

Kompatibilität von BIM- und FE-Modellen für die Tragwerksanalysen

Iryna Rudenko

Fachgebiet Statik und Dynamik, Technische Universität Berlin

Zusammenfassung: Der Beitrag beschreibt die Entwicklung eines Verfahrens für das konsistente Extrahieren von FE-Modellen verschiedener Komplexität und Dimensionalität aus einem BIM-Modell. Die Grundlage für das BIM-Modell stellt eine IFC-Datei dar. Dabei werden FEM-relevante Informationen und, falls das BIM-Modell auch für die Zustandsüberwachung verwendet wird, SHM-relevante Informationen in BIM mitberücksichtigt.

1 Einleitung

Der Einsatz von Building Information Modeling (BIM) im Bauwesen nimmt stark zu. Ein digitales Bauwerksmodell wird erstellt, verwaltet und kann von der Entwurfsphase bis hin zum Lebensdauermanagement verwendet werden. Ein BIM-Modell beinhaltet sowohl geometrische als auch semantische Informationen und kann als eine Datenquelle für verschiedene Simulationen dienen. [1] In der Tragwerksplanung sind Finite-Elementen-Modelle (FE-Modelle) von großer Bedeutung. Diese werden für Schnittgrößenermittlung und Bemessung eingesetzt. In Abhängigkeit vom Anwendungsfall weisen die FE-Modelle unterschiedliche Komplexität und Dimensionalität auf. Beispielsweise wird ein FE-Modell vom Gesamtsystem mit Balkenelementen ausreichend sein, um die Stabilität einer typischen Hallenkonstruktion nachzuweisen. Für den Nachweis einzelner Verbindungen wird aber ein lokales FE-Modell mit Schalen- oder Volumenelementen benötigt. Viele Softwarehersteller bieten bereits entsprechende Schnittstellen zwischen BIM und FEM an, ein allgemeingültiger Weg für den Datenfluss von BIM zu FEM existiert derzeit aber noch nicht. Im Rahmen von Structural Health Monitoring (SHM, Bauwerksmonitoring) wird der Zustand des Bauwerks überwacht, um die Änderungen der Tragstruktur, wie z. B. Schäden, zu erfassen, notwendige Maßnahmen zu ergreifen und eine Restlebensdauerprognose zu erstellen. Dafür werden auch FE-Modelle benötigt, die das reale Verhalten des Tragwerks abbilden können. Dementsprechend ist eine effiziente Verbindung zwischen BIM, SHM und FEM essenziell.

Das Hauptziel dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Verfahrens für das konsistente Extrahieren von FE-Modellen verschiedener Komplexität und Dimensionalität

aus einem BIM-Modell. Das BIM-Modell soll unter anderem Bestandsdaten sowie wesentliche SHM-Informationen beinhalten. Zugleich wird der Fokus auf openBIM gelegt. Dabei werden offene und herstellerneutrale Datenformate, wie z. B. Industry Foundation Classes (IFC), für den Datentransfer verwendet, was für eine bessere Interoperabilität sorgt. Dieses Thema wird im Rahmen des Forschungsprojekts LEMOTRA aus dem DFG-Schwerpunktprogramm SPP 2388 „Hundert plus - Verlängerung der Lebensdauer komplexer Baustrukturen durch intelligente Digitalisierung“ bearbeitet. In dem vorliegenden Beitrag wird zuerst allgemein auf den Datentransfer zwischen BIM- und FE-Programmen eingegangen und ausgewählte Szenarien des Datentransfers werden vorgestellt. Anschließend wird das Vorgehen zur Umsetzung einer Erweiterung erläutert, um das Extrahieren der FE-Modelle verschiedener Komplexität und Dimensionalität aus einem BIM-Modell zu ermöglichen und an einem Beispiel demonstriert.

