



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

## Building Information Modeling am Beispiel eines U-Bahnhofs am Hauptbahnhof München

**Thomas Lippert**

**Bachelor's Thesis im Studienfach Umweltingenieurwesen**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Science (B.Sc.)

Autor: Thomas Lippert  
Matrikelnummer: XXXXXXXXXX  
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. André Borrmann  
Dipl.-Inf. Yang Ji  
Ausgabedatum: 01. August 2011  
Abgabedatum: 31. Dezember. 2011





## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Bachelorarbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt wurde. Alle verwendeten Passagen wurden kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

---

Thomas Lippert

München, den 31.Dezember.11

## Kurzfassung

Vorliegende Arbeit beschreibt die Überführung des AutoCAD-Modells der U-Bahnhöfe am Münchner Hauptbahnhof in das CAD-Programm Siemens NX 7.5. Neben der originalgetreuen Nachbildung erfolgt zudem eine vollständige Parametrisierung des Ausgangsmodells.

Die Volumenkörper sämtlicher AutoCAD-Modelle werden zunächst auf ihre Ursprungsgeometrie – Querschnitte und zugehörige Extrusionsführungen - rückgeführt. So werden bereits in AutoCAD gezielt diejenigen Geometrieinformationen generiert, die in NX für die effiziente Erstellung eines parametrischen Modells erforderlich sind. Zudem wird durch die Geometriereduktion der Transfer irrelevanter Daten nach NX vollständig vermieden.

In NX erfolgt eine automatisierte Parametrisierung der importierten Querschnitte. Auf Basis der parametrischen Skizzen und der zugehörigen Extrusionsführungen wird komponentenweise die Nachbildung des Ausgangs-Modells durchgeführt.

Durch die Zusammenführung und gegenseitige Ausrichtung der einzeln gefertigten Komponenten in einer Baugruppen-Datei wird abschließend das Gesamtmodell erzeugt. Bestehende Fehler aus der AutoCAD-Vorlage können mit verschiedenen NX-Funktionalitäten ermittelt und entsprechend verbessert werden. Die korrigierten Komponenten werden im Hinblick auf eine authentische Erscheinungsform mit passenden Texturen aus der NX-internen Texturenbibliothek belegt.

Für eine realitätsnahe, filmische Präsentation der erstellten Modelle werden mithilfe der NX-Simulations-Tools zum Schluss zwei Animationen erzeugt.

Die Erfahrung aus der Arbeit hat gezeigt, dass eine Überführung von AutoCAD-Daten nach Siemens NX 7.5 problemlos möglich ist und bei geeigneter Übertragungsmethodik auch zeitsparend ausgeführt werden kann. Bedingt durch die Parametrisierung und die weitreichenden NX-Funktionalitäten ist zudem eine hohe Bearbeitbarkeit des neuen Modells gewährleistet. Mithilfe der Analysefunktionen von NX konnte neben der exakten Nachbildung auch eine Optimierung bzw. Verbesserung des Modells erreicht werden.

## Abstract

This Bachelor's Thesis describes the conversion of an existing AutoCAD-Model, which contains the subway stations of the Munich Central Station, into the CAD-Programme Siemens NX 7.5. In addition to a reproduction true to the original, the new model gets crafted in a completely parametric design.

In the first instance, the 3D-Solids of all AutoCAD-Models are getting reduced to their fundamental geometry – sections and extrusion guidance. In this way, the geometry information, which is needed for an efficient, parametric modeling in NX, is already generated in AutoCAD. Additionally, irrelevant Data-Transfers can be avoided entirely.

The parameterization of the imported sections in NX is carried out automatically. Based on those parametric sketches and the associated extrusion guidance, copies of the original models are getting crafted component-by-component.

After combining and arranging the separately designed components in an assembly data file, the model is compounded as a whole.

Existing defects of the original AutoCAD-Model can be detected and also corrected by various NX functionalities. In terms of an authentic form of appearance, the rectified components got texturized by appropriate, NX-internal textures afterwards. By dint of the NX animation tools, two realistic video sequences were generated.

The work experience, which was achieved through this Bachelor's Thesis, shows that the conversion of AutoCAD-Data to Siemens NX is possible without difficulty. By using the optimal translation-method, the conversion is also accomplishable in short time. Due to the parameterization and the far-ranging NX functionalities, a high workability of the completed model is ensured. By aid of the NX fault analysis, the model could not only be rebuilt exactly, but also recreated in an optimized and improved way.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Übertragung des Modells</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1</b>	Diskussion verschiedener Übertragungs-Methoden.....	<b>3</b>
<b>2.1.1</b>	Übertragung durch Messen.....	<b>3</b>
<b>2.1.2</b>	Übertragung mithilfe von Punktlisten.....	<b>4</b>
<b>2.1.3</b>	Übertragung mithilfe gemeinsamer Dateiformate.....	<b>7</b>
<b>2.1.3.1</b>	Übertragung mithilfe des IGES-Formats.....	<b>8</b>
<b>2.1.3.2</b>	Übertragung mithilfe des DWG-Formats.....	<b>10</b>
<b>2.2</b>	Fazit.....	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Modellierung in NX 7.5</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1</b>	Vorarbeiten in AutoCAD.....	<b>13</b>
<b>3.2</b>	Modellierung der Komponenten.....	<b>17</b>
<b>3.2.1</b>	Streckenführung.....	<b>17</b>
<b>3.2.2</b>	Gleise und Tunnel.....	<b>19</b>
<b>3.2.3</b>	Treppen.....	<b>23</b>
<b>3.2.4</b>	Wände und Decken.....	<b>24</b>
<b>3.2.5</b>	Tragwerke.....	<b>24</b>
<b>3.3</b>	Layer-Belegung.....	<b>25</b>
<b>3.4</b>	Zusammenfügen des Modells.....	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>Fehlerbereinigung</b> .....	<b>29</b>
<b>4.1</b>	Glätten der Streckenverläufe.....	<b>29</b>
<b>4.2</b>	Kollisionsprüfung/Baugruppenfreiraum.....	<b>30</b>
<b>4.3</b>	Querschnittsoptimierung.....	<b>31</b>

<b>5</b>	<b>Visualisierung</b> .....	33
<b>5.1</b>	Modifizierung des Modells.....	33
<b>5.2</b>	Texturierung.....	34
<b>5.3</b>	Beleuchtung.....	36
<b>5.4</b>	Kamera und Kamerafahrt.....	37
<b>5.5</b>	Rendering.....	40
<b>6</b>	<b>Fazit</b> .....	41
<b>6.1</b>	Bewertung.....	41
<b>6.2</b>	Ausblick.....	43
<b>A</b>	<b>Detaillierte Layer-Belegung</b> .....	44
<b>B</b>	<b>DVDs</b> .....	45
<b>C</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	46

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Gesamtmodell der unterirdischen Bauwerke des Hauptbahnhofs.....	1
2.1	Bemaßter Querschnitt mit lokalem Koordinatensystem.....	3
2.2	Mit Definitionspunkten versehener Tunnelquerschnitt.....	5
2.3	Ausschnitt aus einer Punktliste in Open Office Calc.....	6
2.4	Abschnitt der Strecke U4/U5 via IGES-Import.....	9
2.5	Geometriereduktion am Beispiel eines Gleiskörpers.....	11
3.1	AEC-STAIR-Objekt.....	14
3.2	ACAD-Kopie der AEC-Treppe.....	15
3.3	Treppe als „unechter“ Oberflächenkörper.....	15
3.4	Reduktion auf Skizze und Extrusionsführung.....	16
3.5	Gleisbett mit „Knickstellen“ zwischen den Linienobjekten.....	18
3.6	Polylineare Vorlage für die Splinesführungen.....	18
3.7	Führungssplines und importierte Querschnitte.....	20
3.8	Automatisch parametrisierte Skizzen.....	21
3.9	Fertige Tunnelröhre mit Gleis.....	22
3.10	Querschnitte für die Tunnelaufweitung mit gleichgerichteten Vektorpfeilen.....	23
3.11	Gespiegelte Rolltreppen und zugehörige Spiegelebenen.....	24
3.12	Gesamtmodell mit ausgeblendeten Außenwänden.....	26
3.13	Positionierung nach der Zwangsbedingung „Berührung“.....	27
3.14	Gesamtmodell.....	28
3.15	Texturiertes Gesamtmodell in Explosionsansicht.....	28
4.1	Knickstellen im Streckenverlauf U1/U2.....	29
4.2	Vergleich unbearbeitete/geglättete Splines.....	30
4.3	Fehlerhafte, harte Durchdringung im Bahnhof der U4/U5.....	31
4.4	Querschnitt Tunnel U1/U2 mit 15 cm Höhenversatz.....	32



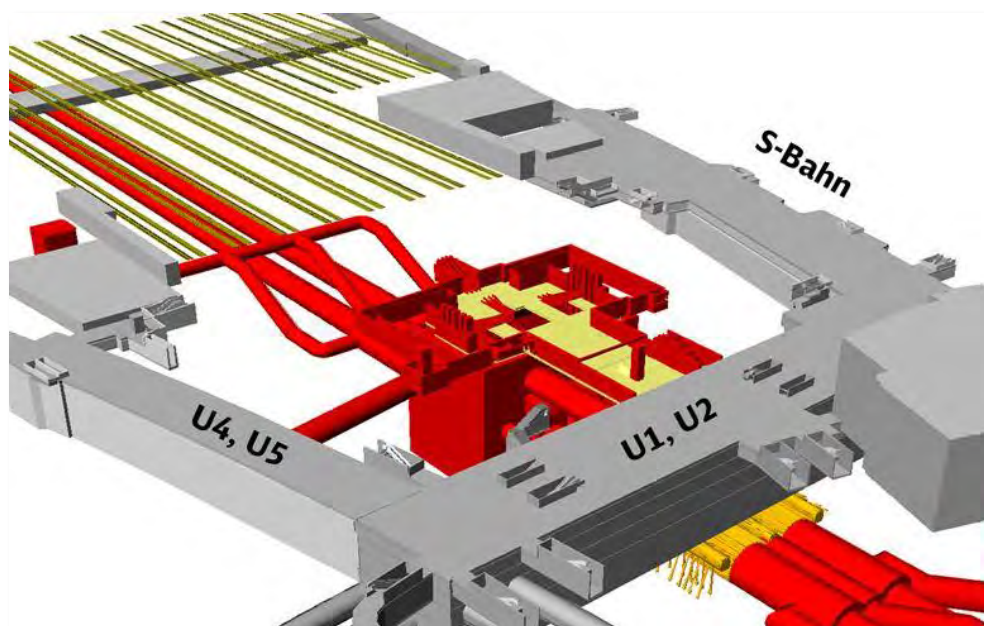
<b>5.1</b>	Für die Visualisierung modifiziertes Gleisprofil.....	<b>33</b>
<b>5.2</b>	Texturiertes Gleisbett.....	<b>35</b>
<b>5.3</b>	Tunnel mit Beleuchtung und Texturierung.....	<b>36</b>
<b>5.4</b>	Erfassen und Bearbeiten der Kamera.....	<b>37</b>
<b>5.5</b>	Video 2, Gesamtmodell mit Führungsspline und markierter Abschnittsgrenze..	<b>39</b>
<b>5.6</b>	Bahnhof U1/U2 mit manuell erstellter Szene-Beleuchtung.....	<b>40</b>

## Tabellenverzeichnis

<b>2.1</b>	Gegenüberstellung der Übertragungsarten.....	<b>12</b>
------------	--	-----------

## 1. Einleitung

Die Metropolregion München ist ein dynamischer Wirtschaftsstandort mit hohem Wachstumspotential. Vor allem für das nähere Münchner Umland prognostizieren Experten eine starke Bevölkerungszunahme innerhalb der nächsten Jahre. <sup>[1]</sup> Aus dieser Entwicklung resultieren massive Herausforderungen für den öffentlichen Nahverkehr; bereits jetzt müssen an einem gewöhnlichen Werktag rund 100 Millionen Personenkilometer innerhalb des Großraums München abgewickelt werden. <sup>[1]</sup> Als zentraler Knotenpunkt der urbanen Infrastruktur ist der Münchner Hauptbahnhof mit seinen 32 oberirdischen und momentan 8 unterirdischen Gleisen und täglich rund 350.000 Reisenden permanent Gegenstand verkehrstechnischer Planungen. <sup>[2]</sup> Das derzeit größte, in diesem Zusammenhang stehende Projekt stellt der Bau der 2. S-Bahn-Stammstrecke dar. Hierfür erstellte die Planungsgesellschaft OBERMEYER zwischen 2003 und 2005 ein 3D-Datenmodell, welches alle wesentlichen, unterirdischen Verkehrsbauwerke am Münchner Hauptbahnhof beinhaltet, darunter die existierenden und die geplanten S-Bahn-Trassen, die Bauwerke der U-Bahnlinien U1/U2 und U4/U5, die Strecke des Projekts „München 21“ sowie die Infrastrukturbauten der ursprünglich geplanten Transrapid-Anbindung. Grundlage für dieses Modell waren neben teilweise historischen Papierplänen digitale Daten verschiedener aktueller Planungen. Dieses Wettbewerbs- und Planungsmodell wurde mithilfe der objektorientierten CAD-Software AutoCAD 2004 erstellt. <sup>[3]</sup> Die Modelle der beiden U-Bahnlinien - bestehend aus den Bahnhofsbauten sowie den daran anschließenden Streckenabschnitten - stellen die Daten-Grundlage für vorliegende Arbeit dar.



**Abbildung 1.1:** Gesamtmodell der unterirdischen Bauwerke des Hauptbahnhofs [\*]

\* [[http://www.2.stammstrecke-muenchen.de/uploads/pics/3D-modell-tunnel-unter-hauptbahnhof\\_01.jpg](http://www.2.stammstrecke-muenchen.de/uploads/pics/3D-modell-tunnel-unter-hauptbahnhof_01.jpg)]

Die Aufgabenstellung der Bachelor's Thesis setzt sich aus der originalgetreuen Nachbildung dieser Modelle im CAD-CAM-CAE-Programm Siemens NX 7.5 und deren vollständigen Parametrisierung, sowie einer möglichst realitätsnahen Visualisierung des fertigen Produkts zusammen.

Der Einsatz von Siemens NX für die Gebäudemodellierung stellt bis jetzt noch eine Ausnahme dar; das CAD-Programm konnte sich bisher vor allem im Maschinenbau, insbesondere im Automobilbereich etablieren. Prominente Nutzer der NX-Software sind beispielsweise die Automobilkonzerne Daimler und Aston Martin. Beide Unternehmen haben ihre gesamten Entwicklungsprozesse auf Basis von NX weltweit standardisiert. <sup>[4]</sup>

Der Anspruch der vorliegenden Arbeit besteht neben der Modellierung demnach auch in der Beurteilung, ob die NX-Funktionalitäten auch im Baubereich erfolgreich eingesetzt werden können.

Die vollständig computer-gestützte Modellierung von dreidimensionalen Modellen, sowie die lebenszyklische Begleitung der realen Produkte bzw. Gebäude anhand der erstellten Modelle wird als Building Information Modeling bezeichnet. Auch die Bauwirtschaft entdeckt gegenwärtig das enorme Potential der digitalisierten Gebäudeentwicklung. So vollzieht sich gerade eine Umstellungen von konventionellen 2D-Planungen auf dreidimensionale, digitale Produktmodelle. Die Relevanz der Arbeit erschließt sich damit aus der aktuellen Situation der Bauindustrie. <sup>[5]</sup>

Das Building Information Modeling anhand gegebener Aufgabenstellung ist im Folgenden ausführlich dokumentiert. Der erste Teil der Arbeit erörtert verschiedene Verfahren, die AutoCAD-Datensätze in NX zu überführen. Entscheidungsgrundlage für die Wahl des geeigneten Verfahrens ist eine möglichst niedrige Fehleranfälligkeit sowie eine hohe Effizienz der Übertragung im Hinblick auf die Erfordernisse der parametrischen Modellierung.

Im zweiten Teil wird die Modellierung der U-Bahnbauwerke in Siemens NX beschrieben. Dabei wird zunächst auf erforderliche Modifikationen des AutoCAD-Modells, sowie auf die Parametrisierung der importierten Daten eingegangen. Anschließend wird die Modellierung aller auftretenden Objekttypen, wie z.B. Tunnel, Gleise und Treppen erläutert. Zudem wird die Verwendung von NX-Analysertools zur Erkennung bestehender Fehler und Modellierungsungenauigkeiten dokumentiert. Abschließend werden die einzelnen Arbeitsschritte der durchgeführten Fehlerkorrekturen beschrieben.

Im letzten Teil der Dokumentation werden die Möglichkeiten der Visualisierung diskutiert. Die Verwendung geeigneter Texturen, der Einsatz von Beleuchtung, sowie die Erstellung photorealistischer Animationen werden innerhalb dieses Kapitels erläutert.

Abschließend zeigt ein Fazit auf, wie geeignet Siemens NX 7.5 für die Modellierung von unterirdischen Infrastrukturbauten ist und welche Möglichkeiten sich aus der konsequenten Fortführung der digitalen Bauwerksmodellierung ergeben.

## 2. Übertragung des Modells

Da sich der praktische Teil der vorliegenden Bachelor-Arbeit mit der Weiterverwendung bzw. Weiterverarbeitung alter AutoCAD-Datenbestände in Siemens NX 7.5 (im Folgenden mit „NX“ bezeichnet) beschäftigt, spielt die Übertragungsart eine entscheidende Rolle für die Effizienz der Modellierung und die Qualität des übertragenen Produkts.

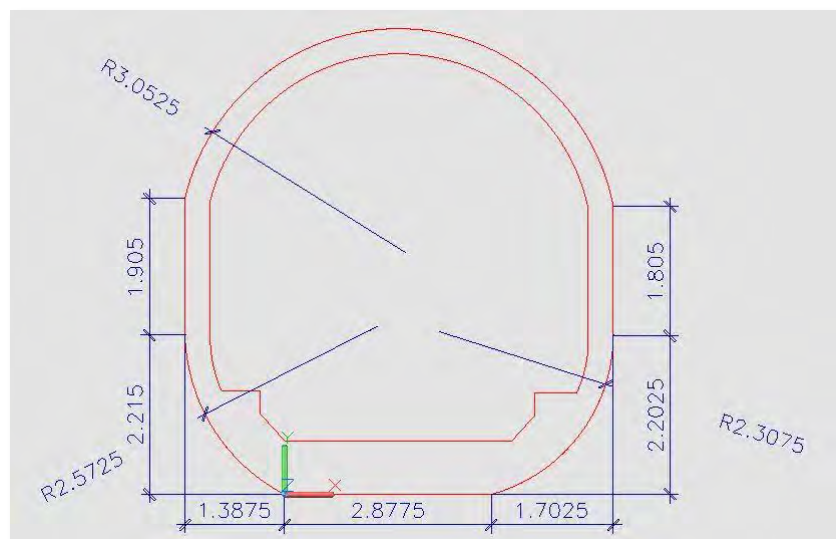
### 2.1 Diskussion verschiedener Übertragungsmethoden

Im Zuge der Arbeit haben sich 4 Methoden herauskristallisiert, die im DWG-Format vorliegenden AutoCAD-Datensätze in NX zu überführen. Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Verfahren näher erläutert und auf ihre Tauglichkeit hin überprüft, bestehende Daten effizient und fehlerfrei zu übertragen. Ein abschließendes Fazit zeigt auf, welche Verfahren für vorliegende Aufgabenstellung am besten geeignet sind.

