



Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation
Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

Parametrische 3-D Modellierung von Brückenbauwerken mit Autodesk Inventor

Fritznel Römer

Bachelorthesis

für den Bachelor of Science Studiengang Bauingenieurwesen

Autor:	Fritznel Römer
Matrikelnummer:	██████████
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. André Borrmann
Betreuer:	Dipl.-Ing(FH) Mathias Obergrießer, M.Eng
Firmenspezifische Betreuung:	Dipl.-Ing. Markus Hochmuth
Ausgabedatum:	31. Oktober 2012
Abgabedatum:	28. März 2013



Abstract

Bridges are being made more complex in their shapes and constructions. Thus the conventional designing through two dimensional planning tools has become inconsistent and inefficient. Due to the technological advances in computer engineering and software development, there are extremely capable 3D planning tools at disposal, which accelerate the processes of structural design and provide better visualization of structures. Because of that 3D modeling exhibits a number of advantages over the 2D planning methods. However, these 3D softwares are not developed for the civil engineering. Nonetheless building companies, planning offices and research institutions are trying to implement these new, more efficient planning tools for modeling of bridges for years. Earlier researches have suggested new methods for this matter, but they are not mature enough and have to be further developed.

This thesis concentrates on the parametric 3D modeling approach that should simplify the visualization, preparation and management of bridge designing. This approach served as a stepping stone to develop a concept, which aims at the utilization of parameters, defining a 3D bridge model. The parametrisation allows for the bridge to be generally and continuously changed, so that the predefined elements can be customized according to the required conditions. The parameter-based software program Autodesk Inventor was selected for this purpose, because it fully supports the parametric 3D modeling.

Firstly, the parametric modeling methods in Inventor were investigated. After that, the construction of bridges and traditional planning tools were presented, which are fundamental for the concept. This concept was then validated through the three dimensional design of an actual railroad bridge. This resulted in a fully operational parametric bridge model, which meets the condition for a flexible customization to the requirements.

It was determined in the thesis, that the machine engineering software Autodesk Inventor is sufficient for the successful 3D bridge modeling in a short time interval by using specific parametric modeling methods, e.g. parametric drafts, extern control data, structured co - dependencies of elements, etc.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	3
Vorwort und Danksagung	7
1 Einführung und Motivation	8
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	8
1.2 Motivation, Zielsetzung und Themenabgrenzung	8
1.3 Aufbau der Arbeit	9
2 CAD-Systeme und Autodesk Inventor	11
2.1 Begriffsdefinition BIM	11
2.2 Autodesk Inventor	11
Einsatzgebiete von Autodesk Inventor	12
3 Modellierungsmethoden	13
3.1 Geometrische Modellierungsmethoden	13
3.1.1 Definition	13
3.1.2 Klassifizierung von geometrischen Modellierungsmethoden	13
3.1.3 Beschreibung von klassischen Methoden	14
3.1.3.1 Das Kantenmodell	14
3.1.3.2 Volumenmodelle	14
3.1.3.2.1 Direkte Darstellungsschemata: Constructive Solid Geometry (CSG)	14
3.1.3.2.2 Indirekte Darstellungsschemata: Boundary Representation (B-REP)	15
3.1.3.2.3 Sweeping-Modelle	16
3.2 Parametrische Modellierungsmethoden in Inventor	17
3.2.1 Parameterarten	17
3.2.1.1 Parameter durch assoziative Bemaßung und vordefinierte Zwangsbedingungen	17
3.2.1.2 Parameter durch Elementdefinition	18
3.2.1.3 Parameter zwischen Bauteilen	18
3.2.2 Parametrische Methoden	19
3.2.2.1 „Sichtbarmachen von Skizzen“	19
3.2.2 Ableiten von Skizzen/Bauteilen/Baugruppen	19
3.2.3 iFeatures	21
3.2.4 Tabellengesteuerte Bauteile und Baugruppen	22
3.2.5 iParts	23
3.2.6 iAssemblies	24

3.2.7	Blöcke.....	25
3.2.8	iLogic/ iTrigger	25
3.2.9	Vergleiche der Modellierungsarten.....	25
3.1	Ausblick und Empfehlungen für weitere Untersuchungen.....	26
4	Traditionelle Entwurfsmethoden für Brückenbauwerke	28
4.1	Randbedingungen aus Trassierungsplanung	28
4.2	Gestaltung von Brückenbauwerken	29
4.2.1	Querschnittsgestaltung	30
4.2.1.1	Plattenquerschnitte:	31
4.2.1.2	Plattenbalkenquerschnitte.....	31
4.2.1.3	Hohlkastenquerschnitte	31
4.1	Die baulichen Belange der Verkehrslastträger	34
4.2	Planungswerkzeuge und Methoden	37
5	Entwurf eines Konzepts zur Parametrisierung von 3D-Brückenbauwerken.....	39
5.1	Aufgabenstellung	39
5.2	Ziele.....	39
5.3	Vorgehen	39
6	Entwurf einer 3D-Eisenbahnbrücke	54
6.1	Brückendaten.....	54
6.2	Modellierung der Brücke	54
6.2.1	Parametrische Modellierung des Überbaus.....	54
6.2.1	Parametrisierung des Regelquerschnittes.....	57
6.2.3	Parametrisierung der Kappen	58
6.2.4	Parametrisierung des Schotterbetts, der Schwellen und der Schiene.....	59
6.3	Parametrisierung des Unterbaus.....	60
6.3.1	Parametrisierung der Widerlager, der Flügel, und der Fundamente	60
6.3.2	Modellierung des Pfeilers.....	61
6.3.3	Assemblierung des Unterbaus	61
6.4	Die Eisenbahnbrücke.....	61
6.5	Grenzwerte der Parameter	62
6.6	Verknüpfung der Excel-Tabelle mit den Bauteilen.....	62
6.7	Kontrolle einzelner Parameter.....	62
6.8	Modellierungsgrenzen in Inventor	63
6.8.1	Einschränkungen durch Änderung der Kreuzungswinkel.....	64

6.8.2 Einschränkung der Flügelform durch Versatz der Widerlager	65
6.8.3 Einschränkung durch Änderung der Böschungswinkel	66
7 Fazit und Ausblick	69
7.1 Zusammenfassung.....	69
7.2 Fazit.....	69
Glossar.....	71
Literaturverzeichnis.....	72

Vorwort und Danksagung

Durch die Kooperation des Lehrstuhls für computergestützte Modellierung und Simulation der Technischen Universität München (TUM) mit dem Planungsbüro Obermeyer GmbH, wird die Studenten des Umwelt- und Bauingenieurwesens der TUM die Möglichkeit angeboten eine Abschlussarbeit praxisnah und erfolgreich zu absolvieren. Durch die umfangreiche Unterstützung beider Kooperationspartner und eine Vielzahl anderer Personen ist mir gelungen die vorliegende Bachelorarbeit anzufertigen. Daher möchte ich mich herzlich bei allen bedanken für diese Unterstützung.

Mein aller ersten Dank geht an den Lehrstuhlinhaber, Prof. Dr.-Ing André Borrmann und den Leiter der Abteilung Ingenieurbau von Obermeyer, Herrn Dipl.-Ing. Erhard Lederhofer für diese Möglichkeit die Arbeit in dem Lehrstuhl und in der Firma anzufertigen.

Besonderer Dank an meinen Betreuern:

Herrn Mathias Obergrießer, meinem Betreuer seitens der Universität, für seine Geduld, seine Bereitschaft und nicht zuletzt für seine außerordentlich fachliche und kompetente Unterstützung.

Herrn Markus Hochmuth, meinem Betreuer in der Firma, für seine Ratschläge, seine fachliche und praxisorientierte Unterstützung.

Ich danke meinen Rechtsschreib-Korrekturleser, Herrn Hans-Jürgens Schaal und Herrn Christoph Vad für die kurzfristige Bereitschaft.

Besonderer Dank gilt meinen Adoptiveltern und Frau Birkhild Leupold, die mich während des gesamten Studiums unterstützt haben.

Abschließend bedanke ich mich an allen Personen die mich auf irgendeiner Weise während des Studiums unterstützt haben, insbesondere meine Freunde Aaron Schaal und Yordan Georgiev.

1 Einführung und Motivation

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Im Verkehrswegebau sind Bauwerke in Höhe und Lage an die Trassierung anzupassen. Da eine Straßenachse im allgemeinen Fall in zwei Raumrichtungen gekrümmt ist, entsteht eine sehr komplexe Geometrie für den Straßenoberbau. Mit konventionellen 2D-Darstellungen kann die Situation nur schwerlich dargestellt werden. Um den erhöhten zeitlichen und wirtschaftlichen Aufwand zu umgehen, wendet man sich 3D-Modellierprogrammen zu (ForBau, 2010). Da die zu erstellenden Pläne in der Planungsphase bis zur endgültigen Ausführung ständig geändert werden, macht es Sinn, änderungsanfällige Bauwerkseigenschaften zu parametrisieren, um das Modell rasch anpassen zu können. Die Größe oder Eigenschaft eines Parameters bleibt variabel. Beim Ändern eines Parameters werden interagierende Geometrien automatisch angepasst. Dies geschieht, indem man zum Beispiel Knotenpunkte mit Zwangs- und Nebenbedingungen beaufschlägt. Am Ende erhält man ein parametrisches Modell mit variablen Größen. Die Parametrisierung dient damit auch der Variantenkonstruktion, d.h. bestimmte Varianten eines Modells werden durch entsprechende Parameterwerte vorgeschlagen. Darüber hinaus können geometrisch ähnliche Produkte und Baureihen aus einem Startmodell abgeleitet werden. Weiterhin ist es möglich, Parameter nachträglich zu entfernen oder hinzuzufügen. Die Relationen zwischen Parametern können einfache algebraische Verknüpfungen, Vergleiche und Wenn-dann-Beziehungen sein. Einige marktrelevante CAD/CAM-Systeme verfügen bereits über parametrisierbare Grundelemente. Andere im Bauingenieurwesen häufig verwendete Programme wie z.B. AutoCAD Architecture haben diese Funktion dagegen noch nicht. So ist der Anwender gezwungen, auf Softwareprodukte aus dem Maschinenbau und Anlagenbau auszuweichen. Da diese Programme nicht für die Entwicklung von Bauwerken konzipiert worden sind, bestehen jedoch bisweilen Probleme z.B. mit Formaten und Normen.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird versucht die Aufgabenstellung mit dem maschinenbauspezifischen CAD-System „Autodesk Inventor“ umzusetzen.

1.2 Motivation, Zielsetzung und Themenabgrenzung

Aufgrund der gegenwärtigen Situation im Bauwesen, in der das Arbeiten mit 2D-Planungswerkzeugen nach wie vor die Regel ist, ist die Bauindustrie mit vielen Problemen beim Einsatz von nicht zufriedenstellenden digitalen Werkzeugen konfrontiert (ForBau, 2010). Wenn zum Beispiel bei der Benutzung einer gängigen Software wie AutoCAD Architecture in späteren Phasen der Planentwicklung ein Parameter in einem Bauteil geändert werden muss (z.B., wenn die Berechnungen der Statik der Brücke ergeben, dass die Bauhöhe des Querschnitts vergrößert oder verkleinert werden muss), bedeutet dies für den Konstrukteur, dass er diese Änderung in allen anderen betroffenen Bauteilplänen manuell vorzunehmen hat. Um Unvollständigkeiten zu vermeiden, müssen die kompletten Zeichnungen neu erstellt werden. Dadurch erhöhen sich Aufwand und Kosten.

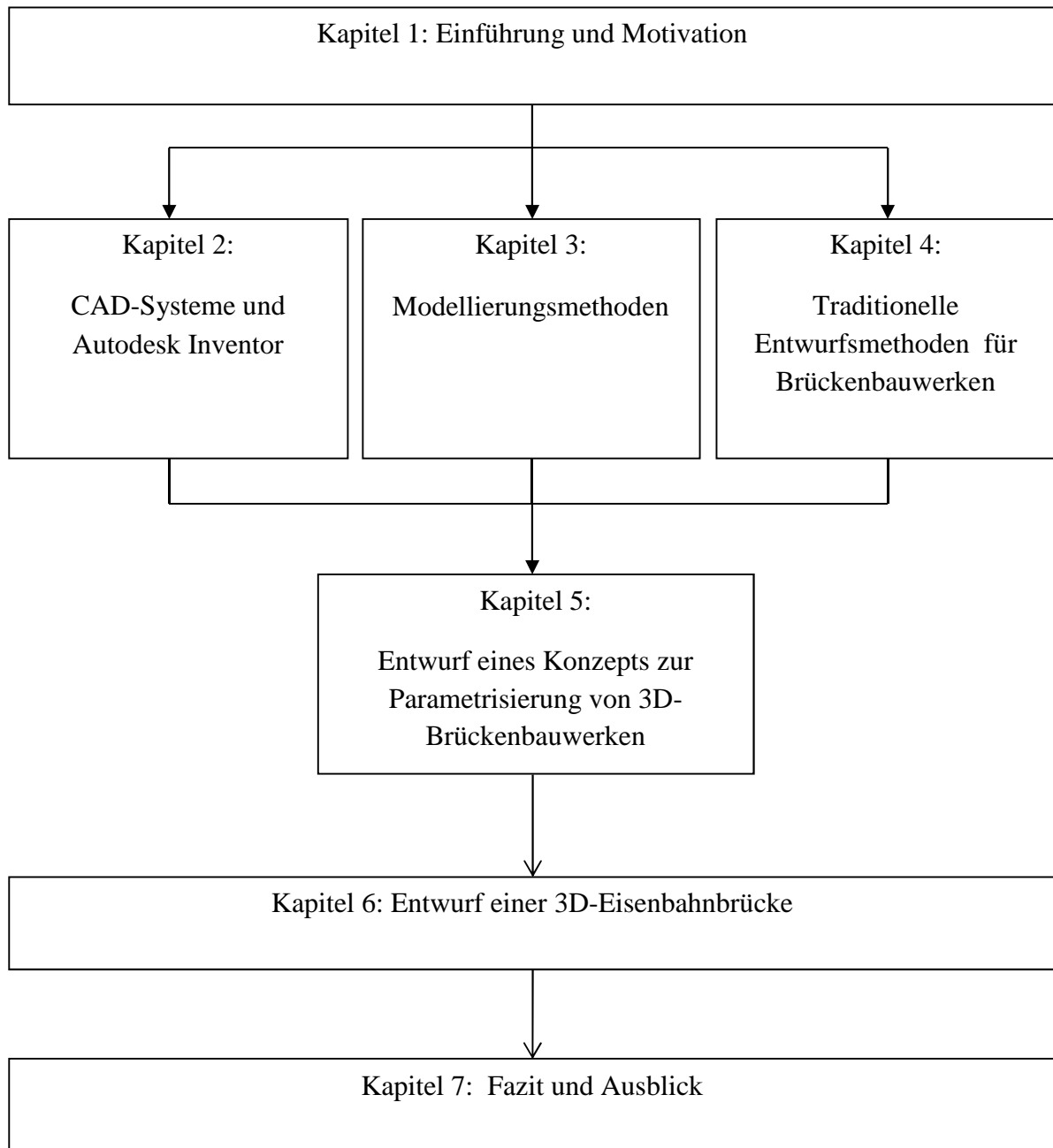
Diese Bachelorarbeit hat das Ziel, durch den Entwurf eines Konzeptes zur Parametrisierung eines 3D-Brückenmodells mit Autodesk Inventor eine Basis für eine zukünftig bessere Planung und Realisierung von Brückenprojekten zu schaffen. Anhand dieses Konzeptes soll

das 3D-Brückenmodell von vornherein so aufgebaut werden, dass maßgebliche Änderungen später einfach durch Eingabe von neuen Maßen durchgeführt werden können und somit eine dynamische Aktualisierung des Planungsmodells ermöglicht wird. Der Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Schaffung eines gut parametrisierten 3D-Brückenmodells mit der Maschinenbausoftware Autodesk Inventor.

1.3 Aufbau der Arbeit

Nach der allgemeinen Einführung und Erläuterung sowie Abgrenzung der Themenstellung werden in einem kurzen zweiten Kapitel zunächst die CAD-Systeme und Autodesk Inventor vorgestellt. Im dritten Kapitel werden im ersten Teil die unterschiedlichsten geometrischen Modellierungsmethoden als theoretischer Ausgangspunkt erläutert. Im zweiten Teil werden anhand von Beispielen die parametrischen Modellierungsmethoden in Inventor beschrieben und verglichen. Damit man die Vorteile der parameterbasierten Modellierungsmethoden erkennt, werden im vierten Kapitel die traditionellen Planungsmethoden vorgestellt. Die Richtlinien für Entwurf und Planerstellung von Brücken bilden den Themenschwerpunkt des vierten Kapitels.

Basierend auf den Untersuchungsergebnissen der Modellierungsmethoden im 3. Kapitel, wird im fünften Kapitel ein Konzept zur Erstellung einer parametrisierten 3D-Brücke mit Inventor vorgestellt. Dabei werden die Modellierungsschritte nacheinander erläutert. Im sechsten Kapitel wird die Brücke in Inventor, basierend auf dem im fünften Kapitel vorgeschlagenen Konzept, modelliert. In diesem Kapitel werden auch die Grenzen und die Probleme bei der Parametrisierung der Brücke beschrieben. Es wird kurz auf die Schwachpunkte der Software eingegangen und gegebenenfalls erklärt, wie man sie umgehen kann. Abschließend werden die Vorteile der Softwares zusammengefasst. Das Brückenmodell und die modellierungsrelevanten Beispiele werden als digitaler Anhang der Bachelorarbeit beigelegt. Darin befinden sich mehrere Modelle mit zunehmendem Parametrisierungsgrad. Die beigelegten Videos und Skizzen sollen dem Leser helfen, die parametrischen Modellierungsmethoden zu verstehen.



2 CAD-Systeme und Autodesk Inventor

2.1 Begriffsdefinition BIM

Unter CAD (engl. *Computer Aided Design*) fallen alle Modelle oder technischen Zeichnungen, die mittels EDV (Elektronische Datenverarbeitung) erzeugt werden. Der deutsche Begriff dafür ist das „rechnerunterstützte Zeichnen, Entwerfen oder Konstruieren“. Heute können Objekte mittels CAD-Software nicht nur als 2D-Zeichnungen, sondern auch als 3D-Modelle dargestellt werden.

Die dritte Dimension ist mittlerweile unentbehrlich und fast alle CAD-Anwendungen arbeiten damit. Durch diese kann der Entwurf relativ schnell als Modell betrachtet werden. Die Wirklichkeit eines Objekts ist oft zu komplex, um alles nur im Kopf oder auf 2D-Zeichnungen zu erfassen. Mit Hilfe eines 3D-Modells wird alles übersichtlicher, wodurch viele Fehler noch in der Planungsphase entdeckt und behoben werden können. Kosten können erheblich reduziert werden, wenn Untersuchungen nicht direkt an einem teuren, realen Modell durchgeführt werden müssen. Die meisten CAD-Anwendungen bieten neben der 3D-Visualisierung auch die Darstellung von Ansichten und Schnitten, welche dann geplottet werden können und als Anleitung oder Ausführungspläne des entworfenen Objekts dienen. Auch fotorealistische Bilder können direkt erstellt werden. Andere zeigen nach dem „Explosionsprinzip“, wie das Modell aufgebaut ist und wie die Bauteile zusammengefügt werden. Simulationen können teils direkt am Modell durchgeführt werden, wenn das Programm über eine Materialbibliothek verfügt, die für ihre Benutzungsbereiche die Material- und physikalischen Eigenschaften enthält. Auch Berechnungen (z.B. FEM-Berechnungen: Eigengewicht, Schnittgrößen, zulässige Verformungs- und Bruchspannungen, Auswirkungen auf extreme Bedingungen, Kostenberechnungen etc.) können teils direkt am virtuellen Modell durchgeführt werden.

In fast allen Bereichen der Technik (Architektur, Maschinenbau, Stahlbau, Metallbau, Anlagenbau, Ingenieurbau, Betonbau, Vermessung, Design, Innenarchitektur etc.) wird CAD-Software benutzt. Es gibt unzählige CAD-Anwendungen, die mehr als die bloße Darstellung eines Objekts anbieten, doch sehr wenige für die Bereiche des Bauingenieurwesens verfügen über die Möglichkeit einer Parametrisierung. In der nächsten Abbildung sind einige Softwareprodukte dargestellt, die eine parametrische Darstellung eines Modells ermöglichen.

2.2 Autodesk Inventor

Autodesk ist im Jahr 1982 von John Walker gegründet worden. Im selben Jahr präsentiert die Firma die erste 3D-Software AutoCAD und übernimmt damit die Marktführerschaft. Mit dieser Entwicklung können Ingenieure, Architekten, Designer und Künstler ihre Projekte als digitale Modelle erstellen und ihre Ideen noch vor der Realisierung erfahrbar machen (Scheuermann, 2011)

Autodesk bietet ihren Kunden ein breitgefächertes Produktportfolio für alle Prozessphasen und Aufgaben von Konstruktion und Planung bis Design. Darunter befindet sich das Maschinenbau/Metallbau-CAD-Programm: Autodesk Inventor.

Autodesk Inventor ist ein parametrisches 3D-Modellierungsprogramm. Der 3D-Modellierkern von Autodesk Inventor ist der von Autodesk weiterentwickelte ACIS-Kernel, der Shapemanager. Er ist ein sehr leistungsstarker Modellierkern, mit dem konstruierte 3D-Komponenten verwaltet und verarbeitet werden können. Die Modellierungsarten, aus denen die 3D-Modelle entstehen, sind CSG (Constructive Solid Geometry), B-Rep (Boundary Representation), Kantenmodelle, BSP (Binary Space Partition) und Sweep Representation (ein 3D-Gebilde wird über die Definition einer 2D-Kontur und einer Transformation der Kontur entlang eines Pfades erstellt). (Scheuermann, 2011) Die Modellierungsarten werden im nächsten Kapitel näher erläutert.

CAD-Programme wie Inventor arbeiten mit analytisch definierbaren Geometrieelementen (Linie, Bogen, Kreis, usw., alle Kurven mit analytischen Funktionen) und parametrischen Geometrieelementen (Freiformgeometrien, Splines, Bezier-Kurven, Basis-Splines und NURBS (Non-Uniform Rational Basis Splines), um damit 3D-Modelle darstellen zu können. Letztere Geometrieelemente werden durch Kontrollpunkte und einen Kurvenverlauf mithilfe von Interpolation bestimmt (Scheuermann, 2011).

Einsatzgebiete von Autodesk Inventor

Der Schwerpunkt der Software liegt im Maschinenbau-Bereich. Wegen seiner Leistungsfähigkeit und der Module, die es zur Verfügung stellt, wird das Programm allerdings auch in vielen anderen Gebieten verwendet. Es wird in der mechanischen Konstruktion, in der Entwicklungskonstruktion im Maschinen- und Gerätebau, im Werkzeug-, Vorrichtung-, Formen- und Modellbau, in der Blechverarbeitung und im Anlagenbau immer wieder eingesetzt.

In Inventor Professional sind alle Inventor-Module¹ integriert. Die Untersuchungen und die Modellierung der Brücke werden mit der neuesten Version *Autodesk Inventor Professional 2013* durchgeführt. Die Inventor-Module sind mit eigenen Befehlen ausgestattet und werden in separaten Arbeitsumgebungen verwendet. Unter den Modulen gibt es beispielsweise Blechmodul, Schweißmodul, Inventorstudio, Finite-Elemente-Modul, Kabel- und Leitungsmodul usw. (Scheuermann, 2011).

¹ Module sind Erweiterungen, die zum Teil fest in das Grundprogramm eingegliedert, zum Teil in den unterschiedlichen Versionen branchenspezifisch zugeordnet oder bereits alle integriert sind wie in Inventor Professional.

3 Modellierungsmethoden

3.1 Geometrische Modellierungsmethoden

3.1.1 Definition

Geometrische Modellierungsmethoden fassen verschiedene Beschreibungsmittel, insbesondere Datenstrukturen und Operationen, für geometrische Objekte zusammen. (Shallehn, 2008)

In der Computergraphik und in den CAD-Systeme werden verschiedene Modellierungsmethoden verwendet um Flächen- und Volumenkörper darzustellen. Die bekanntesten Methoden sind:

- **Kantenmodelle:** Ein Objekt wird nur durch seine begrenzten Kanten dargestellt
- **Boundary Representation (B-REP):** Ein 3D-Objekt wird durch begrenzende Flächen (beliebige Polygone, Freiformflächen) dargestellt.
- **Constructive Solid Geometry (CSG):** Ein 3D-Objekt wird durch die Zusammensetzung von Primitiven dargestellt.
- **Polygonnetze (meist Dreiecksnetze):** Die Flächen eines 3D-Objekts werden durch Polygonnetze diskretisiert.
- **Voxelgitter und Octrees:** ein Körper wird in Voxel (Volume Elements) eines raumzerlegenden Volumenrasters zerlegt. Ein Voxel ist vergleichbar mit Pixel in einem 2D-Raster. Octrees optimieren dabei den Speicheraufwand (Shallehn, 2008).

Man stellt sich die Frage: Was zeichnet eine gute Repräsentation aus? Die Auswahlkriterien dabei sind nach Zhang und Feng (2007), das Domain, die Eindeutigkeit, die Einzigartigkeit, die Korrektheit, die Validierung und schließlich die Kompaktheit.

Erst wenn ein guter Kompromiss zwischen diesen Auswahlkriterien getroffen werden kann, kommt eine Modellierungsmethode in Frage. Aber um die oben genannten Modellierungsmethoden richtig beurteilen zu können, sollen die Wichtigsten in dieser Arbeit näher erläutert werden.

3.1.2 Klassifizierung von geometrischen Modellierungsmethoden

Die Geometrische Modellierungsmethoden werden unterschieden nach der Anzahl unterstützter Dimensionen (zwei, zweieinhalb und drei Dimensionen), nach den unterstützter Operationen (Boolesche Mengenoperationen, Konstruktiven Operationen (Rotation, Extrusion), Geometrische Transformationen (Translationen, Skalierungen, Rotationen etc.) und schließlich nach der Verwendung.

3.1.3 Beschreibung von klassischen Methoden

3.1.3.1 Das Kantenmodell

Kantenmodelle (engl. *wireframes*): Ein Kantenmodell bzw. Drahtmodell beschränkt sich auf die 2D- oder 3D-Repräsentation eines Objektes durch Punkte und Umrisskanten. Im Bauingenieurwesen werden im Raum Stabwerke und Seilnetze auf Strecken und Knoten reduziert, damit Berechnungen am Modell einfacher durchgeführt werden können. *Man spricht dabei von dimensionsreduzierten Modellen* (Rank, 2008). Das Modell gibt jedoch keine Informationen über Flächen oder Volumina. Von Nachteil ist, dass man keine Spannungen ermitteln kann, weil die dafür nötige Angabe der Querschnittsfläche fehlt.



Abbildung 1: Mehrdeutiges Kantenmodell

3.1.3.2 Volumenmodelle

3.1.3.2.1 Direkte Darstellungsschemata: Constructive Solid Geometry (CSG)

Die CSG ist eine Technik, die verwendet wird, um Volumenkörper zu modellieren. Diese Methode ermöglicht dem Modellierer, komplexe Oberflächen- und Volumenkörper mittels Boolescher Operationen zu erzeugen. Auf den ersten Blick erscheint einem ein CSG-Körper sehr komplex, dabei handelt es sich nur um geschickte Assemblierung von Primitiven. Unter Primitiven versteht man die üblichen Geometrien wie Quader, Zylinder, Prismen, Pyramide, Kugel etc. Jede Modellierungssoftware hat mehr oder weniger ähnliche Primitiven. In AutoCAD Architecture zum Beispiel hat man mehr Primitiven zur Auswahl als bei Inventor. Dadurch hat man weniger Boolesche Operationen durchzuführen. Boolesche Operationen sind: Vereinigung (\cup), Differenz (\setminus) und Durchschnitt (\cap). In der Abbildung 2 werden Boolesche Operationen dargestellt. Bei der Vereinigung (engl. *Union*) werden die Mengen C und D zusammengefasst. Bei Differenz (engl. *Difference*) wird die Menge A um den Überschneidungsbereich B vermindert. Und schließlich beim Durchschnitt bleibt die Schnittmenge zweier Mengen erhalten (Kern, 2003). Man beschränkt sich auf diese drei Operationen, weil sich alle anderen Booleschen Operationen von ihnen ableiten lassen. Diese Operationen werden auf zwei Körper angewandt. Das Ergebnis kann weiterhin verwendet werden, um komplexere Körper zu erzeugen. Die logische Beschreibung, wie solche Körper entstehen, wird in einem CSG-Baum dargestellt. Jeder Knoten des Baumes hat zwei Zweige, bei denen es sich wiederum um Knoten oder Blätter handelt. Die Knoten stellen die Operationen dar und die Blätter die verwendeten Körper. Es stellt sich keine Einschränkung bei der Beschreibung eines CSG-Baumes, da jeder beliebige Boolesche Ausdruck in einer binären Schreibweise erfolgen kann und damit auch der CSG-Baum als binärer Baum ausgedrückt wird. In einem CSG-Baum wird die Geometrie von Kanten und Flächen nicht im Baum abgespeichert, sondern muss erst aus dem Baum ermittelt werden.

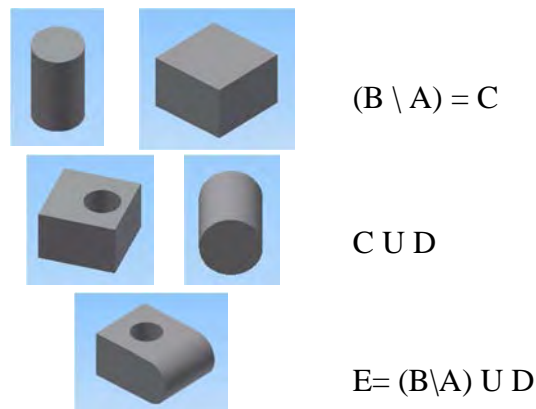


Abbildung 2: CSG-Methode

3.1.3.2 Indirekte Darstellungsschemata: Boundary Representation (B-REP)

Indirekte Darstellungsschemata zeichnen sich dadurch aus, dass die Volumina der Körper indirekt, über die Oberflächen der Objekte, modelliert werden (Rank, 2008).