2 BIM in der Tragwerksplanung

2.1 Modellarten in der Tragwerksplanung

Bei einer BIM-basierten Arbeitsweise existieren in der Tragwerksplanung meistens drei Modellarten: Tragwerksmodell, Tragwerksberechnungsmodell und FE-Modell. Das Tragwerksmodell oder das Fachmodell der Tragwerksplanung ist ein BIM-Modell, das die tragenden Bauteile mit dazugehörigen geometrischen und semantischen Informationen beinhaltet [3]. Geometrische Informationen beschreiben die Geometrie eines Bauteils. Unter semantischen Informationen werden Sachdaten verstanden. Beispiele dafür sind Angaben zu Baustoffen oder zum Herstellungsverfahren. [1] Einige BIM-Programme führen auch ein Tragwerksberechnungsmodell mit. Es handelt sich dabei um das statische System, das in BIM abgelegt wird. Im Fall von Autodesk Revit 2022 wurde das Tragwerksberechnungsmodell automatisch aus dem Tragwerksmodell erstellt. Dabei wurden stabartige Bauteile, wie z. B. Träger und Stützen, zu Stäben und flächenartige Bauteile, beispielsweise tragende Geschossdecken und Wände, zu Flächen. Mithilfe von Schnittstellen können die Informationen aus dem Tragwerksberechnungsmodell an das FE-Programm übergeben werden und ein FE-Modell wird erstellt. Das Tragwerksmodell wird nach den jeweiligen Berechnungen entsprechend angepasst.

2.2 Datentransfer zwischen BIM- und FE-Software

Der Datentransfer zwischen BIM- und FE-Software kann mithilfe direkter Schnittstellen (APIs) oder dateibasiert erfolgen. Wird eine direkte Schnittstelle genutzt, können die Daten aus einem Programm direkt an ein anderes Programm ohne zusätzliche Dateien übergeben werden. Die Kommunikation zwischen beiden Programmen geschieht über Programmierschnittstellen (Application Programming Interfaces (APIs)). Diese Schnittstellen funktionieren meistens besser und sind herstellerepezifisch. Auf dem Markt gibt es eine große Anzahl an BIM- und FE-Programmen, die direkte Schnittstellen zueinander haben. Beim dateibasierten Datentransfer werden die Daten aus einem BIM-Modell in eine bestimmte Datei exportiert. Diese Datei kann dann in ein anderes Programm importiert werden. Es sind zwei Fälle zu unterscheiden: proprietäre und neutrale Formate. Proprietäre Formate wurden von einem bestimmten Softwarehersteller für seine

Anwendungen entwickelt. Ein Beispiel dafür wären DXF und RVT von Autodesk. Im Gegensatz dazu sind neutrale Formate offen und herstellerneutral, wie z. B. Industry Foundation Classes (IFC). [2]

2.3 Industry Foundation Classes

IFC ist ein international standardisiertes Datenformat. Für die Datenmodellierung wird die deklarative Sprache EXPRESS verwendet. Auf diese Weise können objektorientierte Datenmodelle definiert werden. Das IFC-Datenmodell unterscheidet zwischen semantischer Beschreibung eines Bauteils und seinen geometrischen Repräsentationen. Dabei kann ein Bauteil eine oder mehrere geometrische Repräsentationen haben. Das ist sinnvoll, denn in Abhängigkeit vom Anwendungsfall können unterschiedliche Repräsentationen von Vorteil sein. Beispielsweise ist für eine reine Visualisierung eine triangulierte Flächenbeschreibung/Tessellation ausreichend. Im Hinblick auf die Statik könnte die Repräsentation eines Bauteils als Extrusionskörper von Vorteil sein. Dabei wird ein Körper über die Extrusion eines 2D-Profiles beschrieben. Außerdem verfügt IFC über verschiedene Model View Definitions (MVDs). Damit können Bauwerksinformationen, die für den jeweiligen Anwendungsfall relevant sind, übergeben werden. Beispielsweise beinhaltet Structural Analysis View die für die Tragwerksanalysen relevanten Bauteile mit dazugehörigen Lasten, Auflagerbedingungen, Materialien etc. Dabei werden die Bauteile bezogen auf ihre analytischen Achsen repräsentiert, wie im Tragwerksberechnungsmodell. Coordination View ist sehr verbreitet und enthält alle Informationen, die für die Fachbereiche Architektur, Tragwerksplanung und TGA benötigt werden. Die Informationen zum Tragwerksberechnungsmodell bleiben unberücksichtigt. Reference View wird für die Zusammenführung der BIM-Modelle einzelner Fachbereiche und Kollisionsprüfung verwendet. Es ist kaum möglich geometrische Änderungen am Modell vorzunehmen. Mit Design Transfer View werden geometrische Änderungen am Modell hingegen möglich. [1]