#### 2.1.1 Übertragung durch Messen

Die zunächst am naheliegendsten erscheinende Methode der Übertragung stellt das Abmessen bestehender Geometrien dar. Das Grundprinzip besteht darin, per AutoCAD-Bemaßungsfunktion einen Querschnitt vollständig zu erfassen und auf Basis dieser Bemaßung eine Kopie der Skizze in NX zu erstellen.

Da AutoCAD generell nur zweidimensional in der xy-Ebene eines Koordinatensystems bemaßt, ist es sinnvoll, zunächst einen repräsentativen 2D-Schnitt durch den zu übertragenden Volumenkörper zu erzeugen. Dieser Schnitt wird mit dem Befehl „Section“ erzeugt.<sup>[11]</sup> Die Bemaßung selbst erfolgt dann nicht mehr am Körper, sondern direkt an der erstellten 2D-Schnittgeometrie. Um die Bemaßung auszuführen, wird zunächst ein lokales Koordinatensystem an diese Schnittebene angelegt. (Vgl. Abbildung 2.1)



**Abbildung 2.1:** Bemaßter Querschnitt mit lokalem Koordinatensystem

Unter Ausführung des Befehls „lineare Bemaßung“ werden anschließend mithilfe der Punktfangeinstellung „Endpunkt“ alle Linienobjekte der Skizze abgemessen. Anmerkung: Die Bemaßung der Bogen-Radien kann an der unveränderten Skizze nicht durchgeführt werden, da die Bögen aufgrund des Skizzenverbundes nicht separat angewählt werden können. Daher ist es nötig, auf die Bögen der Skizze deckungsgleiche Pendants zu zeichnen, die dann als eigenständige Objekte bemaßt werden können.

Die bemaßte 2D-Ansicht wird im Anschluss als Screenshot gespeichert und dient so als Vorlage für die Skizzenerstellung in NX. Dort lassen sich die Skizzen auf der Grundlage des erstellten Screenshots nachzeichnen; das Resultat ist eine vollständig parametrische, zur Ausgangsgeometrie identische Skizze, die von NX automatisch bemaßt wird.

Theoretisch ist es also möglich, Skizzengeometrien über Bemaßung in NX zu übertragen. In der Praxis stellt sich allerdings schnell heraus, dass diese Methode äußerst zeitintensiv und zudem stark fehleranfällig ist. Folgende Nachteile werden in der Anwendung ersichtlich:

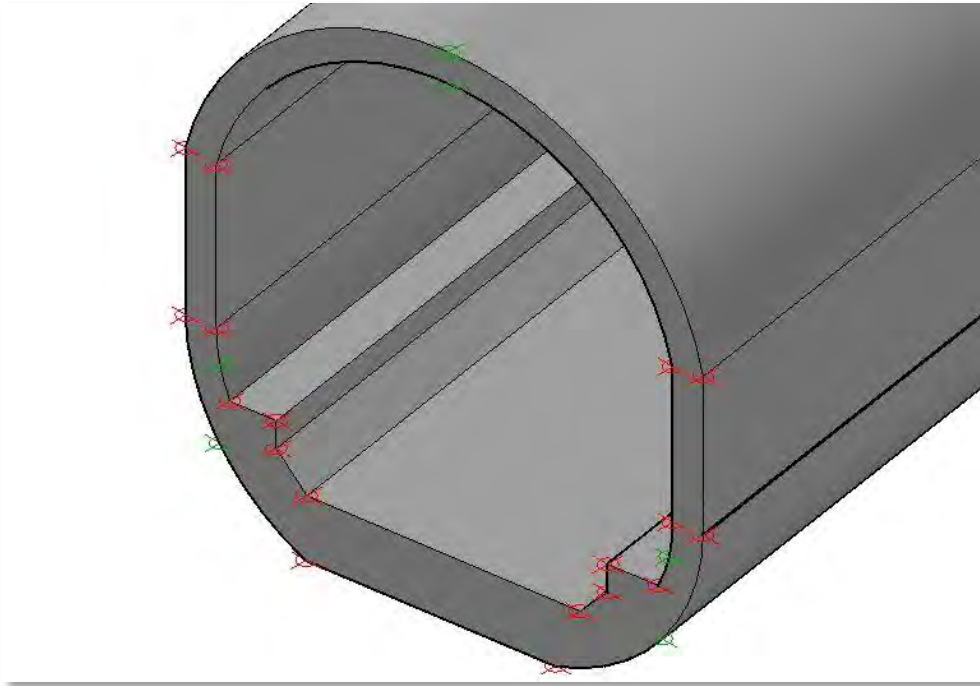
- Bei der Bemaßung von komplexen und kleingliedrigen Skizzen, wie z.B. den Schienenköpfen, wird der bemaßte Schnitt unübersichtlich. Um eine Überlappung der Bemaßung zu vermeiden, müssen mehrere Screenshots der vergrößerten Skizze erzeugt werden.
- Die Bemaßung erfolgt nur innerhalb einer Skizze; die globale Position der Skizze in der NX Zeichnung ist also aus dem bemaßten Querschnitt nicht zu entnehmen und muss separat ermittelt werden.
- Es ist nicht möglich, komplexe 3D-Geometrien wie Splines durch 2D-Bemaßung korrekt zu erfassen. Spätestens bei der Übertragung der Streckenführung erweist sich die Methode also als unzureichend.

Die Übertragung mithilfe von Bemaßung ist also nur im Falle von sehr übersichtlichen, vorzugsweise zweidimensionalen Zeichnungen sinnvoll, für vorliegende Arbeit hat die Methode jedoch keine Relevanz.

### 2.1.2 Übertragung mithilfe von Punktlisten

Diese Methode beruht auf der Idee, sämtliche zu übertragende Skizzen und Extrusionsführungen auf Punkte zu reduzieren. Diese Punkte werden daraufhin in NX übertragen und dort wird aus ihnen die Ursprungsgeometrie rückerzeugt. Beispielsweise wird für die Übertragung einer Linie deren Anfangs- und Endpunkt übertragen, für einen Bogen Anfangs-, End- und Mittelpunkt. Über ihre globalen Koordinatenwerte ist in den übertragenden Punkten zudem die räumliche Position der Skizze bzw. der Führung enthalten. Die Übertragungsart basiert auf einer Schnittstelle zwischen NX und AutoCAD, die den formatunabhängigen Import von Punktlisten erlaubt.

In einem ersten Arbeitsschritt werden in AutoCAD in einem Layer „Punkte“ all diejenigen Endpunkte, Ecken bzw. Mittelpunkte mit neuen Punktobjekten besetzt, die notwendig sind, um eine Skizzengeometrie eindeutig zu bestimmen. (Vgl. Abbildung 2.2)



**Abbildung 2.2:** Mit Definitionspunkten versehener Tunnelquerschnitt. Der Querschnitt ist durch die rot und grün dargestellten Punkte vollständig erfasst. Die roten Punkte stellen Anfangs- und Endpunkte von Linien dar, die grünen Punkte Mittelpunkte von Bögen.

Via Befehl „Data Extraction“ werden gezielt diese Punkte mit ihren Koordinatenwerten (*stets bezogen auf das Weltkoordinatensystem*) in einem Tabellenkalkulations-Programm als Punktliste gespeichert. <sup>[11]</sup> Für die vorliegende Bachelor-Arbeit wurde das Programm „Oracle Open Office Calc“ verwendet, da entscheidende Speicheroptionen leichter zugänglich sind als in „Microsoft Excel“. Die Punktkoordinaten werden mit einer Genauigkeit von 8 Nachkommastellen extrahiert. Für das Einlesen in NX muss das Tabellendokument jedoch zuerst modifiziert werden.

Alle Zell-Inhalte, die keine Koordinatenwerte beinhalten, werden zunächst gelöscht. (z.B. *Count, Name, Position X...*, vgl. Abbildung 2.3) Die verbleibenden 3 Spalten, die ausschließlich die Koordinaten-Werte enthalten, werden en bloc in die Spalten A, B und C kopiert. Die Liste muss in Zeile 1 beginnen. Da NX .ods- beziehungsweise .xls-Formate nicht verarbeiten kann, muss die Punktliste in eine .dat Datei umgewandelt werden.

Hierfür wird die Liste übergangsweise als .csv Datei gespeichert, da Open Office Calc die Liste nicht direkt als .dat-Datei ausgeben kann. Wichtig ist, dass als Texttrenner das Komma angegeben wird und der Feldtrenner deaktiviert wird. Die gespeicherte .csv Datei kann schließlich in eine .dat Datei umbenannt werden. <sup>[10]</sup>

	A	B	C	D	E	F
1	Count	Name	Position X	Position Y	Position Z	
2	1	Point	132.31473	-154.94179	-2.23519314	
3	1	Point	132.31275	-154.73333	-2.22796187	
4	1	Point	132.30016	-152.7289	-2.16006431	
5	1	Point	132.29559	-150.7240	-2.09415615	
6	1	Point	132.29903	-148.7191	-2.03025287	
7	1	Point	132.31050	-146.7142	-1.96835448	
8	1	Point	132.32999	-144.7094	-1.90846097	
9	1	Point	132.35749	-142.7047	-1.85057235	
10	1	Point	132.39302	-140.7002	-1.79468861	
11	1	Point	132.43656	-138.6957	-1.74080976	

**Abbildung 2.3:** Ausschnitt aus einer Punktliste in Open Office Calc

Das Einlesen der Punkte in NX erfolgt ebenfalls über einen „Umweg“. In der NX-Zeichnung wird zunächst auf die Arbeitsumgebung „Fertigung“ gewechselt. Über das Menü „Einfügen“ wird der Befehl „Spline aus Punkten“ aufgerufen. Diese Punkte werden aus der eben erzeugten externen .dat-Datei bezogen. Ist entsprechende Datei angewählt und geladen, erzeugt NX aus den extrahierten AutoCAD Punkten einen Spline, währenddessen die Punkte selbst wieder verloren gehen. Um diese Punkte wiederherzustellen, fügt man entlang des entstandenen Splines das Punkte-Set „definierende Punkte“ ein. So werden die Punkte rückerzeugt.<sup>[10]</sup> Im Hinblick auf eine möglichst exakte Passung mit der Ursprungsgeometrie ist darauf zu achten, die Toleranz-Werte bei der Positionierung dieses Punkte-Sets auf ein zulässiges Minimum zu reduzieren. Sind die definierenden Punkte auf dem Spline erstellt, kann die Freiform-Kurve gelöscht werden. Aus dem verbleibenden Punkteset kann nun über die Skizzen-Fangoption „vorhandene Punkte“ der ursprüngliche AutoCAD-Querschnitt erstellt werden. Der Umweg über die punktbasierte Splineerstellung ist notwendig, da NX sonst keine Möglichkeit bereithält, Punktlisten einzulesen.

Auf diese Weise kann eine zur Ursprungsgeometrie identische Skizze erzeugt werden. Solange das Punkteset jedoch erhalten bleibt, handelt es sich um keine parametrische Skizze, da die Zwangsbedingungen der Skizze über die Punktkoordinaten definiert sind. Deshalb müssen nach der Fertigstellung der Skizze sämtliche Punkte gelöscht werden; da man der Skizze damit alle definierenden Elemente nimmt, reagiert NX zunächst mit einer Fehlermeldung; die Skizzengeometrie bleibt dennoch unbeschädigt erhalten. Um auf die Meldung zu reagieren, genügt es, das entsprechende Skizzenobjekt in der Modellhistorie mit einem Doppelklick anzuwählen. Daraufhin führt NX eine automatische

Bemaßung durch, wodurch die Skizze vollständig durch Parameter zwangsbedingt wird. Die Fehlermeldung verschwindet daraufhin.

### 2.1.3 Übertragung mithilfe gemeinsamer Dateiformate

Im Gegensatz zu den beiden vorherig vorgestellten Übertragungsmethoden basiert die Nutzung gemeinsamer Dateiformate auf der Überführung von Modellen, nicht auf der vollständigen Neumodellierung. Die Verfahren „Punktlisten“ - und eingeschränkt auch das Verfahren „Messen“ - generieren einen formatunabhängigen Input für NX, mithilfe dessen das gewünschte Modell originalgetreu kopiert werden kann, hierfür jedoch von Grund auf neu erstellt werden muss.

Die Übertragung mithilfe gemeinsamer Dateiformate beruht auf dem Prinzip der Weiterverwendung von Ausgangs-Datensätzen. Bildlich erklärt wird das Ursprungsformat, also die „Sprache“ des Ausgangsmodells in die Sprache des gewünschten neuen Formats übersetzt. Im Idealfall funktioniert diese Übersetzung fehlerfrei, d.h. das umgewandelte Modell ist auch im neuen Format vollständig erhalten und eventuell sogar bearbeitbar. Da in diesem Verfahren keine Zwischenschritte bzw. Hilfselemente - wie Punktlisten oder Screenshots - nötig sind und theoretisch auch keine Neumodellierung stattfinden muss, hat es bezüglich Arbeits-Geschwindigkeit und Fehleranfälligkeit per se erhebliche Vorteile gegenüber den ersten beiden vorgestellten Übertragungsmethoden.

Bereits im Vorfeld zeichnet sich jedoch ein Problem ab: Die Modellierung in NX beruht auf parametrischen Skizzen mit zugehörigen Extrusionsführungen und kommt folglich mit einer schlanken Datengrundlage aus. Die Übertragungsmethoden „Messen“ und „Punktlisten“ selektieren gezielt diese Geometrien und überführen somit ausschließlich die essentiellen Elemente. Der formatbasierte Austausch hingegen übersetzt den gesamten Inhalt einer AutoCAD-Zeichnung. Bleiben diese Zeichnungen unbearbeitet, ist ein Großteil des Importvolumens für die parametrische Modellierung irrelevant. Im Folgenden werden demnach zusätzlich die Möglichkeiten einer Geometriedreduktion der AutoCAD-Datensätze diskutiert. Ziel ist es, die Ausgangs-Datensätze vor der Übersetzung auf repräsentative Querschnitte und zugehörige Extrusionsführungen zu reduzieren, also auf die Basisgeometrie einer parametrischen Modellierung.



### 2.1.3.1 Übertragung mithilfe des IGES-Formats

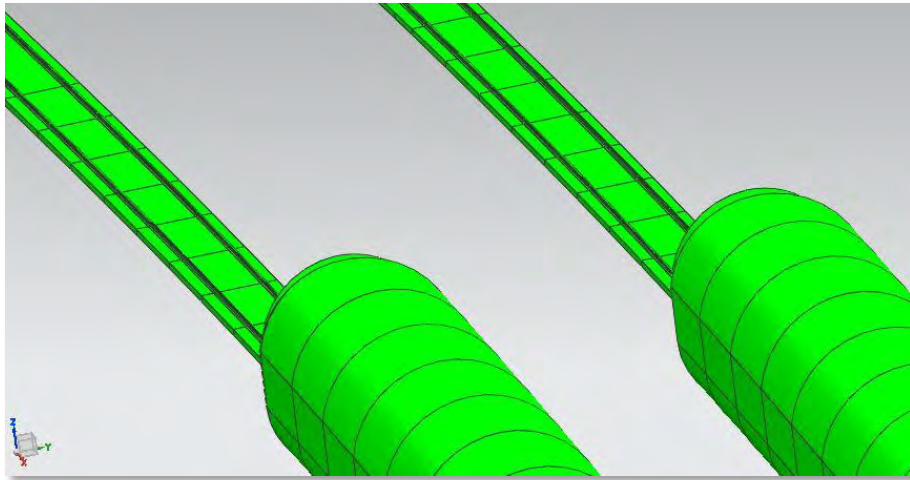
Das IGES-Format (Initial Graphics Exchange Specification) ist ein herstellerunabhängiges Datenformat <sup>[13]</sup>, welches sowohl von AutoCAD, als auch von NX unterstützt wird. Neben IGES kann nur noch das DWG-Format von beiden Programmen verarbeitet werden. Somit stellen sie die beiden einzigen Format-Schnittstellen zwischen AutoCAD und NX dar. Da die Datensätze des Hauptbahnhofs bereits im DWG-Format vorliegen, erscheint der Zwischenschritt über IGES zunächst unnachvollziehbar. Im Folgenden soll jedoch untersucht werden, ob der IGES-Import gegenüber dem DWG-Import signifikante Vorteile aufweist, die den Zwischenschritt rechtfertigen würden.

Die AutoCAD-Dateien müssen zunächst ins IGES-Format exportiert werden. Die Umwandlung von .dwg nach .iges erfolgt über die entsprechende Exportfunktion von AutoCAD. Für die Übertragung der neu erstellten IGES-Datei in NX wird der NX-Übersetzer verwendet. <sup>[9]</sup>

Anmerkung: NX bietet auch die Möglichkeit eines Direktimports der IGES-Datei in die offene Zeichnung; der Import ins aktive Teil funktioniert allerdings nicht. Das Modell kann lediglich in eine neue Datei importiert werden, die während des Import-Vorgangs erstellt wird. Bei diesem Import gehen jedoch Elemente der IGES-Dateien verloren. Die Translation mithilfe des NX-Übersetzers ist folglich die angewandte Methode.

Um die Notwendigkeit einer Geometriereduktion zu verifizieren, wurde die Streckenzeichnung von U4/U5 zunächst unbearbeitet übersetzt. Aufgrund der Modellgröße ergab sich auf verwendetem Rechner eine Übersetzungszeit von knapp 40 Minuten. Der hohe Zeitaufwand ist durch die große Masse an Einzelobjekten zu erklären: Das importierte Modell der U4/U5-Strecke umfasst mehr als 20.000 Flächenelemente, die Dateigröße wächst von 8,18 MB (AutoCAD-Ausgangs Datei) auf über 133 MB (NX-Datei im PRT-Format) an.

Über die IGES-Schnittstelle wird die AutoCAD-Streckenzeichnung in NX als Verbund von Flächenobjekten übertragen, die ursprünglichen 3D-Solids der AutoCAD-Zeichnung gehen vollständig verloren. Geometrisch und topologisch ist das Resultat der Übersetzung jedoch eine fehlerfreie Kopie des Ausgangsmodells, d.h. all die importierten Flächen stellen passgenau die Oberflächen der früheren Solids dar. Würde eine korrekte Erscheinungsform des Modells ausreichen, wäre der formatbasierte Austausch via IGES folglich eine praktikable Methode. Im Hinblick auf das Ziel der Arbeit – die Erstellung eines parametrischen, bearbeitbaren Modells mit echten Volumenkörpern – ist diese Art der Übertragung jedoch vollkommen unzureichend. Bei den importierten Elementen handelt es sich um „tote“ Objekte, d.h. das Modell kann in keiner Weise parametrisch verändert werden. Da die Übertragungsart zudem ausschließlich Flächenobjekte und keine Linien generiert, ist eine direkte Weiterverwendung der Importdaten nicht möglich; die notwendigen Skizzen müssten auf Basis der Flächenobjekte neu erstellt werden.



**Abbildung 2.4:** Abschnitt der Strecke U4/U5 via IGES-Import

Die Layer-Belegung aus AutoCAD bleibt über den IGES-Import erhalten, wenngleich die Benennungen der Layer verloren gehen.