Die Darstellung eines Objekts durch begrenzende Oberflächen wird in CAD-Programmen bevorzugt verwendet, *da sie algorithmisch schnell verarbeitbar ist. Der Anwender oder ein Prüfalgorithmus muss sicherstellen, dass es sich dabei um eine geschlossene Hülle handelt.* (Wikipedia, 2013)

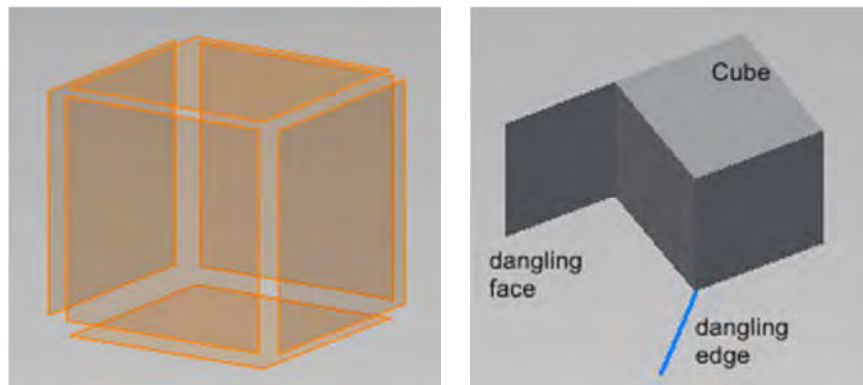


Abbildung 3: B-Rep, angrenzende Flächen eines Quaders

Die Bedingung, dass es sich um eine geschlossene Hülle handelt reicht durchaus nicht um präzise Körper darzustellen. Daher hat Requicha (1985) *regularized sets (R-sets)* definiert um Aussage darüber zu treffen ob ein Punkt sich innerhalb, außerhalb oder auf der Oberfläche eines Körper befindet. In der Abbildung 3 rechts, verfügt der Würfel zwar über eine geschlossene Hülle, aber hat auch eine stehende Fläche (*dangling face*) und eine stehende Kante (*dangling edge*). Daher hat Requicha die CSG-Operatoren *regularisiert* (Wössner, 2005). Sie wurden zu \cap^* , \cup^* und $-^*$:

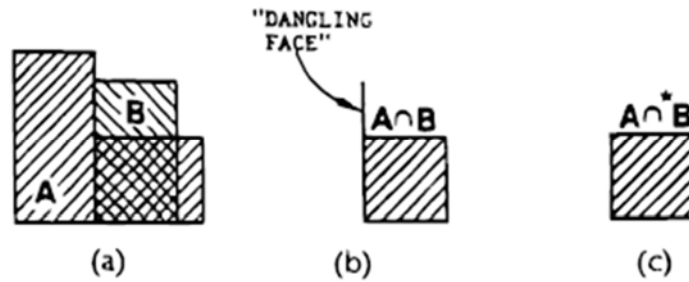


Abbildung 4: Vereinigung von A und B (a), enthält eine Fläche zu viel (b), Rechts: Ergebnis eines regularisierten Operators(c) (Quelle: Requischa et al. (1985))

Bei einer B-Rep oder R-Set-Repräsentation muss eine Kante mindestens zu zwei Flächen gehören. Bei einer Regularized Sets, verwendete Requischa (1985) Nachbarschaftsinformationen. Es wird mit einer Implementierung von Funktionen, getestet ob ein Punkt innerhalb, außerhalb oder auf der Mantelfläche eines Kugel ist. Ist dieser Punkt innerhalb oder auf der Mantelfläche dann soll diese erhalten bleiben. Andernfalls darf der Punkt gelöscht werden.

3.1.3.2.3 Sweeping-Modelle

Unter „Sweeping“ oder „Extrusion“ versteht man das Bilden eines Körpers durch Verschieben einer Grundfläche entlang einer Kurve. Die erzeugten Sweep-Körper lassen sich z.B. als zusätzliche Grundkörper in ein „CSG-Modell“ einfügen. Für die Darstellung und Weiterverarbeitung empfiehlt sich wiederum die Umwandlung in das B-rep-Datenmodell (Rank, 2008). In Inventor wird ein Sweeping-Modell direkt in das B-rep-Datenmodell dargestellt.

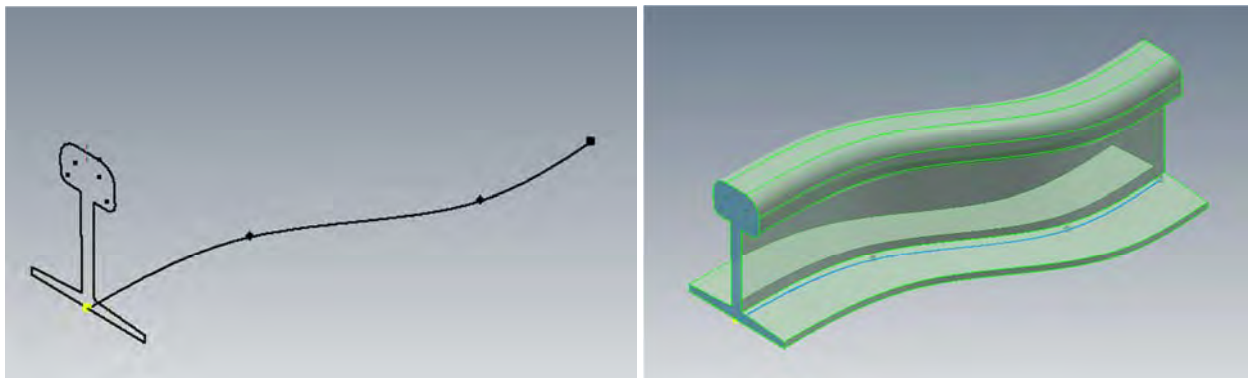


Abbildung 5: Sweeping-Modell

Die Modellierung eines Objekts am Rechner kann die Darstellung eines Objekts um ein Vielfaches vereinfachen, da der Zeichner nicht mehr löschen und radieren muss. Aber viele Rechner-Methoden sind gegenüber kleinen Änderungen, die sich auf das Gesamte gezeichnete Projekt auswirken, immer noch inkonsistent. Anpassungen des Gesamten an kleine Änderungen müssen dann einzeln und zeitaufwendig vorgenommen werden. Diesbezüglich ist es notwendig gewesen Planungswerkzeuge, die eine geometrische Modellierung und Darstellung ermöglichen, weiter zu parametrischer Planungssoftware zu entwickeln. Moderne Planungswerkzeuge unterstützen deshalb heute die parametrische 3D-Modellierung von Objekten.

Im folgenden Absatz wird näher erläutert, was die Parametrik bewirkt und welche parametrische Modellierungsmethoden speziell Autodesk Inventor unterstützt.

3.2 Parametrische Modellierungsmethoden in Inventor

Das parametrische Modellieren basiert auf dem Grundprinzip, dass ein Basismodell von vornherein so aufgebaut wird, dass bestimmte Eigenschaften oder Maßwerte dem Anwender zur Modifikation offen bleiben. Gleichzeitig werden diejenigen Eigenschaften oder Maßwerte festgelegt, die gegenüber einer Modifikation an anderer Stelle invariant bleiben. (Blien, 99)

Als Parameter gelten dabei die Attribute der Bauteile des Modells z. B die Höhe, die Breite, die Länge, die Position und die Ausrichtung eines Bauteils. (Rank, 2008)

Es gibt zwei verschiedene Integrationsarten der Parametrik:

Bei der ersten Art steht dem Modellierer eine Auswahl an vordefinierten Zwangsbedingungen zur Verfügung. Diese Zwangsbedingungen sind beispielsweise die Orthogonalität oder die Kollinearität zweier Elemente zueinander. Die Orthogonalität bewirkt, dass die Elemente bei Änderungen orthogonal bleiben. Analog, bewirkt die Kollinearität, dass zwei Elemente zueinander kollinear bleiben.

Bei der zweiten Art kann der Modellierer diese Zwangsbedingungen selbst erstellen. Als Parameter stehen in diesem Fall alle geometrischen Abmessungen zur Verfügung und Abhängigkeiten können mithilfe von Formeln definiert werden.

Beide Variante werden von Autodesk Inventor dem Anwender zur Verfügung gestellt. So ist es möglich flexible Modelle zu konzipieren, die später Änderungen zulassen und sich an festgelegte Randbedingungen automatisch anpassen. Mit Inventor kann eine vollständig digitale Darstellung eines Produkts konstruiert, visualisiert und simuliert werden. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Möglichkeiten untersucht, wie damit eine parameterbasierte 3D-Brücke modelliert werden kann.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Parameter erläutert und anschließend die parameterbasierten Modellierungsmethoden des Programms vorgestellt.

3.2.1 Parameterarten

3.2.1.1 Parameter durch assoziative Bemaßung und vordefinierte Zwangsbedingungen

Parameter werden zum einen über die Bemaßung der Skizzen erstellt. Die folgende Abbildung zeigt eine Skizze mit assoziativer Bemaßung in Inventor.

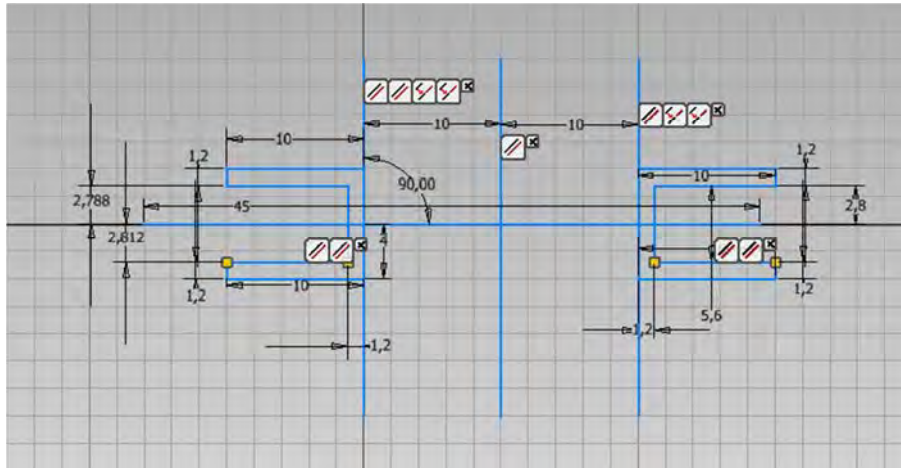


Abbildung 6: Assoziative Skizzenbemaßung

Die weiß-roten Kästchen in der oberen Abbildung 6 sind sogenannte geometrische Zwangsbedingungen zwischen den Elementen (engl. *Constraints*). Diese Zwangsbedingungen bewirken, dass z.B. zwei geometrische Objekte, immer parallel, tangential, oder lotrecht zueinander sind. Im folgenden Bild werden die parametrischen Zwangsbedingungen die Inventor zur Verfügung stellt.













				von links nach rechts: koinzident, kollinear, konzentrisch, fest
				parallel, lotrecht, horizontal, vertikal
				tangential, stetig, symmetrisch, gleich

Tabelle 1: geometrische Zwangsbedingungen (Engl. Constraints) aus Inventor

3.2.1.2 Parameter durch Elementdefinition

Eine weitere Art Parameter zwischen Elementen zu erstellen ist durch Ebenen-Definition: z.B.: zwei Ebenen bleiben immer Parallel zueinander; oder eine Ebene wird um eine Arbeitsachse gedreht. Die Palette dieser Parameterarten ist sehr breit und unterteilt sich in drei Gruppen: Parameter für Arbeitspunkte, für Ebenen und schließlich für Arbeitsachsen.

3.2.1.3 Parameter zwischen Bauteilen

Eine weitere Art Bauteile parametrisch zu verbinden ist durch *Abhängigkeiten*. z.B.: zwei Stirnflächen zweier Bauteile sind fluchtend zueinander. Diese Art von Parametern befinden sich in dem Format-Datei *.iam. Sie werden benutzt um Baugruppen zu erstellen. Mit ihnen werden Bauteile abhängig gemacht und zusammengefügt.

Es existieren noch weitere Parameterarten die sich in anderen Modulen der Software befinden und im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht untersucht werden.

In Inventor können diese „Constraints“ innerhalb verschiedenster Modellierungsmethoden angewandt werden. Zu diesen zählen: das Sichtbarmachen von Skizzen, tabellengesteuertes Modellieren, iFeatures- iParts-Generierung, Ableiten von Bauteilen, Baugruppen erstellen etc...

Nachfolgend werden diese Methoden kurz erläutert.

3.2.2 Parametrische Methoden

3.2.2.1 „Sichtbarmachen von Skizzen“

Eine einfache Methode, bei komplexen Baugruppen die Übersicht zu behalten, ist „das Sichtbarmachen von Skizzen“. Dabei werden alle oder einige Maßangaben in einer Skizze hinterlegt, die als Basis für die weiteren davon abhängigen Bauteile und Baugruppen dient. Das spätere Ändern gestaltet sich einfach, weil die Messwerte in der übersichtlichen Skizze geändert werden und automatisch in die Bauteile und Baugruppen übertragen werden können. Die bemaßten Geometrien werden als Wert oder Gleichung automatisch in einer integrierten Parameterliste in Inventor übernommen. Die Skizzen können in einer 2D- oder 3D-Arbeitsebene erstellt werden, wobei nur die Geometrien bemaßt werden, die später mit Parametern geändert werden sollen. Bei symmetrischen Bauteilen kommen parametrische Vermassungsketten bzw. geometrische Zwangsbedingungen (sog. Constraints) zum Einsatz. Hier in der Abbildung unten wurde mit dem Constraint-Operator „=“ der Böschungswinkel auf beiden Seiten gleich gesetzt. Der Böschungswinkel von links ist 33,69; der von rechts „FX: 33,69“. Die Bezeichnung „FX“ weist darauf hin, dass es eine Abhängigkeit zu einem anderen Parameter gibt.

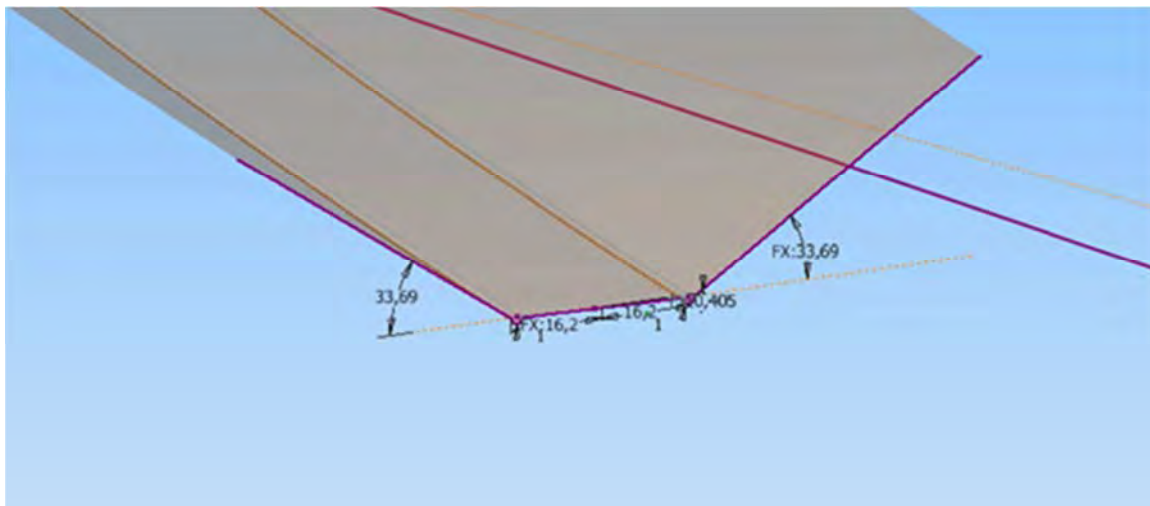


Abbildung 7: Sichtbare Vermassungsketten der Böschung

3.2.2 Ableiten von Skizzen/Bauteilen/Baugruppen

Ableitungsmethoden

Die Methode des „Ableitens“ ist die meist verwendete Technik bei der Modellierung des Brückenbauwerkes im 6. Kapitel. Volumenkörper, Oberflächenkörper, Arbeitsgeometrien, Skizzen, Blöcke sogar Benutzerparameter können in ein neues Bauteil mit dieser Methode abgeleitet.

Der Anwender hat dabei auch die Auswahl, die bestehenden Teile zu spiegeln, in der Größe anzupassen oder boolesche Operationen anzuwenden (Differenz, Vereinigung, Schnittmenge). Wird das Basisbauteil oder die Baugruppe, aus welcher die abgeleitete Komponente erstellt wurde, geändert, wirkt sich das auch auf das neue Objekt aus.

Unterbaugruppen können als eine Einheit in einem neuen Bauteil eingefügt werden, um die Komplexität und den Speicherbedarf zu reduzieren. Das ist oft zweckmäßig, wenn die Baugruppe in ein anderes Programm eingefügt werden soll.

Man kann eine abgeleitete Baugruppe in ein Bauteil einfügen und dieses Bauteil noch einmal als abgeleitete Komponente in ein neues Bauteil einfügen, um die Herkunftshistorie im Browser zu löschen. Der Befehl „Ableiten“ ist unter der Sparte *Verwaltung* zu finden. Ein abgeleitetes Bauteil kann auch nachträglich bearbeitet werden. Falls Skizzen oder Komponenten nachträglich geändert oder erstellt werden sollen, wählt man im Browser im Kontextmenü *abgeleitetes Bauteil bearbeiten*. Diese Parametrisierungsmethode ist eine Spezialeigenschaft des Volumenmodellierers Autodesk Inventor. Gängige Planungssoftware haben nicht diese Eigenschaft, Baugruppen aus abgeleitete Elementen zu bilden, die im Nachhinein bearbeitet werden können. In der Abbildung ist ein Bauteil namens *Masterskizze* in das Bauteil *Arbeitsflächen* abgeleitet worden.

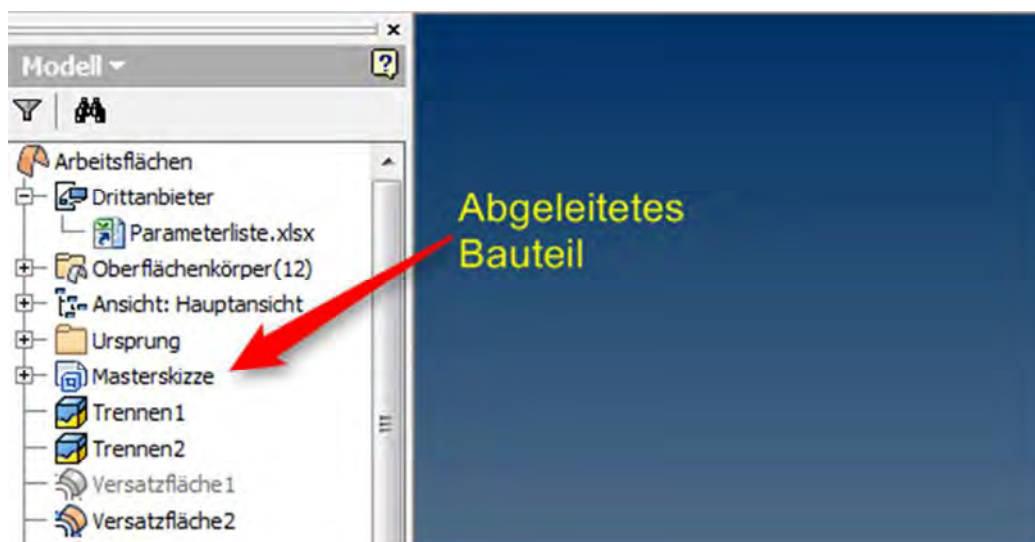


Abbildung 8: Abgeleitetes Bauteil Masterskizze

Ableiten von Elementen in das Format *.iam

Um eine Baugruppe vom Format *.iam zu erstellen, müssen Bauteile platziert werden. Das Platzieren ist die gängige Modellierungsart, Bauteile aus verschiedenen Projekten zu einer

Baugruppe zu verschmelzen. Das hat Vor- und Nachteile gegenüber dem Ableiten. Die abgeleiteten Elemente bleiben ihren Ursprungskoordinaten treu, d.h., man braucht keine zusätzlichen Translationen anzuwenden, bis die Bauteile richtig zusammen eingefügt sind.

Bei der Erzeugung einer Baugruppe kann auf eine Reihe hilfreicher Boolesche Operationen zurückgegriffen werden. Z.B. Mit der Funktion *Vereinigung oder Komponente einschließen* bleibt die Komponente im Bauteil. Bei einer Schnittmenge bleibt das von beiden überschchnittene Volumen erhalten. Mit der Funktion *adaptives Bauteil* kann die automatische Änderung des Bauteils ein- und ausgeschaltet werden.

3.2.3 iFeatures

iFeatures sind „intelligente“ Skizzen die in einer Bibliothek abgelegt werden. Sie lassen sich von dort beliebig in andere Bauteile oder Baugruppen einfügen und verändern.

iFeatures Extrahieren, Einfügen, Ausrichten

In der Abbildung 9 wird beispielweise die Skizze Eines Oberbauquerschnitts einer Brücke eingezeichnet und anschließend mit der Funktion in der Sparte *Verwalten/iFeatures Extrahieren* in einer bereits vorhandenen Bibliothek gespeichert. Mit dem Befehl *iFeatures platzieren* wird die gespeicherte Skizze aufgerufen und anschließend an die Gewünschte Position angebracht(hier am anderen Ende des Verlaufs). Diese Methode ist sehr zeitsparend da diese Skizze in anderen Projekten jeder Zeit aufrufbar und weiterverwendbar ist. Das ist ein wichtiger Vorteil gegenüber nichtparametrischer Software.

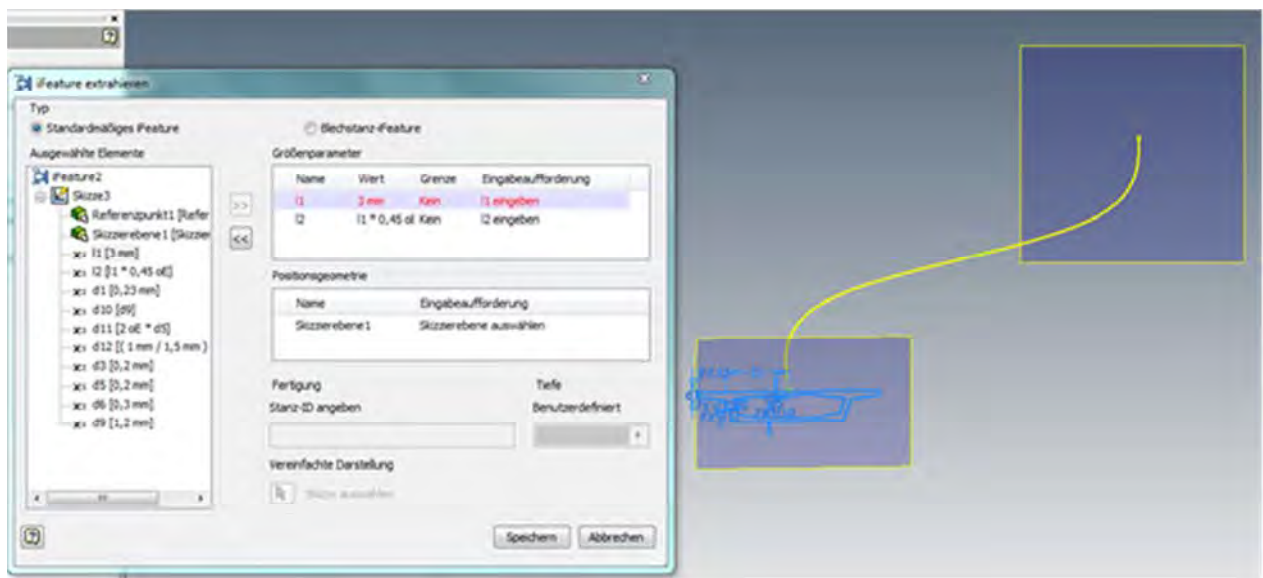


Abbildung 9: Extraktion von iFeatures (Speichern der Parameter der Skizze)

Beim Tätigen des Befehls iFeatures, wird zuerst die Skizze ausgewählt, woraufhin deren Parameter wie in der Tabelle der Abbildung 7 erscheinen. Die Abmessungen, die parametrisiert werden müssen, werden (in das rechte Feld der Tabelle) eingefügt.

iFeatures: Tabellengesteuert

Die Parameter z.B. des Querschnittes der Voute (siehe Abbildung 9) können auch über eine Tabelle so definiert werden, dass beim späteren Einfügen eine Liste mit verfügbaren Parametergrößen angezeigt wird und darin Einstellungen vorgenommen werden können.

Dabei wird das definierte iFeature in dem Ordner *Slots* aufgesucht und geöffnet. iFeatures werden automatisch in dem Speicherformat *.ide gespeichert. In der iFeature-Generierungstabelle erscheinen die Parameter des gespeicherten Elements.

iFeatures: Tabelle erweitern, einfügen

Die oben erstellte Tabelle kann jederzeit erweitert werden. Die Parameter der Tabelle in der Spalte „Name“ oder „Wert“, müssen nur für das spätere Einfügen aktiviert werden. Die Option „Alle Werte“ muss auch ausgewählt sein.

3.2.4 Tabellengesteuerte Bauteile und Baugruppen

Parameterwerte werden grundsätzlich direkt in Bauteil oder Baugruppe angelegt und verwaltet. Wenn Messwerte aber auch in anderen Bauteilen oder Baugruppen benötigt werden, können sie auch in einer Excel-Tabelle angelegt werden.

Die Werte aus der Excel-Tabelle werden dann mit dem Bauteil oder der Baugruppe verknüpft und die Parameter stehen so zur Verfügung. Als Beispiel soll hier in der unteren Abbildung ein Hohlkastenquerschnitt per Excel-Tabelle gesteuert werden.

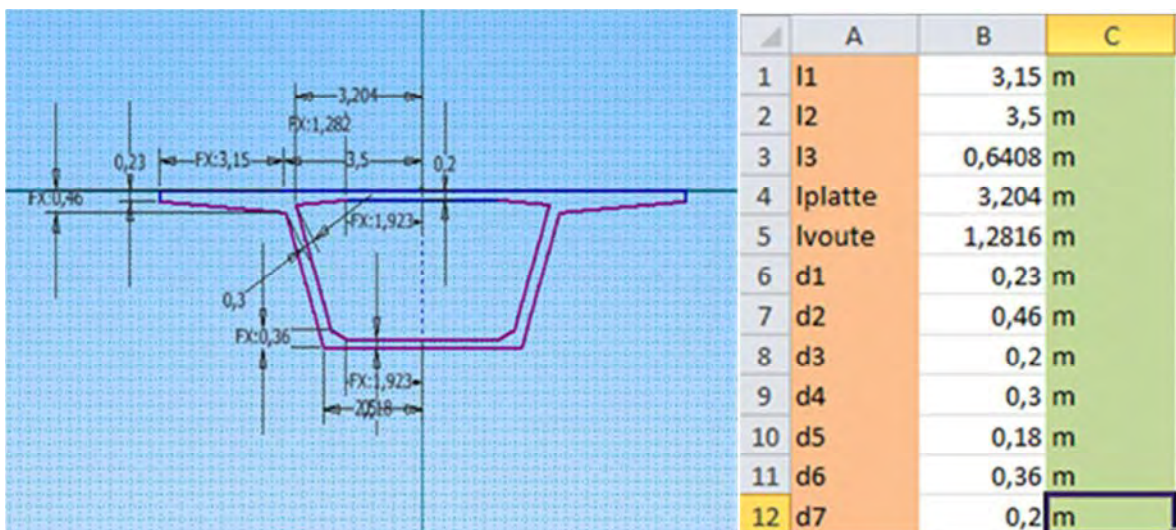


Abbildung 10: Tabellengesteuerter Hohlkastenquerschnitt

- Die einfache Tabelle wird, wie es in der Abbildung rechts oben dargestellt ist, in Microsoft Excel erstellt.

- In den Spalten A, B und C werden jeweils der Name der Parameter, die Messwerte und deren Einheit eingegeben. Zum Beispiel gibt man für eine Längeneinheit in Meter in der Spalte C „m“ ein. Will man anstatt eines Abstandes einen Winkel definieren, so gibt man in der Spalte C die Abkürzung „grd“ für Grad ein. Die Excel-Tabelle wird im Projektverzeichnis gespeichert.

Die Verknüpfung der Parameter mit den Modellparametern erfolgt in der Befehlsgruppe *Verwalten* unter „Parameter fx“. Dabei müssen zuerst die Benutzerparameter wie in der Excel-Tabelle erstellt werden und die damit korrespondierenden Modellparameter gleichgesetzt werden. Anschließend wählt man „Verknüpfen“, um die externe Excel-Tabelle an das Projektverzeichnis anzubinden.

Die Parameter der Verknüpfungstabelle können auch für andere Skizzen im selben oder in anderen Bauteilen verwendet werden. Es muss definiert werden, ab welcher Zelle das Programm anfangen soll abzulesen. Die Zelle wird im dafür vorgesehenen Kästchen angegeben. Für die obige Tabelle wäre dies A1.

3.2.5 iParts

Eine andere Möglichkeit, in Inventor Bauteile intelligent zu verwalten, ist mittels iParts. Nach dem Erstellen des Bauteils werden die gewünschten Bauteileigenschaften in einer Tabelle hinterlegt. Beim späteren Einfügen des Bauteils in eine Baugruppe können aus einer Liste vorher definierte Varianten ausgewählt werden. Das Verfahren ist ähnlich wie beim Einfügen eines Bauteils aus der Bibliothek. Um das Vorgehen besser nachvollziehen zu können, wird dieses anhand eines Beispiels erläutert. Hier sollen verschiedene Varianten des Querschnitts mit unterschiedlichen Abmessungen definiert werden.

- Ein neues Bauteil .ipt wird geöffnet und der 3D-Pfad wird erstellt. Die Erstellung des 3D-Verlaufs wird im Kapitel „Entwurf des Konzeptes zur parametrischen 3D-Brücken Modellierung“ näher erklärt. Man kann den Pfad auch einfach ableiten, falls es bereits vorhanden ist.
- In einer lotrechten Ebene zum Pfadende wird eine Querschnittsskizze eingezeichnet.
- Ein iFeature dieses Querschnitts wird erstellt.
- Lotrecht zum anderen Endpunkt des Pfades wird eine neue Ebene erzeugt. Das iFeature des Querschnitts wird hinzugefügt. Der Vorteil eines iFeatures ist, dass Parameter wie gewünscht geändert werden können und bereits einen Namen haben. So ist das durchschaubarer, als wenn man die Skizze nur in die neue Ebene kopieren würde.
- Man erhebt die zwei Skizzen entlang der Mittellinie, d.h. entlang des 3D-Pfades. Die Erhebung eines Querschnitts kann auch als Verbundfläche erfolgen. Diese Alternative ist hier gewählt worden, um die Darstellung besser nachvollziehen zu können.
- Das Bauteil wird unter dem Namen „Querschnitt-Voute.ipt“ gespeichert.
- Der Befehl „iPart erstellen“ wird getätigt.

- Ein Klick auf den Eintrag *Erhabene Fläche*² macht die Parameter des Bauteils verfügbar.

So kann man wie bei den iFeatures neue Zeilen als iParts hinzufügen. Wenn man mit den Eigenschaften spielt, sieht man, dass es eine sehr effiziente Methode ist, um Varianten von Volumenkörpern parametrisch in beliebiger Anzahl zu erzeugen. Die Effizienz bei der Planung und Fertigstellung der Produkte erhöht sich durch die Zeiteinsparung und die damit verbundenen Kostenersparnisse.

- Per Doppelklick kann man eine der Varianten aktivieren und damit weiterarbeiten.