2.4 Untersuchung verschiedener Szenarien des Datentransfers am Beispiel einer Stahlhalle

Es wurden unterschiedliche Szenarien des Datentransfers zwischen BIM- und FE-Programmen am Beispiel einer Stahlhalle untersucht. Die Hauptfragen waren dabei, ob es möglich ist, FE-Modelle unterschiedlicher Komplexität und Dimensionalität aus einem BIM-Modell zu extrahieren und welche Daten sich im Hinblick auf FE-Berechnungen im BIM-Modell ablegen lassen.

Das BIM-Modell der Halle wurde in Autodesk Revit 2022 erstellt und ist in Abbildung 1 zu sehen. Für die FE-Berechnungen wurden Dlubal RFEM 5.29 und Ansys Workbench 2022 R1 verwendet. Dabei wurden zwei verschiedene Problemstellungen betrachtet: lineare Stabilitätsanalyse am Gesamtsystem und Nachweis einer Schweißnahtverbindung an der Stützenkonsole unter der Kraneinwirkung. Außerdem wurde versucht, möglichst viele Daten, die für die nachfolgenden FE-Berechnungen nötig sind, im BIM-Modell zu spezifizieren. Die Geometrie der Struktur, deren Querschnitte, Werkstoffeigenschaften sowie Lagerbedingungen wurden in Revit modelliert. Die Berücksichtigung von Lasten in Revit hat sich als problematisch ergeben. Dementsprechend wurde nur das Eigengewicht des Dachaufbaus als Linienlast in Revit eingegeben. Die Schnee-, Wind- sowie Kranlasten

wurden später in RFEM definiert. Es ist kaum möglich die Diskretisierung des Systems aus Revit zu steuern. Diese wurde anschließend manuell in RFEM bzw. Ansys angepasst.

