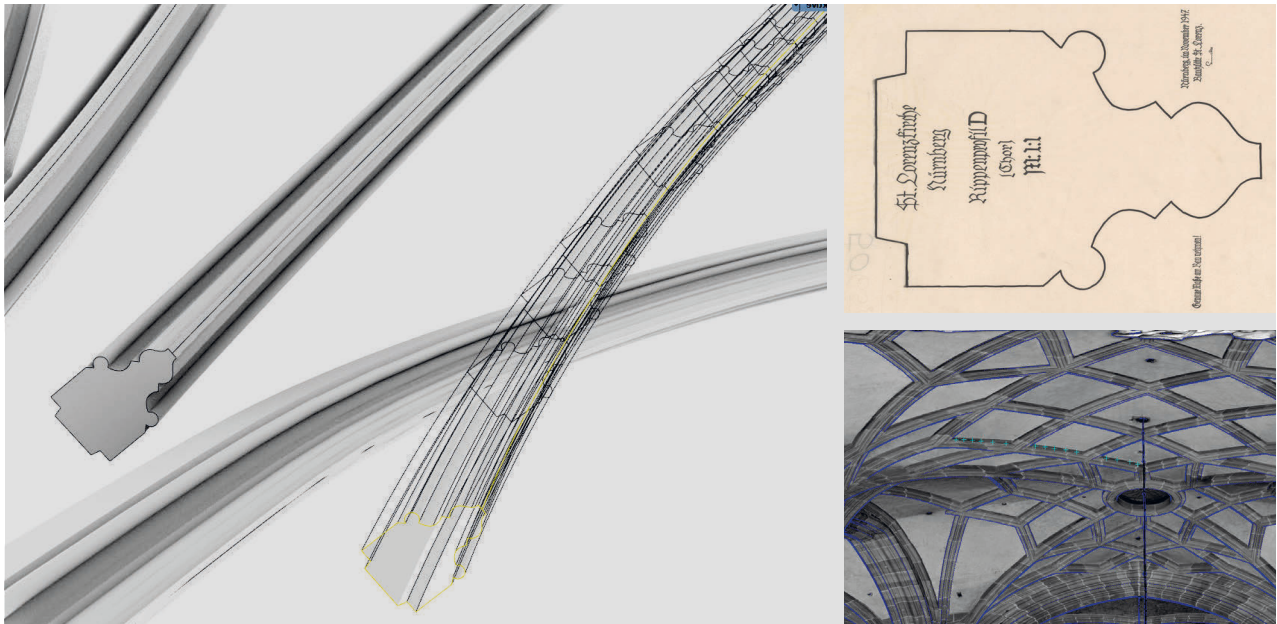


Abb. 3: Die Modellierung von Volumendarstellungen ist zugleich auch eine Zusammenführung unterschiedlicher Grundlagen. Zur Konstruktion der Gesamtgeometrie der hier dargestellten Gewölberippen (links) dienen die Punktwolken moderner Laserscanner (rechts unten). Profilverfolgen des Rippenquerschnitts sind hingegen in händischen, historischen Aufmaßen bauteilgerecht abgebildet (rechts oben). Auf diese Weise fließen die Qualitäten und Genauigkeiten unterschiedlicher Verfahren ins Modell ein [Nöbauer / Salzer / Luib 2018].

Bei genauerer Betrachtung des Herstellungsprozesses wird dieser Aspekt umso deutlicher. Aufgrund der sich rasant entwickelnden Aufmaßtechniken und zur Wahrung der internen Genauigkeit werden Oberflächenmodelle in der Regel gänzlich neu produziert. Demgegenüber ist die händische Modellierung von Volumendarstellungen auf vorhandene Grundlagen angewiesen (Abb. 3). Insbesondere bei Großbauten existiert oft eine lange Forschungsgeschichte und damit ein vielfältiges Angebot bereits vorhandener Bauaufnahmen. Diese Grundlagen werden in die Modellbildung einbezogen und gleichsam fortgeschrieben. Im Projekt zu den Nürnberger Großkirchen orientiert sich die Gesamtgeometrie des 3D-Modells grundsätzlich an vorhandenen Punktwolken eines terrestrischen Laserscans, weil hier die Lagegenauigkeit von Punkten bezüglich der Gesamtgeometrie gegeben ist. Für die Ausmodellierung von Details wie Profile von Pfeilern, Arkadenbögen und Gewölberippen werden hingegen händische Aufmaßzeichnungen aus einhundert Jahren Forschungsgeschichte herangezogen, weil sie Einzelheiten ohne Unschärfe bauteilgerecht darstellen. Schließlich steuern beispielsweise restauratorische Voruntersuchungen den am Bauwerk überprüften Steinschnitt bei. Das Volumenmodell ist demnach ein durch Zusammenführung vorhandener Grundlagen entstandenes Aggregat, wobei jede Quelle durch das verwendete Verfahren