Es ist zu berücksichtigen, dass der Weg über IGES zudem einen Erhalt der „wahren Größe“ des Ausgangsmodells mit sich bringt. In der AutoCAD-Zeichnung ist die grundlegende Einheit Meter, in der NX-Zeichnung hingegen Millimeter. Nach der Umwandlung vom DWG- ins PRT-Format wird demnach ein Meter als 1000 Millimeter ausgedrückt. Somit ist das IGES-Verfahren zum Verfahren der Punktlisten zunächst inkompatibel, da hier aufgrund der skalar vorliegenden Zahlenwerte in der Tabelle Meter einfach in Millimeter umgewandelt werden. Ein konkretes Problem bezüglich der „wahren“ Größe des Objekts entsteht, wenn das importierte Modell eine Ausdehnung von mehr als einem Kilometer bzw. 1 Mio. Millimetern aufweist, da sich eine NX-Zeichnung aufgrund der Definition des Parasolid Kerns innerhalb eines Würfels der Kantenlänge 1000 x 1000 x 1000 Metern befinden muss. <sup>[6]</sup>

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Übertragung von Geometrie via IGES generell fehlerfrei funktioniert, die AutoCAD-Modelle im Hinblick auf „Datenmüll“, Leistungsprobleme und die spätere parametrische NX-Modellierung aber so modifiziert werden müssen, dass nur die essentiellen Elemente übersetzt werden.

### 2.1.3.2 Übertragung mithilfe des DWG-Formats

Das DWG-Format entspricht, wie bereits erwähnt, dem vorliegenden Dateiformat. Deshalb ist die Nutzung der DWG-Schnittstelle von NX von Grund auf naheliegend.

Genau wie beim Import der IGES-Dateien empfiehlt es sich aus obig genannten Gründen, den NX-Übersetzer statt dem Direkt-Import zu verwenden.

Analog zum IGES-Verfahren ist eine Übersetzung der unbearbeiteten Ausgangsdaten nicht sinnvoll; im Gegensatz zum IGES-Format ist dies mit dem DWG-Import auch nicht möglich: Die Überführung der komplexen Streckenzeichnungen schlägt vollständig fehl, nur die Bahnhöfe können unbearbeitet in NX transferiert werden. Nach der erforderlichen Geometriereduktion funktioniert der Import aller Zeichnungen jedoch fehlerfrei. Die importierten Geometrien stellen exakte Kopien der ursprünglichen Skizzen und Extrusionsführungen dar.

Ein Vorteil gegenüber dem IGES-basierten Verfahren besteht darin, dass die Layer-Struktur dank weitergeführter Bezeichnung vollständig erhalten bleibt.

Im Gegensatz zum IGES-Verfahren wird darüber hinaus per DWG-Import ein Meter in einen Millimeter umgewandelt. Das löst zum einen das potentielle Risiko eines für NX zu großen Modells, zum anderen ist das DWG-Verfahren damit kompatibel zum Punktlisten-Verfahren. Für die Arbeit am späteren NX-Modell ist es natürlich wichtig zu wissen, dass Millimeter als Meter angesehen werden müssen.

## 2.2 Fazit

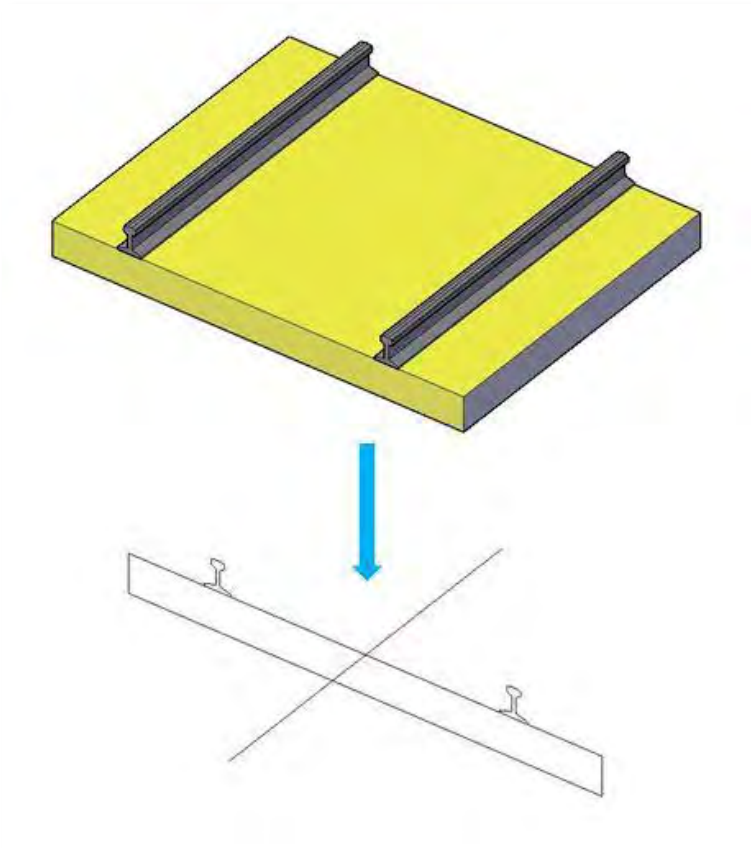
Die 3D-Modelle der U-Bahnhöfe und Strecken unter dem Münchner Hauptbahnhof sind komplex, was eine effiziente und wenig fehleranfällige Übertragungsart sehr wichtig macht. Wie oben bereits ausgeführt, ist die Übertragung durch Messen eine unzureichende Methode und findet in der vorliegenden NX-Modellierung keinerlei Anwendung.

Die Übertragung mithilfe von Punktreihen ist eine theoretisch praktikable Methode, die eigenständig funktioniert. Gegenüber den format-basierten Verfahren hat sie aber folgende Nachteile:

- Da AutoCAD keine automatisierte Methode bereithält, Punkte zu platzieren, muss jeder Punkt, der für eine spätere Skizze oder einen späteren Spline relevant ist, manuell erstellt werden. Das bringt einen erheblichen Arbeitsaufwand mit sich
- Da anstelle von Flächen oder zusammenhängenden Linien ausschließlich Punkte übertragen werden, gestaltet sich das Erstellen von Skizzen aufgrund entstehender Unübersichtlichkeit oftmals als sehr schwer und fehleranfällig
- Auf Basis der Punkte müssen alle Skizzen manuell neu erstellt werden. Eine automatische Skizzenerzeugung auf Basis der Punkte ist nicht möglich

Somit kann die Punktreihen-Methode nicht mit den format-basierten Methoden konkurrieren. Sinnvoll eingesetzt werden kann sie jedoch, wenn ohne gemeinsames Format übertragen werden soll. Dies trifft z.B. auf „Reparaturarbeiten“ bzw. Ergänzungen am bestehenden Modell zu. Hier müssen ganz gezielt gewünschte Bereiche selektiert und auch kleinste Elemente übertragen werden können, ohne dass in AutoCAD zuerst andere, für die aktuelle Operation irrelevante Objekte oder Layer gelöscht werden müssen. Die Übertragung via Punktliste ist also ideal für Nachbesserungsarbeiten, hier ist der Arbeitsaufwand im Vergleich zu den Format-basierten Verfahren deutlich minimiert.

Die Übertragungsverfahren über die gemeinsam unterstützten Formate IGES und DWG funktionieren mit entsprechender Geometriereduktion in AutoCAD beide zuverlässig und fehlerfrei. Wie aus obigen Ausführungen jedoch ersichtlich wird, sind diese Vorarbeiten in AutoCAD im Hinblick auf die Zielsetzung der Arbeit essentiell. Die praktische Ausführung der obig beschriebenen Geometriereduktion in AutoCAD, die vor der Übersetzung durchgeführt werden muss, wird in Kapitel 3.1 ausführlich beschrieben. Abbildung 2.5 verdeutlicht grafisch das zugrunde liegende Prinzip:



**Abbildung 2.5:** Geometriereduktion am Beispiel eines Gleiskörpers: Statt des Volumenkörpers, der in NX als Flächenverbund dargestellt werden würde, werden lediglich Geometrien in NX überführt, die in der späteren parametrischen Modellierung als Skizze oder Extrusionsführung verwendet werden können. Im Querschnitt und der Extrusionsführung sind jegliche Geometrieinformationen enthalten, die für eine originalgetreue Nachbildung des Gleiskörpers in NX erforderlich sind.

Da die Ausgangsdaten als DWG-Dateien vorliegen, beim IGES-Verfahren die Layer-Unterstützung nicht vollständig gegeben ist und zudem keine Kompatibilität mit dem Punktlistenverfahren besteht, ist die Übertragung mithilfe des DWG-Verfahrens am vorteilhaftesten. Wird das Verfahren in entsprechenden, oben beschriebenen Fällen mit dem Punktlisten-Verfahren kombiniert, lassen sich die Ausgangsdatensätze effizient und fehlerfrei in NX übersetzen.

Untenstehend ist zusammenfassend ein tabellarischer Vergleich der 4 Methoden dargelegt, bezogen auf die gegebene Aufgabenstellung

<b>Beurteilungskriterien</b>	<b>Messen</b>	<b>Punktlisten</b>	<b>IGES-Format</b>	<b>DWG-Format</b>
Fehleranfälligkeit der Modellierung	sehr hoch	hoch	sehr gering	sehr gering
Arbeitsaufwand in AutoCAD	sehr hoch	hoch	gering	gering
Arbeitsaufwand in NX	sehr hoch	hoch	sehr gering	sehr gering
Importvolumen des reduzierten Modells	-	sehr gering	gering	gering
Übersichtlichkeit bei der Modellierung	sehr unübersichtlich	unübersichtlich	übersichtlich	übersichtlich
Layer-Unterstützung	nein	nein	unvollständig	vollständig
Eigenständigkeit des Verfahrens	nein	ja	ja	ja
Kombinierbarkeit mit andern Verfahren	ja	ja	nein	ja
Direkte Nutzung importierter Geometrie	-	nein	ja	ja

**Tabelle 2.1:** Gegenüberstellung der Übertragungsarten

## 3. Modellierung in NX 7.5

Die 3D-Modellierung in NX 7.5 basiert auf 3 grundlegenden Arbeitstechniken:

- Die Erstellung zweidimensionaler, parametrisch zwangsbedingter Skizzen
- Die Extrusion dieser Skizzen entlang von Führungen und damit die Erstellung von Volumenkörpern
- Vereinigung, Subtraktion und Schnitt der entstanden Volumenkörper in sogenannten Booleschen Operationen

Natürlich bietet NX eine sehr weitreichende Auswahl weiterer Bearbeitungswerkzeuge für die Erstellung und Änderung von Geometrien an, aber das Fundament jeder Modellierung stellen in erster Linie obig dargestellte Elemente dar. <sup>[6]</sup>

Ein weiteres Grundprinzip der NX-Modellierung stellt die Verwendung von Baugruppen dar. Die Idee ist, die Einzelteile (Komponenten) eines Gesamtmodells in einer Baugruppendatei zusammenzuführen. Diese Baugruppendatei enthält selbst keine Geometrieinformationen mehr, sondern nur noch die Lagebeziehungen der enthaltenen Komponenten. Zudem werden die Änderungen der einzelnen Komponenten in die Baugruppendatei übertragen; Änderungen am Gesamtmodell können also in der übersichtlichen Komponente durchgeführt werden.

Für die Modellierung der U-Bahnbauwerke in NX wurde ebenfalls auf dieses Baugruppenprinzip zurückgegriffen. Die Erzeugung der Baugruppe wurde nach der „Bottom-Up“ Methode durchgeführt, d.h. die Komponenten der späteren Baugruppe wurden separat erstellt und in der Baugruppendatei mithilfe von Zwangsbedingungen zueinander positioniert. <sup>[6]</sup>

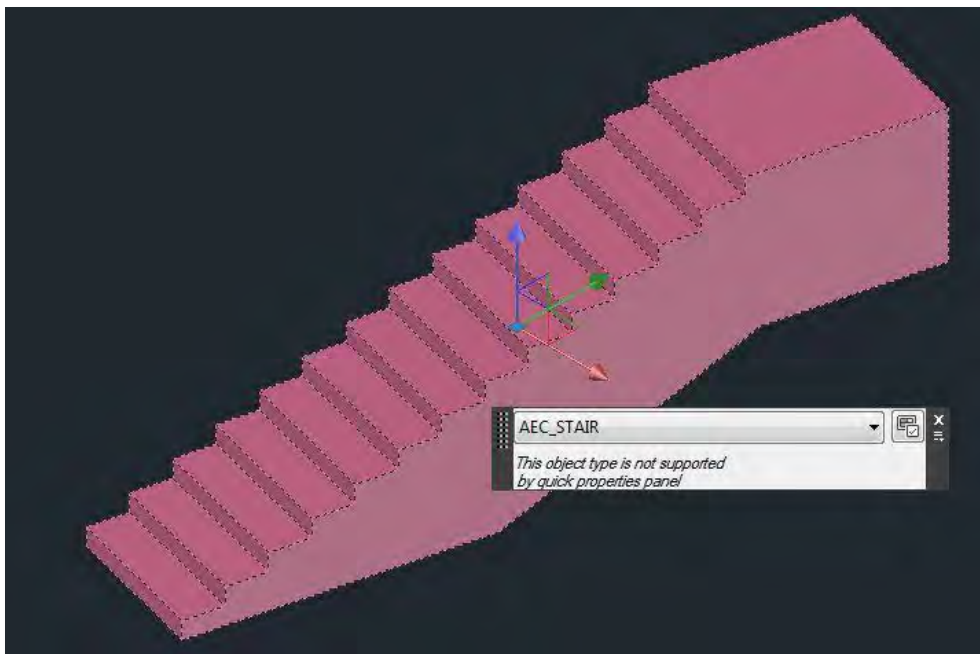
### 3.1 Vorarbeiten in AutoCAD

Wie in Kapitel 2 bereits eingehend begründet, ist die Übersetzung der unveränderten AutoCAD-Ausgangsdaten nicht sinnvoll. Um die Reduktion der AutoCAD-Volumenkörper auf Querschnitte und Extrusionsführungen zu realisieren, müssen nachfolgend beschriebene Vorarbeiten getroffen werden. Ausgangspunkt der Vorarbeiten stellen Modifikationen der enthaltenen Objekttypen dar:

In den unverändert vorliegenden AutoCAD-Datensätzen sind folgende zwei Objekttypen enthalten:

- Volumenkörper
- AEC-Objekte wie AEC-Stair, AEC-Mass-Element, AEC-Slab, AEC-Wall

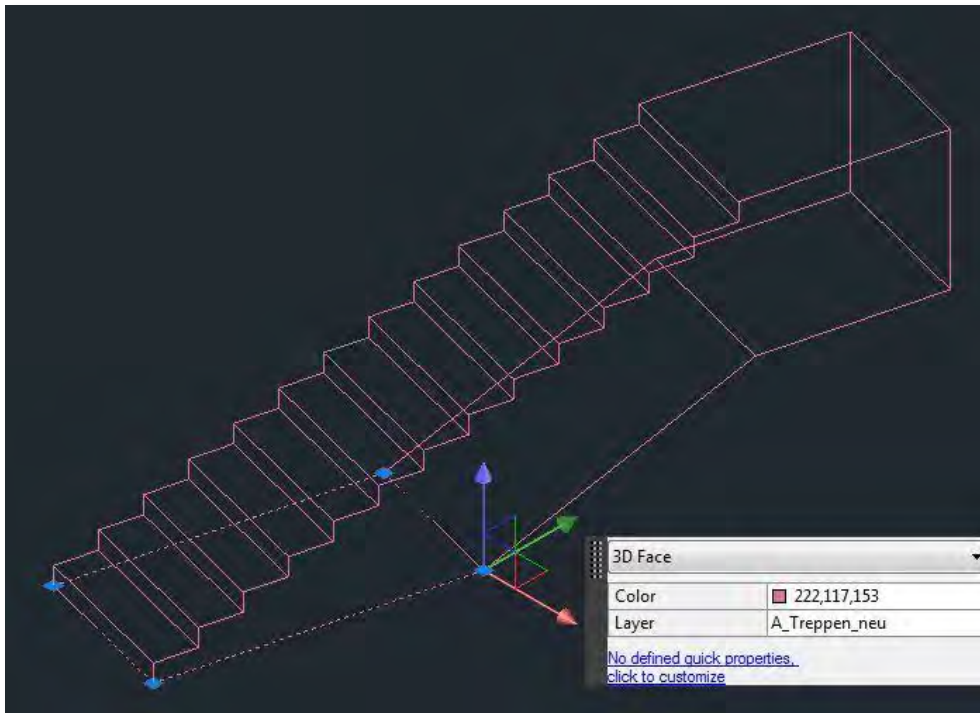
AEC- (**A**rchitectural, **E**ngineering, **C**onstruction) Objekte sind vordefinierte Objekttypen (z.B. Wände oder Treppen), die parametrisch oder über entsprechende Menüs veränderbar sind, in der Grundgeometrie bereits in AutoCAD vorliegen und somit den Arbeitsaufwand der Modellierung deutlich reduzieren können. <sup>[8]</sup>



**Abbildung 3.1:** AEC-STAIR-Objekt

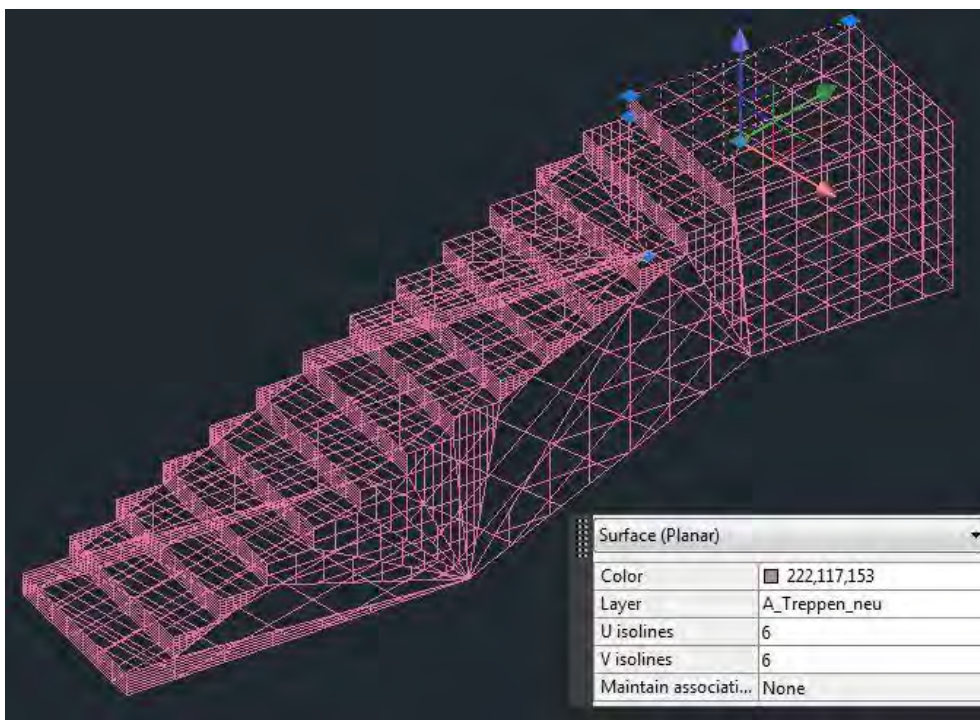
Für vorliegende Arbeit ergibt sich folgende Relevanz dieser Objekte: Gemäß der Idee der Geometriereduktion sollen in AutoCAD aus bestehenden Volumenkörpern 2D-Querschnitte erzeugt werden. Diese automatische Querschnittserzeugung durch den Befehl „Section“ funktioniert allerdings nur bei echten Volumenkörpern (3D-Solid) oder bei „unechten“ Körpern, die aus Oberflächen (Surface) bzw. Netzen (Mesh) zusammengesetzt sind, bei AEC-Objekten hingegen nicht. Deshalb müssen in einem ersten Arbeitsschritt zunächst die AEC-Objekte aller AutoCAD-Datensätze modifiziert werden. Dies lässt sich in offener Zeichnung über den Befehl „AECTOACAD“ realisieren. Daraufhin erzeugt AutoCAD eine neue ACAD-Datei, also eine Kopie der Ausgangsdatei. <sup>[11]</sup> Sie enthält exakt dieselbe Geometrie, lediglich mit dem Unterschied, dass nun alle AEC-Objekte aus einzelnen Flächenobjekten (3D-Faces) bestehen. Echte Volumenkörper verbleiben nach dieser Operation unverändert und werden nicht in 3D-Faces zerteilt.