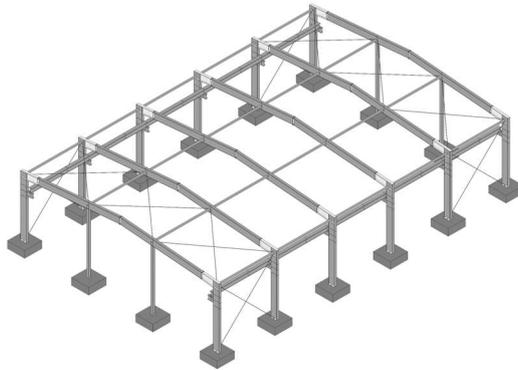


Abbildung 1: Das Tragwerksmodell der Stahlhalle

Für die Stabilitätsanalyse war ein FE-Modell mit Balkenelementen nötig. Hier wurden zwei Varianten getestet: Export von Revit nach RFEM sowie Import der Berechnungsergebnisse in Revit mit der direkten Schnittstelle von Dlubal und Export von Revit nach RFEM mittels der IFC-Datei. Der Export aus Revit mit der IFC 2x3 Coordination View 2.0 hat gut funktioniert. Die Angaben zum Tragwerksberechnungsmodell bleiben dabei per Definition unberücksichtigt. Der Import in RFEM über die Option „CAD/BIM Modell“ hat zwar funktioniert, allerdings war die Nachbearbeitung des FE-Modells nötig. Der direkte Import einer IFC-Datei vom Typ Coordination View in RFEM hat zu einem nicht akzeptablen Ergebnis geführt. Der Export als Structural Analysis View wurde von Revit nicht unterstützt. Der Export des Modells aus Revit nach RFEM und der Import der Berechnungsergebnisse mit der direkten Dlubal-Schnittstelle hat einwandfrei funktioniert. Es lassen sich aber nicht alle Berechnungsergebnisse, beispielsweise die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse, in Revit importieren. Weiterhin können nur die manuell in RFEM erstellten Lasten in Revit importiert werden. Die Lasten, die mit den jeweiligen Generatoren erstellt wurden, bleiben unberücksichtigt. Die direkte Schnittstelle hat viele Vorteile und minimiert den Aufwand erheblich. Somit ist in diesem Fall die direkte Dlubal-Schnittstelle besser für den Export/Import des FE-Modells des Gesamtsystems mit Balkenelementen geeignet. Allerdings exportiert die Schnittstelle von Dlubal das Tragwerksberechnungsmodell aus Revit. Wie bereits erwähnt, werden alle stabartigen Bauteile als Stäbe und alle flächenartigen Bauteile als Flächen im Tragwerksberechnungsmodell repräsentiert. Somit lässt sich die Dimensionalität des FE-Modells nicht steuern.

Für den Nachweis einer Verbindung wurden die Möglichkeiten untersucht, ein lokales dreidimensionales FE-Modell in ausreichender Feinheit und Detailtreue aus Revit zu extrahieren. Es handelte sich dabei um eine linear-elastische FE-Analyse. Es wurden folgende Varianten getestet: Export der Geometrie der Verbindung aus Revit mit einer DXF, ACIS (SAT)- und IFC-Datei und Import in RFEM, Export der Geometrie der Verbindung aus Revit mit einer ACIS (SAT)-Datei und Import in Ansys Workbench. Da ein dreidimensionales Tragwerksberechnungsmodell in Revit nicht vorliegt, wurde auf unterschiedliche Weisen die Geometrie der Konsole exportiert. Die Lasten, Randbedingungen zum Resttragwerk, Schweißnähte etc. wurden anschließend im FE-

Programm manuell eingegeben. Der Import in RFEM wurde mithilfe der DXF-, ACIS (SAT)- und IFC-Dateien realisiert. Sehr gute Ergebnisse wurden mit der IFC-Datei erzielt. Es ist anzumerken, dass die Schweißnähte beim Export in die IFC-Datei nicht berücksichtigt wurden. Alle Bauteile wurden korrekt importiert, mussten aber noch manuell in Dlubal-Volumenkörper umgewandelt werden. Die Ausrundungen der Stahlprofile wurden nur bei manchen Bauteilen mitberücksichtigt. Insgesamt lässt sich sagen, dass diese Importmöglichkeit gut funktioniert hat. Allerdings war eine gewisse Nachbearbeitung erforderlich. Der Import der ACIS (SAT)-Datei in Ansys Workbench hat am besten funktioniert. Die Geometrie wurde vollständig importiert, alle Volumenkörper waren geschlossen und die Kontaktbereiche wurden automatisch beim Import erkannt (siehe Abb. 2). Es gab Probleme mit den Spannungssingularitäten in den Schweißnähten. Diese wurden durch eine Anpassung der Lasteinleitung größtenteils behoben. Der Spannungsnachweis wurde exemplarisch für die obere Gurtschweißnaht der Konsole durchgeführt.

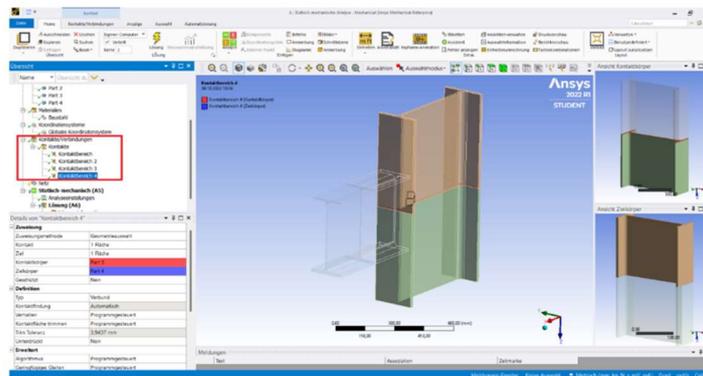


Abbildung 2: Die mit der ACIS (SAT)-Datei in Ansys Workbench importierte Konsole mit automatisch erkannten Kontaktbereichen