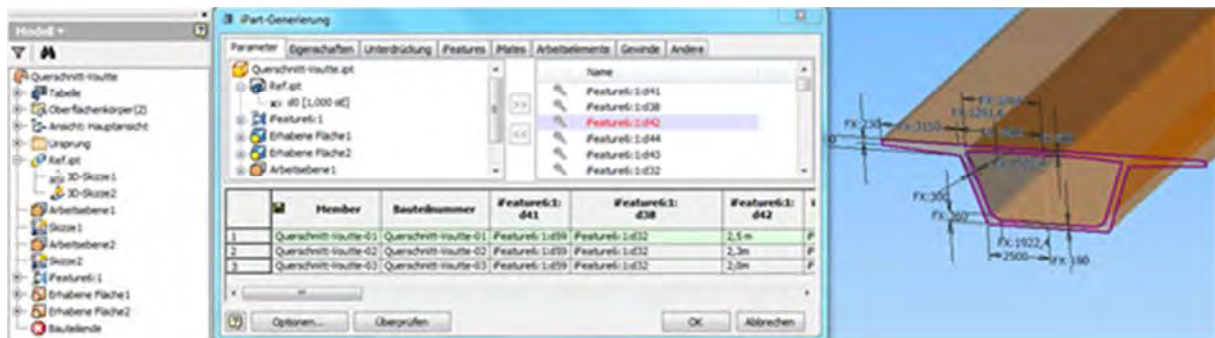


Abbildung 11: iParts

	Member	Bauteilnummer	iFeature6:1: d41	iFeature6:1: d38	iFeature6:1: d42	i
1	Querschnitt-Voutte-01	Querschnitt-Voutte-01	iFeature6:1:d59	iFeature6:1:d32	2,5 m	IF
2	Querschnitt-Voutte-03	Querschnitt-Voutte-03	iFeature6:1:d59	iFeature6:1:d32	2,3 m	IF
3	Querschnitt-Voutte-02	Querschnitt-Voutte-02	iFeature6:1:d59	iFeature6:1:d32	2,0 m	IF

Abbildung 12: iParts-Generierung

3.2.6 iAssemblies

Intelligente Baugruppen helfen besonders bei der Variantenkonstruktion. Ähnlich wie mit iParts, wo die Bauteilinformationen in einer Tabelle hinterlegt und beim Einfügen ausgewählt werden können, können hier komplette Baugruppen „automatisiert“ werden. Da in Wirklichkeit der Oberbau einer Brücke meistens ein Polygonzug ist, könnte man „meterweise“ den Oberbau erstellen und anschließend mit iParts generieren, gerade wenn sich die Quer- und Längsneigung auf der Brücke ändert. Diese Varianten werden in Unterbaugruppen mit Abhängigkeiten zusammengefügt und gespeichert.

Mit dem Befehl iAssembly werden die Komponenten des iAssembly zusammengefügt.

Das Vorgehen ist fast analog wie für iParts. Eine Tabelle zur Generierung ist auch vorhanden.

² Eine erhabene Fläche steht in Inventor für die Erhebung einer Skizze als Fläche oder Flächenverbund.

3.2.7 Blöcke

Komplette Skizzen oder Teile einer Skizze können wie bei iFeatures als Block gespeichert werden. Der Vorteil gegenüber einem iFeature ist, dass der Block direkt im Modellbrowser gespeichert wird und nicht in einen externen Ordner. Dagegen können iFeatures ohne weiteres für ganz verschiedene Projekte weiter verwendet werden. Blöcke sind allerdings auch ableitbar.

3.2.8 iLogic/ iTrigger

Im iLogic-Browser werden Regeln, Formulare, globale Formulare und externe Regeln aufgelistet. Dieses Modellierungswerkzeug dient zum Hinzufügen, Ausführen, Neugenerieren, Bearbeiten, Unterdrücken, Löschen und Neuordnen von Regeln. iLogic erstellt und bearbeitet dokumentspezifische Formulare mit Ziehen und Ablegen. Da im Brückenbau bestimmte Grenzwerte und Anforderungen einzuhalten sind (z.B. darf die lichte Höhe zur untergeordneten Straße nicht geringer als 4,5 m sein), sollte das Programm den Benutzer vorwarnen, wenn dieser oder jener Grenzwert überschritten wird. Ein „iTrigger“ löst eine Regel aus.

Man hat die Möglichkeit, in der Steuerdatei Regeln einzugeben, sofern es nur unkomplizierte Wenn-dann-Beziehungen sind. Für Parameter, die sich erwartungsgemäß nicht oft ändern, ist eher die direkte Eingabe im Modell zu bevorzugen. Parameter wie lichte Höhe, Widerlager usw. können direkt in der Steuertabelle angegeben werden.

Inventor unterstützt die Programmiersprache von *Visual Basic*. Die Eingabe eines Quellcodes erfolgt direkt im Programm oder kann importiert werden. Mit dieser Methode werden die Parametrisierung und die Automatisierung verfeinert. Sie unterstützt so den Anwender beim Modellieren.

3.2.9 Vergleiche der Modellierungsarten

Jede der oben genannten Parameter-Modellierungsmethoden hat ihre Vorteile. Das Sichtbarmachen von Parametern im Bauteil ist für jede Modellierung unabdingbar, genauso wie das Ableiten. Zusammen stellen sie die wichtigsten Modellierungsverfahren dar, um ein ganzes Modell effizient zu entwerfen. Immer wieder können in ein abgeleitetes Bauteil neue Elemente eingefügt werden. Wurden Änderungen für das abgeleitete Bauteil vorgenommen, kündigt das neue Bauteil an, dass Aktualisierungen durchzuführen sind. Handelt es sich jedoch um ein ganz neues Element wie eine Arbeitsgeometrie, wird die Änderung zwar gespeichert, ist aber nicht in dem abgeleiteten Bauteil enthalten und muss daher bearbeitet werden. Anders als bei einer Baugruppe wird beim Hinzufügen eines neuen Elements dieses sofort durch das Programm eingefügt. Es muss nicht extra abgeleitet werden. Das ist der Vorteil gegenüber dem Ableiten. Ein Nachteil des *.ipt-Formats gegenüber einer Baugruppe *.iam ist, dass Elemente aus anderen Projekten nicht platziert, sondern nur abgeleitet werden können. Dies erlaubt keine weiteren Translationen des Bauteils, da die Koordinaten bereits fix sind.

Die Verknüpfung mit einer externen Tabelle dient prinzipiell zur Steuerung der Parameter. Sind alle zu steuernden Parameter aufgelistet und mit jedem Bauteil richtig verknüpft, muss man nicht mehr extra lange suchen, um diese Variablen zu finden. Das hat den Vorteil, dass fixe Parameter nicht versehentlich geändert werden.

Die anderen Modellierungsmethoden (iFeatures, iParts) kommen bei der Modellierung des Überbaus zur Anwendung. Sie können zur Speicherung komplizierter Querschnittsskizzen dienen. Mit ihnen kann eine Skizzenbibliothek erstellt und später beim Gebrauch einfach in das neue Projekt eingefügt werden. Da die iParts im Modell gespeichert werden, kann man sie beliebig aktivieren und deaktivieren. Sind sie vor der Erstellung eines neuen Elements erzeugt worden, so sind sie auch in allen mit ihnen erstellten neuen Elementen zu finden.

Die Platzierung von Bauteilen zu einer Baugruppe mit entsprechenden Dokument mit Dateiformat *.iam ist sehr aufwendig. Aus diesem Grund ist für das Zusammenfügen von Bauteilen die Ableitungsmethodik zu bevorzugen. Der Aufwand der Baugruppenerstellung beruht auf der Tatsache, dass beim Modellieren der Unterbaukonstruktionen gekrümmte(nichtplanare) Flächen auftreten, die man später für das Zusammenfügen eher als planare Oberflächen benötigt. Allerdings können an definierten Punkten, die für die Parametrik günstig sind, neue Ebenen erzeugt und dann die Parametrisierung zwischen den Ebenen erstellt werden.

Blöcke sind Hilfsskizzen, die direkt im Bauteil gespeichert werden. Das erhöht die Schnelligkeit beim Zeichnen. Sie sind gegenüber iFeatures zu bevorzugen, da sie im gleichen Element vorhanden sind. Dagegen muss man die iFeatures aufsuchen, obwohl sie sich in demselben Projektverzeichnis befinden, und bei vielen iFeatures ist dies eher von Nachteil. Ein weiterer Nachteil gegenüber den Blöcken ergibt sich beim Platzieren von iFeatures, da mehr Parameter berücksichtigt werden müssen.

Sind Blöcke in derselben Skizze erzeugt worden, dann können iFeatures nur eingeschränkt erstellt werden, da einige Parameter nicht mehr frei veränderlich sind. iFeatures werden auf ganze Skizzen angewandt. Blöcke dagegen können sowohl auf ganze als auch auf Teilskizzen angewandt werden.

3.1 Ausblick und Empfehlungen für weitere Untersuchungen

Das Programm Autodesk Inventor überzeugt durch seinen starken Kernel³ und ermöglicht viele unterschiedliche Modellierungsarten, die im Bereich des Bauingenieurwesens zur Modellierung von Brückenbauwerken genutzt werden können. Da es aber keine Bauingenieursoftware ist, fehlen bestimmte Eigenschaften (z.B. normierte Layer und Schraffuren), um damit als Brückenkonstrukteur effizient arbeiten zu können. Da die Themenstellung dieser Arbeit recht weitgreifend ist, ist die Ausarbeitung in zwei Teile aufgeteilt worden. Im ersten Teil der Arbeit wurde die Parametrisierung von Brückenbauwerken und im zweiten Teil die (teil)automatisierte Planableitung. Die Arbeit von Herrn Fiermonte basiert auf dem Ergebnissen aus dieser Arbeit, sodass aufgezeigt werden konnte, dass für eine fachgerechte und zielführende Planableitung die Umsetzung des parametrischen Modells einen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Pläne besitzt.

³ Der Kernel von Autodesk Inventor ist der Shapmanager, er wurde von ACIS 7.0 Abgeleitet.

Da Autodesk Inventor ein Volumenmodellierer ist, empfiehlt es sich, weitere Untersuchungen für eine 3D-Parametrisierung des angrenzenden Geländes und des Baugrundes durchzuführen. Laut *ForBau Arbeitsbericht 2010* werden auch zusätzliche 3D-Modelle benötigt, um eine ganzheitliche digitale Baustelle zu erfassen.

In diesem Kapitel wurden die parametrischen Modellierungsmöglichkeiten untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass Autodesk dem Anwender vieles bietet, um flexible Modelle zu konzipieren. Um diese Methoden in einem parameterbasierten 3D-Modell umsetzen zu können, werden im folgenden Kapitel die allgemeinen Grundlagen von Brückenbauwerken und die traditionellen Entwurfsmethoden eingeführt.

4 Traditionelle Entwurfsmethoden für Brückenbauwerke

Diese Arbeit bezieht sich auf eine Eisenbahnbrücke. Die Vorgehensweise beim Entwurf von Straßen- und Eisenbahnbrücken unterscheiden sich aber nicht dramatisch.

Die bauwerkspezifische, verkehrstechnische Funktion und die ortsspezifischen Randbedingungen sind die Vorgaben für den Entwurf einer Brücke. Hinzu kommen noch die wirtschaftlichen und kulturellen Anforderungen. Die bauwerkspezifischen Funktionen sind die Linienführung, die Verkehrsart und der Nutzungsquerschnitt. Die ortsspezifischen Randbedingungen sind Topologie und Geologie, Landschaft, Lärmemissionen und Auswirkungen des Bauwerks auf Vegetation, Lichtraumprofil, Wasser usw. Die funktionellen Anforderungen sind Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Nachfolgend werden diese Randbedingungen näher beschrieben.

4.1 Randbedingungen aus Trassierungsplanung

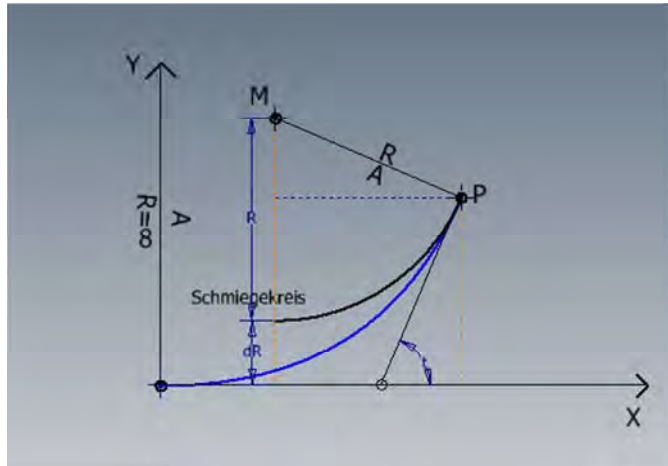
Die Linienführung einer Straße oder der Gleise wird durch Trassierungselemente bestimmt, aus denen sich die Gleistrasse zusammensetzt. Die Brückenbauwerke müssen dann an die Trassierung angepasst werden, d.h., auch ihr Verlauf und Standort werden von den Trassierungselementen bestimmt. Bei der Wahl der Trassierungsparameter sind technische Grenzwerte und Regelwerte zu beachten und einzuhalten. *Während Grenzwerte überwiegend unter dem Kriterium der Sicherheit festgelegt sind, berücksichtigen die Regelwerte auch Belange der Wirtschaftlichkeit und des Fahrkomforts* (Freudenstein, 2010).

Die Entwurfselemente, die bei der Trassierung zur Anwendung kommen, sind Geraden, Bögen, Klothoide. Die horizontale Gerade ist das günstigste Trassierungselement der Eisenbahn.

Für Kurven im Verkehrswegebau wird eine Spiralkurve verwendet, Klothoide genannt (siehe Abbildung 13). Diese Spirale hat eine stetig wachsende Krümmung, wobei das Produkt der Bogenlänge L mit dem Krümmungshalbmesser R konstant ist. Der konstante Wert wird mit A bezeichnet. Der konstante Wert wird mit A bezeichnet. Die Kennstelle der Klothoide wird mit $R/A=(r)$ bestimmt.

Wesentliche Parameter für die Trassierung sind:

- Überhöhung, Überhöhungsfehlbetrag (Fliehbeschleunigung) und Radius im Bogen (Kreisbogen)
- Die Gestaltung des Übergangs vom Bogen zur Geraden
- Die Längsneigung und die Abrundung der Neigungswechsel



$$X = A \cdot \left(l - \frac{l^5}{40} + \frac{l^9}{3456} - \frac{l^{13}}{599040} + \frac{l^{17}}{599040175472640} \right)$$

$$Y = A \cdot \left(\frac{l}{6} - \frac{l^7}{336} + \frac{l^{11}}{42240} - \frac{l^{15}}{9676800} \right)$$

$$XM = A \cdot \left(\frac{l}{2} - \frac{l^5}{240} + \frac{l^9}{34560} - \frac{l^{13}}{83386560} \right)$$

$$dR = A \cdot \left(\frac{l}{24} - \frac{l^7}{26880} + \frac{l^{11}}{506880} - \frac{l^{15}}{154828800} \right)$$

$dR = \text{Abbrückmaß des Schmiegekreises}$
Tangente im Nullpunkt

$$A^2 = R \times L$$

Abbildung 13: die Einheitsklothoide, Anwendung in der Praxis (Quelle: Freudenstein, 2010)

4.2 Gestaltung von Brückenbauwerken

Brücken sind technische Bauwerke, die zuerst bestimmte Anforderungen erfüllen müssen.

Ihre Gestaltung muss mit der Konstruktion und der Landschaft in Einklang stehen, darf aber auf keinen Fall die planmäßige Funktion des Bauwerks beeinträchtigen. Die Berücksichtigung von Klima, Lichtverhältnissen, Schattenwurf und betriebsbedingten Verschmutzungserscheinungen bei der Festlegung von Oberflächenstrukturen und bei der Farbgebung sind zusätzliche Anforderungen (Mehlhorn, 2010).

Nach diesen Grundsätzen werden im Brückenentwurf schrittweise folgende Festlegungen getroffen:

Nach diesen Grundsätzen werden im Brückenentwurf schrittweise die folgenden Festlegungen getroffen. Zuerst werden die erforderliche Gesamtlänge und Feldeinteilung der Brücke bestimmt. Als Zweites wird ein Tragsystem ausgewählt, z.B. Balken-, Bogen-, Rahmenbrücke etc. (siehe Abbildung 14). Als nächster Schritt folgt die Wahl eines günstigen Querschnitts (z.B. Platten-, Plattenbaken-, Hohlkasten- und Trog-Querschnitt), der den statischen und konstruktiven Anforderungen entgegenwirkt. Zum Schluss folgt die Wahl des Baustoffs (z.B. Beton, Naturstein, Stahl, Holz oder eine Kombination davon).

Es werden also äußere Form und Gesamtstruktur eines Bauwerks festgelegt, dann wird - in Abhängigkeit von der örtlichen Situation - entschieden, mit welchen Materialien, Formen und Farben die Gestaltungsziele am besten erreicht werden können. Dabei müssen in jedem Einzelschritt auch die Herstellungs- und Erhaltungskosten mit einbezogen werden. (ÖBB Infrastruktur AG, 2010)

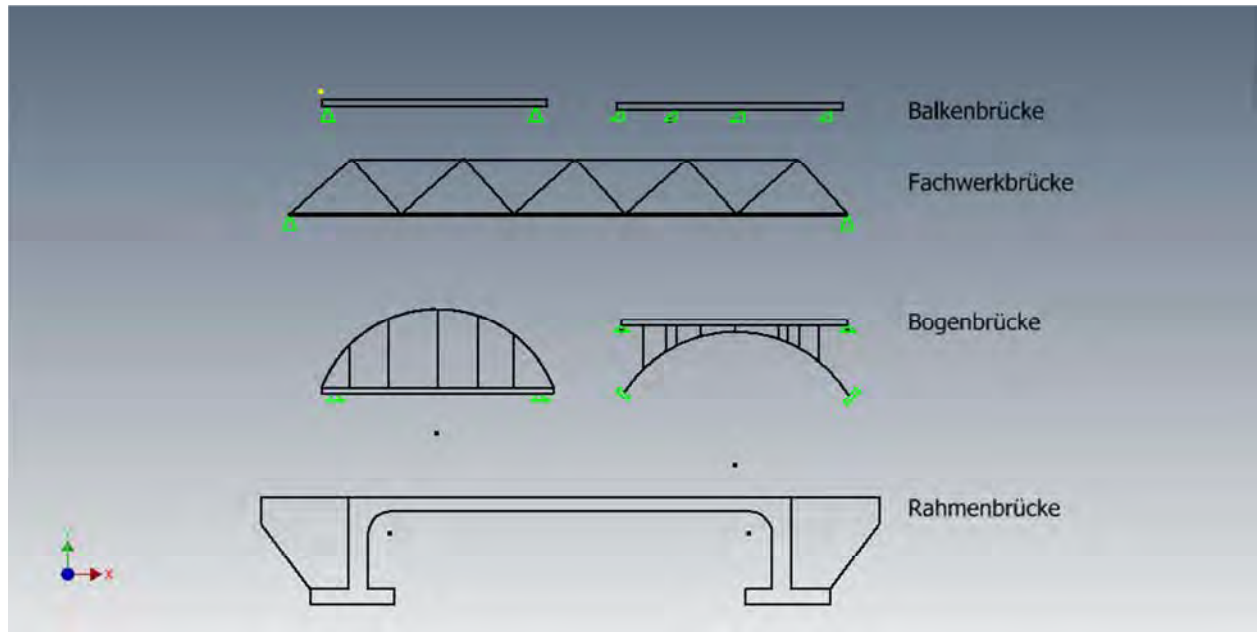


Abbildung 14: Tragsysteme (Längsschnittgestaltung)

Für Eisenbahnbrücken aus Stahlbeton oder Spannbeton kommen verschiedene Brückensysteme in Frage. Bis zu einer Lichtweite von 6 m (max. 8 m) sind geschlossene Rahmen zu bevorzugen. Bei einer Stützweite von 7 m bis ca. 15 m sind einfeldrige Rahmen in integraler Bauweise zu wählen. Ab 15 m Feldlänge können Platten- und Balkenbrücken in Form von Einfeldträgern oder Durchlaufträgern zur Anwendung kommen. Bei größeren Stützweiten kommen Bogentragwerke in Frage (ÖBB Infrastruktur AG, 2010).

Bei der Einbindung eines Bauwerks in die offene Naturlandschaft gibt es im Grunde zwei Gestaltungsalternativen. Entweder ordnet sich das Bauwerk mit einer angepassten Ausführung und Gestaltung (Holzbrücke) der Umgebung unter – oder es wird mit einem bewusst auffällig gestalteten Bauwerk ein technischer Akzent in der Natur gesetzt. Der dritte Weg, nämlich ein lauwärmer Kompromiss zwischen beidem, führt oft zu unbefriedigenden Ergebnissen (ÖBB Infrastruktur AG, 2010).

Die Brücke wird nicht nur in Längsrichtung gestaltet sondern auch in Querrichtung.

4.2.1 Querschnittsgestaltung

Der Querschnitt ist das Herzstück einer Brücke. Mit ihm werden die wesentlichen konstruktiven Daten festgelegt; somit bestimmt er den Charakter der Brücke in der Untersicht. Seine Gestaltung steht in engem Zusammenhang mit der Form der Stützung und sollte auch nur gemeinsam mit ihr beurteilt werden. Bei Verwendung einer Querschnittsform kommen nur bestimmte Stützenformen in Frage, um festgelegten Anforderungen zu entsprechen. Eine entscheidende Bedeutung hat die Querschnittsform auch für die Wirtschaftlichkeit der Brücke und die betriebliche Fertigung. So wird aus diesen Bedingungen die Querschnittswahl getroffen. (Holst, 2004)

Man unterscheidet zwischen: Plattenquerschnitte, Plattenbalkenquerschnitte, Hohlkastenquerschnitte und Trog-Querschnitte (siehe Abbildung 15 und 16)

4.2.1.1 Plattenquerschnitte:

Die Platte ist, wegen der einfachen Herstellung, das bevorzugte Konstruktionselement für Querschnitte von Brücken kleiner Stützweite (≤ 30 m) und wird auch gern als gestalterisches Element im Hochstraßenbau verwendet (Ernst & Holst, 2004). Die Platte wird als Vollplatte oder als Hohlkörper (zur Gewichtsersparnis) ausgeführt. Sie weist im Vergleich zu den meisten großen Konstruktionselementen der Brücke die geringste Konstruktionshöhe auf. Daher wird sie gern als gestalterisches Bauteil verwendet.

4.2.1.2 Plattenbalkenquerschnitte

Plattenbalkenquerschnitte stellen durch ihr Tragverhalten den idealen Querschnittstyp des Betonbaus dar. Der Plattenbalken verbindet die Eigenschaften einer Platte und eines Balkens. Der Balken übernimmt die Funktion des Hauptträgers. Die Platte in ihrer Funktion als Flächentragwerk überträgt die örtlichen Lasten aus der Fahrbahn und leitet sie weiter an die Hauptträger. Die gebräuchlichste Form ist der Zweistetige Plattenbalken der in der Abbildung 15 dargestellt wird. Diese Form wird gern bei größeren Stützweiten und zur Materialersparnisse verwendet.

4.2.1.3 Hohlkastenquerschnitte

Der Hohlkasten ist eine Weiterentwicklung des Plattenbalkens mit einer unteren Platte, die im Stützbereich aus statischen Gründen erforderlich ist. Dadurch bildet sich eine torsionssteife Zelle, die die Beanspruchungen nahezu gleichmäßig in die Hauptträger aufleitet. Durch diese zusätzliche Eigenschaft hat sich der Hohlkastenquerschnitt seinen Platz in den Querschnittstypen verdient. Die Erweiterung bringt zwar aus konstruktiver Hinsicht Nachteile mit sich, aber ermöglicht zugleich bei engen Platzverhältnissen im Stadtbereich eine Einpunktstützung. Der Hohlkastenquerschnitt ist im Stützbereich von 40 m bis 80 m wirtschaftlich und wird häufig bei Krümmungen und im Hochstraßensystem verwendet. Er wird auch bevorzugt bei der Herstellung von Eisenbahnbrücken auf Hochgeschwindigkeitsstrecken eingesetzt. Der Hohlkastenquerschnitt kann auch mehrzellig ausgeführt werden (Zusammensetzung von mehreren Hohlkästen) je nach Breite des Verkehrsquerschnittes (Ernst und Holst, 2004).

Die oben genannten Querschnittsformen sind der Gruppe der Massivbaubrücken zuzuordnen. Weitere Gruppen sind Stahl- und Verbundbrücken. Bei Stahlbrücken wird zwischen Trägerrost, Hutquerschnitt und Stahlhohlkastenquerschnitt unterschieden. Bei Verbundbrücken sind Bauteile von zwei unterschiedlichen Baustoffen im Querschnitt zu finden (z.B Stahl und Beton). Die geläufigen Querschnittsformen der Massivbauweise sind in der Abbildung 15 und 16 dargestellt.

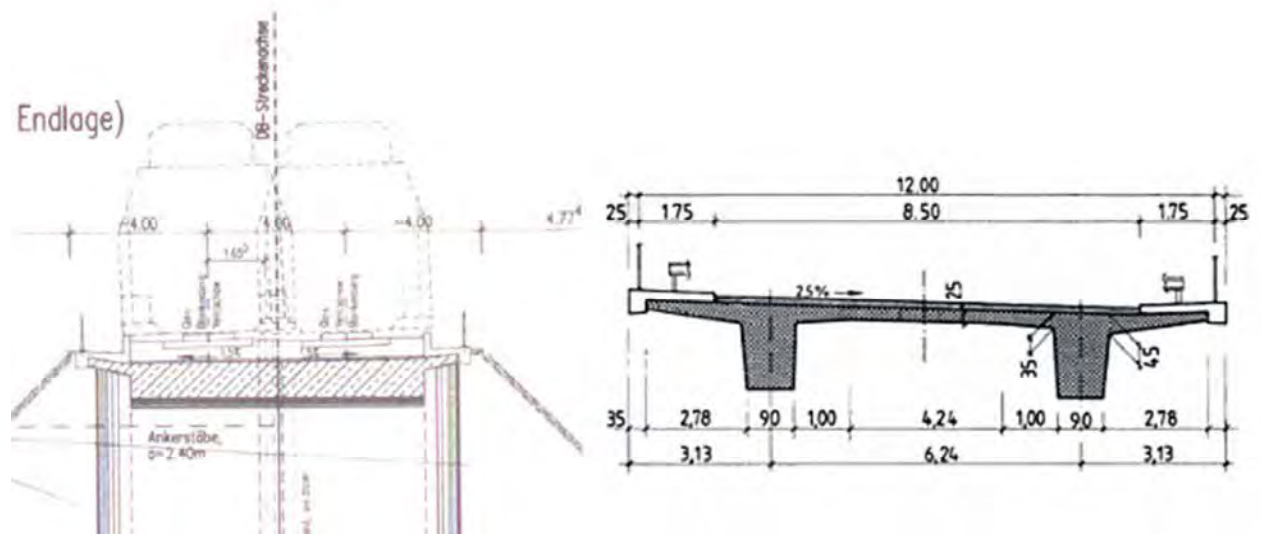


Abbildung 15: Vollplattenquerschnitt und Plattenbalkenquerschnitt(Quelle: Obermeyer; Holst 2004)

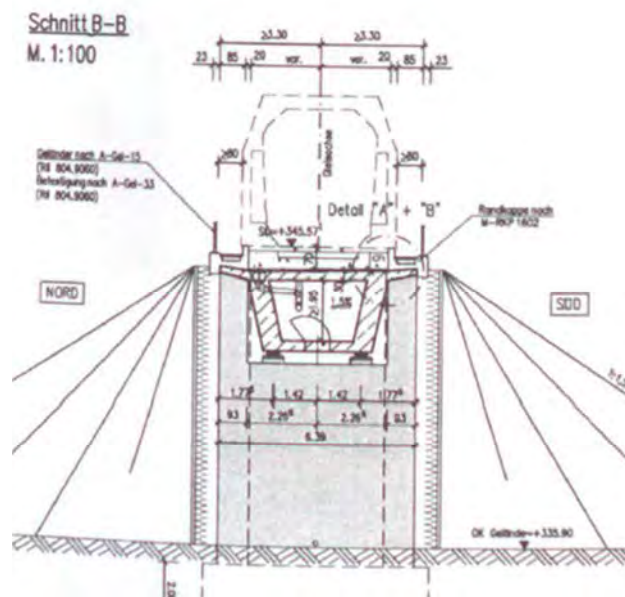


Abbildung 16: Hohlkastenquerschnitt(Quelle: Obermeyer)

Aufbau einer Bücke:

Ein Brückenbauwerk setzt sich zusammen aus Überbau- und Unterbau-Bauteilen. Die Überbau-Bauteile sind Oberbau, Fahrbahn, Kappen, Geländer etc. Die Unterbau-Bauteile sind Widerlager, Flügel, Pfeiler/Stützen, Fundamente und Bohrpfähle. In der Abbildung 17 sind diese dargestellt.

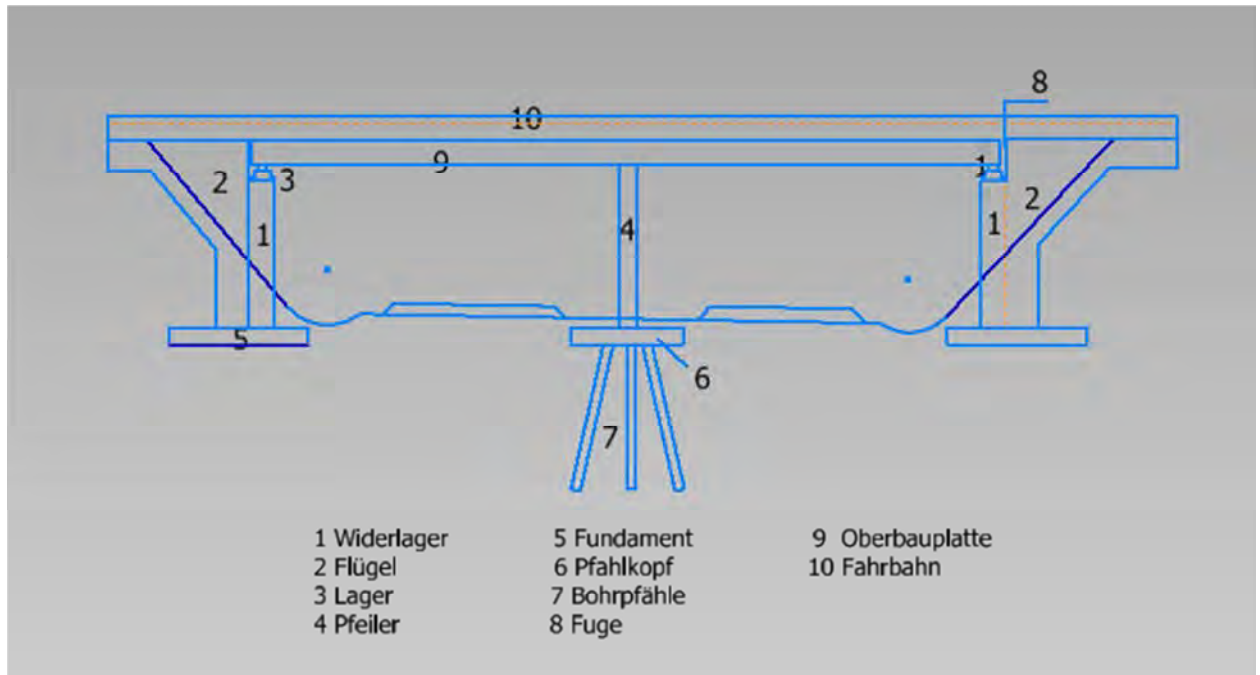


Abbildung 17: Brücke im Längsschnitt

Überbauten von Eisenbahnbrücken

Der Überbau ist das Tragwerk der Brücke, das direkt die Lasten aus dem Verkehr trägt. Er muss alle Funktionskomponenten anbieten für den notwendigen Betrieb. Das Lichtraumprofil auf der freien Strecke darf von Einbauten oder festen Gegenständen nicht eingeschränkt werden. Die Deckbrücke ist die ideale Bauform des Brückenoberbaus, bei der die Hauptträger unter der Fahrbahntafel liegen und nicht über der Funktionsebene des Brückendecks (siehe Abbildung 18).