Die ACAD-Dateien stellen die Ausgangsbasis für alle weiteren vorbereitenden Schritte in AutoCAD dar und müssen für jede einzelne Datei erstellt werden.



**Abbildung 3.2:** ACAD-Kopie der AEC-Treppe

Die Umwandlung in 3D-Faces reicht allerdings noch nicht aus, um den Querschnitts-Befehl auf die einzelnen Objekte anzuwenden zu können. Deshalb muss zusätzlich der Befehl „CONVTOSURFACE“ auf all jene Objekte angewendet werden; die 3D-Faces werden so in 2D-Oberflächen umgewandelt. <sup>[11]</sup> Dieser Elementtyp ermöglicht nun die automatische Erzeugung der gewünschten Querschnitte.



**Abbildung 3.3:** Treppe als „unechter“ Oberflächenkörper



Die entsprechende Geometrie wird nun unter der Ausführung des Befehls „Section“ angewählt; AutoCAD fordert nun vom Benutzer die Eingabe dreier Punkte, um eine Schnittebene erzeugen zu können. Hier empfiehlt es sich immer, jeweils die Mittelpunkte der zu „zerschneidenden“ Geometrie anzugeben. (Punktfang: Mittelpunkt)

Bei Treppen bedeutet dies z.B. auf drei unterschiedlichen Stufen jeweils den Mittelpunkt zu selektieren, wobei darauf zu achten ist, dass die drei Punkte nicht auf einer Linie liegen. Grund für die Wahl der Mittelpunkte ist, dass bei der Auswahl der Ränder stets Oberflächen-Objekte im erstellten Querschnitt „hängen bleiben“, die nur umständlich gelöscht werden können.

Ist die Sektion erstellt, muss noch zugehörige Extrusionsführung (bzw. Länge, Breite oder Höhe des Objekts) erstellt werden. Dies lässt sich einfach mit einem entsprechenden Linienobjekt realisieren.



**Abbildung 3.4:** Reduktion auf Skizze und Extrusionsführung

Nach Abschluss dieser Vorarbeit wird derjenige Layer, auf dem Querschnitte und Führungen liegen, deaktiviert und die Ausgangsgeometrie wird gelöscht. Nach Reaktivierung des Layers verbleibt ausschließlich diejenige fundamentale Geometrie, die in NX importiert wird. Alle voreingestellten Layer, die auf diese Weise geleert werden, sind vor dem Import zu löschen. Diese Geometriereduktion wird für alle Elemente durchgeführt, die in NX übertragen werden sollen. In den verbleibenden Linienobjekten sind alle Informationen enthalten, die für die Wiedererstellung der Ausgangskörper in NX erforderlich sind.

## 3.2 Modellierung der Komponenten

Die Modellierung in NX hat die importierten, gemäß Kapitel 3.1 bearbeiteten AutoCAD-Datensätze zur Grundlage. Gemäß der Aufgabenstellung erfolgt allerdings nicht nur eine originalgetreue Neumodellierung, sondern zusätzlich eine vollständige Parametrisierung aller Modelle.

Die U-Bahn-Modelle liegen nicht als Gesamtmodell vor, sondern sind als einzelne Komponenten gespeichert. Beispielsweise liegen die Streckenzeichnungen von U1/U2 und U4/U5 sowie die einzelnen Ebenen der Bahnhöfe separat vor. Im Hinblick auf das Baugruppenprinzip, verschiedene Analysemöglichkeiten und eine übersichtliche Modellierung wird in NX die vorliegende Komponenten-Struktur weitergeführt.

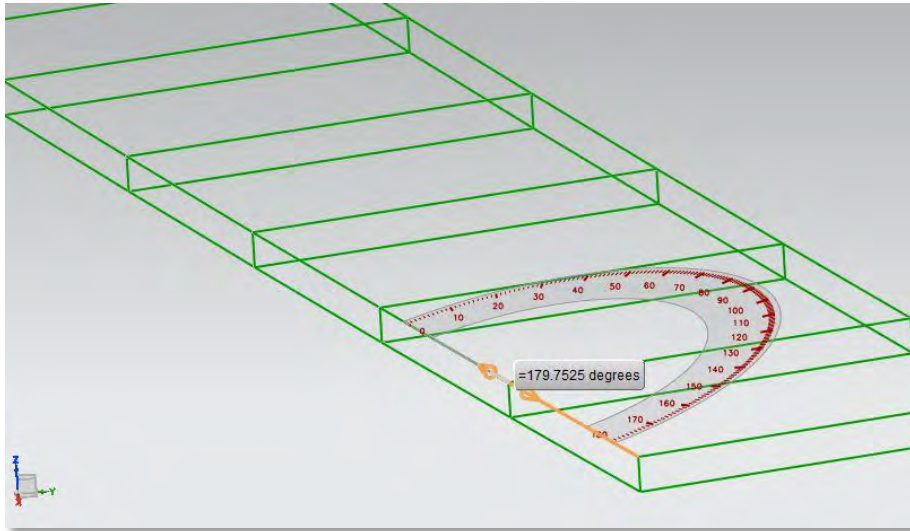
Die verschiedenen Komponenten enthalten wiederum folgende Objektfamilien: Gleise, Tunnel, Treppen, Wände, Decken und Tragwerke. Da sich diese Objekttypen in den meisten Komponenten stetig wiederholen, erfolgt die Beschreibung der Modellierung nicht komponenten-spezifisch, sondern nach Objekttypus.

### 3.2.1 Streckenführung

Die Streckenzeichnungen können auf Basis des Tunnel- und Gleisquerschnitts und zugehöriger Extrusionsführung erstellt werden. Diese Führung entspricht dem räumlichen Verlauf der Strecke. Da die Streckenführung geometrisch sehr komplex ist, kann ihr Verlauf nicht mit Grundelementen wie Linien oder Bögen zufriedenstellend approximiert werden; die Verwendung von Freiform-Splines ist erforderlich.

Für die Streckenmodelle ergeben sich spezielle Vorarbeiten in AutoCAD, da sich im Gegensatz zu allen anderen Objekten die Extrusionsführung nicht durch ein einfaches Linienobjekt darstellen lässt. Zusätzlich zu den relevanten Querschnitten müssen also zudem Geometrien übertragen werden, die in NX als Anhaltspunkt für die Erstellung dieser Führungen dienen können. Hierfür ist das abstrahiert dargestellte Gleisbett am besten geeignet. Diese durchgängige „Schwelle“ liegt als 3D-Solid vor. Im Hinblick auf die Vermeidung von „Datenmüll“ wird das Element mit dem Befehl „Extract Edges“ bearbeitet; so werden alle Kanten des Gleisbettes mit Linienobjekten besetzt und der Solid bzw. seine Oberflächen können gelöscht und müssen nicht in NX übertragen werden. <sup>[11]</sup>

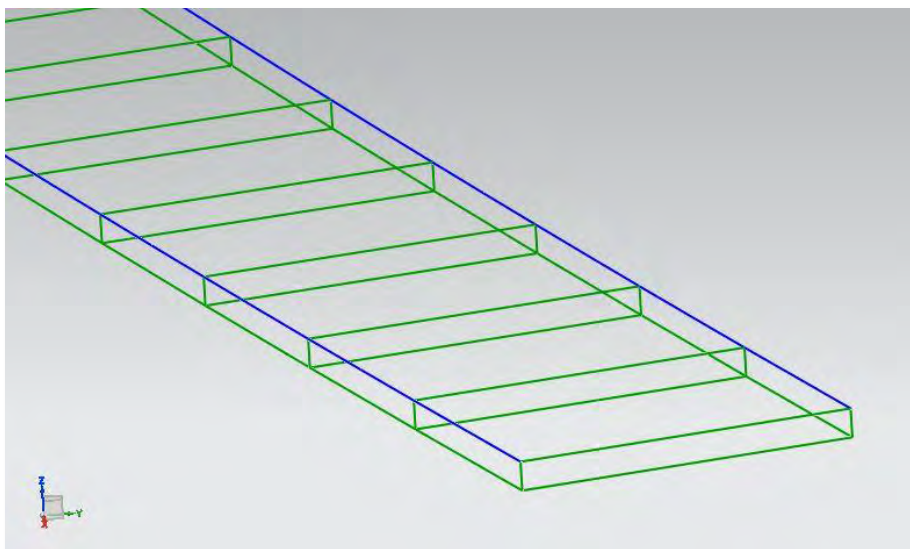
Es fällt auf, dass der Verlauf des Gleisbettes nicht durch einen Spline, sondern durch eine Polylinie bestimmt ist; an jedem Knotenpunkt dieser Polylinie besteht aufgrund des kurvigen Verlaufs der Strecke also ein minimaler Knick. Abbildung 3.5 zeigt auf, dass benachbarte Linien in einem Winkel kleiner 180° aneinander anschließen. Somit ist die Approximation an den originalen Verlauf per se ungenügend, da die Streckenführung der U-Bahn aus fahrtechnischen Gründen keine Knicke, sondern einen harmonischen Verlauf aufweist.



**Abbildung 3.5:** Gleisbett mit „Knickstellen“ zwischen den Linienobjekten. Angezeigter Winkel: 179.7525°

Um diesen weichen, realitätsnahen Verlauf in NX herzustellen, soll die Extrusionsführung nicht durch eine Polylinie, sondern durch einen Studio-Spline dargestellt werden, der an den polylinearen Verlauf der AutoCAD-Vorlage bestmöglich angenähert wird.

Um dies zu realisieren, müssen folgende Operationen in NX durchgeführt werden: Die importierte Gleisbettstruktur besteht ausschließlich aus einzelnen, einander berührender Linienobjekten (siehe Abbildung 3.5). Zunächst müssen pro Gleisbett zwei verknüpfte Linienzüge (in vorliegender Arbeit stets diejenigen Linienzüge, die die Oberkanten des Gleisbettes repräsentieren) zu einer einteiligen Polylinie vereinigt werden. Dies erfolgt mithilfe des NX-Befehls „Kanten verbinden“. Der Befehl orientiert sich zum einen an der Berührung bzw. am Abstand zweier Linien, zum anderen am Winkel zwischen zwei verknüpften Linienobjekten. Die Winkel- und Abstandstoleranzen sollten demnach so eingestellt werden, dass der Linienzug für NX als solcher erkennbar ist und die Vereinigung in einem Schritt erfolgen kann.



**Abbildung 3.6:** Polylineare Vorlage für die Splineführungen

Ist der Zusammenschluss der einzelnen Linien erfolgt, kann entlang der entstandenen Polylinie (in Abbildung 3.6 blau dargestellt) ein Punkteset erzeugt werden. Die Einstellungen sind so vorzunehmen, dass die Punktsetzung vom Anfang bis zum Ende der Linie ausgeführt wird und der Punktabstand konstant ist. Die Elemente dieses Sets stellen die Positionen der definierenden Punkte des späteren Splines dar. Die Anzahl der Set-Punkte hat entscheidenden Einfluss auf die Güte der Approximation an die Ausgangs-Geometrie. Je mehr Punkte das Set enthält, desto näher befindet sich der Spline an der ursprünglichen Polylinie und desto präziser kann zwischen den Führungssplines der konstante Abstand von 2.4 Metern eingehalten werden. Die Konstanz dieses Abstands ist für eine korrekte Darstellung der Tunnel und Gleise essentiell; würde sich der Abstand der Führungslinien beispielsweise vergrößern, wäre eine „Ausbauchung“ der Tunnel die Folge.

Für vorliegende Streckenzeichnungen wurden pro Spline 50 (U4/U5) bzw. 45 (U1/U2) Punkte erzeugt. Mit diesen Werten kann eine gute Grundlage für die Splineerstellung geschaffen werden.

Sind alle Punktesets erstellt, kann die restliche Geometrie prinzipiell gelöscht werden; die vorläufige Beibehaltung hat aber den Vorteil, dass der entstehende Spline mit der Ausgangsstruktur abgeglichen werden kann.

Über die Punktfangoption „vorhandene Punkte“ (dies sollte die einzig aktive Fangoption sein) wird nun ein assoziativer Studio-Spline 3. Grades nacheinander auf die bestehenden Punkte gelegt. Bei der Splineerstellung werden die eigentlichen definierenden Punkte erzeugt, die vorhanden Punkte dienen lediglich als Positionierungshilfe. Nach Abschluss der Splineerstellung werden die Linienobjekte des Gleisbettes und die Punktesets gelöscht; der Spline bleibt über seine internen Definitionspunkte voll bearbeitbar. Die definierenden Splinepunkte können dynamisch in jede der drei Raumrichtungen verschoben werden, der Spline bleibt somit formbar.

Nach Abschluss der beschriebenen Arbeiten verbleiben in der Zeichnung pro Gleis zwei Führungssplines; diese Doppelführung ermöglicht, etwaige Verwindungen des Gleises mit zu berücksichtigen.

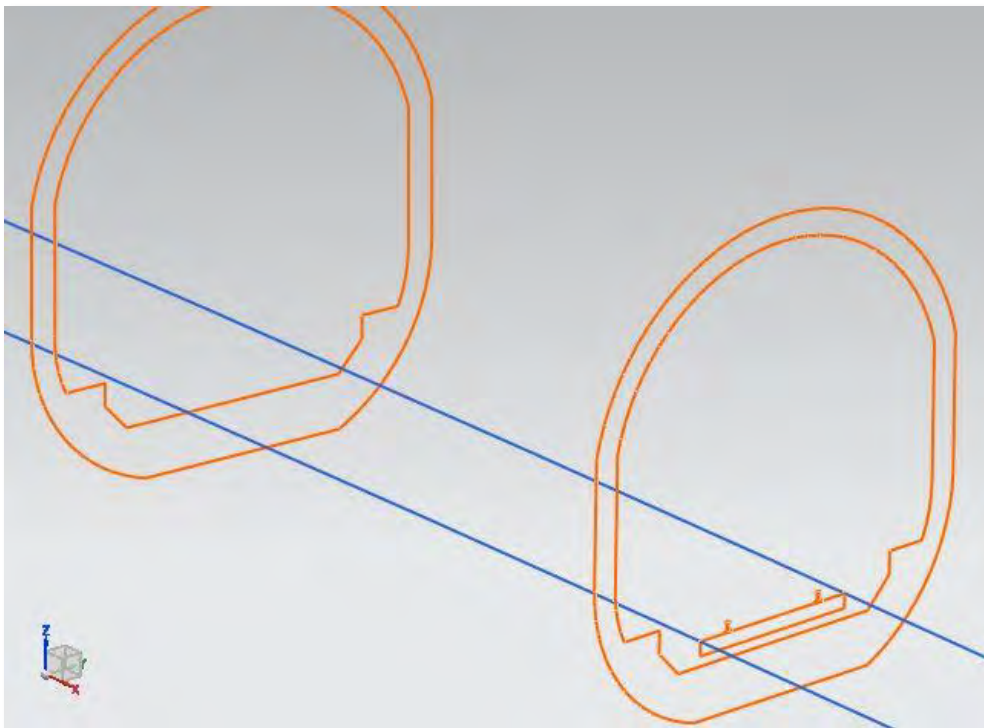
### 3.2.2 Gleise und Tunnel

In Kapitel 3.2.1 wurde die Übertragung der Trassenverläufe beschrieben. Diese Führungssplines stellen das Fundament für die Modellierung der Tunnel und Gleise dar, deren Modellierung in diesem Kapitel behandelt wird.

Die Streckenzeichnungen entstehen natürlich in einem Modell; die Differenzierung der Dokumentation in die zwei Kapitel „Streckenführung“ und „Gleise und Tunnel“ trägt lediglich den unterschiedlichen Arbeitsabläufen Rechnung.

Die Arbeit aus vorigem Kapitel und entsprechende Querschnitte und Trimmebenen aus AutoCAD stellen somit den erforderlichen Input für die Modellierung der Gleise und Tunnel dar.

In Abbildung 3.7 sind zum einen die beiden Führungskonturen aus Kapitel 3.2.1 erkennbar, zum anderen zwei Querschnitte der Tunnel- und Gleisgeometrie. Der rechte Querschnitt beinhaltet sämtliche Geometrieinformationen, die erforderlich sind, um Schienen, Gleise und Tunnel herzustellen. Der linke Querschnitt dient lediglich als Vorlage für eine Trimmebene; im Bereich des Bahnhofsgebäudes existiert selbstverständlich keine geschlossene Tunnelröhre. Der Einfachheit halber wurden die Vorlagen für die Trimmebenen ebenfalls durch den Sektions-Befehl erstellt. Prinzipiell könnten die importierten Skizzen direkt entlang der Führungssplines extrudiert werden. Das Resultat wäre dann zwar geometrisch korrekt, jedoch wären die Volumenkörper nicht parametrisch bearbeitbar.



**Abbildung 3.7:** Führungssplines und importierte Querschnitte

Im Hinblick auf die Zielsetzung der Arbeit müssen deshalb die Skizzen zunächst parametrisiert werden.

Da die Parametrisierung für jedes übertragene Element identisch abläuft, wird das Vorgehen nur an dieser Stelle anhand der Streckenzeichnungen erläutert:

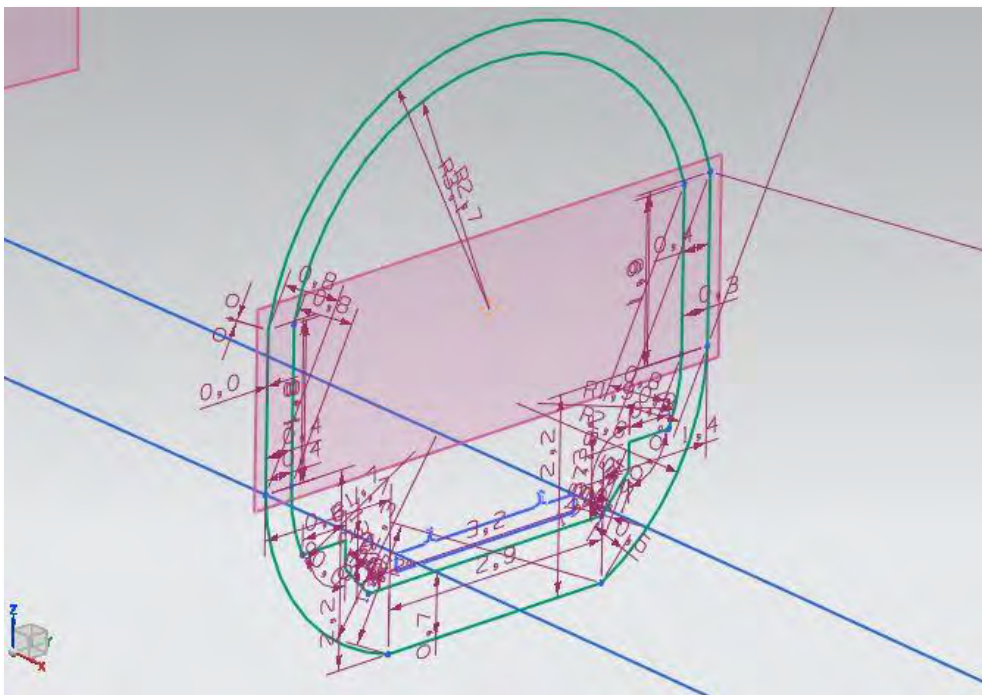
Zuerst werden an die importierten 2D-Querschnitte nicht-assoziative Ebenen geheftet; dies kann z.B. über die Fangoption „2 Linien“ erfolgen. Vor allem für die Trimmebenen ist es wichtig, die Ebenen-Einstellung „assoziativ“ zu deaktivieren, denn nur so kann die Positionierungsgeometrie entfernt werden, ohne dass die erstellte Ebene ebenfalls gelöscht wird.