ihre integralen Qualitäten beisteuert. Das 3D-Volumenmodell weist also eine bedarfsgerechte, wechselnde Tiefenschärfe bzw. Genauigkeit auf.

### Die Separation – eine Frage des Blickwinkels

Ein weiterer Vorteil von konstruierten Modellen liegt darin, dass ihre Aussagekraft nicht an der Oberfläche endet, sondern in das Innere der Bauwerksstruktur eindringt und so die Wirkzusammenhänge einzelner Bauteile realitätsnah simuliert. Auf diese Weise kann in das 3D-Modell eine Darstellungstiefe einfließen, die in der Bauaufnahme schon lange als Qualitätsmerkmal definiert ist. Um dieses Ziel zu realisieren, besteht dieses Volumenmodell nicht aus einem Guss, sondern wird durch Separation in entsprechende Teilelemente aufgeschlüsselt. Dabei gibt es aber nicht einen universellen Weg, der in der Lage wäre, die Wirklichkeit objektiv wiederzugeben. Jedes mit Objekten des kulturellen Erbes befasste Fach besitzt seine ganz eigene Perspektive auf das Sachzeugnis. Weil die Bauforschung als Schnittstellendisziplin Belange der Nachbarfächer berücksichtigen möchte, bieten ihre 3D-Modelle mehrere parallel zueinander existierende Separationslogiken an:

- Die *strukturelle Separation* zerlegt das Volumenmodell in Bauelemente entsprechend der Entwurfslogik. Bei einem gotischen Sakralbau sind dies zum Beispiel Pfeiler, Dienste, Gewölberippen, -kappen, Wandabschnitte;

- Die *konstruktive Separation* stellt die Aufgliederung entsprechend der Herstellung und Fügung tatsächlich vorhandener Bauglieder in den Vordergrund. Hier wird der einzelne Werkstein oder ein Holzbalken ungeachtet seiner Zugehörigkeit zu strukturellen Bauelementen herausgegriffen;
- Die *entwicklungsgeschichtliche Separation* trennt das Volumen in Entsprechung zu den Entstehungszeitpunkten bestimmter Bauwerkspartien auf. Diese Grenzen können mitunter über strukturelle Bauelemente oder konstruktive Bauglieder hinweg reichen (Abb 4.).

Es ist kein Zufall, dass die genannten Zerlegungsmethoden den an anderer Stelle diskutierten *fachspezifischen Kontexten* ähneln (siehe dazu: *Die Nürnberger Großkirchen*, ab S. #), denn Sinn und Zweck der Modellseparation ist die Anreicherung desselben mit zahlreichen fachübergreifenden Hintergrundinformationen aus der wissenschaftlichen Forschung sowie dem praktischen Denkmalerhalt. Die adäquate Aufschlüsselung der Geometrie ermöglicht so die Anwendung der Darstellung als Informationssystem mit dem jeweiligen Zweck und der jeweiligen Nutzergruppe entsprechender Tiefenschärfe.

### Die Semantik – eine Frage der Anschlussfähigkeit

Mithilfe der Modellseparation stünden der Bauforschung ausreichend Softwaresysteme zur Verfügung, um virtuelle 3D-Modelle sogleich mit Informationen anzureichern. In der Planungspraxis zunehmend an Bedeutung gewinnende BIM-Systeme können hierbei aber nur bedingt den Anforderungen in der historischen Bauforschung gerecht werden:

1. Die proprietären Systeme sind abhängig von bestimmten Herstellern. Die fragwürdige Anschlussfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Daten widerspricht dem Dokumentationsauftrag der Bauforschung.
2. Die Bauforschung ist als Schnittstellendisziplin nicht nur an der Adaption von Planungsinstrumenten der Ingenieurfächer, sondern desgleichen am Schulterschluss mit den Geisteswissenschaften interessiert. Folglich wird im Sinne der Anschlussfähigkeit für die Modellierung einer „semantischen Schicht“ auf die in den Digital Humanities etablierten Graphentechnologien zurückgegriffen.