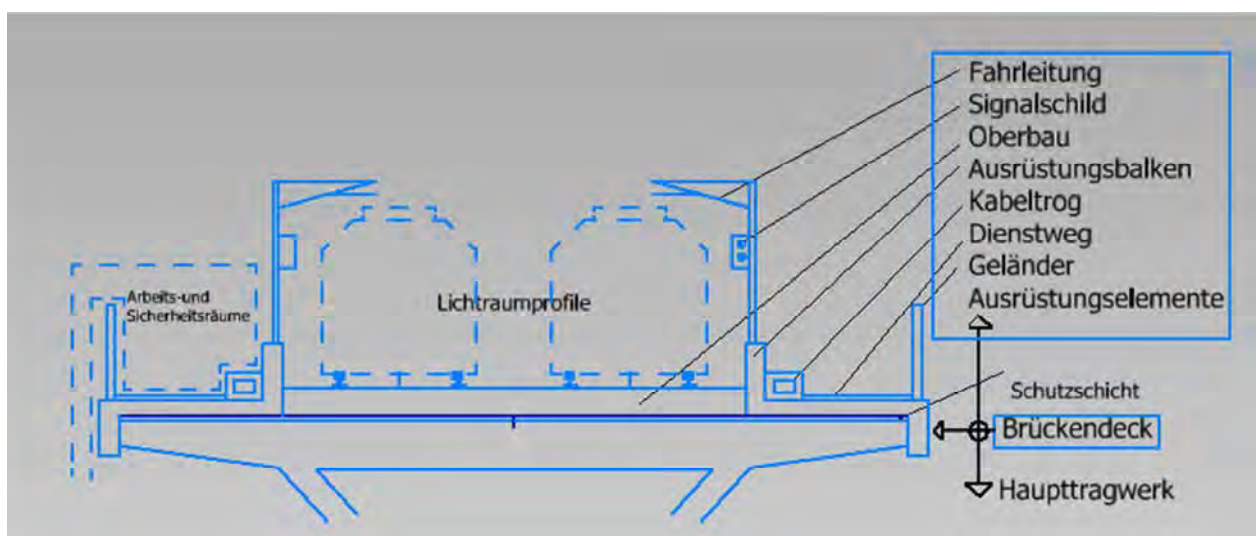


Abbildung 18: Ordnungsprinzip Deckbrücke.

4.1 Die baulichen Belange der Verkehrslastträger

Die baulichen Belange der Verkehrslastträger sind Planungsansätze die befolgt werden müssen beim Entwurf der Brücke. Diese Planungsansätze werden später als Parameter eingegeben in das zu modellierende Brückenmodell.

Nachfolgend werden die wichtigsten Planungsansätze kurz beschrieben.

- Brücke und Böschungssituation:

Die Böschungsneigung ist einer der wichtigsten Parameter. Mit ihr wird die Geometrie der Unterbau-Bauteile bestimmt. Sie ist in der Regel $1/n = 1/1,5$. Die Böschung deckt die Flügelunterkante parallel mit einem Mindestabstand von 1,0m.

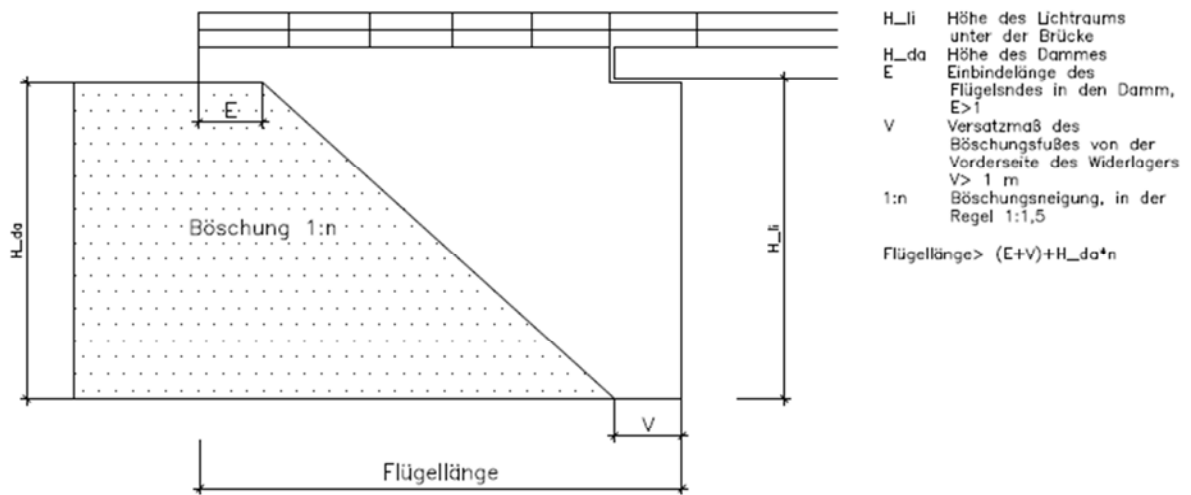


Abbildung 19: Böschungssituation

Die Böschungsneigung wird nach RAS-Q 96 bestimmt. Nachfolgend ist ein Auszug aus der RAS-Q96.

Böschungshöhe h	$h \geq 2,0$ m	$h < 2,0$ m
Damm		
Einschnitt		
Regelböschung	$1 : 1,5$	$b = 3,0$ m
Allgem. Böschungsmaße	$1 : n$	$b = 2 n$
Tangentenlänge T der Abrundung	3,0 m	$1,5 h$

Abbildung 20: Böschungsgestaltung nach RAS-Q 96

- Rechtwinkliger Anschluss der Fahrbahn

Die schiefe Lagerung und der schiefe Fahrbahnanschluss sind voneinander zu unterscheiden. Die schiefe Lagerung ist die Ausrichtung der Widerlagerachse zur Straßenachse. Die schiefe Lagerung der Brückenüberbauteile sollte auf eine Schiefe α_L der Lagerung von $60^\circ < \alpha_L < 120^\circ$ beschränkt werden (wegen Gleisverwindung). Größere Schiefstellungen der Lagerung sind für Brücken mit einem Hohlkastenquerschnitt zulässig (Pfeifer und Mölter, 2008). Die dabei auftretende Torsion kann aufgenommen werden, weil der Querschnitt genügend torsionssteif ist. Das Entwurfskriterium ist dabei *die Sicherheit gegen Abheben* der Lager an der spitzen Ecke. (Pfeifer und Mölter, 2008)

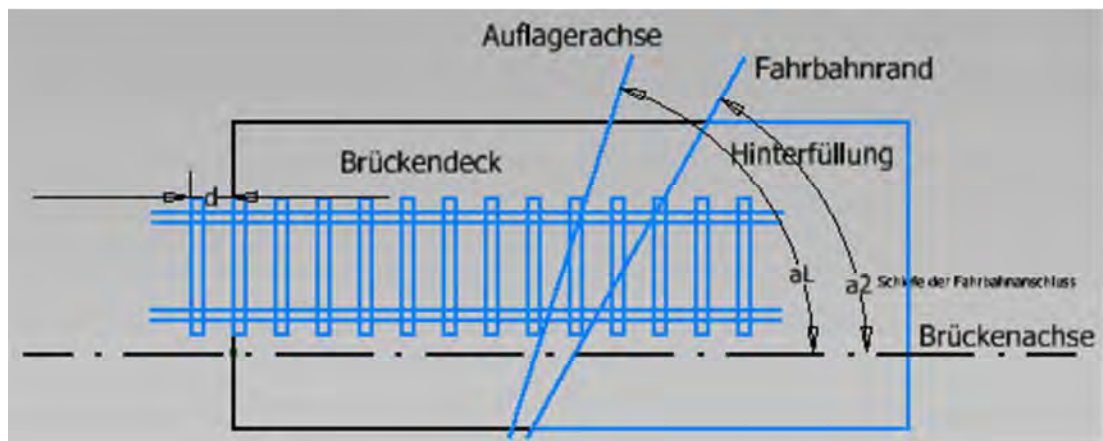


Abbildung 21: Draufsicht auf einer schiefe Lagerung (Quelle: Pfeifer und Mölter, 2008)

- Der Fahrbahnanschluss an den Überbauenden soll rechtwinklig zur Gleisrichtung liegen.

Um einen rechtwinkligen Anschluss der Fahrbahn bei schiefer Kreuzung zu gewähren, kann zwar die spitze Ecke des Brückenüberbaus rechtwinklig gebaut werden, aber die Fläche des Überbaus wird dadurch größer und die Brücke entsprechend teurer (Pfeifer und Mölter, 2008)

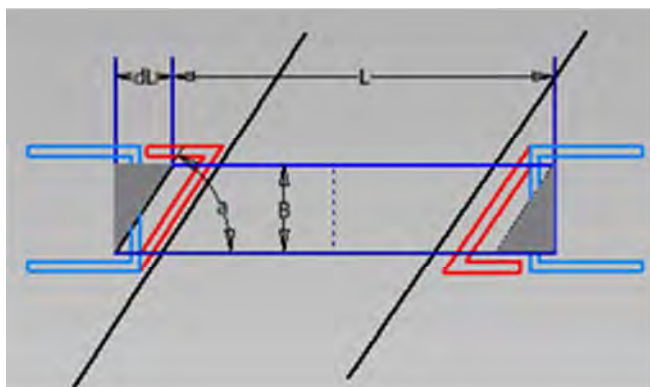


Abbildung 22: Schiefe der Kreuzung (Quelle: Pfeifer und Mölter, 2008)

$a = \text{Schiefe} - \text{der} - \text{Kreuzung}$

$\text{Fläche} - \text{des} - \text{schiefen} - \text{Oberbaus}$

$$A = L \times B$$

$$dA = dL \times B$$

$$dL = B / \tan a$$

Relative-Vergrößerung

$$dA/A = B(L \times \tan a)$$

$$\text{Bsp.: } a = 60^\circ \text{ und } B/L = 12/36$$

$$dA/A = 19\%$$

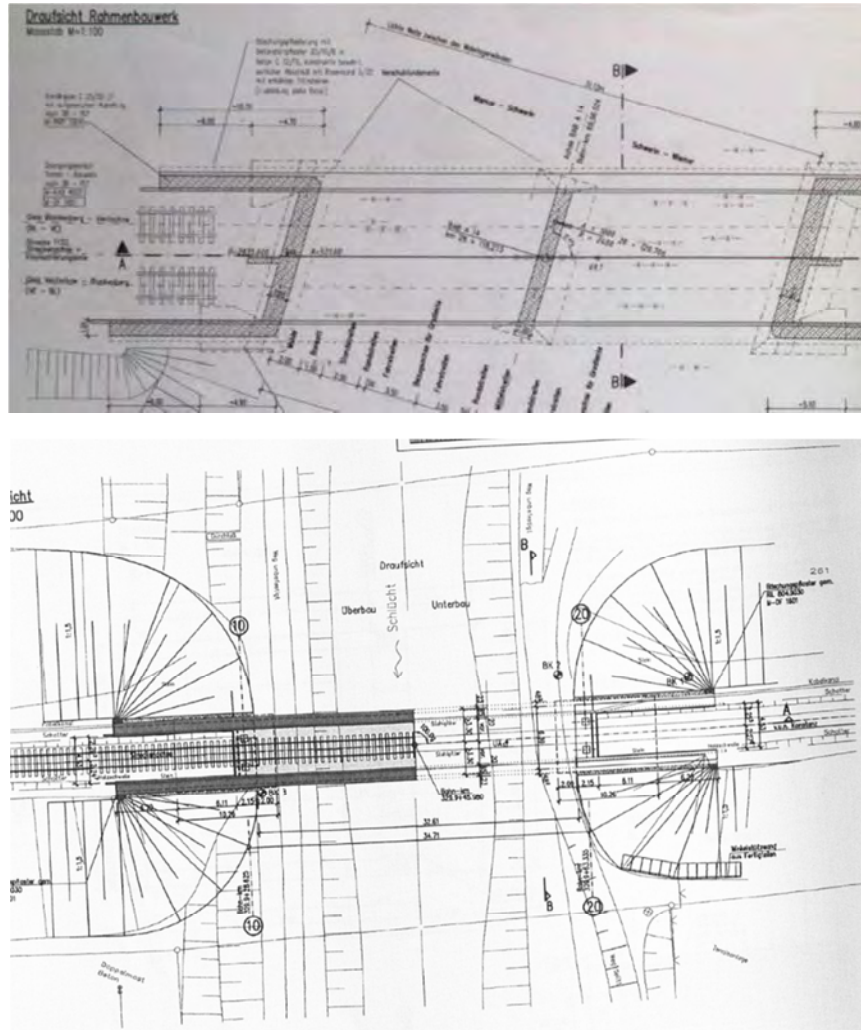


Abbildung 23: Beispiel einer rechtwinkligen und schiefwinkligen Lagerung(Quelle: Obermeyer)

- Die Einbindelänge der Flügel in die Böschung muss mindestens 1,0m lang sein. (siehe Bild).

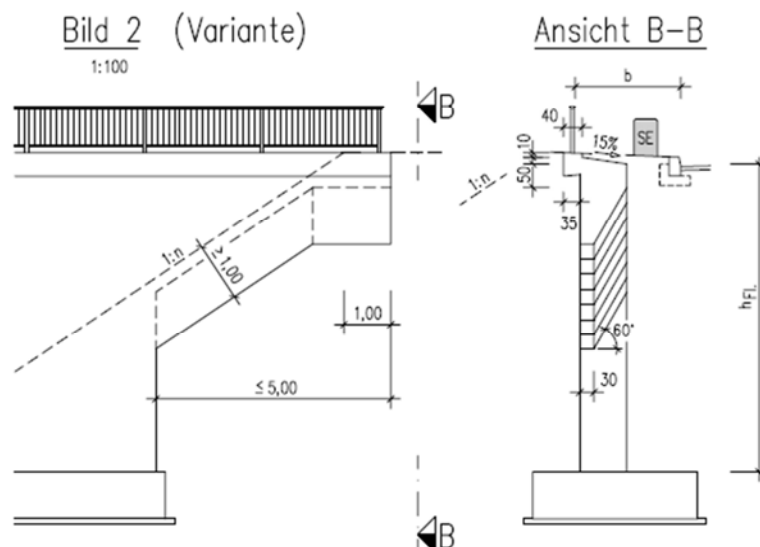


Abbildung 24: Einbindelänge der Flügel in die Böschung (Quelle: RIZ, 2011)

- Auf dem Brückendeck die Schotterfüllung zwischen Oberbauplatte und Randkappe durch eine Schotterbegrenzungswand mit mindesten 2,20m Abstand von der Gleisachse gesichert werden (siehe Abbildung 25).
- Die Höhe der Schotterbett-Fahrbahn auf der Brücke bis zu den Flügelenden muss mindesten 70cm betragen (siehe Abbildung 25).

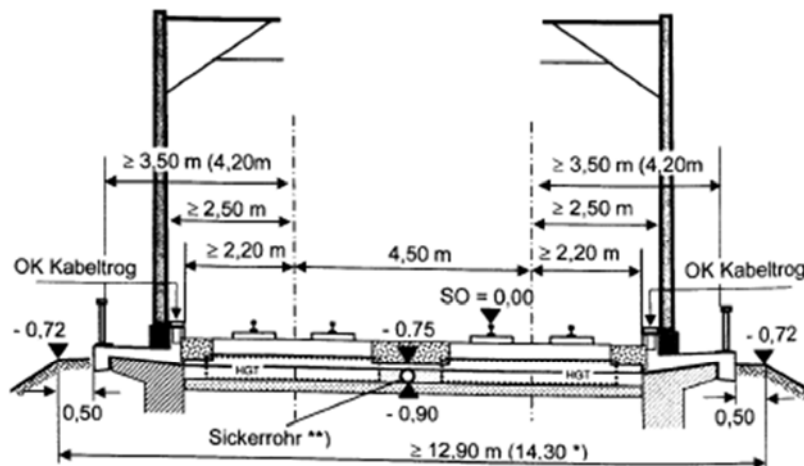


Abbildung 25: Regelquerschnitt mit fester Fahrbahn, gerades Gleis, Planumsquerschnitt am Flügelende (Quelle: Pfeifer und Mölter, 2008)

Jeder dieser Planungsansätze wird als fester Parameter in das Modell eingegeben.

Aus diesen und anderen vordefinierten Randbedingungen und Anforderungen wird die geometrische Gestaltung einer Brücke bestimmt. Im folgenden Absatz werden die traditionelle Planungsmethoden beschrieben und ihre Nachteile gegenüber dem parameterbasierten Modellieren erläutert.

4.2 Planungswerkzeuge und Methoden

Obwohl mittlerweile der Großteil der Anwendungssoftware zur Planung von Brückenbauwerken viele Möglichkeiten anbietet, die das Entwerfen erleichtern sollen, erfolgt die Planung von Brückenbauwerken immer noch in der zweiten Dimension. Die Pläne werden in 2D-Skizzen erstellt und anschließend geplottet. Die Entwurfsdaten hierfür werden Entwurfsplänen entnommen und in eine CAD-Umgebung integriert. Da im Verkehrswegebau die Koordinatenangaben von Punkten im Gauß-Krüger-Koordinatensystem erfolgen und das große Zahlen sind, werden diese dann auf einen günstigen Bezugspunkt reduziert.

Gängige Software zur Planung von Brücken sind z.B. Autocad (Architecture und Civil), Archicad, Soficad, Allplan etc. Diese Programme sind vektororientierte Zeichenprogramme, die auf einfachen Objekten wie Linien, Polylinien, Bögen, Texten usw. aufgebaut sind, welche die Grundlage für komplizierte 3D-Objekte darstellen. Meistens werden standardisierte Detailzeichnungen in Bibliotheken abgelegt und in die Entwurfszeichnungen

importiert. Die Planung der Brücke wird von Randbedingungen aus Trassierungsplänen, Richtlinien und Belangen der Wirtschaft bestimmt.

Aufgrund der erhöhten Anforderungen an Ästhetik und Wirtschaftlichkeit sowie kulturellen Anforderungen reichen diese Planungsmethoden nicht mehr aus, um auf dem Arbeitsmarkt wettbewerbsfähig zu bleiben. Planungsbüros und Lehrstühle berichten, dass sich die Planung von Bauwerken vor allem im Brückenbau mit diesen konventionellen Methoden nur noch unter erheblichem Aufwand realisieren lässt. Die aktuellen Probleme, mit denen die Bauindustrie aufgrund immer komplexerer Bauwerke und wirtschaftlicher Anforderungen bei der Verwendung dieser Planungswerkzeuge konfrontiert wird, sind vielfältig:

- Inkonsistenz bei der Planverwaltung;
- nicht transparente Planung, schlechter Überblick (da keine Vernetzung aller Planbearbeiter);
- unwirtschaftliche iterative Planungsvorgänge (da zum Beispiel bei Änderung die kompletten Zeichnungen neu erstellt oder überarbeitet werden müssen);
- keine Möglichkeit zur Visualisierungs- und Kollisionsprüfung;
- Simulationen können nicht direkt am Modell durchgeführt werden.

Der Bauindustriesektor samt Hochschulen versucht seit Jahren, mit der Entwicklung und dem Einsatz effizienterer Planungswerkzeuge und Methoden diese Probleme zu beheben.

In anderen Bereichen der Technik wie im Maschinenbau, Schiffsbau und Anlagebau sind bereits Lösungen vorhanden. Leider im Bauwesen vor allem im Brückenbau konnte bis jetzt speziell für die Brückenplanung keine direkte Lösungen gefunden werden. Aktuell ist eine Software in Entwicklung speziell für die Planung von Infrastrukturbauwerken, von einem japanischen und französischen Forschungsteam, mit der auch 3D-Brückenmodelle im Format-IFC⁴ ausgetauscht werden können (Forbau, 2010). Diese Entwicklung ist noch nicht ausgereift. Daher versuchen andere Forschungsteams wie der Bayerische Forschungsverbund, andere Lösungen zu präsentieren. Ein Ausweg ist die Verwendung von Maschinen- und Anlagenbausoftware. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass es eine gute Alternative ist, auf maschinenbauspezifische Software auszuweichen. Es konnten bereits Ingenieurbauwerke wie Tunnel und Brücken in Siemens NX parametrisch modelliert werden (vgl. Thomas Lippert, Bachelorarbeit 2012, und Minyi Wang, Masterarbeit 2012).

Im folgenden Kapitel wird ein Konzept vorgeschlagen wie man ein Brückenbauwerk parametrisch in Inventor modellieren kann, selbst wenn Inventor in die Kategorie der Maschinenbauprogramme fällt.

⁴ Format-IFC (Industry Foundation Classes): Austauschformat des französischen Software-Herstellers im Hochbau, Industry Foundation Classes (Quelle: ForBau, 2010)

5 Entwurf eines Konzepts zur Parametrisierung von 3D-Brückenbauwerken

5.1 Aufgabenstellung

Im dritten Kapitel hat die Untersuchung der verschiedenen Modellierungsmethoden gezeigt, dass die Effizienz bei der Entwicklung von Produkt-Modellen durch den Einsatz von parametrischer Modellierung gesteigert werden kann. Ein *konzeptionelles Vorgehen zur parametrischen 3D-Modellierung von z.B. Brückenbauwerken birgt erhebliche Vorteile gegenüber der traditionellen Planungsmethode in 2D-Schnitten. Denn der Anstieg an ästhetischen, topographischen und konstruktiven Randbedingungen macht die geometrische Gestaltung einer Brücke immer komplexer und eine Darstellung in herkömmlichen 2D-Schnitten kann nur noch unter erhöhtem zeitlichem und wirtschaftlichem Aufwand realisiert werden (Forbau,2010).*

5.2 Ziele

Ziel ist, eine parametrische 3D-Brücke mit Parametern zu modellieren, die später im Bereich von festgelegten Grenzen beliebig geändert werden können. Der Überbau und der Unterbau (Flügel, Widerlager, Fundamente, Gründungen usw.) sollen so miteinander verknüpft werden, dass sie vollparametrisch miteinander interagieren. Das heißt: Wenn eine Änderung an einem Bauteil vorgenommen wird, so sollen die benachbarten bzw. davon abhängigen Bauteile automatisch angepasst werden, sofern eine Parametrik festgelegt wurde. Im Folgenden wird ein Konzept vorgeschlagen, wie man ein Brückenbauwerk parametrisch modellieren könnte, und in Inventor dargestellt.

5.3 Vorgehen

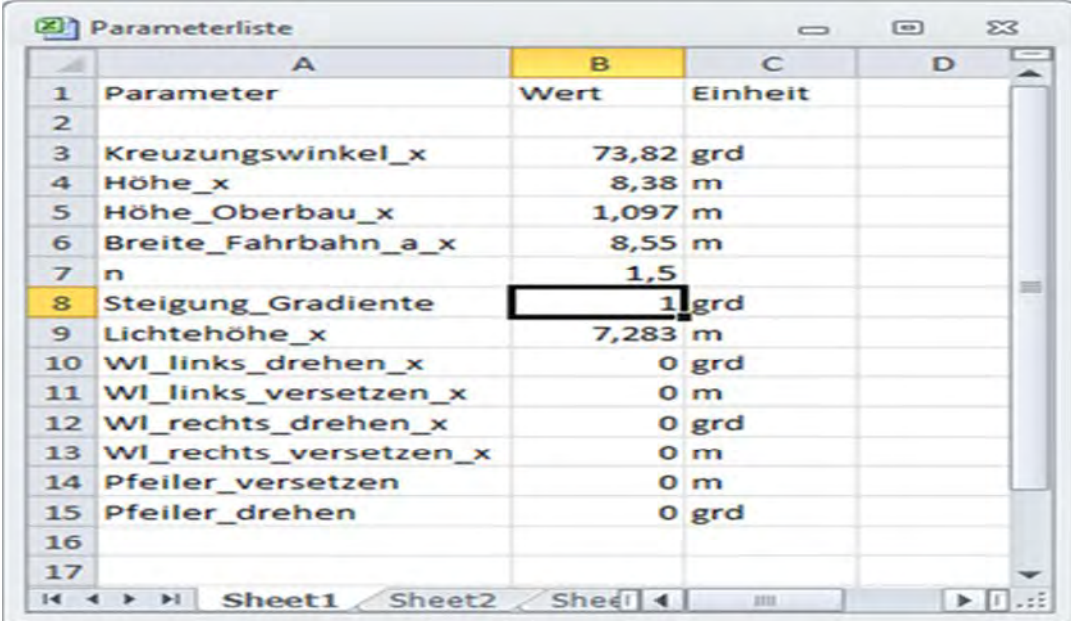
5.3.1 Parameterliste festlegen

Als **erster Schritt** wird eine Parameterliste aufgestellt. Darin werden die Parameter die später verändert werden sollen, aufgelistet: Man möchte zum Beispiel den linken Widerlager beliebig in die Böschung verschieben, dann erhält der Parameter z.B. den Namen *Wl_links_versetzen*. Die wichtigsten Parameter sind in der nächsten Abbildung dargestellt. Der erste Parameter der Liste *Kreuzungswinkel* soll später bewirken das die Brücke den unterführten Verkehrsweg in einen variablen Winkel überquert. Die *Höhe* des Brückenbauwerks müsste auch geändert werden können. Die Widerlager, Stützungen, Pfeiler, und Fundamente müssen versetzbar und drehbar erstellt werden.

Vergrößert oder verkleinert sich die Stützweite, so müssen die Überbau-Bauteilen um den gleichen Maß sich verändern.

Was man nicht parametrisieren kann sind feste Flügelängen oder invariante Breite des unteren Teils eines Flügel, da diese direkt von der Lage der Widerlager und der Böschungsneigung abhängen.

Diese Excel-Tabelle soll später als Steuerdatei dienen und wird an allen Bauteile angehängt. Hier wird die Methode „des tabellengesteuerten Modellierens“ verwendet. Diese Methode besitzt gewisse Vorteile gegenüber der Methode „des Sichtbarmachens von Parameter und Skizzen“. In der Excel-Tabelle sind die Variablen leichter zu finden. Denn beim „sichtbarmachen von Parametern“ muss man mehrere Schritte zurückgehen bis man die richtigen Parameter findet. Dadurch kann aus Versehen ungewollte Parameter geändert werden. Außerdem ist diese Methode sehr hilfreich bei einer Vorführung und vor allem bei einer Bearbeitung durch mehrere Entwerfer.



	A	B	C	D
1	Parameter	Wert	Einheit	
2				
3	Kreuzungswinkel_x	73,82	grd	
4	Höhe_x	8,38	m	
5	Höhe_Oberbau_x	1,097	m	
6	Breite_Fahrbahn_a_x	8,55	m	
7	n	1,5		
8	Steigung_Gradiente	1	grd	
9	Lichtehöhe_x	7,283	m	
10	Wl_links_drehen_x	0	grd	
11	Wl_links_versetzen_x	0	m	
12	Wl_rechts_drehen_x	0	grd	
13	Wl_rechts_versetzen_x	0	m	
14	Pfeiler_versetzen	0	m	
15	Pfeiler_drehen	0	grd	
16				
17				

Abbildung 26: Parameterliste

- *Kreuzungswinkel*: der Winkel zwischen den Zwei Achsen: Achse der Brücke und des Verkehrsweges
- *Lichte-Höhe*: Höhe von der Straßenachse bis zum Unterseite des Bauwerks
- *n*: Steigung 1/n der Straßenböschung
- *Wl_links_drehen_x*: Drehen des linken Widerlagers
- *Wl_links_versetzen*: Versatz des linken Widerlagers

5.3.2 Modellierungshierarchie

Als **zweiter Schritt** werden eine Modellierungshierarchie und die Abhängigkeit der Bauteile voneinander festgelegt. Dieser Modellierungsschritt wurde bereits in früheren Untersuchungen vorgeschlagen (Forbau, 2010, Wang, 2012) (siehe Vorschlag in der Abbildung 27). Man erstellt zuerst die Masterskizze. Darin werden die zwei 3D-Trassenverläufe eingegeben. Die Bauteile *Oberbau* und *Böschung* werden dann mit *Erhebung* erstellt. Anschließend werden die Überbaubauteile wie Kappen und Schotterbett, Schwelle, Schiene etc. bestimmt, falls es sich um eine Eisenbahnbrücke handelt. Das Bauteil „Arbeitsflächen“ ist abhängig von den Bauteilen in der Masterskizze, nämlich von den Oberflächen des Oberbaus. Die Modellierung der Flügel, Widerlager und weiterer Gründungselemente sind wiederum abhängig von den Arbeitsflächen. Diese Bauteile werden in der Baugruppe „Unterbau“ abgeleitet. Danach werden die Überbaubauteile in einer neuen Datei „Überbau“ zusammengefügt. Zum Schluss werden dann die zwei

Baugruppen in die Datei „Brücke“ abgeleitet. So hängen die Bauteile und Baugruppen parametrisch zusammen. Dieser Schritt vereinfacht die Navigation in den Bauteilen und die Bearbeitung durch mehrere Bearbeiter.

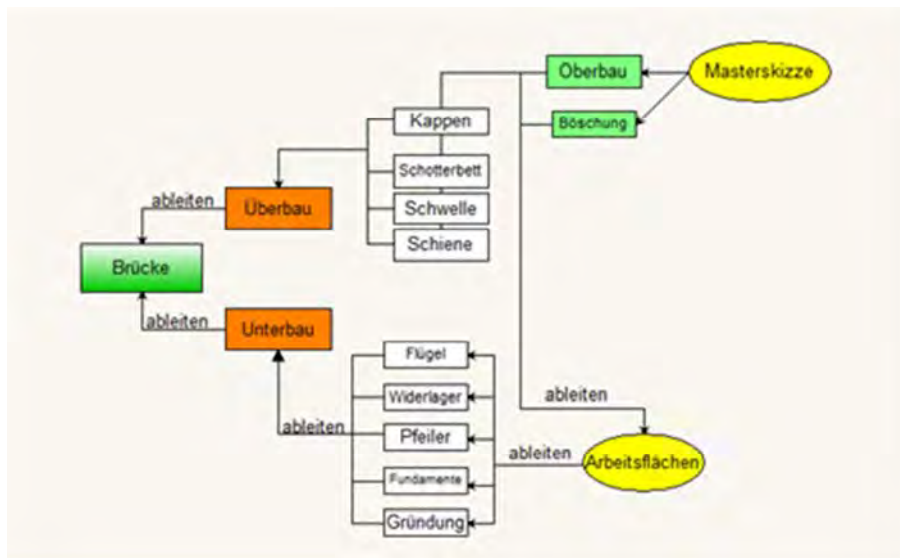


Abbildung 27: Hierarchie der Brückenbauteile

5.3.3 Modellierungsbeginn: Integration oder Eingabe von nur zwei Achsenverläufen

Die Erhebung zweier Skizzen durch eine Mittellinie der Extrusionsvorgang ist im Inventor, der zu den brauchbarsten Ergebnissen führt. Andere übliche Extrusionsfunktionen wie zum Beispiel das „Sweeping mit mehreren Pfaden und Führungsschienen“ ist mit mehr Fehlern behaftet.

Bei extremen 3D-Verlaufskurven werden die Abweichungen zu den tatsächlichen Abmessungen größer. Der Fehler liegt im Programm selbst. Die Entwurfsbedingung, dass der zu extrudierende Querschnitt parallel zur Z-Achse verlaufen soll und sich nicht ändert, wird verletzt (diese Problematik wird im sechsten Kapitel ausführlicher erklärt).

Anders als beim traditionellen Entwurf ist hier vorgesehen, das Brückenbauwerk von oben nach unten zu modellieren (dies ist im Maschinenbau auch als Top-Down-Ansatz bekannt), und zwar unter Berücksichtigung von statischen, konstruktiven Regeln und Planungsgrundlagen der Verkehrslastträger (wie z. B. Lichtraumprofil nach RAS-Q).