In einem nächsten Schritt werden Skizzen auf entsprechenden Ebenen erstellt. Mit der Skizzenfunktion „vorhandene Kurven hinzufügen“ lassen sich in NX importierte Querschnitte de facto automatisch in parametrische Skizzen umwandeln. <sup>[6]</sup> Unter Ausführung des Befehls werden die importierten Querschnitte selektiert; NX ersetzt

daraufhin die angewählten Linien durch parametrische Skizzenlinien; die grundlegenden, importierten Querschnitte werden innerhalb dieser Operation automatisch gelöscht. Die so erstellten parametrisierten Skizzen werden vom Programm automatisch bemaßt und sind über die Bemaßungs-Parameter voll bearbeitbar; es besteht keinerlei Unterschied zu manuell erstellten neuen Skizzen.

Auf diese Weise kann das ganze Modell auf Basis parametrischer Skizzen erstellt werden, ohne dass eine einzige Skizze manuell bemaßt oder neu gezeichnet wurde.

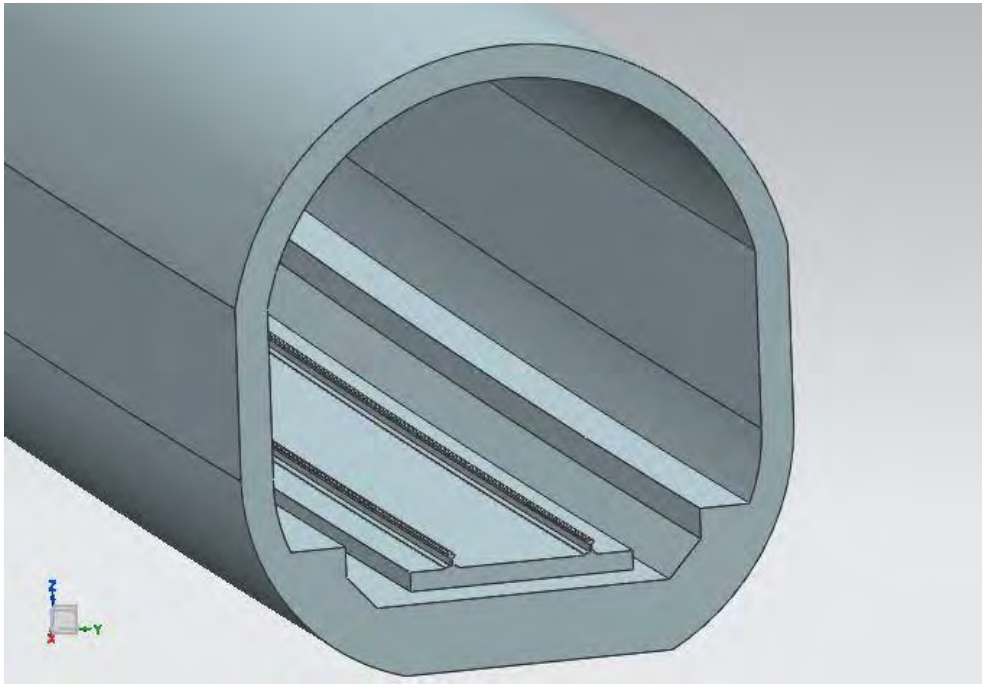
Anmerkung: Die Abmessungen der Skizzenlinien der Schienenköpfe sind äußerst klein und fallen deshalb unter den voreingestellten Toleranzbereich von NX. In der Folge werden sie nicht automatisch bemaßt. Um die Bemaßung nachzuführen, müssen unter „Voreinstellungen - Konstruktion“ die Toleranzwerte auf einen entsprechenden Minimalwert eingestellt werden.



**Abbildung 3.8:** Automatisch parametrisierte Skizzen

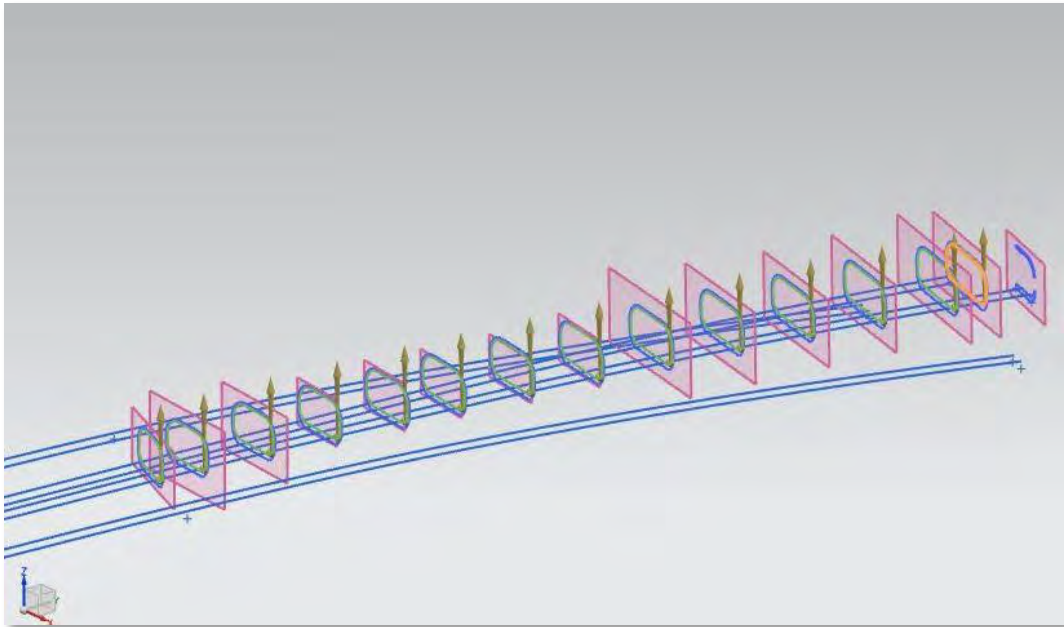
Auf Basis dieser parametrischen Querschnitte kann nun mit der Erzeugung der Volumenkörper begonnen werden. Schienen und Gleisbett wurden auf einer Skizze zusammengefasst; diese Skizze wird entlang der beiden Führungssplines extrudiert. Die Erstellung der Tunnel erfordert die Ausführung Boolescher Operationen. Zunächst wird die äußere Skizze entlang beider Führungskonturen extrudiert, danach die innere. Der entstehende Ausschnitts-Körper wird anschließend mit der Booleschen Operation „Subtraktion“ vom umgebenden Körper abgezogen. Das Resultat ist eine Tunnelröhre, innerhalb derer das Gleisbett mitsamt der Schienenkörper verläuft. Im Bereich des Bahnhofs muss die Röhre unterbrochen werden. Diese Aussparung wird mithilfe der erzeugten Trimmebenen realisiert.

Abbildung 3.9 zeigt einen Ausschnitt des fertigen Strecken-Modells.



**Abbildung 3.9:** Tunnelröhre mit Gleis

Eine Besonderheit in der Tunnelmodellierung stellt die mittlere Röhre von U1/U2 dar. Diese Tunnelröhre beinhaltet zwei Gleise, die sich über den Verlauf der Strecke voneinander entfernen; in der Folge weitet sich der Tunnel über den Streckenverlauf aus. Da die Röhre somit über keinen konstanten Querschnitt mehr verfügt, muss eine Extrusion über mehrere, in der Breite zunehmende Querschnitte erfolgen. Um eine gute Anpassung an die Vorlage zu erzielen, wurden über den Verlauf der Ausweitung 15 Querschnitte via „Section“ angelegt. Diese Querschnitte wurden analog zu den anderen, konstanten Tunnelquerschnitten in NX importiert und parametrisiert; die Extrusion erfolgt entlang der äußeren Führungssplines, jedoch über alle 15 Querschnitte. Hierbei ist zu beachten, dass die Vektorrichtungen der Ursprungskurven aller selektierten Skizzen in dieselbe Richtung zeigen; nur so kann NX die Extrusion fehlerfrei ausführen. <sup>[6]</sup>



**Abbildung 3.10:** Querschnitte für die Tunnelaufweitung mit gleichgerichteten Vektorpfeilen

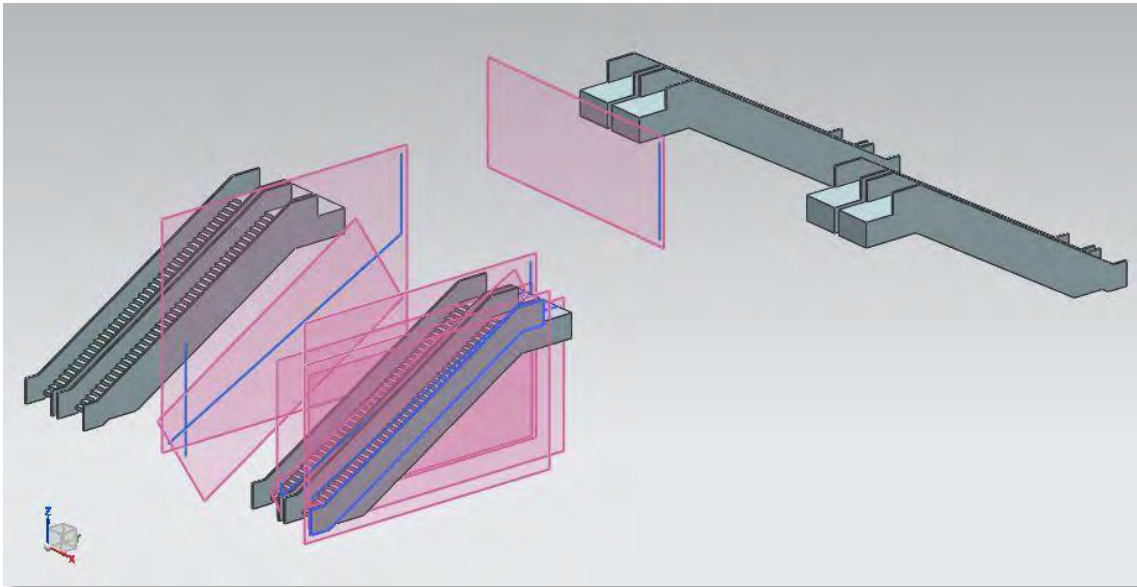
### 3.2.3 Treppen

Die Treppen stellen ein häufig wiederkehrendes Element in den Ausgangsdatensätzen dar. Neben einfachen Treppen kommen abstrahiert dargestellte Rolltreppen vor, die sich lediglich durch ein Geländer und andere Stufenabmessungen unterscheiden.

Bei den komplexen Querschnitten der Treppen (oftmals weit über 100 Linienobjekte) wird die Leistungsfähigkeit der formatbasierten Übertragung in Verbindung mit der automatischen Skizzenerzeugung überdeutlich; die manuelle Skizzenerstellung in der Treppenmodellierung erweist sich als überaus aufwendig und zeitintensiv.

Für gewöhnliche Treppen werden der Querschnitt und die entsprechende Extrusionsführung importiert. Für die Rolltreppen sind der Querschnitt der Treppe sowie der links- oder rechtsseitige Geländer-Querschnitt zusammen mit den zugehörigen Führungen erforderlich. Hier ist die mittige Platzierung des Treppenquerschnitts von besonderer Bedeutung, da dieser Querschnitt in NX zugleich als Spiegelebene für das Geländer dient. Da viele Treppen in symmetrischer Anordnung angebracht sind, kann die Funktion „Körper spiegeln“ in der Treppenerstellung weiter genutzt werden. Abbildung 3.10 zeigt einen Treppenverband, der aus mehrfacher Spiegelung einer einzelnen Treppe erstellt wurde.





**Abbildung 3.11:** Gespiegelte Rolltreppen und zugehörige Spiegelebenen

Die Skizzenparametrisierung erfolgt genauso wie bei den Streckenzeichnungen über den Befehl „vorhandene Kurven hinzufügen“. Aufgrund der Komplexität der Treppenskizzen kann es jedoch vorkommen, dass NX die Parametrisierung bzw. die automatische Bemaßung auf vorliegendem Rechner nicht in einem Rechenschritt durchführen kann. Tritt dieser Fall ein, müssen die Selektion der Geometrie und damit die Parametrisierung in mehreren Schritten erfolgen.

Die Selektion der vielen Linienobjekte in den importierten Treppenquerschnitten erfolgt am schnellsten mithilfe der Auswahloption „Lasso“.

### 3.2.4 Wände und Decken

Da NX über keine vorgefertigten Wand- oder Deckenobjekte verfügt, müssen die Elemente ebenfalls über Skizzen und Extrusionen erstellt werden. Da sich die Arbeitsabläufe hier nicht von den vorig vorgestellten Objektmodellierungen unterscheiden, wird an dieser Stelle nichts weiter ausgeführt.

### 3.2.5 Tragwerke

Als „Tragwerke“ werden in den AutoCAD-Modellen weithin alle tragenden Betonpfeiler bezeichnet. Die Modellierung eines einzelnen Pfeilers erfolgt über die Extrusion des importierten Kreisquerschnitts. Da die Pfeiler zu Dutzenden in Reihen angeordnet sind, ist eine separate Modellierung jedes einzelnen Pfeilers jedoch nicht effizient. Als Lösungsansatz bieten sich zwei Möglichkeiten an: Die Erstellung eines „Pfeiler-Prototypen“ in der NX-internen Wiederverwendungsbibliothek oder die Duplizierung mithilfe der NX-Funktion „Assoziative Kopie“. Da die Duplizierung in einem Arbeitsschritt

erfolgt und zusätzlich die Positionierung der Pfeiler schneller ausgeführt werden kann, ist die „Assoziative Kopie“ die angewandte Methode.

Hierfür wird der erste Pfeiler einer Reihe über Extrusion erstellt. Die Querschnitte der anderen Pfeiler werden ebenfalls importiert. Über die Funktion „Geometrie kopieren“ wird unter der Einstellung „von – bis“ der Mittelpunkt des Ausgangspfeilers und der Mittelpunkt des Folgepfeilers selektiert. Nach Angabe der Anzahl der Kopien fügt NX gemäß dem angegebenen Abstand die assoziativen Elemente ein. Die übrigen Querschnitte dienen zur Positionskontrolle der erzeugten Pfeiler und können bei entsprechender Passung gelöscht werden.

### 3.3 Layer-Belegung

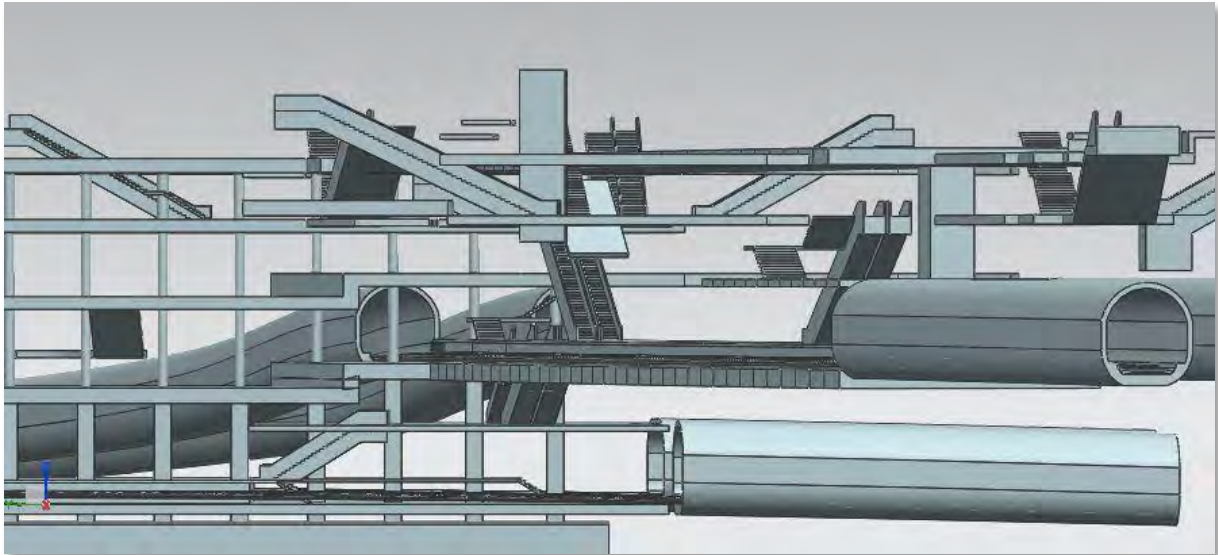
Eine sinnvolle Layer-Belegung ist vor allem im Hinblick auf eine übersichtliche Modellierung unabdingbar. In der AutoCAD-Vorlage sind die verschiedenen Elementtypen eines Modells auf verschiedenen Layern abgelegt, z.B. Treppen, Wände, Decken usw. Aufgrund der Vorarbeiten in AutoCAD können diese Layer aber nicht direkt in NX weitergeführt werden: Entsprechend der Geometriereduktion müssen in AutoCAD vor der Übersetzung Querschnitte und Linien erzeugt werden. Diese Objekte werden auf neu erstellte Pendants zu den ursprünglichen Layern gelegt: So wird beispielsweise der Querschnitt einer Treppe mitsamt der zugehörigen Extrusionsführung auf den neuen Layer „Treppen\_QS“ gelegt. Der Layer „Treppen“ kann nach der Erstellung der Übertragungsgeometrie mitsamt seinem Inhalt vollständig gelöscht werden. So kann das Entfernen unnötiger Geometrie schnell abgewickelt werden und die Übersichtlichkeit in der NX-Modellierung bleibt erhalten.

In NX liegen genau 250 Layer-Plätze vor, die standardmäßig als „Sketches“, „Datums“, „Solids“ usw. vorbelegt sind. <sup>[6]</sup> Für die vorliegende Modellierung wurden diese voreingestellten Bezeichnungen gelöscht. Nach dem Import der DWG-Modelle erscheinen im Layer-Manager alle verbliebenen Layer aus der AutoCAD-Zeichnung. Hierbei handelt es sich um die neu erstellten Layer, die Querschnitte und Extrusionsführungen enthalten. Zusätzlich sind einige Layer vorhanden, die in AutoCAD nicht gelöscht werden können, z.B. „Defpoints“, „Ashade“ usw.; diese Layer enthalten jedoch keine für die NX-Modellierung relevanten Daten und werden nun in NX entfernt.

Die Querschnitts-Layer dienen in NX im Weiteren als Skizzenlayer, d.h. Skizzenebenen und Skizzen werden direkt auf ihnen erstellt. Elemente, die weder Skizze noch Extrusionsführung sind, werden auf einem Layer „Hilfselemente“ gespeichert (z.B. Trimmebenen).

Um eine Differenzierung zwischen Hilfsobjekten (Skizzen, Trimmebenen) und den Volumenkörpern zu erreichen, werden die Volumenkörper auf separate Layer gelegt. Die Layer-Belegung der Komponente wird in der Baugruppe fortgeführt, das heißt, die Elemente, die in der Komponente auf dem Layer xy gespeichert wurden, befinden sich folglich auch in der Baugruppendatei auf dem Layer xy. Um in der Baugruppe nicht nur einzelnen Komponenten ein- und ausblenden zu können, sondern auch alle Objekttypen einzelner Komponenten separat ein- und ausschalten zu können, erfolgt die Verteilung der Volumenkörper auf verschiedene Layer nach einem ganzheitlichen Prinzip; jede

Objektfamilie einer Komponente erhält einen speziellen Layer, auf dem sonst keine andere Geometrie vorhanden ist. So lassen sich beispielsweise im Gesamtmodell komponentenübergreifend alle Außenwand-Objekte entfernen, um einen Blick ins Innere des Modells zu ermöglichen. Die detaillierte Layer-Zuordnung der Volumenkörper ist dem Anhang zu entnehmen.