Die Untersuchung unterschiedlicher Szenarien des Datentransfers zwischen BIM- und FE-Programmen hat ergeben, dass sich die Dimensionalität des FE-Modells nicht steuern lässt. Es sind immer Umwege nötig. Die Erstellung von FE-Modellen basierend auf IFC-Dateien soll auch verbessert werden. Außerdem werden die SHM-Informationen in den genannten Schnittstellen nicht berücksichtigt. Aus diesen Gründen wurde beschlossen eine Schnittstelle zwischen BIM und FEM basierend auf IFC zu entwickeln.

3 Geplante Schnittstelle zwischen BIM und FEM

3.1 Methodik

Die geplante Schnittstelle zwischen BIM und FEM basiert auf offenen Datenformaten. Somit ist eine IFC-Datei die Grundlage für das BIM-Modell. Es wurde sich für IFC4 Design Transfer View entschieden. Für das Erstellen und Visualisieren von IFC-Dateien wird das Open-Source-Programm Blender zusammen mit dem BlenderBIM Add-on [4] verwendet. Die größten Vorteile davon sind die frei zugänglichen Quelltexte und die direkte Arbeit mit IFC-Klassen. Die Grundlage für das BlenderBIM Add-on stellt die Open-Source-

Softwarebibliothek `IfcOpenShell` [5] dar. Diese ermöglicht es die IFC-Dateien mit C++ oder Python zu erstellen, zu bearbeiten, einzulesen etc. Für die FE-Berechnungen wird das Programm Ansys APDL verwendet. Zuerst enthält die IFC-Datei nur die Geometrie und die Materialeigenschaften des Tragwerks. Anschließend wird die Datei um die FEM-relevanten Informationen, wie z. B. Dimensionalität des FE-Modells, Elementart, Elementgröße sowie Lagerpositionen, ergänzt. Wenn dieses BIM-Modell für die Zustandsüberwachung verwendet werden soll, werden auch die SHM-relevanten Informationen, beispielsweise Zustand und Position der Sensoren, Informationen zu Schäden sowie weitere Zustandsindikatoren, in die IFC-Datei eingepflegt. Die Angaben zu Lasten werden nicht in BIM gespeichert. Dies wurde gemacht, um das BIM-Modell übersichtlicher zu halten. Die modifizierte IFC-Datei kann nachfolgend mit `IfcOpenShell` eingelesen und mithilfe von einem Python-Quelltext in eine Makrodatei für Ansys APDL umgewandelt werden. Die Lasten sowie weitere Angaben zur Analyse können nachträglich in der Makrodatei ergänzt werden. Später soll es auch möglich sein, die Daten aus der FE-Berechnung automatisch in BIM zu speichern. Die erläuterte Vorgehensweise ist in Abbildung 3 dargestellt.