Der **Ausgangspunkt** der Modellierung ist der **Kreuzungspunkt der zwei Verkehrsachsen als Referenzlinien**. Die Daten der Verkehrsachsen (Lage- und Höhenplan) werden aus der Entwurfsplanung des übergeordneten Verkehrsweges aus einer CAD-Umgebung entnommen und in Inventor integriert. Von diesen zwei Achsen werden die übrigen Modellierungselemente abgeleitet.

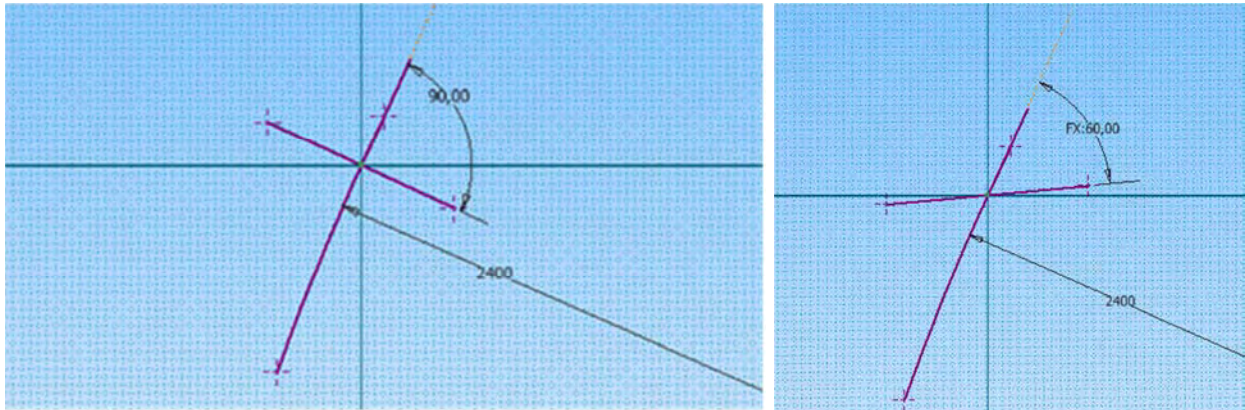


Abbildung 28: Trassenverläufe im Lageplan mit bemaßtem Kreuzungswinkel

5.3.4 Modellierung des Überbaus

Es wird hier vorgeschlagen den Überbau unter Verwendung von iFeatures, Sichtbarmachen von Skizzen und Tabellensteuerung zu Modellieren. Im 3. Kapitel wurden bereits diese Modellierungsmethoden vorgestellt. Im Folgenden sind die Wichtigsten Schritte dargestellt:

- 1) Die Modellierung beginnt mit der Erstellung des Bauteils **Masterbauteil.ipt** oder **Masterskizze.ipt**.
- 2) Im Lageplan(z.B in X-Y-Ebene) werden die zwei Achsen eingezeichnet.
- 3) Am Kreuzungspunkt wird der Winkel zwischen den Tangenten der zwei Achsen bemessen. Mit dem bemaßten Winkel ist der **erste Parameter erstellt**, nämlich der Kreuzungswinkel(siehe Abbildung 28). Danach wird die Tangente der Straße am Kreuzungspunkt als Extrusionsfläche extrudiert. Anschließend wird eine Ebene parallel zu der Extrusionsfläche und tangential zur Straßenachse am Kreuzungspunkt erstellt. Diese Ebene ist nämlich die Kreuzungsebene. Mit ihr wird später die Position der Unterbauten bestimmt (siehe Abbildung 29).

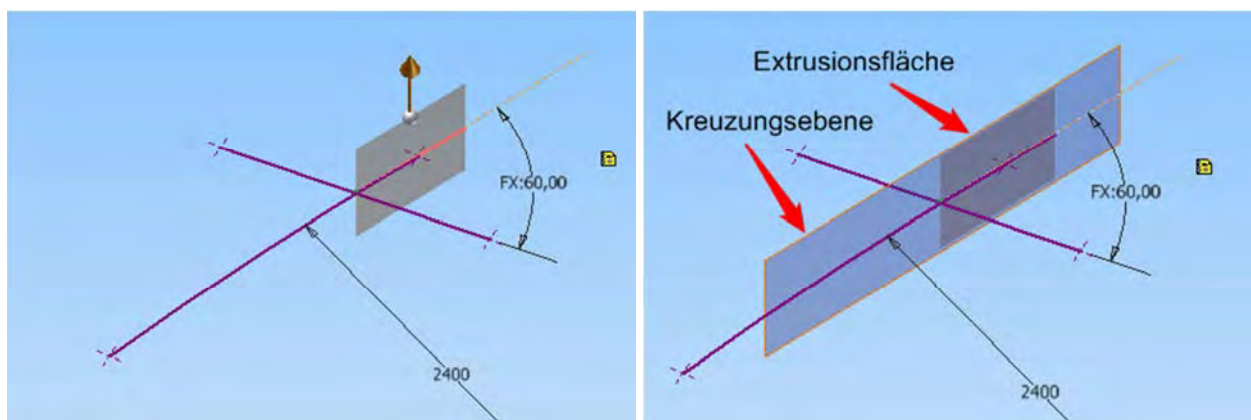


Abbildung 29: Parametrisierung der Kreuzungsebene

- 4) Die zwei Gradienten werden in neuen Skizzen eingezeichnet. Hier können die Parameter **Höhe** und **Lichthöhe** als Höhendifferenz der beiden Gradienten bemaßt werden. (siehe Abbildung 30)

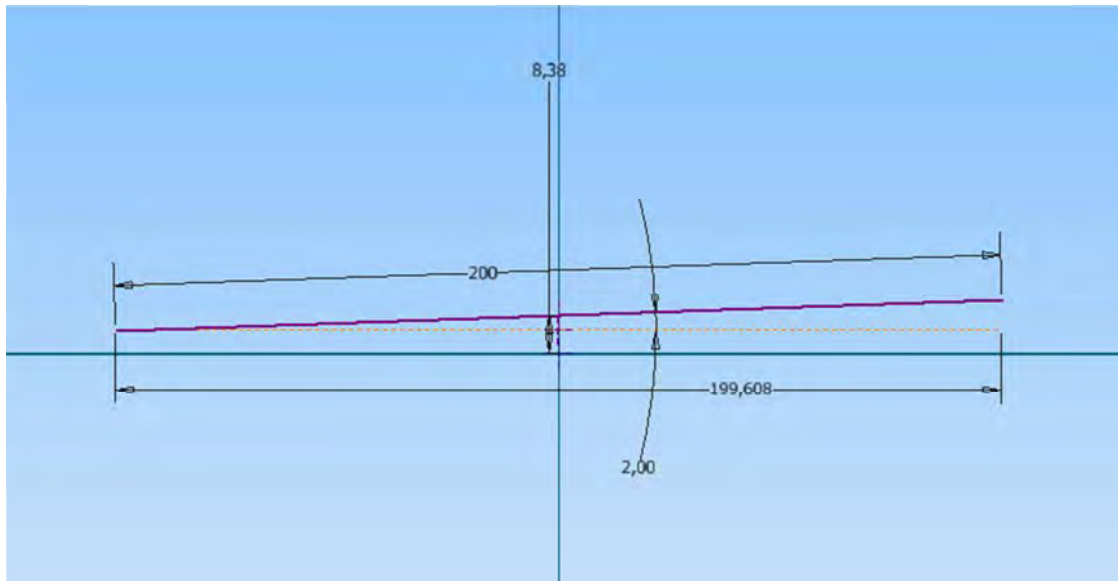


Abbildung 30: Gradiente der Brücke

Man achtet darauf, dass ein Punkt im Höhenplan dieselben X-Koordinaten besitzt wie im Lageplan (Entwurfsbedingung von Trassierungsplanung). Die nächste Abbildung soll das veranschaulichen.

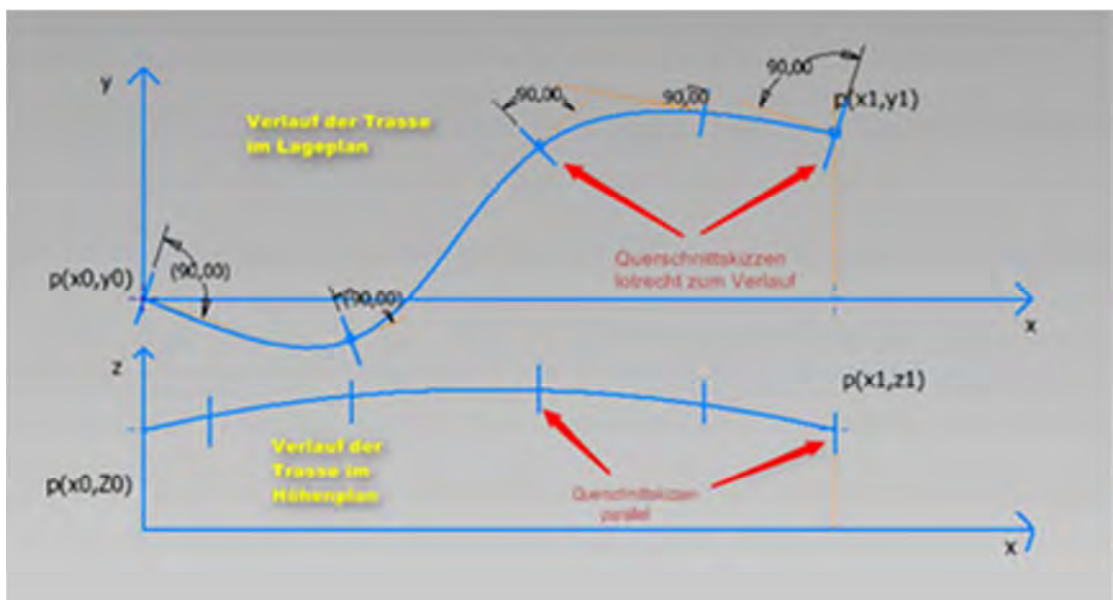


Abbildung 31: Position des Überbauquerschnitts in Lage- und Höhenplan

- 5) Die zwei Pfade werden in neuen 3D-Skizzen eingezeichnet, und zwar als Schnittkurven der Trassen im Lageplan und Höhenplan. Es besteht auch die Möglichkeit, die Trassen als Extrusionsfläche zu extrudieren und anschließend die 3D-Verläufe als Schnittkurve mit den Höhenplänen zu erstellen. Allerdings ist die erste Methode vorteilhafter, da die Extrusionsflächen in Z-Richtung durch die Bemaßung begrenzt sind. Wird später der

Parameter „Höhe“ in der Parameterliste geändert und dadurch die Extrusionshöhe der Flächen überschritten, kommen Fehlermeldungen.

- 6) Der Oberbauquerschnitt und die Skizze der Böschung werden in lotrechten Ebenen zu den 3D-Verläufen eingezeichnet. Die lotrechte Anordnung der Skizzierebenen zu den 3D-Verläufen bewirkt, dass beim Sweep-Vorgang die Skizzen im Lageplan senkrecht und im Höhenplan zu den jeweiligen 3D-Kurven parallel verlaufen (siehe Abbildung 31).

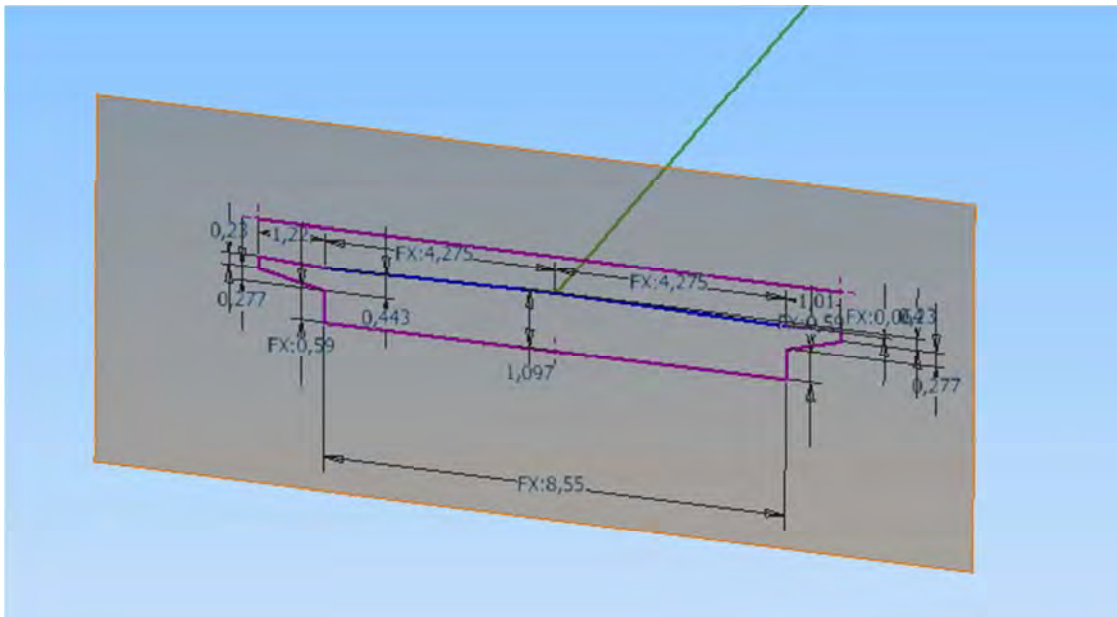


Abbildung 32: Parametrisierung des Oberbauquerschnitts

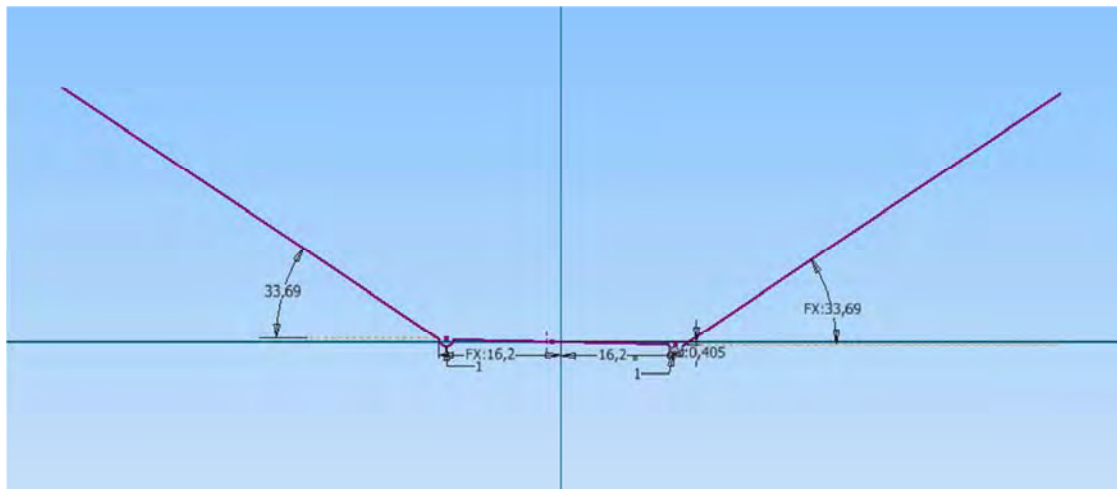


Abbildung 33: Parametrisierung der Regelböschung

An dieser Stelle kommt die Methode „iFeatures extrahieren, einfügen und ändern“ zur Anwendung. Dadurch wird die Querschnittsskizze am anderen Ende eines Verlaufs nicht noch einmal eingezeichnet. Per „Copy and Paste“ kann auch eine Skizze in eine andere Skizze kopiert werden.

- 7) Die Regelböschung wird mit einem Neigungswinkel von $\frac{1}{n} = \frac{1}{1,5}$ erzeugt (es entspricht einem Winkel von 33,69 Grad) (siehe Abbildung 33). In Abhängigkeit von der Regelböschung wird eine neue Böschung mit Neigungswinkel $\frac{1}{n}$ erstellt. Der Parameter „n“ wird als Benutzer-Parameter hinzugefügt. Im Folgenden sind die Schritte für die **Modellierung der neuen Böschung** dargestellt:
- Schnittkurve einer *erhabenen Fläche*⁵ mit der Regelböschung $\frac{1}{n} = \frac{1}{1,5}$ erstellen. Die Erhabene Fläche wird von einer Linie, die im Regelfall 70 cm über dem Oberbau liegt, an beiden Enden des 3D-Verlaufs der Brücke erzeugt (siehe Abbildung 35).
 - Schnittpunkte fangen
 - Zwei Arbeitsebene definieren
 - Eine Böschungslinie einzeichnen
 - Höhe SOK-Straße bemaßen
 - Benutzerparameter 1/n in Abhängigkeit dieser Höhe hinzufügen
 - Neue Böschungsskizze erstellen: die Höhe der Neuen Böschung entspricht der Höhe SOK-Straße
 - Neue Böschung erheben

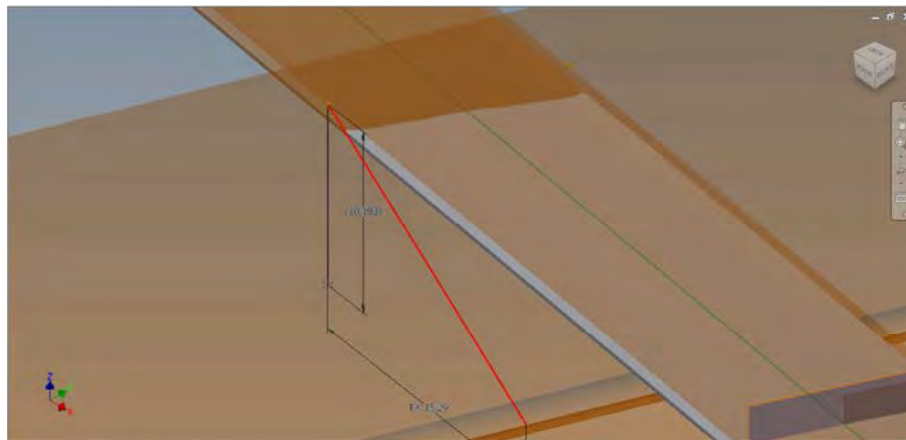


Abbildung 34: Böschungslinie

Anmerkung: Die Suche nach dem richtigen Schnittpunkt der Regelböschung und der erhabene Fläche, ist einer der wichtigsten Modellierungsschritte überhaupt. Von ihm hängt später die korrekte Modellierung des Unterbaus ab. Diese erhabene Fläche wird von einer Linie, die im Regelfall 70 cm über dem Oberbau liegt, an beiden Enden des 3D-Verlaufs der Brücke erzeugt, und zwar unter Verwendung desselben Erhebung-Befehls. Diesen Regelabstand von 70 cm wird auch parametrisiert so dass man ihn auch ändern kann (siehe *Powerpoint-Präsentation BA-Arbeit Inventor* der beigelegten CD).

⁵ Eine Erhabene Fläche ist in Inventor die Bezeichnung für die erzeugte Fläche oder Flächenverbund mittels „Erhebung“.

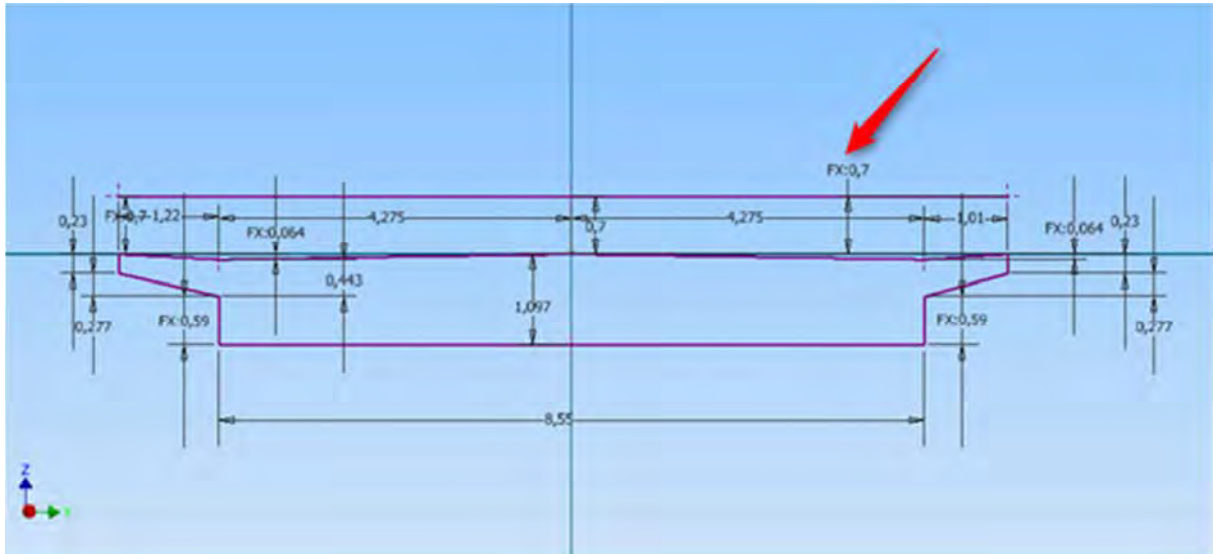


Abbildung 35: Oberbauquerschnitt und Regelabstand von 70cm der Regelböschung zum Oberbau

- 8) Sind die Querschnittsskizzen des Überbaus und der Böschung vollständig parametrisiert, so können die Volumenkörper (Oberbau, Kappen, Schotterbett usw.) erstellt werden mit der Erhebungsmethode (siehe Abbildung 36). Die Erhebung zweier Skizzen durch eine Mittellinie liefert die brauchbarsten Ergebnisse daher wird diesen Vorgang bevorzugt (im Kapitel 3 wurde bereits den Sweep-Vorgang Erhebung erwähnt, die Problematik mit der Modellierung des Oberbaus wird im 6. Kapitel näher erläutert).
- 9) Mit geometrischen Zwangsbedingungen werden die Kappen und die anderen Überbau-Bauteile zusammen mit dem Oberbau in den Querschnittsskizzen parametrisiert.
- 10) Im Modellparameter können die erwünschten Parameter mit Bemaßungen und Gleichungen, erstellt werden. So wäre die parametrische Modellierung des Überbaus vollständig. Je nach Brückenmodell kommen noch zusätzliche Parameter dazu.

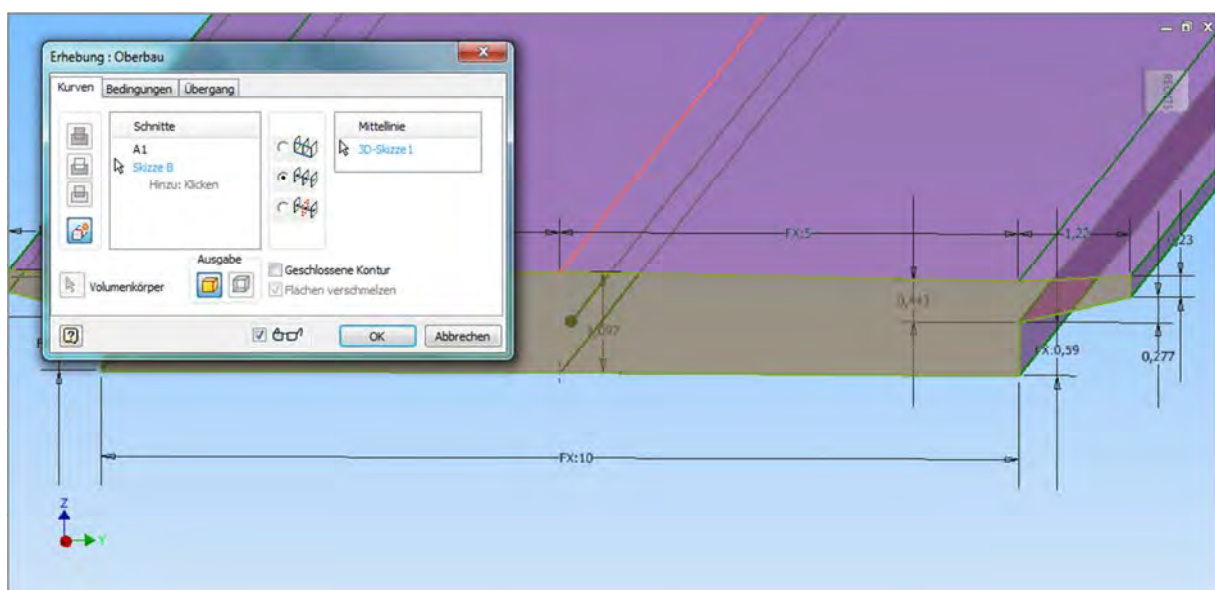


Abbildung 36: Erhebung des Oberbaus

In der nächsten Abbildung ist die Modellierung des Oberbaus und der Kappen dargestellt. Die Skizze der Kappen⁶ wurden in neuen Skizzen erstellt, dabei sind die Kappenunterkanten kollinear zur Oberbauoberkante erstellt worden. Die Parameter der Kappen z.B. dessen Abstand voneinander, wird mit der Fahrbahnbreite gekoppelt.

So wäre die parametrische Modellierung des Überbaus vollständig. Je nach Brückenmodell kommen noch zusätzliche Parameter dazu.

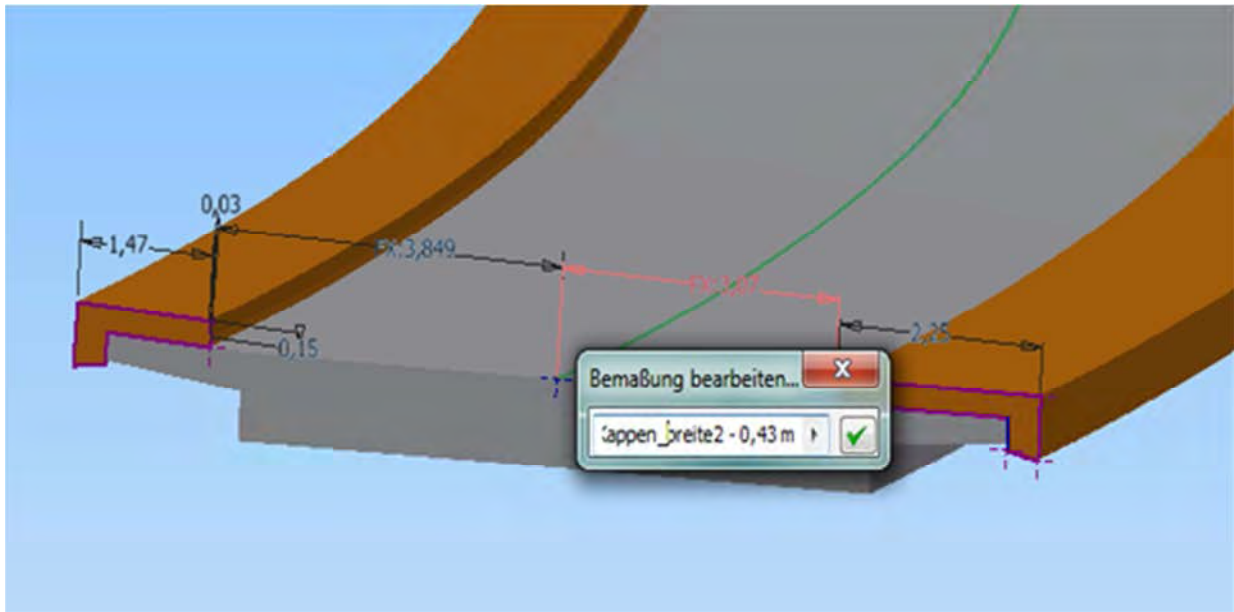


Abbildung 37: Parametrische Modellierung eines Oberbauquerschnitt und dessen Kappen

5.3.5 Modellierung des Unterbaus als Kombination von CSG-, B-Rep-Methode und parametrisches Ableiten

5.3.5.1 Arbeitsflächen erstellen

Anders als beim Überbau, wird der Unterbau vorwiegend mit der B-Rep-Methode modelliert. Man benötigt kaum eine Skizze um dessen Bauteile zu modellieren. Die Arbeitsflächen dafür werden von den abgeleiteten Elementen des Überbaus gewonnen. Im 3. Kapitel wurde die Methode des „Ableiten“ ausführlich erklärt.

Als nächster Schritt, öffnet man ein neues Bauteil und speichert diese unter den Namen Arbeitsflächen.ipt. Der Oberbau, die neue Böschung, die erhabene Fläche und die Kreuzungsebene werden unter den Ableitungsstil „Körper als Arbeitsfläche“ abgeleitet. Der Vorteil dieser Vorgang gegenüber z.B. dem Ableitungsstil „Körper als Volumenkörper“ ist, dass man die Arbeitsflächen nicht selbst erstellen muss. Das Programm leitet alle Volumen Körper bereits als Verbund von Arbeitsflächen ab. Stichpunktartig werden nachfolgend die Arbeitsschritte erläutert:

⁶ Die Parametrisierung des Überbau (Oberbau, Kappen, Fahrbahn etc) kann in einer einzigen Skizze erfolgen. Allerdings wird die Skizze wegen den vielen Constraints schneller überbestimmt.

- (1) Versatz der seitlichen Flächen des Oberbaus und deren Dehnung bis zu einer ausreichenden Länge(ca.20-30m). Mit diesem Vorgang werden die seitlichen Arbeitsflächen der Widerlager und der Flügel gewonnen.
- (2) Versatz der Unterseite des Oberbaus: Hiermit wird die Stützform gewonnen. Ist der Oberbau direkt auf die Stützungen (Widerlager und Pfeiler) gelagert, so wird die Unterseite direkt als angrenzenden Flächen verwendet. Somit sind Oberbau und Unterbau miteinander gekoppelt.
- (3) „Trennen“ der Böschung mit der erhabenen Fläche zur Gewinnung des Schnittpunktes aus der Schnittkurve. Mit dem Befehl „Trennen“ kann ein Volumenkörper in Teilen zerlegt oder gestutzt werden.
- (4) „Trennen“ von Böschung und die seitlichen Versatzflächen
Bis zum 4. Schritt sollte der Oberbauquerschnittsform auf die Böschungsseiten wiedererkennbar sein...

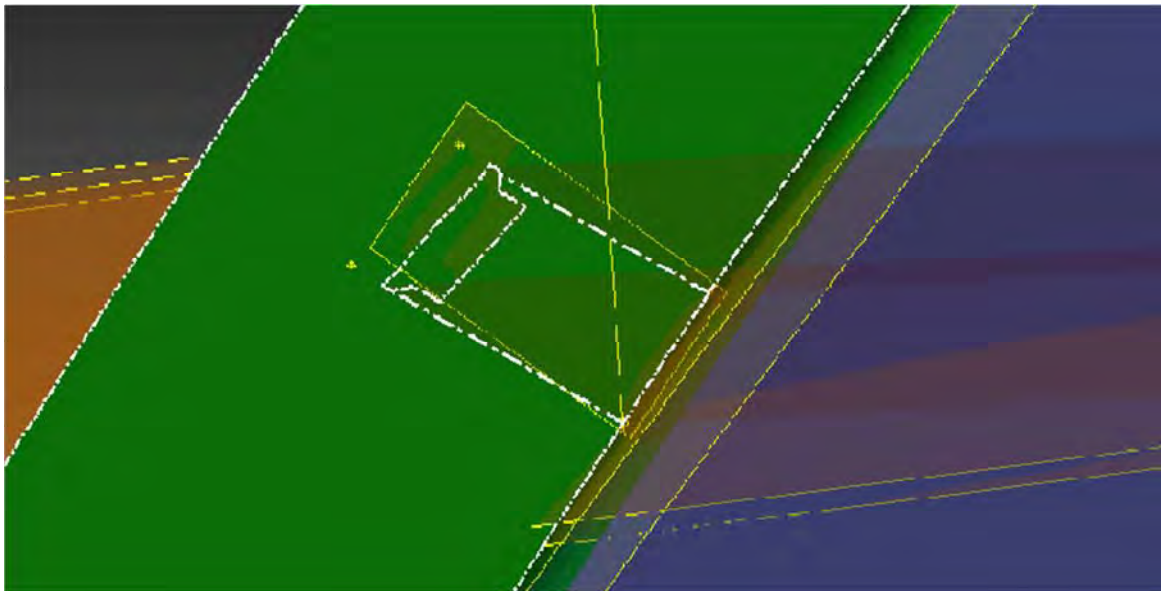


Abbildung 38: Arbeitsflächen-, Stützform der Widerlager

- (5) Auffangen der kritischen Schnittpunkte zwischen Straßenmulde und den Seitlichen Versatzflächen auffangen. Die Parameter: Versatz und Drehen der Widerlager werden von diesem Punkt erstellt.
- (6) Auffangen der Schnittpunkte der Erhabene Fläche und der Böschung
- (7) Erstellen zweier Arbeitsachsen parallel zur Z-Achse entlang der kritischen Schnittpunkten erstellen: Hiermit wird ein Element für die Drehbarkeit der einzelnen Widerlager erstellt. Das Widerlager wird gegen den Uhrzeigersinn um diese Achse gedreht falls es um das linke Widerlager handelt.
- (8) Versatz der Kreuzungsebene bis zum kritischen Schnittpunkt jeweils links und rechts.
- (9) Mit den versetzten Ebenen im 8. Schritt und die Arbeitsachsen werden drehbare Ebenen erstellt.
- (10) Erneuter Versatz der drehbaren Ebenen (jeweils für die linke und die rechte Seite).