**Abbildung 3.12:** Gesamtmodell mit ausgeblendeten Außenwänden

### 3.4 Zusammenfügen des Modells

Um das Modell im Gesamten anzeigen zu können, müssen die einzeln erstellten Komponenten abschließend in einer Baugruppen-Datei zusammengefügt werden. <sup>[6]</sup> Die Baugruppen-Struktur wurde für vorliegende Arbeit einfach gehalten. So wurde auf Unterbaugruppen verzichtet, in der Hauptbaugruppe liegen also alle Komponenten direkt vor. Für das Erstellen des Gesamtmodells sind folgende Arbeitsschritte zu beachten:

In einer neu erstellten Baugruppendatei werden über den Befehl „Komponenten hinzufügen“ die einzelnen Bauteile eingefügt. Obwohl durch die Übertragungsart des DWG-Imports die AutoCAD-Positionierung der Modelle beibehalten wurde, ist die Anordnung der Komponenten nicht korrekt; die Objekte überlappen sich oder sind in einem falschen Winkel zueinander angeordnet. NX bietet für die (Neu-)Positionierung von Komponenten weitreichenden Funktionen an, die leicht auszuführen sind. Für die vorliegende Arbeit wurde immer nach folgendem Schema vorgegangen:

Zunächst wird eine Positionierung nach der Zwangsbedingungen „Berührung“ vorgenommen. Dafür werden diejenigen Ebenen (vornehmlich Wände) zweier Objekte selektiert, die berührend verbunden werden sollen. NX bewegt daraufhin das zu verschiebende Objekt so, dass ein berührender Anschluss an die als zweites selektierte

Fläche erfolgt. Somit muss jede weitere Positionierung nur noch zweidimensional auf der Berührebene erfolgen; drei von sechs Freiheitsgraden (2 Rotations- und 1 Translationsfreiheitsgrad) sind durch die Zwangsbedingung bereits gesperrt.

Abbildung 3.11 zeigt die Selektion zweier Flächen; links im Bild die Stirnfläche einer Tunnelröhre der Linie U4/U5, rechts die Außenwand des Bahnhofs. Nach der Bestätigung der Auswahl führt NX den gewünschten berührenden Anschluss durch.

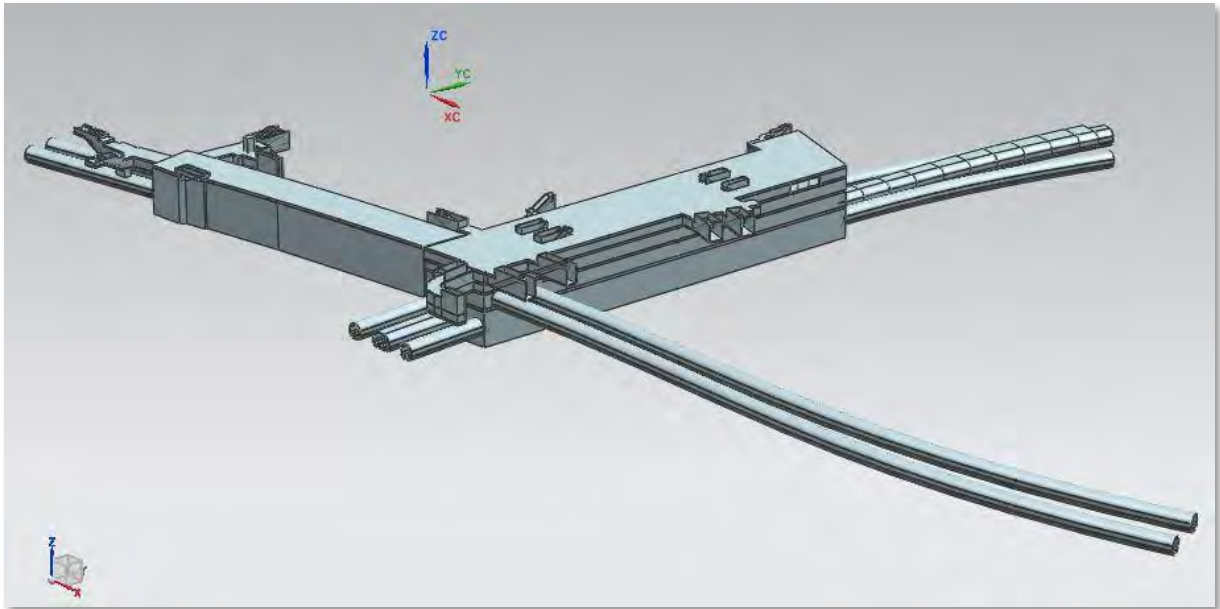


**Abbildung 3.13:** Positionierung nach der Zwangsbedingung „Berührung“

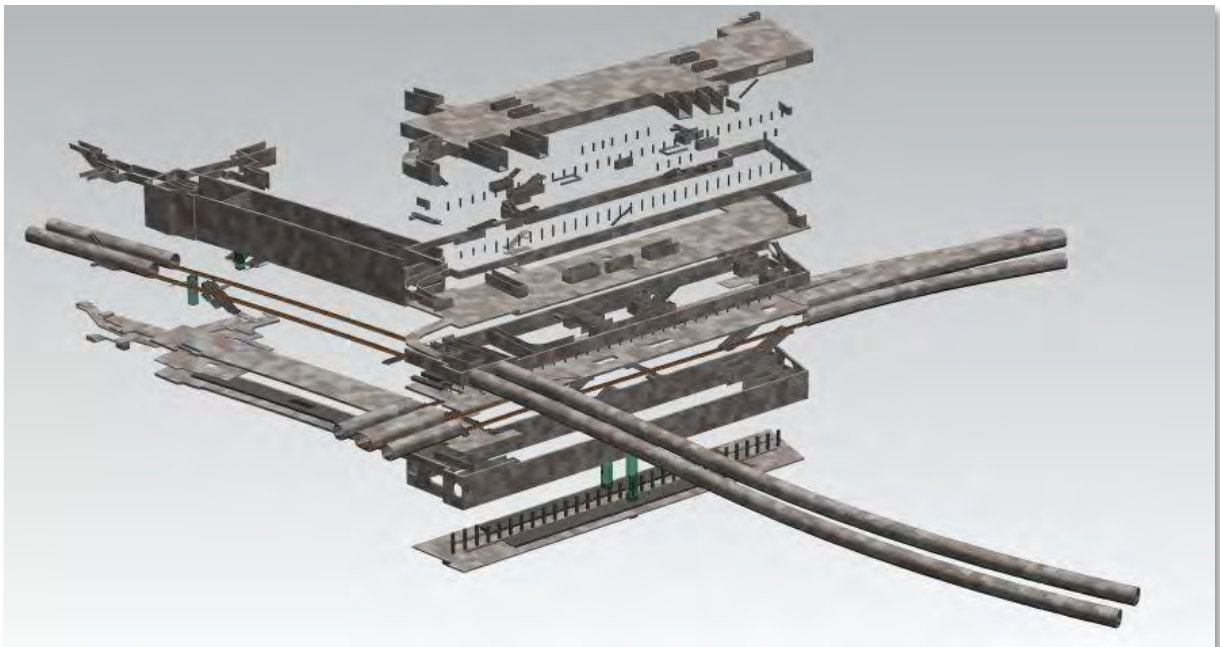
Die Feinpositionierung – ggf. bestehend aus 2 Translationen und einer Rotation - erfolgt mithilfe der Funktion „von Punkt zu Punkt“. Dafür wird zunächst das zu bewegende Objekt selektiert. Auf diesem Objekt wird der Startpunkt der Verschiebung gewählt, im Anschluss der Endpunkt der Verschiebung auf dem Zielobjekt. Nach der Bestätigung der Auswahl führt NX eine Translation entlang der Linie aus, die durch die beiden selektierten Punkte definiert ist.

Ist eine Rotation um eine zur Berührebene senkrecht stehende Drehachse nicht mehr notwendig, ist die Verschiebung bereits abgeschlossen. Sollte dies jedoch nicht der Fall sein, wird die Funktion „um drei Punkte drehen“ ausgeführt. Hierfür werden der Drehpunkt, der Start- und der Endpunkt der Rotation angegeben. Der Drehpunkt ist vorzugsweise der Zielpunkt der vorigen Operation, da zumindest an dieser Stelle bereits die endgültige Lage erreicht ist.

Nach obig beschriebenem Schema lassen sich die Komponenten zügig zum Gesamtmodell zusammenfügen. Bei gemeinsamer Selektion können auch mehrere Komponenten zusammen verschoben werden. Die Abbildungen 3.12 und 3.13 zeigen die fertig zusammengesetzten Modelle der U-Bahnbauwerke.



**Abbildung 3.14:** Gesamtmodell



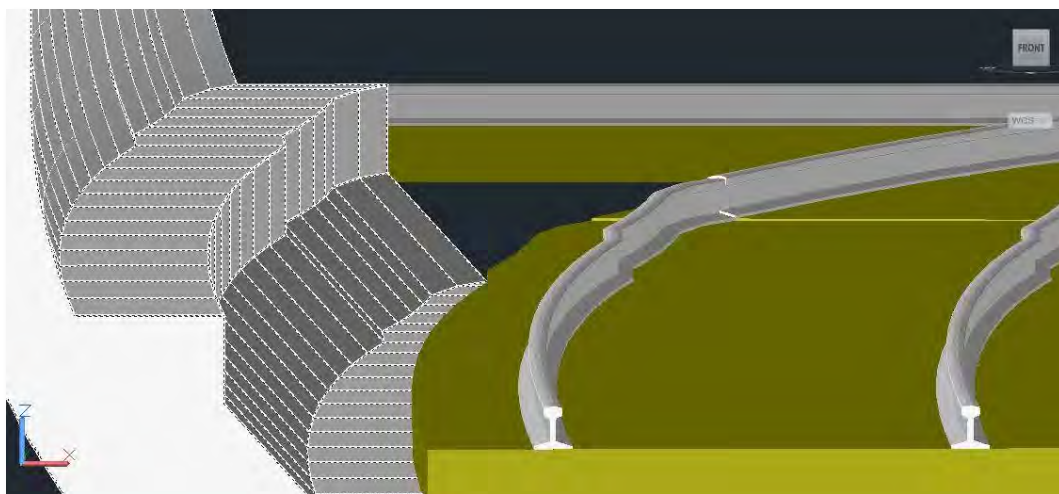
**Abbildung 3.15:** Texturiertes Gesamtmodell in Explosionsansicht

## 4. Fehlerbereinigung

Die vorliegenden NX-Modelle wurden allesamt exakt der AutoCAD-Vorlage nachempfunden. An manchen Stellen weist die Vorlage jedoch Fehler auf. Folgendes Kapitel soll aufzeigen, wie mithilfe der NX-Funktionalitäten solche Fehler erkannt und korrigiert werden können.

### 4.1 Glätten der Streckenverläufe

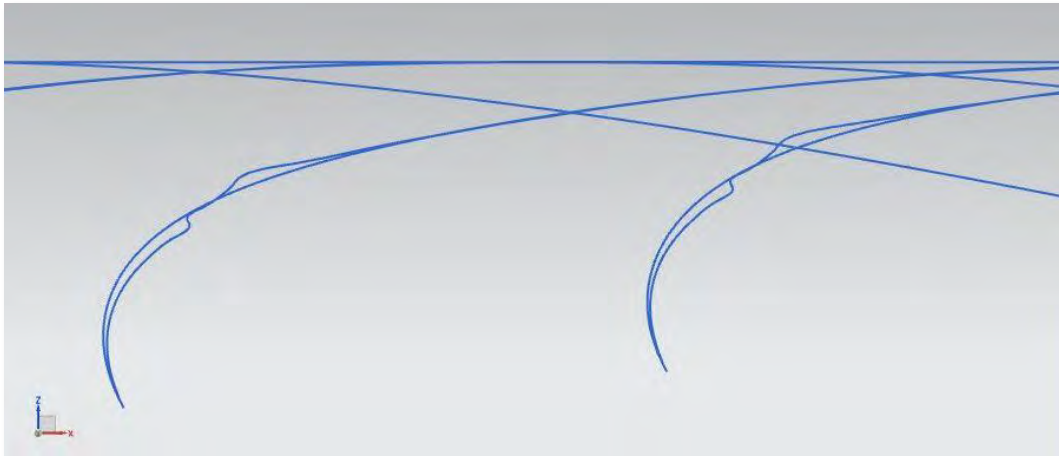
Gemäß der in Kapitel 3 beschriebenen NX-Modellierung wurden die Streckenzeichnungen entlang Splines 3. Grades erstellt. Bedingt durch diese Art der Ausführung sind die Knickstellen der polylinearen Vorlage damit bereits entfernt. Zur weiteren Überprüfung des Krümmungsverlaufs eines Splines bietet NX eine Krümmungs-Kamm-Analyse an. <sup>[6]</sup> Diese Funktion erstellt entlang eines Splines einen Krümmungskamm, der den Verlauf der Krümmung stark überhöht darstellt. Entlang von Geraden (Kammhöhe = 0) oder konstanten Radien weisen die Kämmen einen konstanten Abstand zur Ursprungskurve auf. Bei einer klothoidischen Krümmungszunahme würde die Abstandszunahme der Kämmen zum Spline linear verlaufen. Eine Abweichung des Krümmungskamms von diesen Verlaufsformen stellt also bereits eine Abweichung von einer weichen bzw. ruckfreien Streckenführung dar. Bei der Streckenzeichnung von U1/U2 stellt sich der Verlauf der Krümmungskämme jedoch als ausgeprägte, unregelmäßige „Zick-Zack-Linie“ dar; selbst mit bloßem Auge ist eine starke Abweichung von einem weichen Streckenverlauf erkennbar (Siehe Abbildung 4.1). Dieser Fehler liegt in der AutoCAD-Modellierung zugrunde und muss im Anspruch auf eine realitätsnahe Modellierung bereinigt werden.



**Abbildung 4.1:** Knickstellen im Streckenverlauf U1/U2

Für die Beseitigung dieser Fehlstellen stellt NX den Befehl „Spline glätten“ bereit. <sup>[6]</sup> Hierfür wird der zu korrigierende Spline ausgewählt; NX löscht daraufhin alle vorherigen Definitionsdaten des Splines und glättet alle entsprechenden Stellen. Gegebenenfalls muss diese Operation so lange iteriert werden, bis eine zufriedenstellende Lösung

erreicht wird. Nach der Ausführung des Befehls ist der Spline anhand der neu positionierten definierenden Punkte vollständig erhalten und weiterhin bearbeitbar. In Abbildung 4.2 ist eine Gegenüberstellung von geglättetem und ursprünglichem Spline dargestellt. Der abgebildete Ausschnitt bezieht sich auf denselben Streckenabschnitt wie Abbildung 4.1.

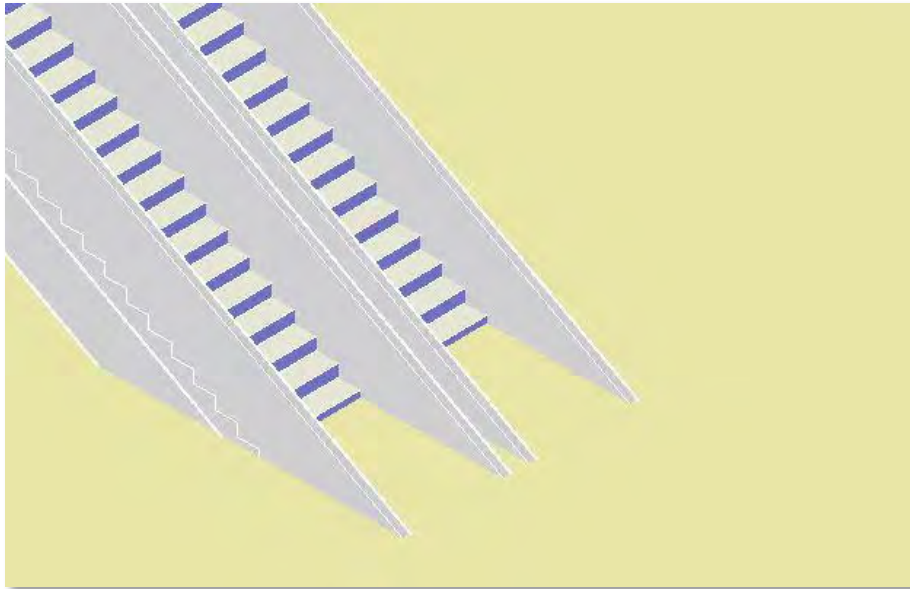


**Abbildung 4.2:** Vergleich unbearbeitete/geglättete Splines

## 4.2 Kollisionsprüfung/Baugruppenfreiraum

Der NX-Befehl „Baugruppenfreiraum“ ermöglicht es, alle Komponenten einer Baugruppe auf Überlappung, Berührung und/oder minimale Distanzeinhaltung zu überprüfen. Die Mindestabstände können vom Benutzer festgelegt werden. <sup>[6]</sup> Aufgrund der Komplexität der U-Bahn-Hof-Modelle ist eine solche Kollisionsprüfung von hohem Wert; bei entsprechender Modellgröße sind Fertigungsfehler – beispielsweise vergessene Decken-Aussparungen für durchgängige Treppen – beinahe unvermeidlich. Auch die AutoCAD-Vorlage beinhaltet mehrere derartige Fehlstellen. Abbildung 4.3 zeigt exemplarisch eine solche „harte Durchdringung“ einer Rolltreppe durch ein Zwischengeschoß. Mithilfe der Funktion „Baugruppenfreiraum“ können diese Stellen kenntlich gemacht und ausgebessert werden. Da sich die Kollisionsprüfung nur auf unterschiedliche Komponenten und nicht auf einzelne Volumenkörper innerhalb einer Komponente bezieht, wurde bei der Modellierung darauf geachtet, nur Elemente in einer Komponente zusammenzuführen, die sich definitiv nicht berühren bzw. durchdringen. Dies ist in den übersichtlichen Komponenten leicht zu realisieren. So ist sichergestellt, dass sich fehlerhafte Kollisionen nicht schon in der Komponentenerstellung ergeben. Eine Ausnahme dieser Regel stellen Elemente dar, die sich standardmäßig berühren, wie z.B. Treppen und deren Geländer.

Nach Ausführung des Befehls „Baugruppenfreiraum“ werden alle erkannten Kollisionen aufgelistet und bei Anwahl farblich hervorgehoben.