Nicht nur aus den genannten Gründen hat der Arbeitsbereich entschieden, für die Anreicherung von Volumendarstellungen mit Informationen eine weitgehend unabhängige „semantische



Abb. 4: Die Aufgliederung des Modells in verschiedene Kontexte, erlaubt die Referenzierung nutzerspezifischer Informationen und die Zusammenstellung fachspezifischer Darstellungen. Hier ermöglicht die *entwicklungsgeschichtliche Separation* die Abbildung verschiedener Bauzustände von drei ausgewählten Zeitpunkten [Nöbauer / Luib 2018].

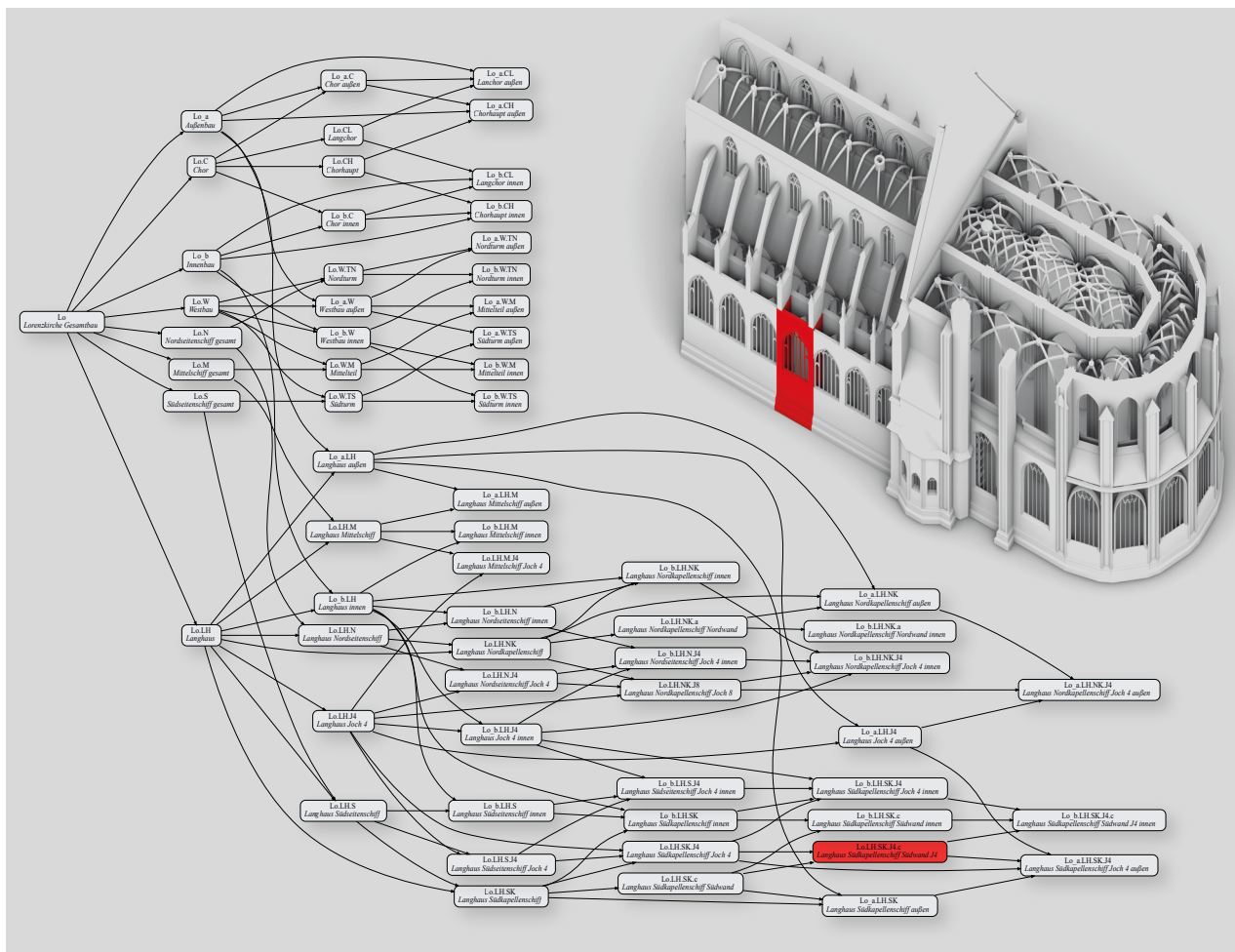


Abb. 5: Die Gebäudestruktur wird als virtueller Graph sich wechselseitig übergreifender Teilobjekte aufgeschlüsselt und mit dem separierten 3D-Modell verknüpft [Arera-Rütenik / Nöbauer / Salzer / Luib / Schalk 2020].

Schicht“ als virtuellen Graph zu modellieren. Sie stellt die Beziehungen der einzelnen Bauelemente zueinander umfassend dar und berücksichtigt dabei desgleichen unterschiedliche Nutzerkontexte (siehe dazu: *Die Nürnberger Großkirchen*, ab S. #). Das Vorgehen lässt Gruppierungen von Bauelementen und Raumeinheiten zu übergeordneten Bauteilen zu, berücksichtigt, angelehnt an BIM, konstruktive Verbindungen und erlaubt bei alledem Mehrfachzuordnungen von sich wechselseitig übergreifenden Einzelgliedern. D.h., hier wird beispielsweise ein Mittelschiffspfeiler als sogenannter *Knoten* im virtuellen Strukturgraphen mit zugehörigen Nummern unterschiedlicher Inventarisierungssysteme angelegt. Beziehungen – sogenannte *Kanten* – formulieren, dass dieser Pfeiler als Einzelsegment einer entsprechenden Arkade aufzufassen ist, selbst in