Bennen der Arbeitsebenen: Die drehbaren werden zum Beispiel: „Widerlager_drehen_links/rechts“ genannt und die Versetzten „Widerlager_versetzen_links/rechts“. Es wurde hiermit weitere vier Parameter aus der Parameterliste erstellt.

Aus den oben ermittelten Schnittpunkten werden Arbeitsebenen für die Böschungslinien erzeugt. Man benötigt jeweils drei Schnittpunkte für eine Ebene. Diese zwei neuen Ebenen werden um einen Meter nach unten versetzt. Bis zu diesem Schritt wurden die wichtigsten Arbeitselemente für die automatische Kopplung des Oberbaus mit dem Unterbau erstellt.

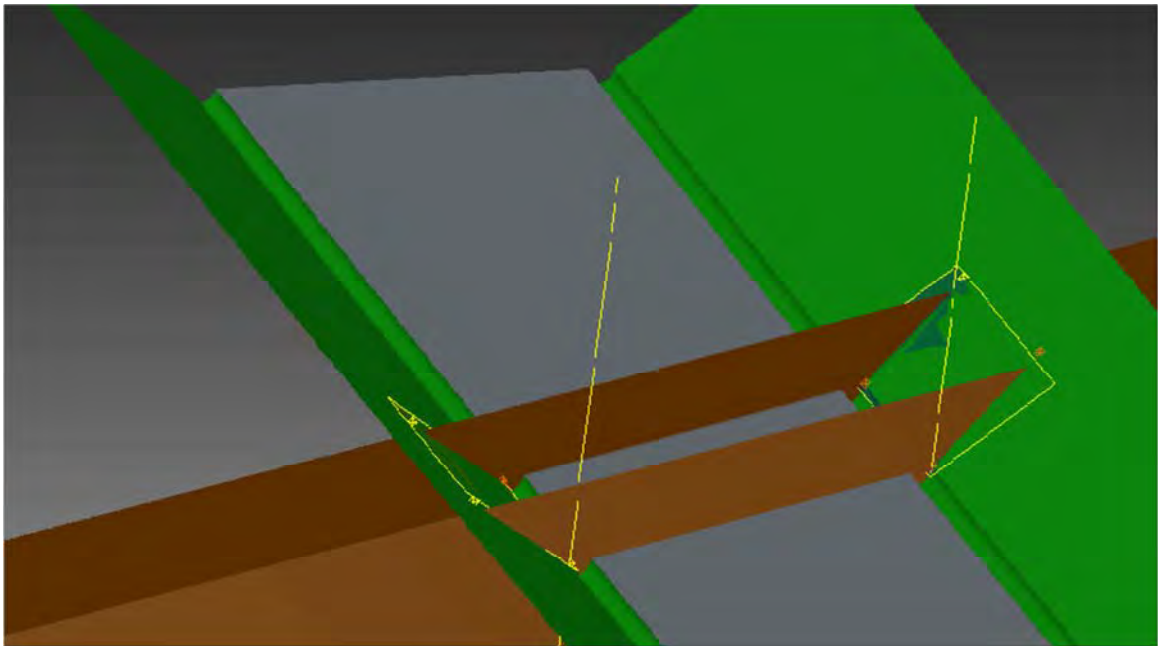


Abbildung 39: Arbeitsgeometrien: Widerlagerseiten, Arbeitsachsen, Flügelunterkante, Arbeitspunkten

Zusätzliche Konstruktionsebenen werden aus diesen Arbeitsebenen erstellt um die Volumenkörper des Unterbaus zu Modellieren.

5.3.5.2 Ableiten der relevanten Arbeitsflächen in einer neuen *.ipt-Datei:

Da es mit den vielen Arbeitsgeometrien etwas unübersichtlich wird, wird hier empfohlen die relevanten Arbeitsflächen in einer neuen *.ipt-Datei abzuleiten (z.B. mit den Namen: Unterbau.ipt).

5.3.5.3 Modellierung der Widerlager , der Flügel und der Fundamente

Die Formen der Widerlager werden aus den Stirnflächen, den Versatzflächen für die Widerlager und den Oberbauunterseiten unter Verwendung des Befehls „Formen“ erstellt. Mit dem *Formen* werden Volumenkörper aus ungestutzter Flächengeometrie erstellt (Autodesk Inventor, 2013). Zusammen mit dem Befehl „Trennen „, sind das die wichtigsten Werkzeuge um die Volumenkörper des Unterbaus zu modellieren. Der Befehl „Trennen“ wird auch verwendet um den Überbau in seinen Richtigen längen zu stutzen. Die Stirnflächen der Widerlager werden um den richtigen Maß versetzt und dann auch als Trennwerkzeuge dienen. Die Arbeitsebenen die für die Begrenzung der Bauteilunterseiten benötigt werden, z.B. für die Fundamentunterseiten

werden einfach als paralleler Versatz der x-y-Ebene um den kritischen Punkt beliebig nach unten oder nach oben verschoben.

Beim Modellieren der Brücke im sechsten Kapitel werden die Schritte ersichtlicher, daher wird hier nicht zu sehr auf die Parametrisierung jedes Element in Details eingegangen. In (der Abbildung 35) ist die Ableitung der parallelen Flügel dargestellt. Die Flügel und die Widerlager werden zusammen erstellt. Hierfür werden die B-REP und CSG-Methode verwendet. Man achtet darauf dass die ausgewählten Geometrien geschlossene Volumina bilden. z.B Für die Grundform der Widerlager werden die folgenden 6 Arbeitsflächen benötigt: Stirnfläche der Widerlager, Versatz der Widerlagerstirnfläche, Widerlagerseiten (jeweils links und rechts), Oberbauunterseite, Widerlagerunterseite.

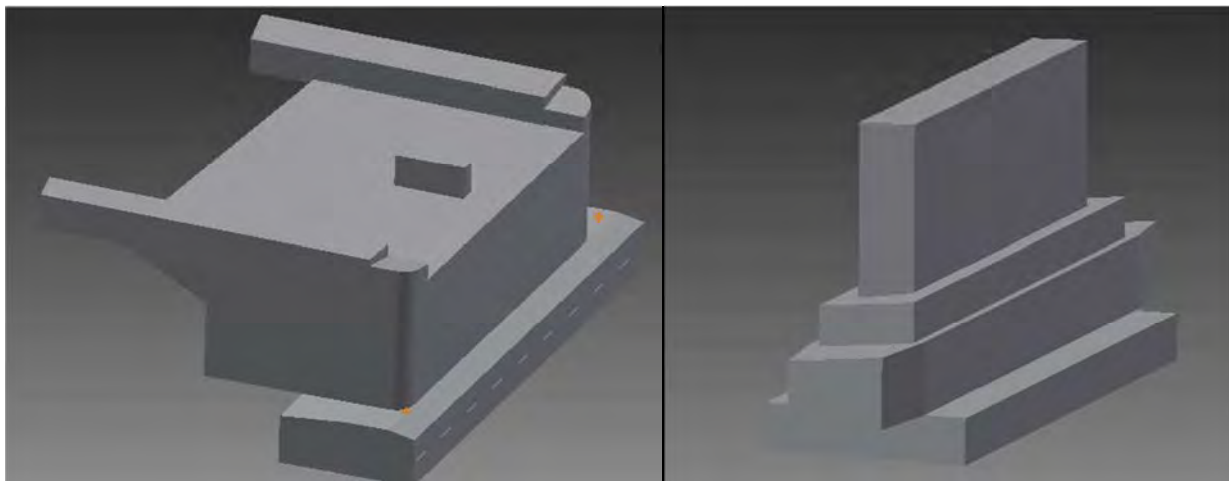


Abbildung 40: Unterbauten: Widerlager, Flügel, Stützwand, Fundamente, Füllmaterial, Pfeiler mit Anprallssockel

5.3.6 Modellierung von Stützen, Pfeiler, Gründungselemente

Damit es im Modellbrowser nicht zu unübersichtlich wird, wird ab hier empfohlen die anderen Bauteile wie Pfeiler, Stützungen, Gründungen (Bohrpfähle) in neuen Bauteildateien des Formats *.ipt zu modellieren. Das Vorgehen ist analog wie für die Widerlager und die Flügel und deren Fundamente. Die Konstruktionsgeometrien werden einfach von dem Bauteil **Arbeitsflächen.ipt** abgeleitet. Boolesche Operationen kommen auch zur Anwendung wenn es darum geht Rundungen, Fasen, Kombinationen von Formen, Abtrag und Füll-Material zu erzeugen (siehe Abbildung 40)

5.3.7 Stützen des Überbaus

Die Überbau-Bauteile wurden bis jetzt in ihrer richtigen Längen noch nicht gestutzt weil man unter anderem die Flügelenden benötigt werden, um die Kappen zu stützen. Es ist etwas widersprüchlich zum *Top-Down-Vorschlag*, dass Bauteillängen des Überbaus von den Unterbau-Bauteilen abhängen und nicht umgekehrt. Der Grund dafür ist, dass beispielweise die Flügellängen von der Böschungsneigung und die Lage der Stirnflächen abhängen. Dieser wichtiger Konzeptvorschlag (Bauteillängen des Überbaus von dem Unterbau abhängig zu machen) bewirkt das beim Versatz des Widerlager, die ganzen Überbau-Bauteile sich auch

verlängern oder verkürzen. Natürlich könnte man diesen Modellierungsschritt mit Regeln erzwingen aber diese scheinbare „Schleife“ (Ableiten von Unterbau-Elementen: Widerlagerstirnflächen und Flügelenden zusammen mit den Überbau-Volumenkörper in ein neues Bauteil Überbau.ipt) ist einfacher zu erzeugen.

In das neue Bauteil **Überbau.ipt** werden nur die Volumenkörper (Oberbau, Kappen, Schiene, Schotterbett, Schwelle usw.) abgeleitet. Vom Bauteil Unterbau.ipt werden die angrenzenden Arbeitsebenen wie Widerlagerstirnfläche, Oberbauende, Flügelende (jeweils links und rechts), zusammen mit Böschung abgeleitet. Mit dem Befehl „trennen“ werden die Elemente gestützt.

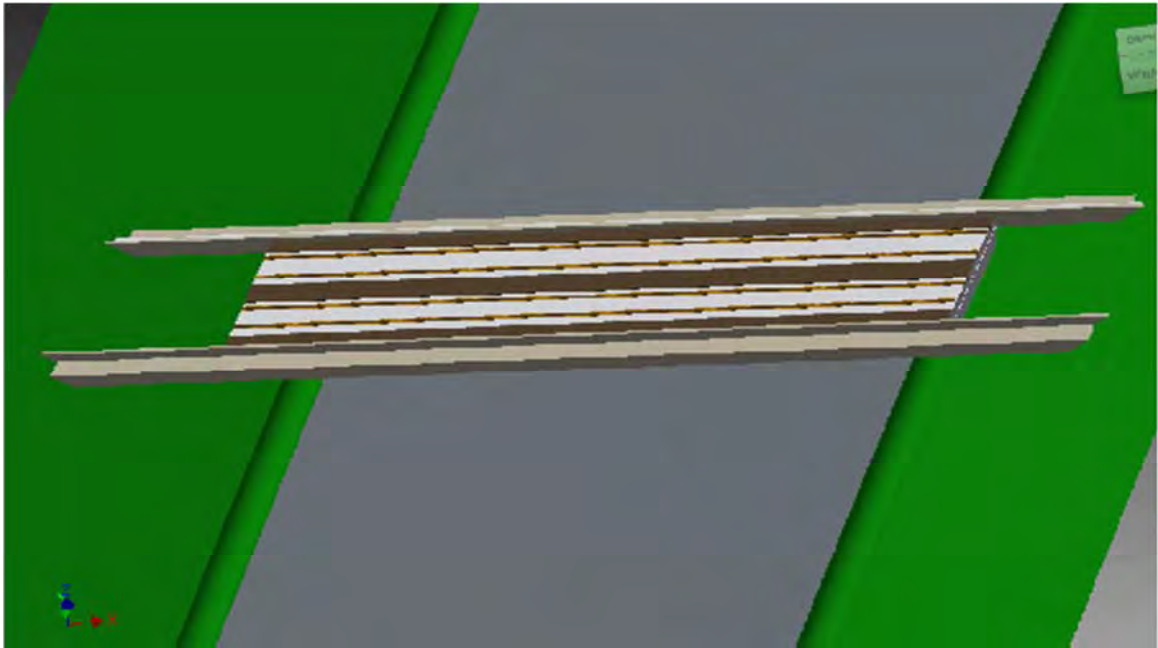


Abbildung 41: Assemblierung und Stutzen der Überbauten

5.3.8 Verfeinern des Modells

5.3.8.1 Parametergrenzen festlegen

Im iLogic-Browser jedes Bauteils, können die jeweiligen Grenzen der Parameter festgelegt werden. Beispielsweise dürfen die Widerlager nur bis zu einem bestimmten Winkel verdreht werden. Im folgenden Absatz sind die einzelnen Schritte zur Verdrehung der Widerlager gegen den Uhrzeigersinn dargestellt:

1. Benutzerparameter Modellparameterliste hinzufügen (falls noch nicht erstellt).
2. Im iLogic_Browser: Regeln hinzufügen.
3. Den Regel einen Namen geben.
4. Button Parametergrenzen auswählen oder den Quellecode im Dialogfeld selber eingeben.
5. Im Quellcode werden die Regeln als kleines Programm eingegeben. Höchst- und Mindestwerte werden festgelegt.
6. Anwenden und bestätigen.

Unten steht beispielhaft der Quellcode für die Festlegung der Grenzwerte des Parameters „Widerlager_links_drehen“. Der Mindestwert wird zu null Grad gesetzt, weil der Widerlager

nicht in die Straßenmulde liegen darf. Und der Höchstwert zu 45 Grad, weil es eher unwahrscheinlich ist, dass der Widerlager um einen größeren Winkel sich verdrehen soll. Die „Klassen“ für die Buttons sind bereits im iLogic-Browser enthalten.

Quellcode:

```
' ***** Widerlager_drehen Grenzwerte *****
```

```
If Widerlager_links_drehen < 0.0
```

```
Widerlager_links_drehen = 0.0
```

```
MessageBox.Show("Der zulässige Mindestwert für diesen Parameter lautet: " & Widerlager_links_drehen & vbCr & "Der Wert wird automatisch in den Mindestwert geändert.", "Regel für Mindestwert", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
```

```
ElseIf Widerlager_links_drehen > 45.0 Then
```

```
Widerlager_links_drehen = 45.0
```

```
MessageBox.Show("Der zulässige Höchstwert für diesen Parameter lautet: " & Widerlager_links_drehen & vbCr & "Der Wert wird automatisch in den Höchstwert geändert.", "Regel für Höchstwert", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
```

```
End If
```

Erscheint der Parametername in Blau, das weist daraufhin dass der Parameter gefunden wurde in der Modellparameterliste. Analog kann man andere Parametergrenzen festlegen oder Regeln hinzufügen.

Beim Überschreiten der Grenzen wird dem Anwender gewarnt dass der Höchst- oder Mindestwert über- oder unterschritten wurde.



Abbildung 42: bestimmende Regel: Widerlager_links_drehen und Fehlermeldung

5.3.9 Tabellensteuerung der Parameter

In jedes Bauteil wird die Excel-Tabelle angehängt. Das Vorgehen ist bereits im Kapitel 3 dargestellt.

5.6.10 Die Brücke als abgeleitetes Bauteil und nicht als Baugruppe

Die Assemblierung der Brückenbauteile erfolgt in das DIN-Format *.ipt und nicht in das DIN-Format *.iam als Baugruppe. Die Bauteile des Oberbaus, des Unterbaus, die Pfeiler, die Stützen und Gründungen werden in ein neues Bauteil abgeleitet. Der riesen Vorteil ist das man die Bauteile nicht neu platzieren muss. Die notwendigen Funktionen die man normalerweise in der Baugruppe benötigt sind auch in der Bauteil-Format *.ipt enthalten.

Die Assemblierung der Bauteile in einer Baugruppe stellt nur für einen erfahrenen Konstrukteur keine Herausforderung dar.

Die Parameterliste wird genau wie an die anderen Bauteile angehängt, sodass man direkt darauf zugreifen kann.

Anmerkungen:

- Die Parameterliste soll in demselben Projektverzeichnis sein.
- Die erfolgreiche Umsetzung dieses Konzeptes setzt eine Einarbeitung in das Programm Inventor voraus.
- Man muss darauf achten das beim Ableiten eines Elements die Eigenschaften „exportieren“ eingeschaltet ist. Oft wird auch die Eigenschaft „adaptiv“ benötigt.
- Stellt der Speicherplatz für spätere Anwendungen von Algorithmen ein Problem dar, wird empfohlen die Anzahl der Abgeleiteten Bauteile zu reduzieren in dem man überprüft ob Elementen nicht mehrmals abgeleitet wurde (Element ist in mehreren Bauteile vorhanden).
- Nach Festlegung eines Parameters oder Regeln, sollte man immer geprüft werden ob alles wie gewünscht funktioniert, da Fehler gerne in neue Elemente übertragen werden.
- Ein falsch erzeugtes Element kann erneut definiert werden. Ein Nachteil dabei ist, dass allerdings Abhängigkeiten zu anderen Elementen dadurch gelöst werden könnten.
- Nach der Implementierung kann die Parameterliste in der Brücke.ipt-Datei aufgerufen werden und die Parameter mit unterschiedlichen Werten belegt werden.

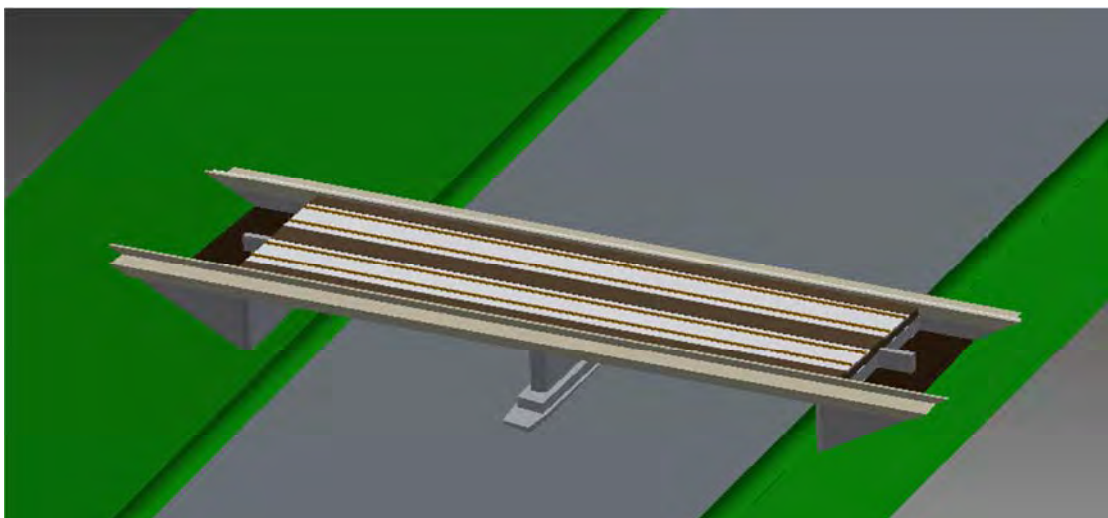


Abbildung 43: die Brücke

6 Entwurf einer 3D-Eisenbahnbrücke

6.1 Brückendaten

Die zu modellierende Eisenbahnbrücke überkreuzt die untergeführte Straße in einem Winkel von 82 Gon. Es handelt sich um eine zweifeldrige Plattenbrücke mit einer gesamt Lichtweite von 32,40 m. Die Widerlager und die Flügelseiten sind monolithisch verbunden und werden als zwei Fertigteile seitlich der Böschung erstellt und dann zusammen geschoben. Der Oberbau wird direkt auf den Widerlagern gelagert und bildet somit mit den Unterbau-Bauteilen ein Rahmenbauwerk in semi-integraler Bauweise. Die Konstruktion wird in der Mitte mit einer 35 cm dicken Wand monolithisch gestützt. Weitere Informationen betreffen die geometrische Gestaltung der Brücke sind aus dem Bauvertrags- und Ausführungsplan entnommen worden. Neben dem Ausführungsplan sind weitere Detailzeichnungen vom Planungsbüro Obermeyer GmbH zur Verfügung gestellt worden.

6.2 Modellierung der Brücke

Basierend auf theoretischen Grundlagen und bereits vorgestellten parametrischen Modellierungsmethoden wird nachfolgend das im Kapitel 5 vorgeschlagene Modellierungskonzept auf die Eisenbahnbrücke angewandt und umgesetzt.

6.2.1 Parametrische Modellierung des Überbaus

Die Modellierung des Oberbaus geschieht mit dem Extrusionsvorgang „sweeping“ entlang des linken, rechten und mittleren Trassenverlaufs. Diese Methode konnte bereits bei früheren Untersuchungen zur parametrischen 3D-Modellierung von Brückenbauwerken erfolgreich mithilfe anderer Volumenmodellierer wie Siemens NX oder Revit Structure umgesetzt werden. So wurde der Oberbau in Abhängigkeit der Längs- und Querneigung des Trassenverlaufs dargestellt (Obergrießer, 2010). Dieser Vorgang ist in Inventor nicht möglich oder liefert falsche Ergebnisse. Die Z-Achse des Querschnitts (sofern die Z-Achse natürlich in der Skizzierebene liegt, muss parallel globalen Z-Achse sein, d.h. die Skizze muss zur Kurve ausgerichtet sein (vgl. Fiermonte, 2013).

Im Folgenden wird diese Problematik anhand von Experimenten dargestellt.

ABLAUF: Anhand drei unterschiedlichen 3D-Trassen, deren Komplexität von Trasse zu Trasse zunimmt, werden die Extrusionsvorgänge *Sweeping* und *Erhebung* untersucht. Dabei wird ein bemaßter Plattenquerschnitt am Anfang und am Ende jedes Verlaufs lotrecht platziert. Die Extrusionsvorgänge werden durchgeführt, anschließend werden Schnitte abgeleitet und bemessen.

Trassenverläufe:

1. Trasse: Schnittkurve einer Geradenverlauf im Lageplan (in x-y-Ebene) und einer linearen Gradienten mit einer Steigung von 4% (in x-z-Ebene)

2. Trasse: Schnittkurve einer Gerade im Lageplan und einem Bogen (Radius 100m) im Höhenplan(x-z-Ebene)
3. Trasse: Schnittkurve zweier Bögen in Lage und Höhenplan mit jeweils einem Radius von 100m

Ergebnisse:

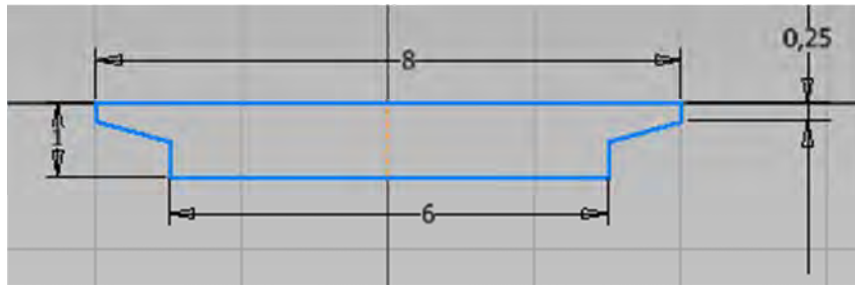


Abbildung 44: Abmessungen des zu extrudierenden Querschnitts

Extrusion entlang der 1.Trasse:

Bei allen drei Extrusionsvorgängen wurden Abweichungen zu den tatsächlichen Abmessungen festgestellt. Beim *Sweepen parallel* vergrößert sich die Bauhöhe um 1,2% dagegen verringert sich die Querschnittsbreite um 4%. Der *senkrechtem Sweepvorgang* und *Erhebung* zeigen gleiche Veränderungen. Nur die Bauhöhe hat sich vergrößert, nämlich um 1,2%. In der folgenden Abbildung ist die Zeichnungsableitung für die Erhebung dargestellt.

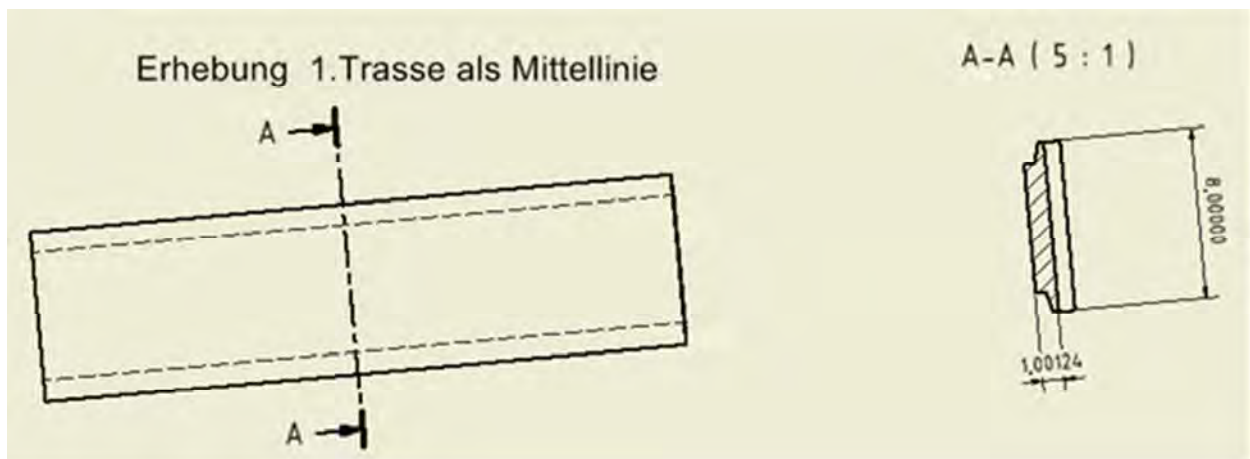


Abbildung 45: Resultat des Extrusionsvorgangs Erhebung durch die 1.Trasse als Mittellinie

Extrusion entlang der 2.Trasse:

Es ist in den nächsten Abbildungen ersichtlich dass der Sweepvorgang *parallel zum Verlauf* nicht anwendbar ist, da der Querschnitt tordiert wird. Die *Erhebung* und der *senkrechter Sweepvorgang*, zeigen weiterhin gleiche Veränderungen. Nur die Bauhöhe des Querschnitts ist geändert worden, und zwar um 8%.

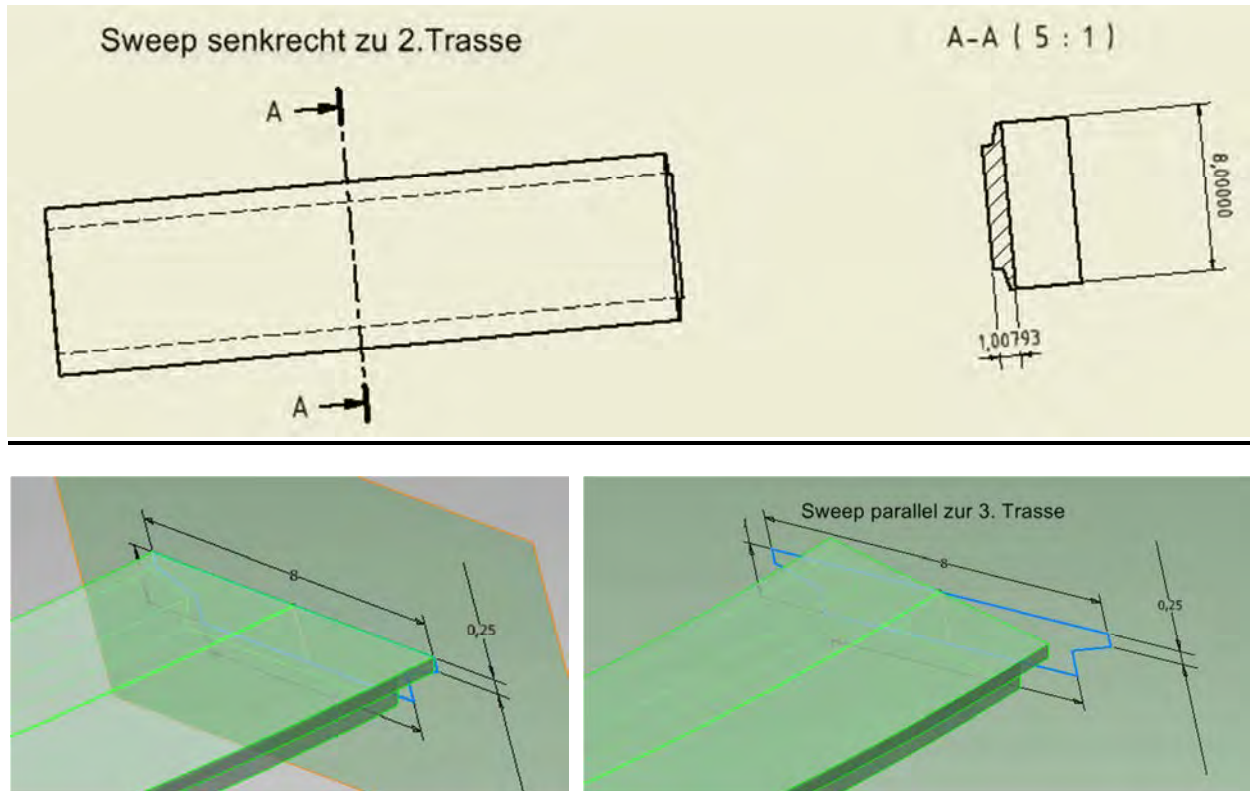


Abbildung 46: Versuche Sweep parallel zu 2. und 3. Trasse

Extrusion entlang der 3.Trasse:

Der Extrusionsvorgang *Erhebung* liefert bei dieser Trasse bessere Ergebnisse als das Sweeping senkrecht zum Pfad. Die Querschnittsbreite hat sich dabei um 0,5‰ vergrößert während die Bauhöhe ist um 2‰ vergrößert worden. Beim *senkrechten Sweeping* die Torsion des Querschnitts wurde deutlicher mit dieser Trasse (siehe Abbildung 37).