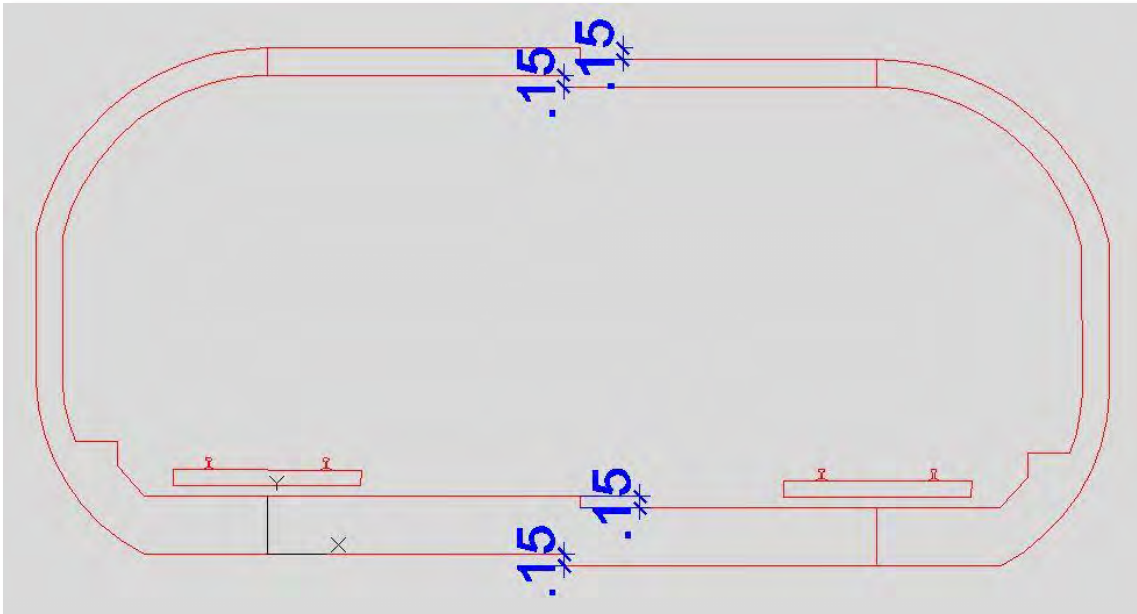
**Abbildung 4.3:** Fehlerhafte, harte Durchdringung im Bahnhof der U4/U5

Für den in Abbildung 4.3 dargestellten Fall wurde nachträglich eine Aussparung in die Zwischendecke eingefügt. Die Abmessungen des dafür notwendigen Subtraktionskörpers orientieren sich an vergleichbaren, vorhandenen Treppendurchlässen.

### 4.3 Querschnittsoptimierung

Die Möglichkeit, den Querschnitt und damit die Geometrie eines Volumen-Modells nachträglich beliebig verändern bzw. verbessern zu können, zeigt die Leistungsfähigkeit parametrischer Modellierung deutlich auf. Wie bereits in Kapitel 3: „Modellierung in NX“ beschrieben, erfährt der mittlere Tunnel von U1/U2 - bedingt durch den divergierenden Verlauf der beiden beinhalteten Gleisstränge - eine Ausweitung. Diese Querschnittsänderung über den Verlauf der Strecke wurde in AutoCAD jedoch unsauber realisiert. Anstelle einer Extrusion über verschiedenen Querschnitte, die sich gemäß der Streckenverläufe verbreitern, wurde der Tunnel aus 6 separaten Extrusionskörpern, die durch Boolesche Operationen vereinigt wurden, erstellt: Tunnelboden und -decke wurden jeweils entlang beider Gleisstränge extrudiert, die Wände am jeweils zugehörigen Gleis. In der Folge bestehen Boden und Decke aus je zwei Körpern, die sich in weiten Teilen überlappen. Da die Trassenverläufe auch einen Höhenunterschied aufweisen, sind in den boolesch vereinigten Decken- und Bodenkörpern Höhenversätze zu erkennen; mittig entsteht also eine fehlerhafte Kante, die an der stärksten Stelle am Ende des Tunnels 15 cm aufweist. Abbildung 4.4 zeigt auf, wie sich der Höhenversatz in den importierten Skizzen darstellt.





**Abbildung 4.4:** Querschnitt Tunnel U1/U2 mit 15 cm Höhenversatz

In NX lassen sich diese Kanten über eine Skizzen-Modifizierung entfernen. Der Ablauf soll exemplarisch anhand der äußeren Skizze (Tunnelaußenwand) erläutert werden: Zunächst werden die beiden Seitenwände, sowie die zwei vertikalen Linien der Höhenversätze der importierten Außenwand-Skizze gelöscht. Anschließend wird der rechte obere Skizzenbereich, bestehend aus Bogen und rechtsseitiger „Deckenlinie“ gemeinsam per „Punkt zu Punkt“-Verschiebung an die höher liegende linke Deckenlinie angeschlossen. Auf der sicheren Seite liegend wird analog dazu der linke untere Skizzenbereich nach unten an die rechte Bodenlinie angeschlossen. Aufgrund dieser Verschiebungen wird der Tunnel an der stärksten Stelle um 30 cm höher; somit ist jedoch sichergestellt, dass die notwendige lichte Höhe gewahrt bleibt. Abschließend werden die „Wandlinien“ eingefügt und die Decken- und Bodenlinien durch jeweils eine einzelne Linie ersetzt. Dieses Schema wird auf alle 15 Querschnitte angewandt; der Höhenversatz ist somit beseitigt.

Die NX-Funktionalitäten ermöglichen also ein zuverlässiges Auffinden und Entfernen vorhandener Fehler. Die Kollisionsprüfung stellt hier ein besonders mächtiges Werkzeug dar, wenn es um die Modellierung komplexer, schlecht einsehbarer Modelle geht.

## 5. Visualisierung

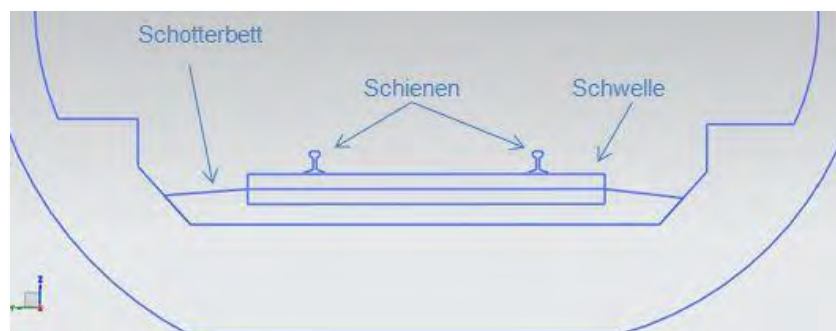
Um das Modell der U-Bahnbauwerke eindrucksvoll zu präsentieren, bietet sich die Erstellung einer Animation an. Eine Kamerafahrt durch das Modell vermittelt einen realitätsnahen Eindruck des Bauwerks und lässt eine perspektivische Wahrnehmung der Raumgeometrie zu. Beleuchtung und Texturen runden die reale Wirkung ab und sollen in den vorliegenden Animationen dazu dienen, die Atmosphäre der im Rohbau erstellten U-Bahn-Bauwerke zu vermitteln. Um die Möglichkeiten der NX-Visualisierung zu erproben, wurden die vorliegenden Filme programmintern erzeugt.

### 5.1 Modifizierung des Modells

Nach abgeschlossener Rohbauphase bestanden die U-Bahntunnel aus der fertig betonierten Röhre, dem Schottergleisbett, Holzschwellen und den Schienenkörpern. <sup>[7]</sup> Diese Elemente stellen das Vorbild für die erstellten Animationen dar, da es sich auch bei der AutoCAD-Vorlage um eine Rohbau-Darstellung handelt. Da das Gleisbett in der AutoCAD-Zeichnung abstrahiert dargestellt ist (die Schienen liegen auf einer durchgängigen „Schwelle“, der ganze Gleiskörper „schwebt“ aufgrund der Aussparung für die Schotterbefüllung ca. 15 cm über dem Tunnelboden) müssen für eine authentische Darstellung einige Veränderungen am Modell durchgeführt werden. Diese Änderungen werden nur für die Erstellung des Videos vorgenommen. Das korrekte, in NX erstellte Original-Modell liegt separat gespeichert weiter vor.

Zunächst wird die Lücke zwischen Schwellen und Tunnelboden geschlossen, indem eine Skizze für ein vereinfacht dargestelltes Schotterbett erstellt wird. Diese Skizze wird entlang der Strecken-Splines extrudiert.

Für die Erstellung der Schwellen wird eine neue, rechteckige Skizze ans Ende der Strecke gelegt. Die Querschnittsabmessungen orientieren sich an den Abmessungen des Gleisbettes aus der AutoCAD-Zeichnung. Somit ist eine Schwelle 2,4 m lang und 20 cm hoch. Die Breite der Münchner U-Bahnschwellen beträgt 26 cm. <sup>[14]</sup> Im Anschluss wird die Gleis-Skizze dahingehend verändert, dass nur noch die Schienenprofile bestehen bleiben, da das abstrahierte Gleisbett durch die Schwellen ersetzt wird. Abbildung 5.1 zeigt den veränderten Querschnitt auf:



**Abbildung 5.1:** Für die Visualisierung modifiziertes Gleisprofil

Um die Skizze der Schwelle zu extrudieren, wird eine Linie der Länge 0,26 m senkrecht an eine Schwellen-Skizzenlinie gelegt. Durch eine leichte Kantenverrundung wird eine realitätsnahe Form des extrudierten Schwellenkörpers erreicht. Wie Abbildung 5.1 dargestellt, berühren die Schwellen die Unterseite der Schienen und tauchen zur Hälfte in das Schotterbett ein.

Im Anschluss wird die erstellte Schwelle entlang der Streckenführung dupliziert. Um einen originalgetreuen Schwellenabstand von 0,68 m zu erreichen <sup>[14]</sup>, werden 395 (U1/U2) bzw. 616 (U4/U5) Kopien der Schwelle entlang der Splines erstellt.

### **Bestimmung der Anzahl der Schwellen:**

Durchschnittliche Gleislänge / (Breite Schwelle + Abstand d. Schwellen)  $\approx$  Schwellenanzahl

U1/U2: 340 m / (0,26 m + 0,6 m)  $\approx$  395 Schwellen

U4/U5: 530 m / (0,26 m + 0,6 m)  $\approx$  616 Schwellen

## **5.2 Texturierung**

Texturen haben maßgeblichen Einfluss auf die visuelle Qualität von Animationen. Deshalb ist es im Hinblick auf eine gelungene Präsentation unbedingt erforderlich, die Bauteile mit den geeigneten Texturen zu versehen. NX besitzt eine reichhaltige Texturen-Bibliothek mit mehreren hundert Einträgen. Trotz der Ausrichtung auf den Maschinenbau verfügt NX über zahlreiche Texturen für Ingenieurbauwerke, darunter verschiedene Texturen für Beton, Holz, Stein und Metall. Somit muss für die Texturierung der U-Bahn-Bauwerke auf keine externen Textur-Daten zurückgegriffen werden.

### **Für die Animationen verwendete Texturen:**

- Betonbauteile: *Concrete Highway*, *Concrete* und *Wet Concrete Highway*
- Schienen: *Burnished Steel*
- Holzschwellen: *Unfinished Teak*
- Rolltreppen: *Polished Steel*
- Schotterbett: *Large Gravel*



**Abbildung 5.2:** *Texturiertes Gleisbett*

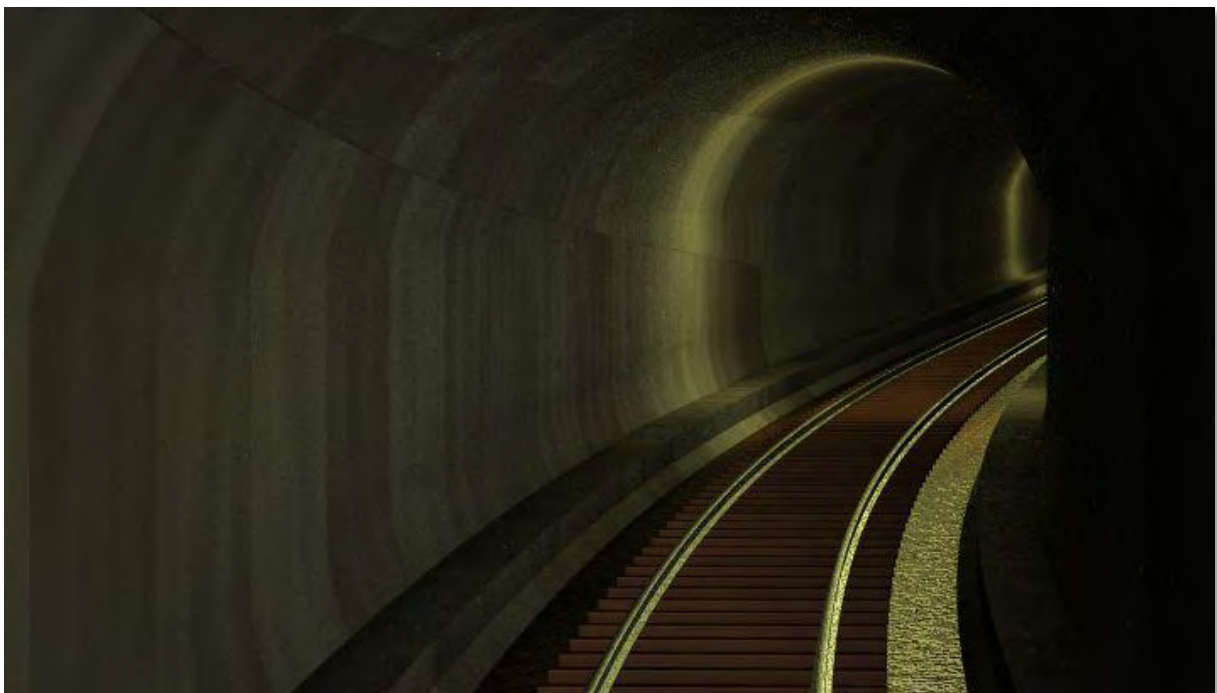
Bei der Auswahl der Texturen wurde vor allem Rücksicht auf die optische Wirkung genommen. Beispielsweise empfindet das Muster von Concrete Highway Schalungsabdrücke nach und verstärkt durch seine ungleichmäßige Oberfläche zugleich den Eindruck der Bewegung bei Kamerafahrten entlang von Betonflächen. Die eigentlich korrekte Concrete-Textur hingegen erscheint nur als wenig ansprechende graue Fläche. Ähnlich verhält es sich mit der Auswahl von Teak-Holz für die Schwellen. Die Münchner U-Bahnschwellen bestehen aus Kiefernholz, welches durch das Imprägnier-Öl „WEIC-GX+“ und die Einwirkung des Fahrbetriebes stark verdunkelt ist. <sup>[14]</sup> Die NX Textur für Kiefer ist allerdings sehr hell und wirkt daher unpassend als Material für die in der Realität fast schwarzen Holzbohlen.

Bei der Texturierung ist zu beachten, dass die Materialien innerhalb der einzelnen Komponenten im Konstruktionsmodus zugewiesen werden, da in der Baugruppe nur noch ganze Komponenten angewählt werden können und somit eine differenzierte Texturierung nach Objektart nicht mehr möglich ist. Eine Schwäche der Texturen-Zuweisung bei NX ist, dass einem Körper nur eine Textur zugeordnet und keine nach Oberflächen differenzierte Zuweisung erfolgen kann. Beispielsweise ist die Oberseite eines Schienenkopfes durch das ständige Befahren glatt und metallisch glänzend, der untere Bereich matt bzw. angerostet. Da die Schiene aber als Einzelkörper modelliert ist, müssen die in der Realität verschieden erscheinenden Oberflächen mit demselben Material versehen werden.

## 5.3 Beleuchtung

Ebenso wie die Texturierung ist eine geeignete Beleuchtung essentiell für den Photorealismus eines Animationsbildes. NX bietet eine Vielzahl von szenischen Beleuchtungsmöglichkeiten an, angefangen von simuliertem Tageslicht bis hin zu Spots und punktförmigen Lichtquellen. Die Einstellungsmöglichkeiten von Licht sind in NX relativ weitreichend. So kann neben der Art der Lichtquelle die Lichtfarbe, die Lichtintensität, der Verlauf der Lichtintensität und die Art des Schattenwurfs (an, aus, hart, weich, besonders weich, ultraweich) frei gewählt werden.

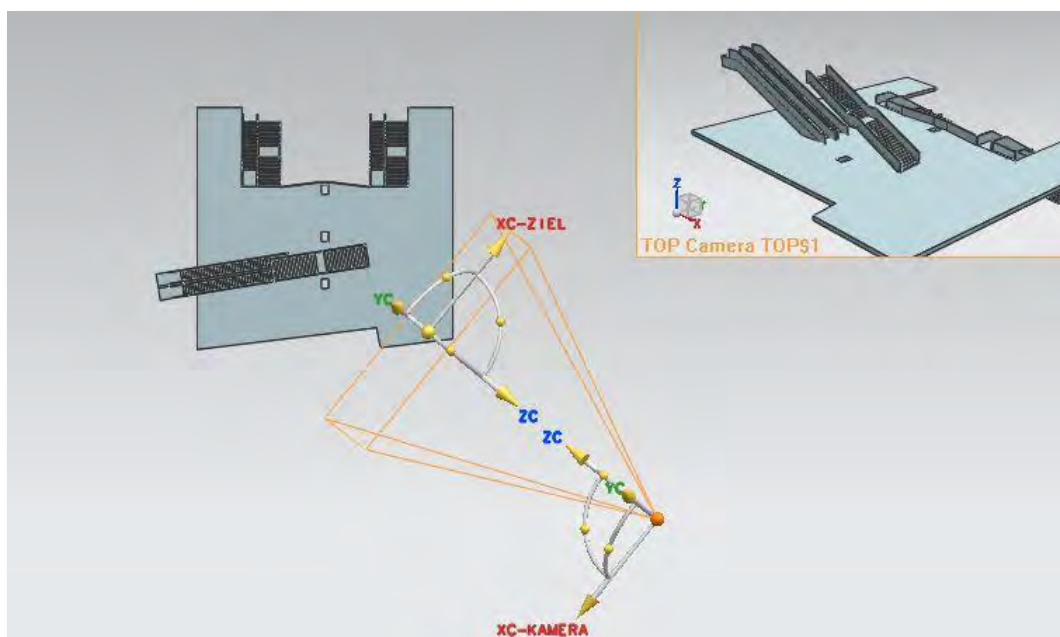
Die Positionierung sowie die Anzahl von Lichtquellen sind ebenfalls völlig frei, was das Erstellen einer szenischen Beleuchtung intuitiv gestaltet. Ein Nachteil ist, dass in NX kein sichtbares Licht erzeugt werden kann, d.h. die Lichtquelle bleibt stets unsichtbar, lediglich die beschienenen Oberflächen erscheinen erleuchtet. Das gestaltet z.B. die Erstellung von Lampen sehr schwierig; eine ungenügende Abhilfe können Texturen mit Glüheffekt schaffen. Für die beiden vorliegenden Animationen wurden vornehmlich punktförmige Lichtquellen verwendet. Alle voreingestellten Szenebeleuchtungen bzw. das simulierte Tageslicht wurden aufgrund der Lage unter der Erdoberfläche für das erste Video deaktiviert. Für das Rendering des zweiten Videos musste auf Szenebeleuchtung bzw. Schattenwurf verzichtet werden, um eine vertretbare Rendering-Dauer zu gewährleisten. Um eine sterile, unwirkliche Atmosphäre zu vermeiden, wurden hauptsächlich weiche Gelbtöne als Lichtfarbe verwendet. Für eine hohe Realitätsnähe in Video 1 wurde der Schattenwurf für jede Lichtquelle aktiviert und die Lichtintensität nimmt stets invers quadratisch zur Distanz ab. In den Tunnelröhren sind die Lichter mittig 2,5 m über dem Gleis platziert, in den Bahnhöfen ist die Platzierung auf die szenische Wirkung hin abgestimmt.