Basis, Schaft, Kapitell, mehrere Dienstbündel und einzelne Werksteine unterteilt werden kann und darüber hinaus als raumtrennende Einheit zwischen zwei Seiten- und zwei Mittelschiffsjochen fungiert. Zur Differenzierung dieses Geflechts können Knoten und

Kanten unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Erstere lassen sich als:

- *Baugruppen* (Ensemble von Einzelgebäuden, z.B. „Vorburg“, „Hauptburg“ oder „Wirtschaftshof“ bei Adelssitzen),
- *Einzelbauten* („Kirche“, „Pallas“, „Klausur“, „Torkapelle“ etc.)
- *Bauteile* (Gruppen von Bauelementen und Räumen, z.B. „Doppelturmfront“, „Langhaus“ und „Chor“ bei Kirchengebäuden),
- *Raumeinheiten* (z.B. „Joch“ und „Schiff“ bei Sakralbauten oder „Geschoss“ und „Raum“ bei Profanbauten),
- *Bauelemente* (z.B. „Pfeiler“, „Fenster“, „Wandabschnitt“) oder ...
- *Aspekte* (z.B. „Innen-“ oder „Außenansicht“, „Grundriss-“ und „Schnittebenen“ eines dreidimensionalen Bauteils oder Bauelements) definieren.

In Entsprechung zu den Knoten charakterisieren desgleichen verschiedene Kantentypen die Art der Beziehung zu über- oder untergeordneten bzw. nachbarschaftlichen Knoten:

- Die *part of*-Beziehung stellt existenzielle Abhängigkeiten zwischen einem Objekt und seinen Einzelteilen dar.
- Die *belongs to*-Beziehung formuliert eine weniger strenge Abhängigkeit, sondern eher eine Gruppierung und erlaubt zudem mehrfache Zuordnungen zu übergeordneten Einheiten.
- Die *connects*-Beziehung beschreibt die bauliche bzw. geometrische Berührung zwischen zwei Elementen, wird auch in BIM verwendet und garantiert Anschlussfähigkeit zu entsprechenden Systemen.