Abbildung 47: Resultat der Erhebung 3.Trasse als Mittellinie

Fazit: Obwohl die Querschnittsänderungen hier sehr gering und annähernd gleich sind, nach weiteren Untersuchungen mit extremen Kurven, wurde festgestellt dass die Erhebung die bessere Variante ist um den Überbau zu modellieren. Die Versuche für einen *Sweepvorgang* mit

mehreren Führungsschienen lieferten unbrauchbare Ergebnisse. Der Querschnitt wurde sowohl in der Höhe als auch in der Breite tordiert.

Daher wird hier empfohlen eine Brücke mit der Erhebungsmethode zu modellieren. Bei geraden Brücken und Brücken mit großen Radien sind diese Fehler im Toleranzbereich. Bei kleinen Radien wird dann die Anwendung von *Autodesk Inventor* kritisch. Es muss in dem Fall untersucht werden ob die Querschnittsänderungen noch akzeptabel sind.

6.2.1 Parametrisierung des Regelquerschnittes

Im ersten Modellierungsschritt werden die zwei Achsen in einer Masterskizze eingezeichnet. Die Modellierung des ersten Parameters „Kreuzungswinkel“ können, wie im Modellierungskonzept vorgeschlagen, problemlos erstellt werden. Nach weiteren Modellierungsschritten werden die 3D-Verläufe als Schnittkurve von Trassenverläufen im Lage- und Höhenplan erstellt (Trassierungsdaten siehe CAD-Zeichnungen). Beim Bau-km 28+118 besitzt die Autobahn einen Radius von 2400m. Das Trassierungselement der Schiene wird im Lageplan mit einer Gerade angenähert. Im Höhenplan besitzt die Trasse eine Steigung von 2%. Nach Integration dieser Verläufe im Lage und Höhenplan, können die Referenzlinien als Schnittkurve erzeugt werden. In einer lotrechten Ebene, am einen Ende der Oberbautrassen kann der Regelquerschnitt des Plattenquerschnitts parametrisiert werden (siehe Abbildung unten). Die geometrischen Informationen des Überbauplattenquerschnitts werden dem Ausführungsplan entnommen. Eine Kopie der Querschnittsskizze wird am anderen Ende des Verlaufs mit der iFeature-Methode platziert. Die Parametrisierung des Querschnitts erfolgt durch Festlegung bestimmter Maße und weiterer Zwangsbedingungen, wie gegenseitige geometrische Ausrichtung (Koinzidenz, Kollinearität, Konzentrizität, usw.)

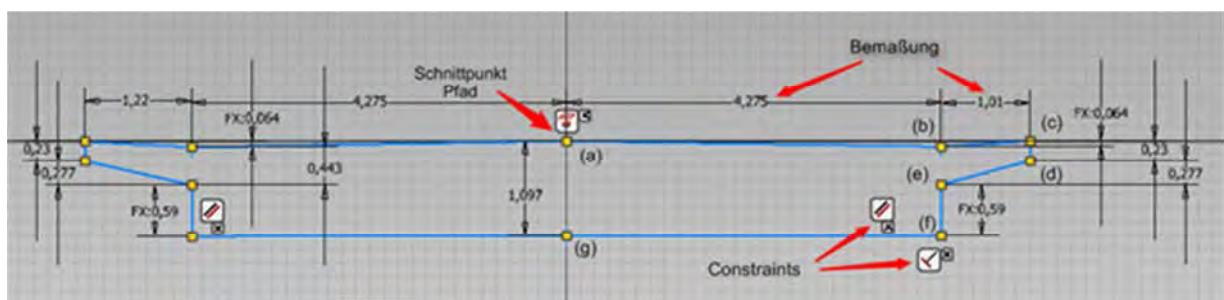


Abbildung 48: Parametrisiertes Regelquerschnitt des Vollplattenquerschnitts

Analog erfolgt die Parametrisierung der Skizzen für die Böschung der Unterführung. Die Böschungsseiten sollten vor der Fertigstellung des Konzeptes mit der Bemaßung des Winkels zwischen Böschungslinie und einer horizontalen Tangente an der Straßenmulde parametrisiert werden. Dieses Vorgehen hat sich aber später als ungenügend erwiesen, denn man möchte nicht den Böschungswinkel wissen, sondern die Neigung $1/n$ der Böschungslinie. Nach weiteren Überlegungen konnte dieses Problem gelöst werden und wurde im Nachhinein als Konzeptschritt übernommen(siehe Abschnitt 5.1.5). Die Ergebnisse werden schließlich mit den Maßen aus dem Ausführungsplan verglichen (z.B. Länge der Flügel). Unter Berücksichtigung der richtigen Parametereinstellungen (Kreuzungswinkel, Lichthöhe usw.) kann daraus der Oberbaukörper und die Böschung *erhoben* werden.

6.2.3 Parametrisierung der Kappen

Der Abstand der Kappen wird mit der Breite des Oberbaus in Abhängigkeit gesetzt und mit weiteren Zwangsbedingungen beaufschlagt (kollineare Abhängigkeit zwischen Oberbau-Oberkante und Kappen-Unterkante; feste Abmessungen für Kappen und Kragarme; Relation zwischen Fahrbahnbreite und Abstand der Kappen).

In der nächsten Abbildung ist die Parametrisierung des Oberbaus und der Kappen dargestellt.

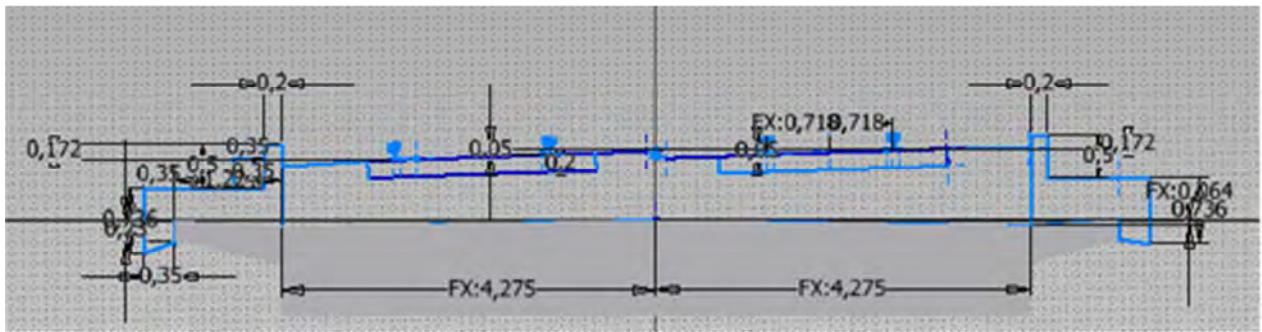


Abbildung 49: Kopplung der Kappen und der Fahrbahn an den Oberbau

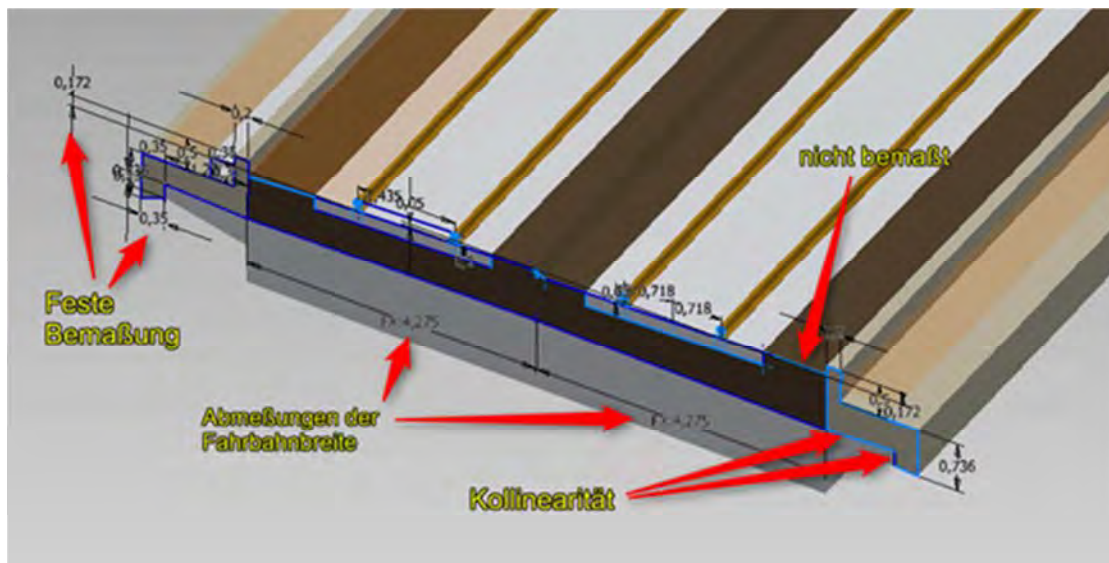


Abbildung 50: Kopplung der Kappen mit dem Überbau

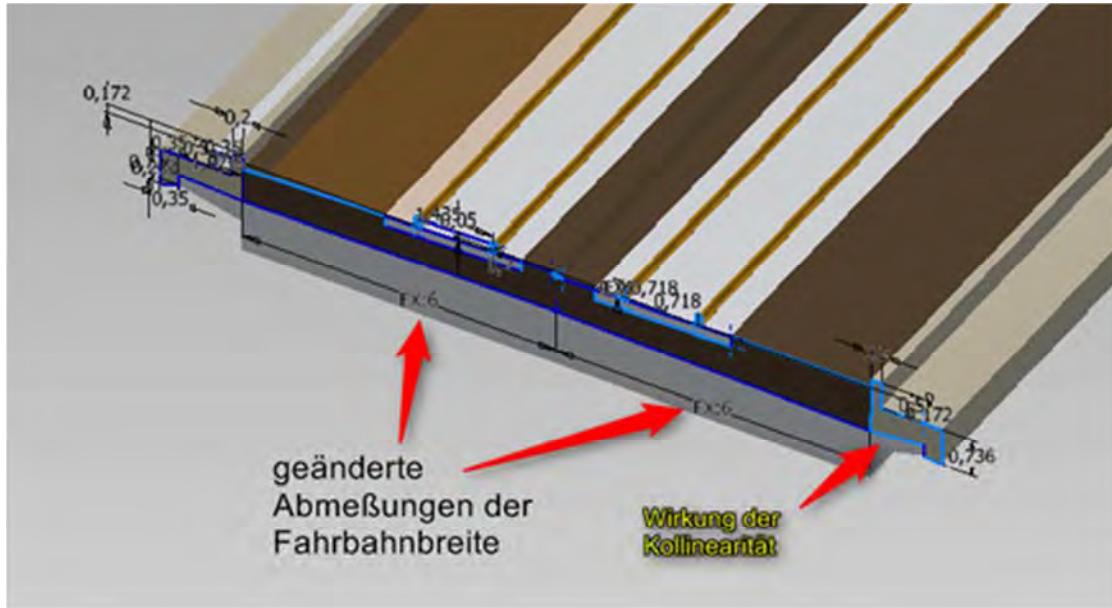


Abbildung 51: Wirkung der Parametrisierung auf die Überbau-Bauteile

6.2.4 Parametrisierung des Schotterbetts, der Schwellen und der Schiene

Das Schotterbett, die Schwellen und die Gleise wurden analog zur Modellierung der Kappen erstellt. Die Überbau-Bauteile können auch in einer einzigen Skizze modelliert werden. Das hat Vor- und Nachteile. Nachteilig ist, dass sich Constraints mit höherem Aufwand anpassen lassen. Der Vorteil ist, man hat direkter Zugriff auf andere Abmessungen und die Kollinearität der angrenzenden Kanten wird nicht mehr benötigt.

Weitere Elemente wie Geländer können direkt oder in anderen Bauteil-Dateien erstellt werden.

Die nächsten Abbildungen bilden ein Portfolio der parametrisierten Überbau-Bauteile.

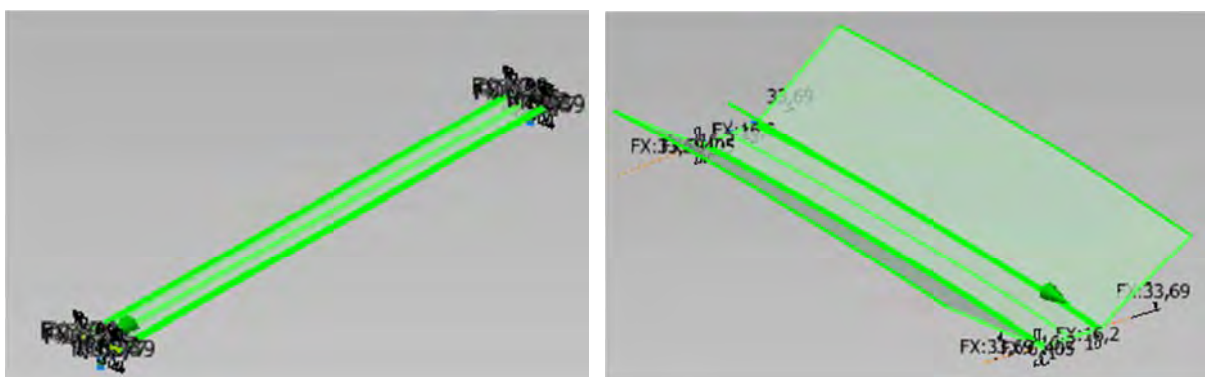


Abbildung 52: Erhebung des Oberbau und der Böschung

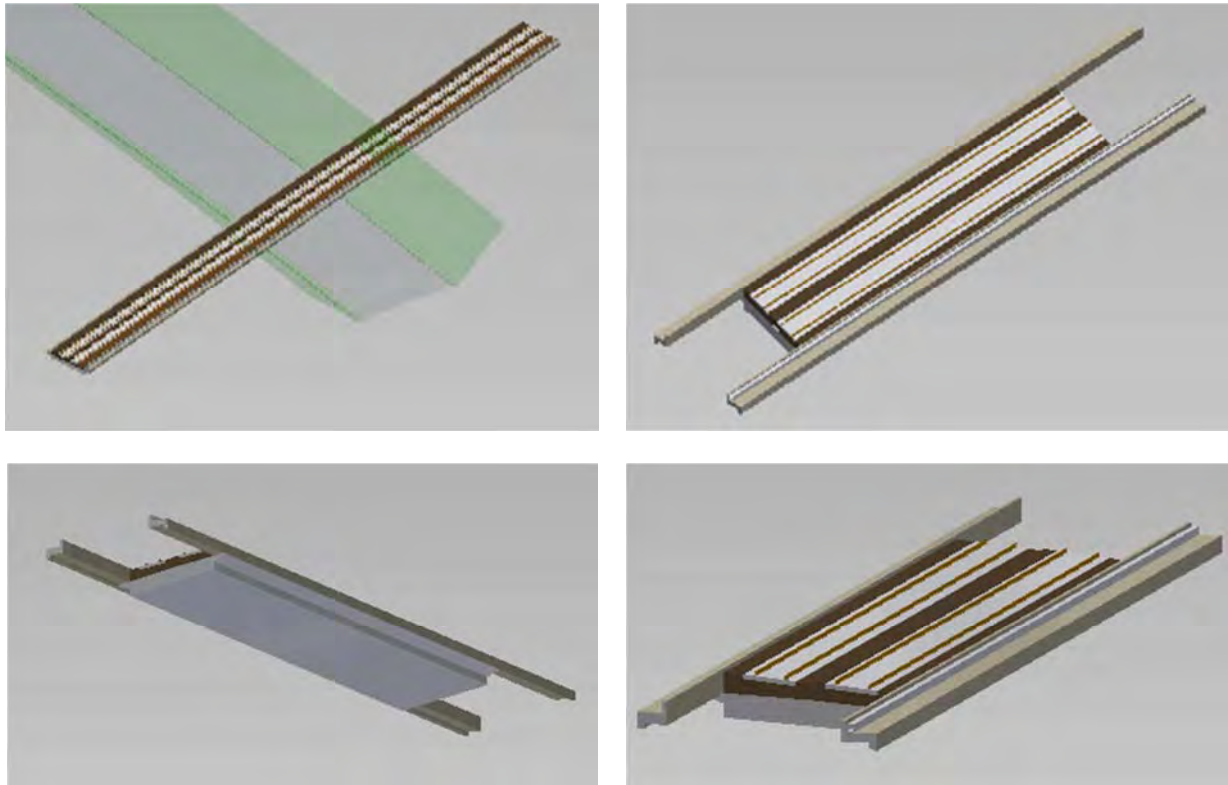


Abbildung 53: Erhebung und vollständig parametrisiertes Überbaumodell

6.3 Parametrisierung des Unterbaus

Die Arbeitsflächen für die Modellierung des Unterbaus kann man vorwiegend als Versatz der Oberbau-Oberflächen gewinnen. Mit der *Ableitungsart* „Volumenkörper als Verbundflächen“ werden als erster Schritt die parametrisierten Arbeitsgeometrien - wie Stirnflächen, seitliche Flächen, Unterseiten der Widerlager usw.- in eine neue .ipt*-Datei abgeleitet. Durch weiteres Versätzen der Stirnflächen werden „parametrische Primitiven“ für die Widerlager und die Flügel erstellt. Mit Hilfe der CSG-Methode können die Teile kombiniert werden. Die Grundformen werden zuerst mit der B-Rep-Methode erstellt, anschließend verwendet man die CSG-Methode um Kombinationen, Rundungen, Fasen zu erstellen. Im nächsten Absatz wird die Modellierung eines Widerlagers näher erläutert.

6.3.1 Parametrisierung der Widerlager, der Flügel, und der Fundamente

Die sechs Arbeitsgeometrien - Oberbauunterseite, Widerlagerseiten, Widerlagerunterseite, Stirnfläche und Versatz der Stirnfläche - bilden gemeinsam Flächen für die Grundform eines Widerlagers. Fügt man unter Verwendung des Befehls *Formen* die Arbeitsfläche hinzu, welche die schräge Kante eines Flügels definiert, wird die Grundform für die Widerlager und der Flügel erstellt (vgl. Abbildung unten). Nach analoger Umsetzung des Konzeptes, können die anderen Bauelemente erzeugt werden.

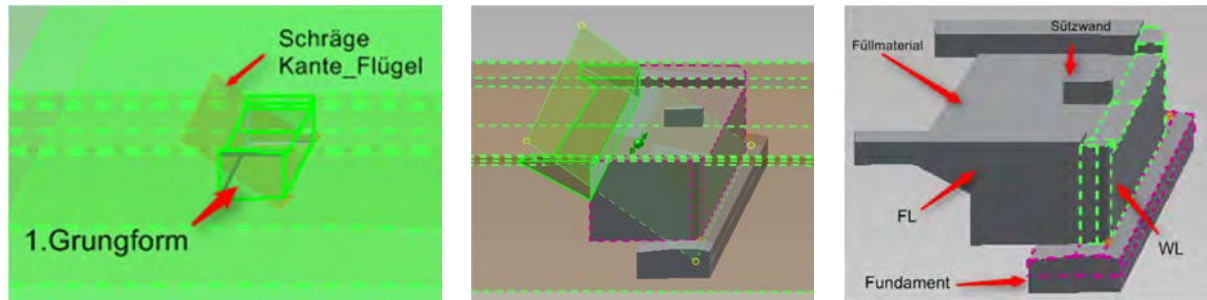


Abbildung 54: Modellierung der Unterbau-Bauteile

6.3.2 Modellierung des Pfeilers

Der Pfeiler wird analog zur Modellierung der Widerlager erstellt. Die Stirnflächen des Pfeilers werden drehbar erstellt und anschließend versetzt. Der Anprallschutz wird nach demselben Vorgehen erstellt. Da der Modellbrowser zunehmend unübersichtlich wird, kann man dessen Modellierung auch in einer anderen *ipt-Datei vornehmen. Die Geometrie seiner geometrischen Gestaltung wird Detailplänen entnommen.

6.3.3 Assemblierung des Unterbaus

Die Unterbau-Bauteile werden in einer neuen *ipt-Datei zusammengesetzt. Hierbei werden nur die Volumen- und die relevanten Oberflächenkörper - wie die Böschung - abgeleitet. Der Vorteil dieser Assemblierung ist ein besserer Überblick über alle Bauteile. Die Arbeitsgeometrien machen das Modell etwas unübersichtlich und erschweren die Navigation im Modellbrowser.

In der folgenden Abbildung sieht man die Assemblierung der Unterbau-Bauteile.

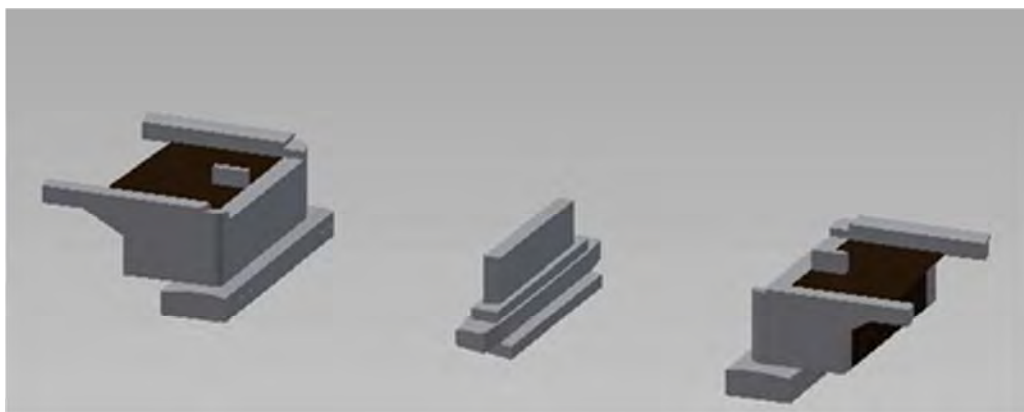


Abbildung 55: Vollständiges Unterbaumodell der Brücke

6.4 Die Eisenbahnbrücke

Einer der wichtigsten Modellierungsansätze des vorgeschlagenen Konzepts ist die Assemblierung der Bauteile in Baugruppen, aber doch im selben Dateiformat *ipt. Dieser Ansatz ist vorteilhaft gegenüber einer Gruppierung in dem Dateiformat *.iam. Darin werden die Bauteile in Baugruppen mit Abhängigkeiten zueinander platziert. Das gilt insbesondere, wenn

Bauteile dieselben Ursprungskoordinaten besitzen. Weitere Vorteile sind bereits im Modellkonzept erwähnt worden.

Nach der Modellierung des Unterbaus, werden alle Modellbauteile zusammengefügt.

6.5 Grenzwerte der Parameter

Grenzwerte werden für die wichtigsten Parameter festgelegt, z. B. für Verdrehung/Versatz der Widerlager. Die Böschungsneigung und der Kreuzungswinkel werden auch beschränkt.

Nachfolgend ist der Quellcode für den Kreuzungswinkel dargestellt.

```
' ***** Kreuzungswinkel Grenzwerte *****  
  
If Kreuzungswinkel < 10  
    Kreuzungswinkel = 10  
  
    MessageBox.Show("Der zulässige Mindestwert für den Parameter  
Kreuzungswinkel lautet: " & Kreuzungswinkel & vbCrLf & "Der Wert wird  
automatisch in den Mindestwert geändert.", "Regel fr Mindestwert",  
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)  
  
ElseIf Kreuzungswinkel > 170 Then  
    Kreuzungswinkel = 170  
  
    MessageBox.Show("Der zulässige Höchstwert fr den Parameter Kreuzungswinkel  
lautet: " & Kreuzungswinkel & vbCrLf & "Der Wert wird automatisch in den  
Mindestwert geändert.", "Regel fr Mindestwert", MessageBoxButtons.OK,  
MessageBoxIcon.Error)  
  
End If
```

Die Grenzen hierfür werden aus statischen Regeln bestimmt, daher werden sie hier nur willkürlich angesetzt.

6.6 Verknüpfung der Excel-Tabelle mit den Bauteilen

In allen Bauteilen ist die Excel-Tabelle angehängt worden. Hierfür sucht man im Modellbrowser die korrespondierenden Parameter. Numerische Verknüpfungen mit denselben Namen und Einheiten wie in der Tabelle werden hinzugefügt und die korrespondierenden Modellparameter gleichgesetzt.

6.7 Kontrolle einzelner Parameter

Nach einer vollständigen Modellierung werden die Parameter mit unterschiedlichen Werten belegt. Mittels einer entwickelten Applikation von Herrn Fiermonte können dann die Pläne automatisch abgeleitet und anschließend bemaßt werden. Darin werden Schnitte implementiert (vgl. Fiermonte, 2013). In den folgenden Abbildungen ist die vollständig modellierte Bücke dargestellt.

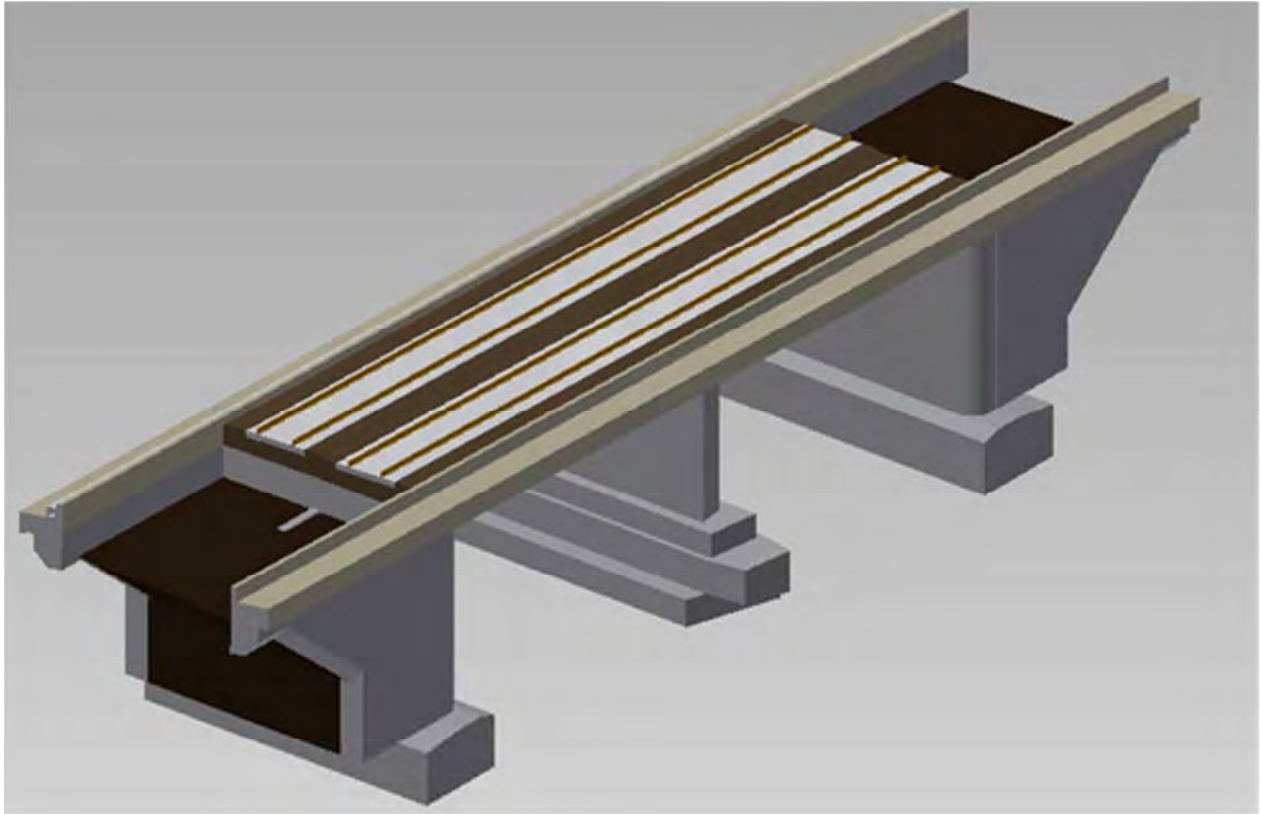


Abbildung 56: Vollständig parametrisiertes Brückenmodell

Der Ansatz von parametrischen Modellierungsprogramme zur Generierung verschiedener Varianten eines Objektes hat seine Grenzen. Nicht immer sind die Variantenkonstruktionen brauchbar. Dies gilt auch für Inventor. Nach einer Kontrolle aller Parameter, könnte festgestellt werden, dass die Parameter zwar funktionieren, allerdings agieren sie nicht uneingeschränkt miteinander. Es hat sich dabei herausgestellt dass die Modellierung erstens durch die vielen geometrischen und parametrischen Zwangsbedingungen und zweitens durch die direkte Kopplung der Bauteile miteinander, begrenzt wird. Wie z.B. die Länge der Flügel wird durch die Böschungsneigung bestimmt. Bleibt die Neigung unverändert - wobei die Widerlager versetzt werden - dann verkürzt oder verlängert sich der Flügel. Nachfolgend werden einige Grenzen der Parametrisierung in Inventor näher vorgestellt.

6.8 Modellierungsgrenzen in Inventor

Wie bereits oben erwähnt, die Flügel sind am meisten von den Einschränkungen betroffen, denn ihre Form hängt von vielen Parametern ab. Daher müssen Untersuchungen durchgeführt werden, um herauszufinden, welche Variante zur optimale Lösung unter Berücksichtigung von Randbedingungen, führt. In den folgenden Absätzen werden beispielsweise die Einschränkungen in Abhängigkeit der Parameter *Kreuzungswinkel*, *Stützweite*, *Lichthöhe*, und *Böschungsneigung* untersucht.

6.8.1 Einschränkungen durch Änderung der Kreuzungswinkel

Die Brücke überquert tatsächlich die Autobahn in einem Winkel von 73,8 Grad (82 Gon). Bei diesem Kreuzungswinkel und bei einer Böschungsneigung von 1:1,5, entsprechen die Flügelängen auch den tatsächlichen. Wird der Kreuzungswinkel geändert wobei die Böschungsneigung erhalten bleibt, verlängert oder verkürzt sich die Flügel und die. Ihre Form ist auch geändert worden. In den Abbildungen 56 und 57 wird diese Problematik dargestellt.