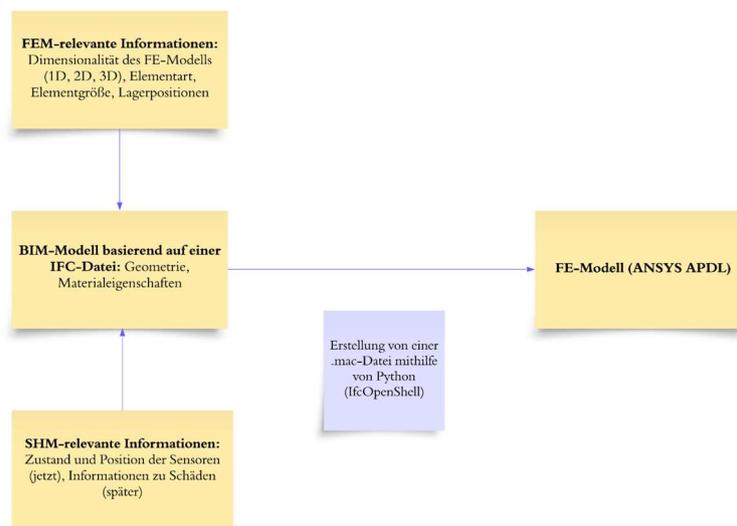


Abbildung 3: Geplante Schnittstelle zwischen BIM und FEM

Damit FE-Modelle unterschiedlicher Komplexität und Dimensionalität aus einem BIM-Modell erstellt werden können, wird der Vorteil von IFC genutzt, dass ein Bauteil verschiedene geometrische Repräsentationen haben kann. Um ein Bauteil später mit Balkenelementen zu vernetzen, wird für die geometrische Repräsentation ein Extrusionskörper `IfcExtrudedAreaSolid` verwendet. Dabei wird die Geometrie eines Bauteils mithilfe eines 2D-Profiles `IfcProfileDef`-Objekt, Richtung der Extrusion `ExtrudedDirection` und Weglänge `Depth` beschrieben. Für die Berechnung der Querschnittswerte der Balkenelemente wurde das Python-Modul `sectionproperties` [6] verwendet. Triangulierte Flächenbeschreibung/Tessellation ist von Vorteil, wenn ein FE-Modell mit Volumenelementen aufgebaut werden soll. Dabei wird ein Bauteil mit Polygonen mit

beliebiger Kantenzahl beschrieben. In der IFC-Datei werden die Liste mit Koordinaten der Eckpunkte *IfcCartesianPointList3D*, die Indizes der Eckpunkte der Polygone in der Koordinatenliste *IfcIndexedPolygonalFace* und der Satz von Polygonen *IfcPolygonalFaceSet* gespeichert. Weiterhin sollen Dimensionalität des FE-Modells, Elementart, Elementgröße und ob das jeweilige Bauteil bei der FE-Berechnung berücksichtigt werden soll, in der IFC-Datei abgelegt werden. Dafür wurde eine Merkmalsliste *IfcPropertySet* unter dem Namen *Custom_Pset_FE_ANSYS* definiert. Somit können jedem Bauteil diese Eigenschaften zugeordnet werden. Außerdem soll beim Erstellen des FE-Modells Rücksicht auf Sensorpositionen sowie Lagerbedingungen genommen werden. Beispielsweise ist es von Vorteil, direkt Knoten an diesen Stellen zu haben. Die Sensoren *IfcSensor* sowie Lagerbedingungen, wie z. B. *IfcStructuralPointConnection*, werden über die Beziehung *IfcRelConnectsElements* den jeweiligen Bauteilen zugewiesen.

Diese Schnittstelle weist viele Vorteile auf. Zum einen ist IFC ein offenes Datentransferformat, was eine Herstellerneutralität und bessere Interoperabilität im Hinblick auf das BIM-Modell bedeutet. Zum anderen können sowohl die IFC-Datei als auch die Makrodatei für Ansys APDL direkt geöffnet und manuell bearbeitet werden. Weiterhin lässt sich die Vorgehensweise auch auf andere FE-Programme übertragen.