Diese topologische Struktur als virtueller Graph aus Knoten und Kanten verbleibt zunächst in gewissem Sinne „inhaltslos“. Die einzelnen Instanzen werden mittels Zuweisung von Begriffen erst in zweiter Instanz durch qualitative Beschreibungen charakterisiert. Dazu dienen Themen aus einem kontrollierten Vokabular, dessen Aufbau und Funktionsweise an anderer Stelle genauer beschrieben wird (siehe dazu: *Bamberger Vokabular für historische Architektur*, 146–149). Hierdurch wird schließlich geklärt, dass ein bestimmter *Bauelement*-Knoten in der virtuellen Struktur den Form-Typ „Bündelpfeiler“, den Funktions-Typ „Arkadenpfeiler“ und den Lage-Typ „Freipfeiler“ aufweist. Entsprechend wird mit seinen über- und untergeordneten Knoten verfahren. Im Ergebnis liegt eine semantische Schicht als gleichsam unsichtbare Parallelstruktur vor, die alle relevanten topologischen und thematischen Informationen enthält.

Für deren technische Umsetzung wird mit verschiedenen offenen Dateiformaten experimentiert. Im Projekt zu mehreren hundert Adelsitzen im Altmühltal dienen hochstrukturierte XML-Dateien der semantischen Modellierung virtueller Bauwerksstrukturen und ihrer thematischen Auszeichnung. Bei St. Lorenz in Nürnberg stellt ein Linked-Open-Data-fähiges Graphenmodell als SKOS (Simple Knowledge Organization System) im RDF-Format (Resource Description Framework) die virtuelle Struktur zur Verfügung – eine Technologie, die normalerweise für Normdaten Anwendung findet. Welche technische Herangehensweise auch immer für die semantischen Graphen verwendet werden, als eigentlicher Träger beliebig erweiterbarer Inhalte verbleiben sie zunächst eigenständig und unabhängig von der geometrischen Repräsentation. Durch Referenzierung einzelner Knoten, inklusive ihrer thematischen Bezüge auf einzelne Elemente der separierten Volumendarstellung entsteht schließlich das semantische Gesamtmodell (Abb 5). Damit ist es

möglich, inhaltliche Abfragen aus dem „unsichtbaren“ semantischen Graphen automatisiert in die Modelle auszukartieren. Umgekehrt lässt sich die separierte Volumendarstellung als Interface benutzen, um umfassende objektbezogene Hintergrundinformationen zu ihren Einzelelementen zu erreichen. Die Parallelführung beider Repräsentationen hat darüber hinaus verschiedene Vorteile im Sinne der Anschlussfähigkeit:

- Der topologisch-thematische Graph wie auch die visuelle Darstellung können unabhängig voneinander ausgewertet werden. Dazu gehören quantitative Analysen ebenso wie die Suche von Einzelphänomenen mithilfe komplexer Filterungsmechanismen oder auch geometrisch-geographische Abfragen.
- Die gegenseitige Referenzierung der beiden weitgehend selbständigen Instanzen erlaubt die flexible Nachverdichtung oder Umstrukturierung sowohl innerhalb der semantischen Schicht als auch im separierten Modell.
- Derselbe topologisch-thematische Graph lässt sich gleichzeitig auch auf andere Daten referenzieren, dabei kann es sich um Pixelbilder, Raumbücher, Volltexte, 2D-Pläne und dergleichen handeln.
- Die Aufteilung des semantischen Modells in eigenständige Schichten kommt der kollaborativen Arbeit in Verbänden entgegen.
- Weil die semantische Schicht und das Volumenmodell unabhängig voneinander in offenen Dateiformaten vorliegen, können ihre Inhalte durch Export und Transformation innerhalb ganz anderer Strukturen und Zusammenhänge – darunter auch BIM-Systeme – nachgenutzt werden.

Durch die beschriebenen, aufgrund der entsprechenden Anforderungen entstandenen Überlegungen gehen semantische Modelle in der Bauforschung weit über reine Vermittlungszwecke hinaus. Sie unterstreichen durch Zusammenführung sowie möglichst dauerhafte Anschlussfähigkeit den Dokumentationsauftrag der Bauforschung. Als Informationsinfrastruktursysteme sind sie folglich leistungsfähige Arbeitsmittel, die die Vielfalt relevanter Informationen aus kulturgeschichtlicher Forschung und praxisbezogener Planung bündeln, übersichtlich erschließen, mit nutzerspezifischen Kontexten vernetzen, dadurch dem Anspruch der Bauforschung als Schnittstellendisziplin gerecht werden und schließlich die Bedeutung des Objekts als Informationsträger angemessen hervorheben.

(Tobias Arera-Rütenik, Anna Nöbauer, Patrick Schalk)