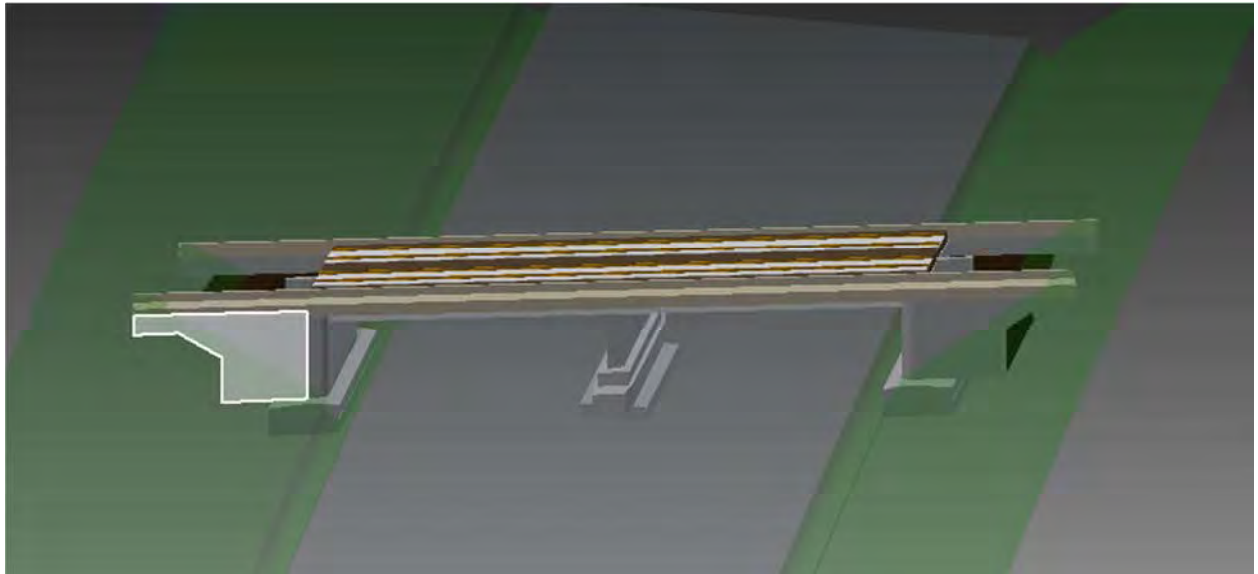


Abbildung 57: Tatsächliche schiefe Lagerung der Brücke (73,8 Grad)

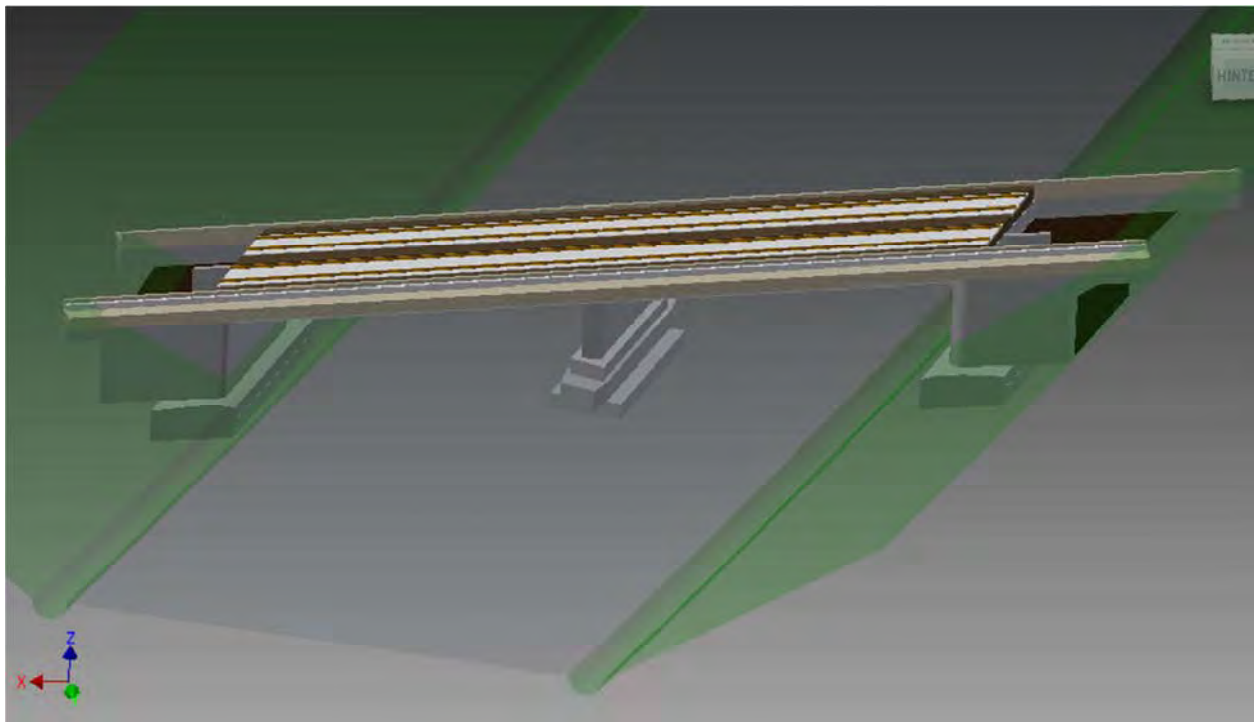


Abbildung 58: Kreuzungswinkel eingestellt auf 60 Grad

6.8.2 Einschränkung der Flügelform durch Versatz der Widerlager

In den folgenden Abbildungen wird die Grenzen des Modells hinsichtlich der Änderung der Lichtweite geprüft. Der tatsächliche Lichtweite zwischen einem Widerlager und dem Mittelpfeiler beträgt 16,2m. In der Abbildung 60 wurde das linke Widerlager um 3m in die Böschung verschoben. In der Abbildung 61 wurde das linke Widerlager um 3m in der Böschung verschoben und gleichzeitig um 20 Grad gedreht.

Es ist in der Abbildung 54 zu erkennen das der linke Flügel ihr ursprüngliche Form verloren hat durch den Versatz in die Böschung. In der Abbildung 55 lässt sich die Form ungefähr wieder herstellen durch die zusätzliche Drehbewegung.

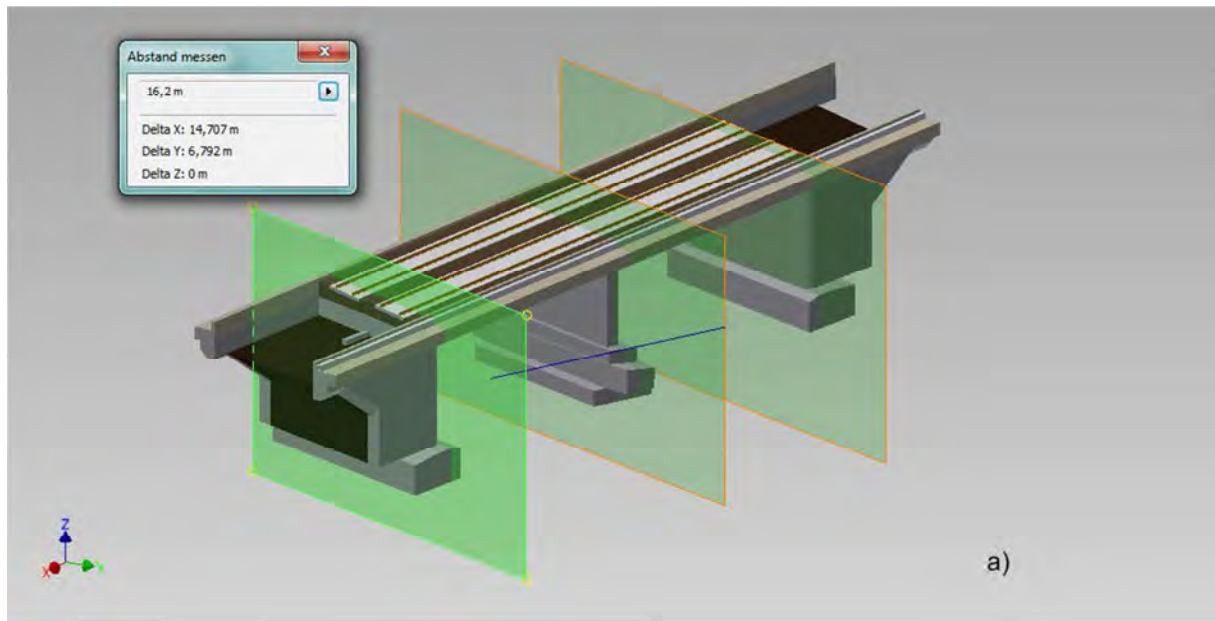


Abbildung 59 a: Tatsächlicher Abstand eines Widerlagers und des Pfeilers voneinander (16,2m)

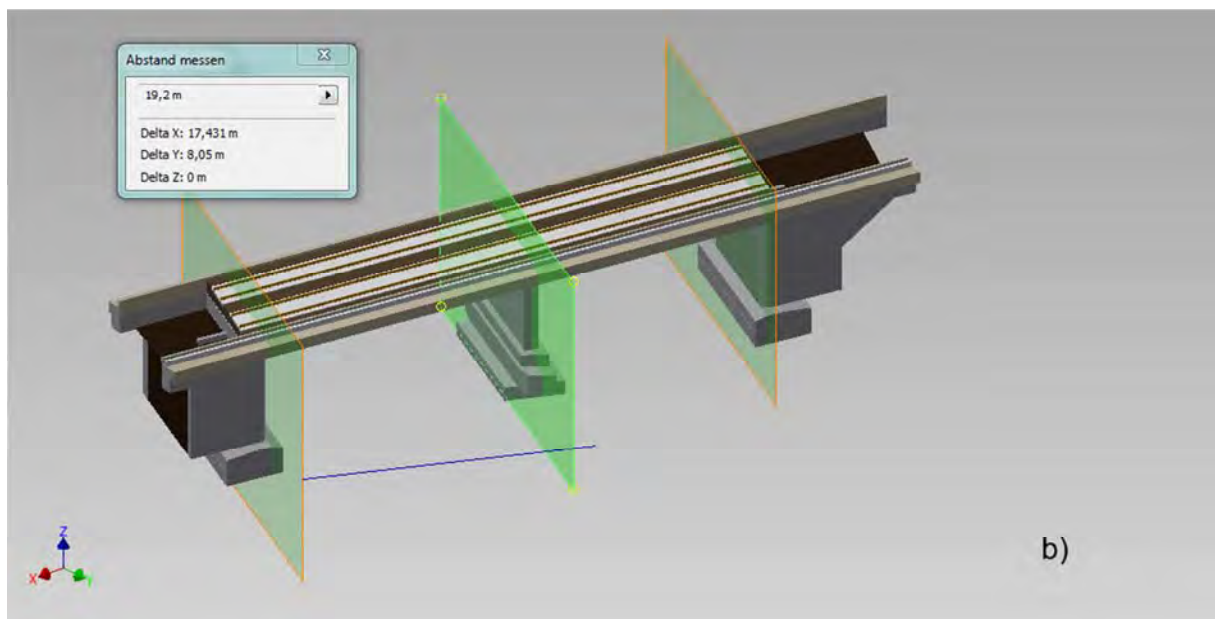


Abbildung 60: Versatz des linken Widerlagers in die Böschung um 3m

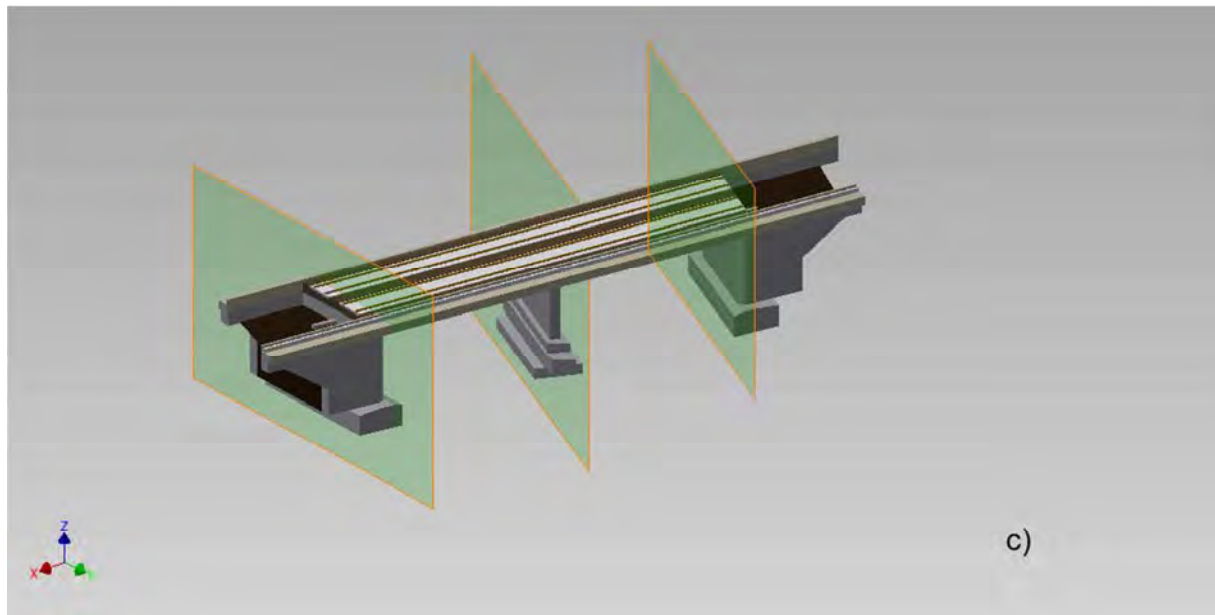


Abbildung 61: gleichzeitiger Verdrehung und Versatz des Widerlagers

6.8.3 Einschränkung durch Änderung der Böschungswinkel

Die Form der Flügel ist durch Schräge der Böschungslinie bestimmt. Die Unterkante eines Flügels wird mit der Böschung parametrisiert, so dass sie einen konstanten ausgerichteten Abstand von einem Meter aufweisen. In dieser Untersuchung wird nachgegangen in wie ihre Form von anderen Parameter wie Lichthöhe der Brücke beeinflusst wird. In der Abbildung 56 ist die ursprüngliche Böschungsneigung der Regelböschung 1:1,5. In Abbildung 57 wird die Böschungsneigung mit 1:3 belegt. Im Abbildung 58 bleibt die Böschungsneigung von 1:3 erhalten und das rechte Widerlager wird um 5m in die Böschung verschoben. Im Bild 59 wird bei gleichen Versuchsbedingungen wie in c) die ursprüngliche Lichthöhe von 7,283m um 3m erhöht.

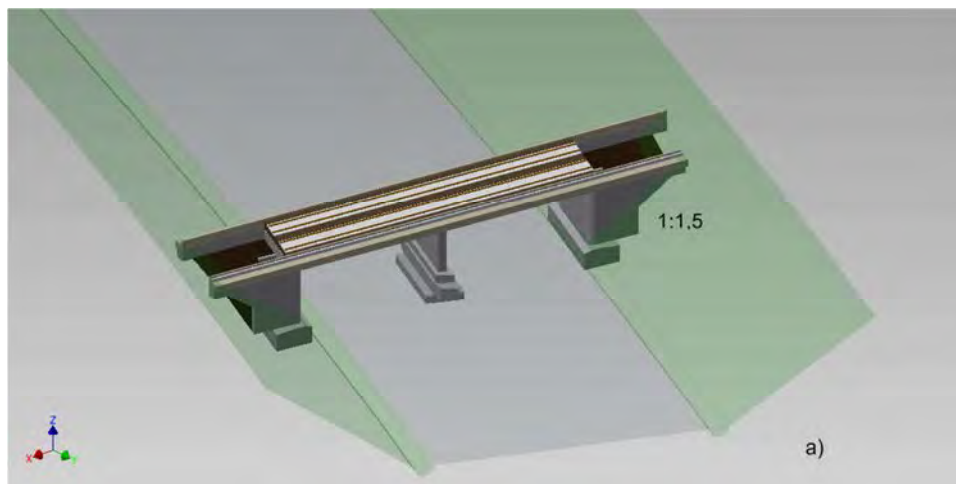


Abbildung 62: Regelböschung 1:1,5

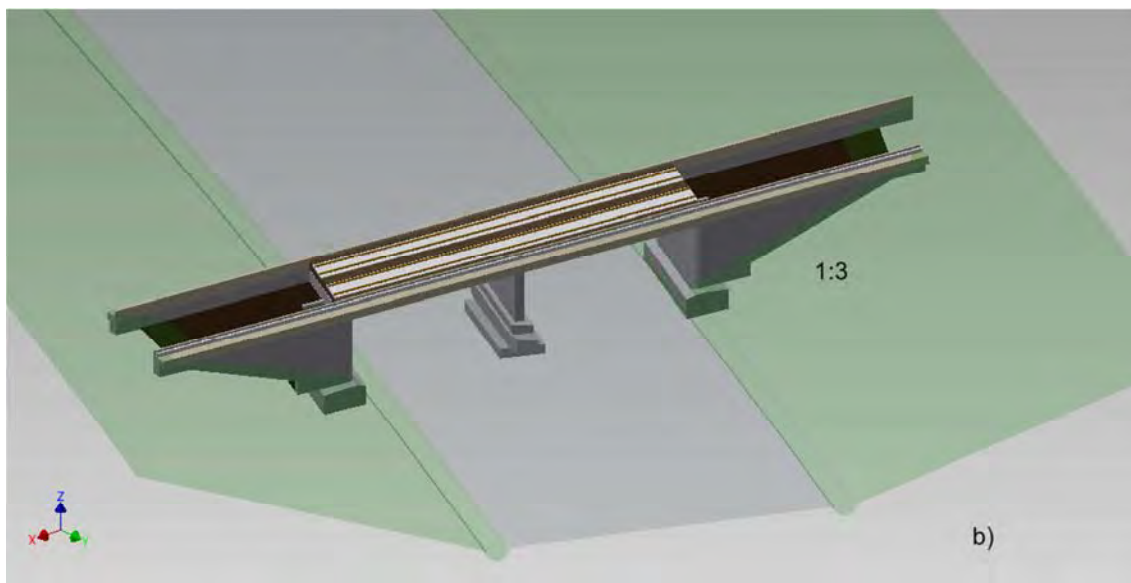


Abbildung 63: Einschränkung durch die Böschungsneigung

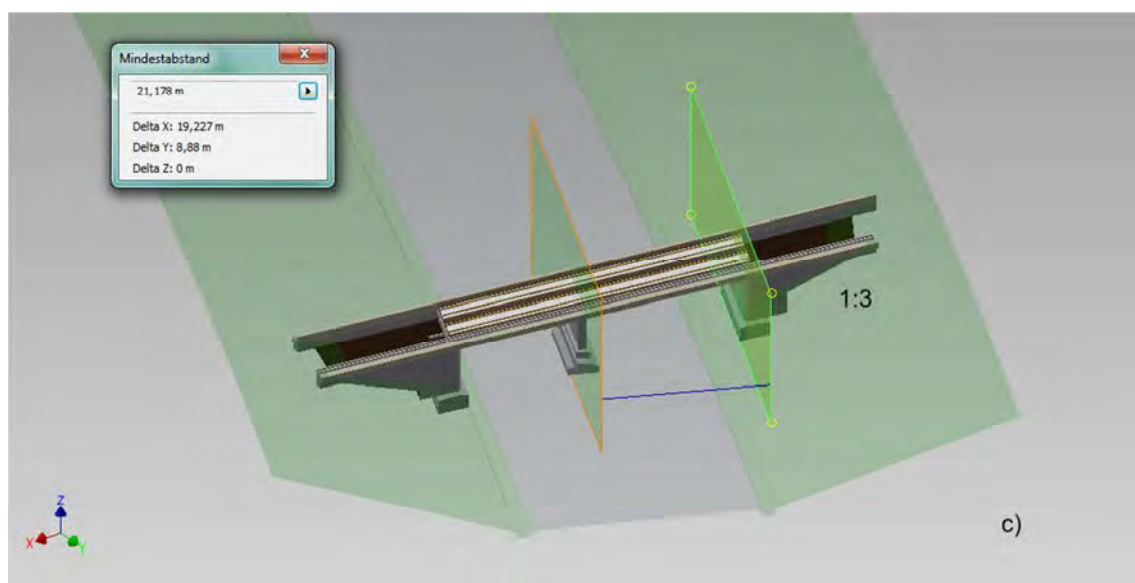


Abbildung 64: Einschränkung durch die Böschungsneigung und Versatz der Widerlager

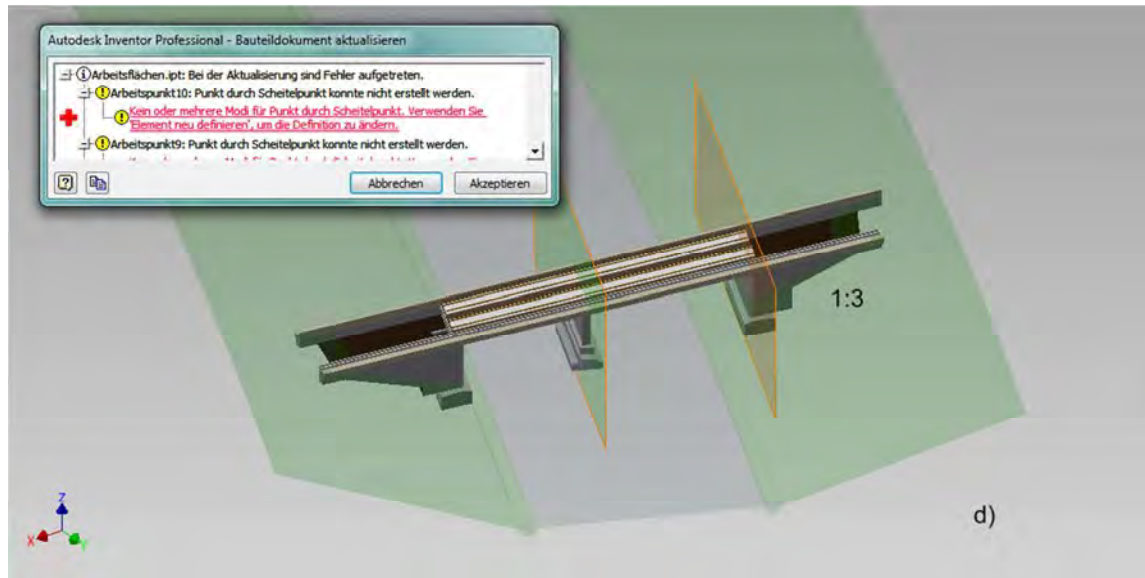


Abbildung 65: Einschränkung durch die Böschungsneigung

Fazit: Die Änderung eines Parameters beeinflusst die Geometrie der zusammenhängenden Bauteile. So lassen sich zwar sehr schnell Varianten einer parameterbasierten Brückenmodellierung untersuchen, was die Prozesse der Planung um ein vielfaches beschleunigt, aber die Brauchbarkeit dieser abgeleiteten Varianten muss hinsichtlich wirtschaftlicher, statischer, und konstruktiver Randbedingungen noch geprüft werden.

7 Fazit und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Brückenbauwerke werden immer komplexer gestaltet. Ihre konventionelle Planung mit 2D-Planungswerkzeugen, ist daher inkonsistent und unwirtschaftlich geworden. Dank der neuen Entwicklungen in der Computertechnik stehen bereits sehr leistungsfähige 3D-Planungswerkzeuge zur Verfügung, die die Planerstellungs- und Planabwicklungsprozesse beschleunigen und übersichtlicher machen. Die 3D-Modellierung weist daher viele Vorteile gegenüber der 2D-Planungsmethoden. Allerdings sind diese 3D-Software nicht für das Bauwesen entwickelt worden. So versuchen trotzdem seit einigen Jahren Bauunternehmen, Planungsbüros und Forschungsinstitute diese neuen und effizienteren Planungswerkzeuge für die 3D-Modellierung von Brückenbauwerken einzusetzen. Frühere Untersuchungen haben bereits neue Methoden vorgeschlagen allerdings sind diese noch nicht ausgereift und müssen daher weiter entwickelt werden.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem parametrischen 3D-Modellieransatz, welches die Visualisierung, die Planerstellung und die Planverwaltung von Brückenbauwerken vereinfachen soll. Mit diesem Ansatz wurde ein Konzept entwickelt, das auf die parametrische Erfassung eines 3D-Brückenmodells zielt. Die Parametrisierung ermöglicht eine durchgängige Modelländerung des Bauwerks, wobei die vordefinierten Bauteile an neuen Bedingungen jederzeit angepasst werden können. Dafür wurde die parameterbasierte 3D-Modellierungssoftware Autodesk Inventor ausgewählt, welche die parametrische 3D-Modellierung vollständig unterstützt.

Es wurden zuerst die parametrische Modellierungsmethoden in Inventor untersucht. Danach wurden der Aufbau einer Brücke und die traditionellen Planungsmethoden vorgestellt, welche die Grundlagen zur Entwurf des Konzepts bildeten. Dieses Konzept wurde mit dem Entwurf einer realen 3D- Eisenbahnbrücke validiert. Das Ergebnis war ein voll parametrisiertes Brückenmodell, das die Anforderungen einer flexiblen Anpassung an die Umgebung erfüllt.

Es konnte in dieser Arbeit festgestellt werden, dass die maschinenbauspezifische Software Autodesk Inventor mit einem gezielten Einsatz verschiedener parametrischen Modellierungsmethoden (parametrische Skizzen, externe Steuerdatei, strukturierte Abhängigkeit der Bauteile voneinander, usw.) ein 3D-Brückenmodell in kurzer Zeit erfolgreich erstellen lässt.

7.2 Fazit

Die parametrische 3D-Modellierung von Brückenbauwerken befindet sich in seiner frühen Entwicklungsphase. Mit ihr wird die Planung um ein vielfaches effizienter als die herkömmlichen Planungsmethoden. In dieser Bachelorarbeit konnte gezeigt werden dass eine parametrische Software wie Autodesk Inventor viele Vorteile birgt gegenüber den jetzigen Planungswerkzeugen, die im Brückenbau momentan verwendet werden wie Autocad Architecture oder Soficad. Das Bauwerk wird im Raum betrachtet und nicht nur im 2D-

Ansichten (dadurch können mit Kollisionsprüfungen Fehler leichter entdeckt werden). Neuermittlung von ebenen und räumlichen Eigenschaften der Bauteile können direkt vom Programm durchgeführt werden (z.B. Füllmaterial für die Böschung, Schalungsflächen, usw.). Autodesk Inventor besitzt ein sehr gutes Navigationsbrowser, das auch flexibel ist. Dies ermöglicht eine transparente und konsequente Planverwaltung. Die Hierarchie der Bauteile ist dadurch sofort ersichtlich.

Die für diese Bachelorarbeit gesetzten Ziele wurden alle erreicht. Durch Geschicklichkeit und Überlegungen konnten die im Kapitel 5 vorgeschlagenen Modellierungsansätze erfolgreich umgesetzt werden. Das Resultat ist eine vollständig parametrisierte Basisbrücke, deren Parameter von einer Excel-Tabelle aus, beliebig in den festgelegten Rahmen geändert und angepasst werden können.

In der Steuerdatei (die Excel-Tabelle) wurden die wichtigsten Parameter aufgelistet. Es sind Kreuzungswinkel, Widerlager drehen/versetzen, die Lichthöhe des Bauwerks, die Breite der Fahrbahn, die Höhe des Oberbaus, der Böschungswinkel, die Steigung der Gradienten, Pfeiler verschieben/verdrehen usw. Diese Parameter können direkt vom Planer und Bauherrn verändert werden. Mit Hilfe der eingebauten Grenzen, meldet der Programm wann diese überschritten werden. Mit dieser Fernsteuerung, bleibt das Modell stabil und es wird nicht ungewollte Änderungen vorgenommen. Diese Parameter sind sogenannte *externe Parameter*. Im Innern des Modells sind andere variable Benutzerparameter eingebaut worden (z.B. die Breite des Pfeilers, die Dicke der Widerlager/Flügelwände usw.) die nur vom Planer geändert werden sollten. Und schließlich sind die Modellparameter, wie Kopplung der Bauteile (z.B. Anbindung der Kappen mit dem Oberbau Anhand von Constraints), Querschnittsbemessungen (z.B. Länge der Kragarme von Plattenquerschnitt, Entwässerungsneigung etc.) und festgelegte Randbedingungen (z.B. Einbindungslänge der Flügel in die Böschung (1,0 m), Böschungsdeckung (1,0 m), etc.). All diese Parameter ermöglichen einen sehr hohen Parametrisierungsgrad des Brückenmodells.

Zu den Nachteilen der Software zählt die nichtexakte Extrusion eines Querschnitts (diese Problematik wurde im Absatz 6.2 ausführlich beschrieben). Sind Knicke im Extrusionspfad vorhanden, müssen dann die Überbau-Bauteile abschnittsweise extrudiert werden oder der andere Sweepvorgang „senkrecht zum Pfad“ angewandt werden. Man muss dann mit erhöhtem Abweichungen der Querschnittsabmessungen rechnen.

Die Erfahrung in dieser Arbeit zeigt, dass Autodesk Inventor, trotz es kein Bauingenieursoftware ist, ein gutes Alternativsoftware ist, um 3D-Brücken parametrisch zu modellieren. Es empfiehlt sich weitere Untersuchungen durchzuführen, zum Beispiel mehrere Trassenverläufe in die Masterskizze zu implementieren, so dass auch bei aktivieren eines Pfades, ein dynamisches Aktualisierung des ganzen Oberbauverlauf und damit die verbundenen Unterbau-Bauteile gewährleistet werden.

Glossar

FEM-Berechnungen: Finite-Elemente-Methoden Berechnungen.

ACIS-Kernel: Ein 3D-CAD-Programmpaket besteht aus mehreren Komponenten. Im Innern dieser Programme wirkt ein Modellierkern (Programmbibliothek, die CAD-Modellier-funktionalität zur Verfügung stellt) womit die konstruierten 3D-Komponenten verarbeitet werden. ACIS ist die Kunstwort und steht für Alan, Charles, Ian (die früheren Entwickler) und Spatial Technology Inc., der Firma der diesen Programmteil vertreibt (Scheuermann, 2011).

Literaturverzeichnis

- (Blien, 99): www.blien.de/ralf/cad/db/paramodul.htm ; Quelle: Variantenkonstruktion und parametrische Modellierung“ Prof.Dr.Dieter Roller
- (ForBau, 2010): Bayerischer Forschungsverbund, Virtuelle Baustelle Arbeitsbericht 2010
- (Freudenstein, 2010) Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein, Vorlesungsskript Verkehrswegebau Grundkurs, Stand 2010
- (Kern, 2003) Dipl.-Ing. Fredie Kern, Doktor-Arbeit, Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten, ISBN 3-926146-14-1, Braunschweig, 2003
- (Mehlhorn, 2007): Prof.Dr.-Ing.Dr.-Ing. Gehard Melhorn, Handbuch Brücken, ISBN 978-3-642-04422-9 e-ISBN 978-3-642-04423-6DOI 10.1007/978-3-642-04423-6 Springer Heidelberg Dordrecht London New York, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, 2010
- (Mensch und Maschine, 2013): Mensch und Maschine Software,SE; www.mum.de/DE-Autodesk-Inventor-Professional-3D-CAD-Maschinenbau.CAD
- (Obergrießer, 2010): Kapitel 6, Mathias Obergrießer: Trassengebundene 3D-Brückenmodellierung, W. Günter, A.Borrmann (Hrsg.), Digitale Baustelle-innovativer Planen, effizienter Ausführen, DOI 10.1007/978-3-642-16486-6_6, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- (Rank, 2008): Prof.Dr.rer.nat. Ernest Rank, Vorlesungsskript zu Computerorientierte Methoden, Ausgabe 10/2008
- (Requicha et al., 1985): A. A. G. Requicha and H. B. Voelcker. Boolean operations in solid modeling: Boundary evaluation and merging algorithms. In Proc. IEEE, volume 73, pages 30-44, January1985
- (Scheuermann, 2011): Günter Scheuermann, Inventor 2012 Grundlagen und Methodik in zahlreichen Konstruktionsbeispielen, ISBN 978-3-446-42716-7 E-Book-ISBN 978-3-446-42898-0 © Carl Hanser Verlag München
- (Woessner, 2005): Ralph Woessner, Studienarbeit: Effiziente Oberflächenberechnung von komplexen CSG-Bäumen, Dezember 2005
- (Wikipedia, 2013): Wikipedia, die Freie Enzyklopädie, http://de.wikipedia.org/wiki/Boundary_Representation, Stand 16 März 2013

(Zang und Feng, 2007)

Hongzhi Zhang, Jieqing Feng, Introduction to Solid Modelling, Stand 2007

Compact Disc

Auf der beigefügten Compact Disc sind folgende Datenenthalten:

- Der schriftliche Teil der Arbeit als Worddokument und PDF-Datei
- Die Dateien des Brückenmodells
- Zusätzliche Datei (Skizzen, Bildschirmvideos)

Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Thesis selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ich versichere außerdem, dass die vorliegende Arbeit noch nicht einem anderen Prüfungsverfahren zugrunde gelegen hat.

München, 5. April 2013

Fritznel Römer

Fritznel Römer

[Redacted signature]