3.2 Beispiel

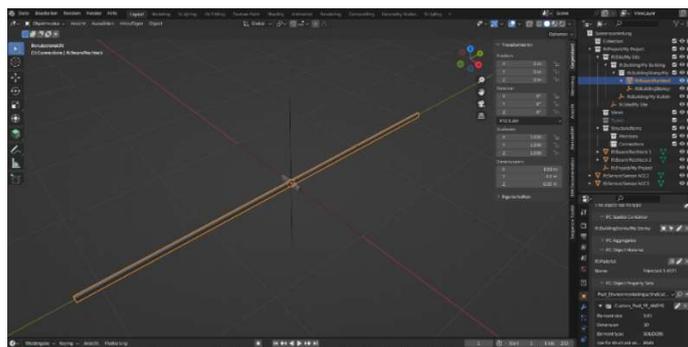


Abbildung 4: Das BIM-Modell des Balkens in Blender

Die beschriebene Methodik wurde bereits an einigen Beispielen erprobt. In Blender wurde das BIM-Modell eines Balkens mit Auskragungen und Rechteckquerschnitt aus Edelstahl erzeugt. Edelstahl 1.4571 wurde als *IfcMaterial* definiert. In der Merkmalsliste *Pset_MaterialMechanical* wurden Elastizitätsmodul, Schubmodul, Querdehnzahl und Temperaturexpansionskoeffizient entsprechend dem IFC-Schema abgelegt. Die Massendichte wurde in *Pset_MaterialCommon* berücksichtigt. Die Sensoren sowie Lagerbedingungen wurden ebenfalls modelliert. Momentan wurde nur die Erstellung von 1D- und 3D-FE-Modellen getestet. Exemplarisch sind in der Abbildung 4 das BIM-Modell des Balkens in Blender und in Abbildung 5 das 1D- und 3D-FE-Modell in Ansys APDL zu sehen. Die Schnittstelle hat zufriedenstellende Ergebnisse geliefert. Als Nächstes soll die Erstellung von 2D-FE-Modellen umgesetzt werden. Weiterhin soll die Schnittstelle an komplexeren BIM-Modellen erprobt werden. Später werden die Informationen zu Schäden sowohl in BIM als auch bei der Erstellung von FE-Modellen mitberücksichtigt.

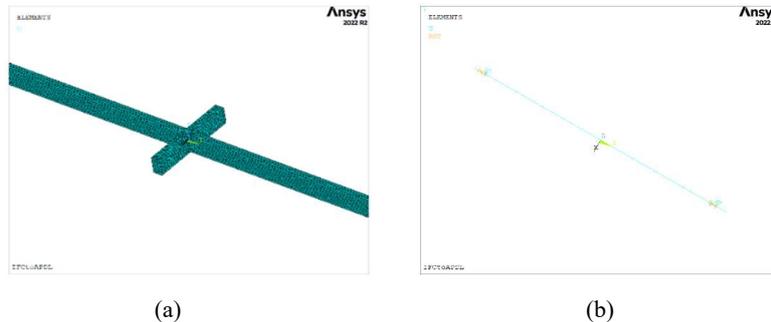


Abbildung 5: Das FE-Modell des Balkens mit Volumenelementen (a) und Balkenelementen (b) in Ansys APDL

4 Fazit

In diesem Beitrag wurde auf die Kompatibilität von BIM- und FE-Modellen für die Tragwerksanalysen eingegangen. Ausgewählte Szenarien des Datentransfers zwischen BIM- und FE-Programmen wurden vorgestellt. Weiterhin wurde das Vorgehen zur Umsetzung einer Erweiterung erläutert, um das Extrahieren der FE-Modelle verschiedener Komplexität und Dimensionalität aus einem BIM-Modell inklusive der FEM- und SHM-relevanten Informationen zu ermöglichen.

Literatur

- [1] BORRMANN, A.; KÖNIG, M.; KOCH, C.; BEETZ, J. Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Springer Vieweg Wiesbaden, 2021
- [2] SACKS, R.; EASTMAN, C.; LEE, G.; TEICHOLZ, P. BIM Handbook. A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers. John Wiley & Sons, Inc, 2018
- [3] EGGER, M.; HAUSKNECHT, K.; LIEBICH, T.; PRZYBYLO, J. BIM-Leitfaden für Deutschland. Information und Ratgeber. Endbericht. Forschungsprogramm ZukunftBAU (BMVBS), 2013.
- [4] BlenderBIM Add-on 0.0.231104 documentation. Letzter Zugriff: 12.11.2023. URL: <https://blenderbim.org/docs/index.html#>.
- [5] IfcOpenShell 0.7.0 documentation. Letzter Zugriff: 12.11.2023. URL: <https://blenderbim.org/docs-python/introduction.html>.
- [6] VAN LEEUWEN, R. sectionproperties 3.1.2. Letzter Zugriff: 12.11.2023. URL: <https://pypi.org/project/sectionproperties/>.