**Abbildung 5.3:** Tunnel mit Beleuchtung und Texturierung

## 5.4 Kamera und Kamerafahrt

Bevor eine Kamerafahrt durch das Modell erstellt werden kann, muss eine neue Kamera definiert werden. Bei Aufruf des Befehls „Kamera erfassen und bearbeiten“ erscheint im NX Hauptfenster eine Arbeitsansicht auf die neu erstellte Kamera und das Modell. Die Kameraposition entspricht der vorigen Arbeitsansicht. Zusätzlich erzeugt NX ein kleineres Fenster, das die Perspektive der Kamera wiedergibt. Die Ausrichtung der Kamera auf das Modell sollte in 2D-Ansichten erfolgen, ebenso sollte die Zielposition der Kamera an die Bewegung des Objektivs gekoppelt werden, damit die Grobpositionierung schneller durchgeführt werden kann. Im Hinblick auf eine natürliche Wirkung der Animation sollte der Bildwinkel der Kamera dem menschlichen Auge angeglichen werden und somit rund 50 Grad betragen. <sup>[12]</sup>



**Abbildung 5.4:** Erfassen und Bearbeiten der Kamera

Beim Kameraflug durch Tunnelröhren und Bahnhöfe ist unbedingt zu beachten, dass die Kamera in den Tunnel „passt“. Ist der Bild-Zielbereich größer als der Tunnelquerschnitt, befinden sich die Bildränder des späteren Videos außerhalb des Tunnels. Erfolgt die Kamerafahrt durch enge Räumlichkeiten, ist es somit empfehlenswert, die Kamera grundsätzlich auf die Minimalgröße zu reduzieren.

Für einen räumlichen Eindruck sollte die Kameraeinstellung zudem auf „perspektivisch“ stehen.

Die Erstellung von Kamerafahrten erfolgt in NX über zwei verschiedene Prinzipien: Das Prinzip der Schlüsselrahmen und das Prinzip der Navigationsbahnkurven. Die Funktionsweise der Schlüsselrahmen-Animation beruht darauf, in der Arbeitsansicht von

einer Kameraposition in eine andere zu wechseln und dem so entstandenen Perspektivenwechsel eine bestimmte Anzahl Bilder zuzuordnen. Dieser Perspektivwechsel kann über einfaches Umschalten der Arbeitsansichten oder durch manuelles Drehen der Ansicht erzeugt werden. <sup>[8]</sup> Die erstere Methode ist leichter zu realisieren, die Möglichkeiten sind aber stark eingeschränkt. Für die vorliegenden Animationen wurde deshalb ausschließlich das im Folgenden erläuterte Prinzip der Navigationsbahnkurven verwendet.

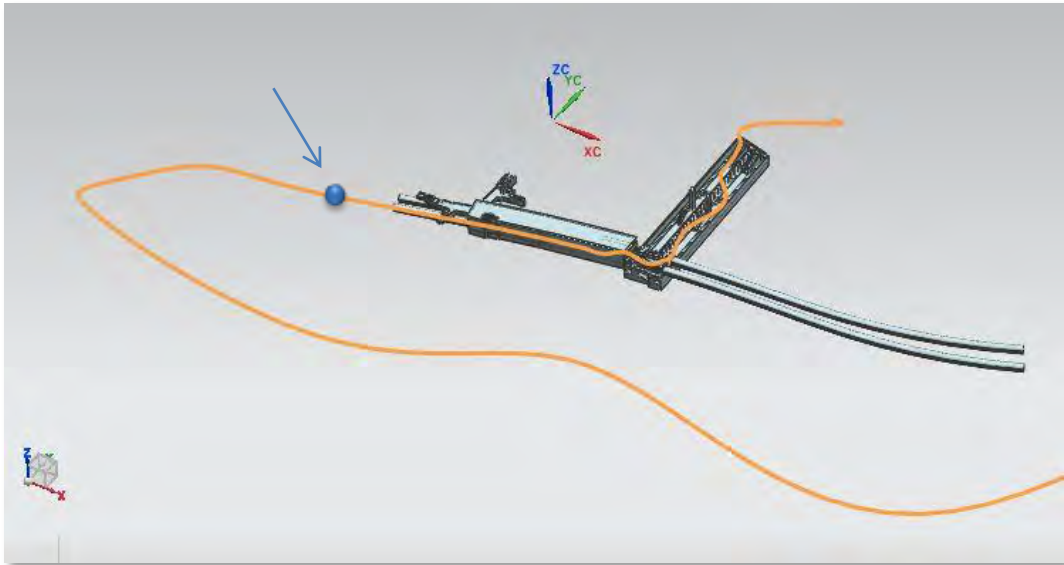
Unter einer Navigationsbahnkurve versteht man eine Raumkurve, an der die Kamera entlang geführt wird. Diese Raumkurve kann aus einzelnen Elementen wie Linien und Bögen, aber auch aus Freiform-Splines bestehen. <sup>[8]</sup> Die Erstellung einer solchen kameraführenden Raumkurve ist bei entsprechend komplexer (Innenraum-)Geometrie ein iterativer Prozess. Aufgrund der größeren Gestaltungsmöglichkeiten wurden für die Leitlinien der Kamerafahrten ausschließlich Splines verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Animationen erstellt: Das erste Video empfindet die Perspektive eines U-Bahnfahrers während der Tunnelfahrt nach, das zweite Video zeigt das Gesamtmodell von außen und innen. Da für die Animationen mehrere (Video 1) bzw. alle (Video 2) Komponenten benötigt werden, erfolgt die Filmerstellung in der Baugruppendatei.

Die Erstellung einer Kamerafahrt wird im Folgenden erläutert:

Zunächst wird in der Arbeitsumgebung „Konstruktion“ mit einem Spline 3. Grades eine grobe Linienführung für die spätere Kamerafahrt erstellt. Hierfür kann es zweckmäßig sein, zunächst in der Draufsicht zu arbeiten und ggf. störende Komponenten auszublenden. Zudem sollten weitreichenden Punktfangeinstellungen aktiviert sein, damit der Spline zunächst an markanten Stellen „aufgehängt“ werden kann. Ist so ein erster, ausreichend gut geformter Spline entstanden, lassen sich seine einzelnen definierenden Punkte separat in alle drei Raumrichtungen verschieben; so kann der Verlauf der Kurve beliebig variiert bzw. verbessert werden.

Um an engen Stellen, z.B. in den Treppenhäusern der Bahnhöfe, den Verlauf kleingliedriger zu gestalten, kann es zusätzlich notwendig sein, weitere definierende Punkte einzufügen. Dies ist mit einem einfachen Klick auf entsprechende Stelle des Splines realisierbar; der Spline folgt dem neu erstellten Punkt in gleicher Weise wie den ursprünglichen Knotenpunkten.

Im nächsten Arbeitsschritt wird die vorherig erfasste Kamera an den Startpunkt der Leitlinie bewegt. Diese Kameraposition stellt in der Animation das erste Bild bzw. den ersten Frame (dt.: „Einzelbild“) dar. Über das Animationsmenü wird die Leitlinie nun in verschiedene Abschnitte unterteilt; jedem Abschnitt können nun eine bestimmte Anzahl von Bildern, ggf. ein Rollwinkel und eine Kameraausrichtung zugeordnet werden.



**Abbildung 5.5:** Video 2, Gesamtmodell mit Führungsspline und markierter Abschnittsgrenze

Beispielsweise wurde der Führungsspline für Video 2 in zwei Abschnitte eingeteilt. Abschnitt 1 verläuft vom Startpunkt des Splines bis zu einem Punkt, der sich kurz vor dem Eintritt des Splines in das Bauwerk befindet. Abschnitt 2 verläuft folglich von ebendiesem Punkt bis zum Ende der Führungslinie. Dem ersten Abschnitt wurde die Kameraausrichtung „Betrachtungspunkt“ zugeordnet. Somit fokussiert die Kamera während des Rundflugs um das Gesamtmodell einen festen, im Zentrum des Modells befindlichen Punkt. Im zweiten Abschnitt der Sequenz ist die Kameraausrichtung „tangential“ zum Führungsspline, damit der Eindruck eines „Fluges“ durch das Modell wirkungsvoll erzeugt werden kann. (Vgl. beigefügte DVD: Video 2)

Bei einer konstanten Bildrate ergibt sich aus der Länge des Abschnitts und der zugeordneten Bildanzahl die Geschwindigkeit der Kamerafahrt. Falls eine konstante Geschwindigkeit über den Verlauf des gesamten Splines erwünscht ist, muss das Verhältnis der Abschnittslängen gleich dem Verhältnis der jeweilig beinhalteten Bildanzahl sein.

Die Güte der Splineführung und die gewählte Geschwindigkeit der Kamerafahrt können über eine Vorschau auf die Animation überprüft werden.



## 5.5 Rendering

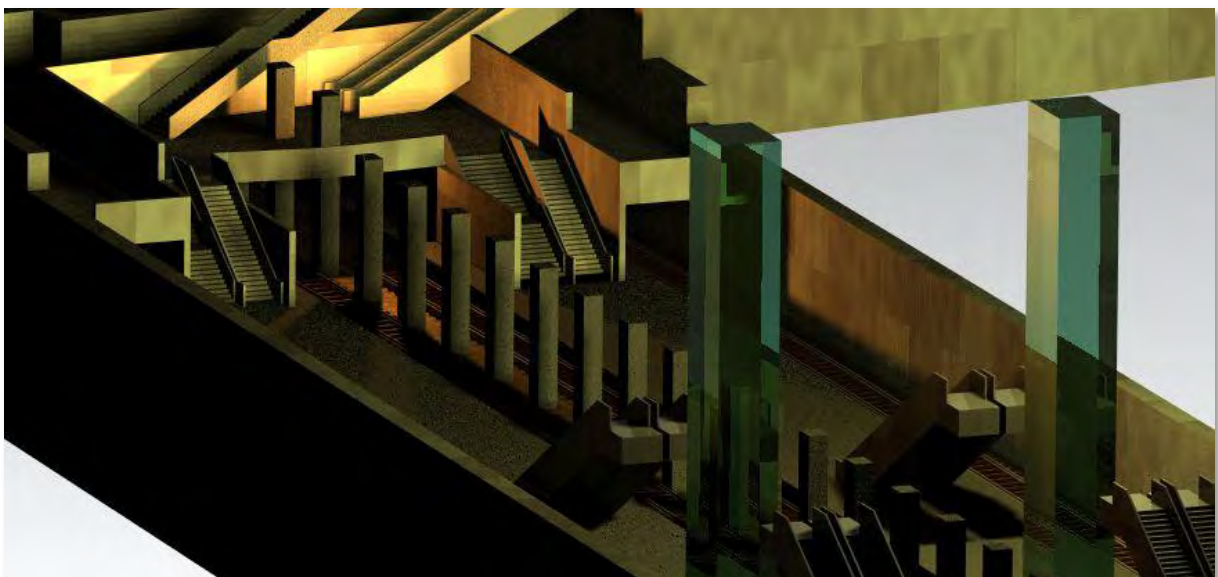
Fällt die Vorschau auf eine Animation zufriedenstellend aus, kann die Animation als Video erstellt und gespeichert werden. Diese Videodatei kann unabhängig von NX abgespielt werden und besteht im Gegensatz zur Vorschau aus schattierten Bildern. Der Vorgang der Schattierung wird auch als Rendering bezeichnet.

NX bietet für die Videoerstellung folgenden Einstellmöglichkeiten:

- Dateiformat: Mpeg-1, Mpeg-2, TIFF, GIF 89a
- Bildauflösung: von minimal 2 x 2 bis maximal 2048 x 2048 Pixel, Verhältnis frei wählbar
- Bilder pro Sekunde (fps): 23,9 bis 60

Die vorliegenden Animationen wurden mit einer Auflösung von 1600 x 900 Pixeln und einer Frame-Rate von 25 Bildern pro Sekunde erstellt. Als Datenformat wurde Mpeg-2 gewählt. Aufgrund der hohen Anzahl an Objekten und der daraus resultierenden aufwendigen Licht- und Schattenberechnungen sowie der hohen Bildqualitätseinstellungen war das Rendering sehr zeitintensiv; Berechnungsdauern von mehreren Tagen sowie Videodateigrößen von einigen Gigabyte waren die Folge. Aufgrund einer prognostizierten Rendering-Zeit von über drei Wochen wurde im zweiten Modell, wie obig bereits erwähnt, auf eine Szenebeleuchtung mit Schattenwurf verzichtet. Mit der voreingestellten Grundbeleuchtung konnte das Rendering innerhalb einer Woche durchgeführt werden.

Einen Eindruck des szenisch beleuchteten U-Bahnhofs der Linie U1/U2 soll ersatzweise Abbildung 5.6 vermitteln:



**Abbildung 5.6:** Bahnhof U1/U2 mit manuell erstellter Szene-Beleuchtung und Schattenwurf

Die erstellten Videodateien „U-Bahn-Fahrt“ und „Flug durch das Gesamtmodell“ sind der Arbeit beigelegt.

## 6. Fazit

### 6.1 Bewertung

Die Eignung von NX als Modellierprogramm für unterirdische Bauwerke soll anhand folgender Aspekte erläutert werden:

- Übertragbarkeit von AutoCAD in NX
- Parametrik und Bearbeitbarkeit
- Möglichkeit der Visualisierung

Die in Kapitel 2 beschriebene Übertragung der AutoCAD-Datensätze in NX ist unter Beachtung der empfohlenen Übersetzungs-Methoden gut ausführbar. Da die Arbeitsabläufe sowohl in AutoCAD als auch in NX nach stets gleichem Schema ablaufen, stellt sich zügig ein routiniertes, effizientes Arbeiten ein.

Die automatisierte Querschnittserstellung in AutoCAD und die direkte Weiterverwendung der importierten Skizzen in NX ermöglichen eine zeitsparende und wenig fehleranfällige Nachbildung des Modells. Mit den vorgestellten Arbeitstechniken kann das vorliegende Modell innerhalb weniger Arbeitstage vollständig in NX überführt werden.

Diese hohe Modelliergeschwindigkeit ist allerdings nur mit einer entsprechenden Vorlage und der zugehörigen optimalen Übersetzungsmethode erreichbar. Müssen die Skizzen allesamt manuell erstellt werden – das ist beispielsweise bei einer Neumodellierung oder auch beim Punktlistenverfahren der Fall – ist die Modellierung um ein Vielfaches zeitintensiver.

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die etablierten Architekturprogramme wie AutoCAD im klassischen Baubereich durch ihre AEC-Objekte einen deutlichen Vorteil gegenüber NX aufweisen. NX beinhaltet zwar auch vorgefertigte Objekte (z.B. Schrauben und Muttern), jedoch nichts, was für den Bau- bzw. Architekturbereich geeignet wäre. Die manuelle Treppen-, Wand oder Deckenerstellung mithilfe von extrudierten Querschnitten gestaltet sich in NX demnach als äußerst umständlich. Auch die Parametrisierung stößt hier an ihre Grenzen. Möchte man beispielsweise die Wanddicke eines U-förmigen Wandelements um einen bestimmten Betrag verändern, müssen in NX mehrere Skizzenparameter verändert werden. Bei einem AEC-Wand-Objekt kann die Wanddicke über ein Menü variiert werden; die veränderte Einstellung wirkt sich dann automatisch auf die Zeichnung aus.

Bei der Modellierung der Tunnelröhren kann NX jedoch überzeugen. Durch die Parametrisierung lassen sich die Querschnitte zu jeder Zeit beliebig verändern und der Streckenverlauf ist über die definierenden Punkte der Splinesführungen sehr leicht zu bearbeiten. Da die Querschnitte von Tunnelröhren (oder auch Brücken und Straßen) in der Grundform große Gemeinsamkeiten aufweisen, können allgemein einsetzbare „Querschnitts-Prototypen“ in die Wiederverwendungsbibliothek integriert werden und je nach aktuellen Anforderungen über Parameter angepasst werden. Hier werden die Vorteile der parametrischen Modellierung am deutlichsten erkennbar.

Ein weiterer grundsätzlicher Vorteil der NX-Modellierung im Vergleich zu AutoCAD ist die Möglichkeit einer Kollisionsprüfung. In vorliegender Arbeit konnten mit der Funktion „Baugruppenfreiraum“ zahlreiche Modellierfehler erkannt und ausgebessert werden. Gerade für die in der Realität nicht einsehbaren unterirdischen Bauwerke besteht ein großes Potential für diese Analysefunktion. (Vgl. Kapitel 6.2, Ausblick)

Die Visualisierungsmöglichkeiten in NX sind für eine technisch ausgerichtete Präsentation vollkommen ausreichend. In Bezug auf Lichteffekte, Kameraeinstellungen oder vorgefertigte Szeneobjekte (Menschen, Fahrzeuge usw.) kann NX als Modellierprogramm selbstverständlich nicht mit reinen Animationsprogrammen wie Maxon Cinema 4D oder Artlantis mithalten. Unter Einbeziehung aller visuellen Möglichkeiten des Programms lassen sich jedoch hochauflösende, photorealistische Animationen erstellen. Für vorliegende Aufgabenstellung konnte demnach mit der NX-Visualisierung ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden. Die programminterne Texturenbibliothek ist vornehmlich auf den Maschinenbau ausgerichtet; trotzdem konnten vorliegende Animationen allesamt mit geeigneten Inhalten dieser Bibliothek erstellt werden.

Da zwischen NX und Cinema 4D bzw. Artlantis keine formatbasierte Schnittstelle existiert, ist die Überführung sehr umständlich. Wenn für eine Animation also nicht höchste Ansprüche bestehen, ist die Verwendung der NX-Visualisierung folglich die geeignetere Methode.

## 6.2 Ausblick

Wie aus der abschließenden Bewertung hervorgeht, ist die NX-Modellierung vornehmlich für die Modellierung des Streckennetzes geeignet. Vor allem in urbanen Gebieten ließen sich mit NX folgende, weitere Nutzeffekte realisieren:

- Neben dem Streckennetz der unterirdisch verlaufenden Bahnsysteme können Kanalisation, Leitungssysteme und Fundamente von Gebäuden (Einbindungen, Bohrpfähle usw.) in ein ganzheitliches NX-Modell integriert werden. Mithilfe der Kollisionsprüfung könnten so jegliche Fehlplanungen automatisch und ohne Zeitaufwand erkannt bzw. vermieden werden.
- Aufgrund der guten Bearbeitbarkeit der Streckenverläufe können alternative Trassierungsplanungen leicht ausgeführt werden. Über die NX-Berechnungsfunktionen können nach jeder Veränderung des Modells automatisch die aktuellen Werte für Volumen, Masse, Oberfläche usw. bestimmt werden.
- Modifizierungen des Modells, z.B. bedingt durch eine nachträgliche Installation eines Oberleitungssystems oder eine Nachrüstung auf ein Festbett lassen sich mithilfe der parametrischen Skizzen schnell nachführen.
- Für eine effiziente Neumodellierung eines Bahnsystems lassen sich parametrische Standardformen (wie z.B. Gleis- und Tunnelquerschnitte) in die Wiederverwendungsbibliothek integrieren. So müssen die benötigten Skizzen nur eingefügt und parametrisch verändert, statt neu gezeichnet werden.
- Bei einem ganzheitlichen, unterirdischen Stadtmodell können qualifizierte Aussagen über die Auswirkungen von Grundwasserschwankungen getroffen werden.
- Bei einer Integration von Messgeräten (Rauchmelder, Wärmemelders, Brandmelder) kann das Modell im Falle eines Unfalls für Einsatzplanung und Evakuierung verwendet werden. Zudem kann es bei entsprechender Interoperabilität als Grundlage für Fußgängersimulationen dienen.

## Anhang A: Detaillierte Layer-Belegung

Untenstehend ist die Layer-Zuweisung sämtlicher Volumenkörper aufgelistet. Die Zuweisung der Layer erfolgt in den Komponenten. Diese Belegung führt sich in der Baugruppendatei fort.

Layer 50: U4U5, Gleise

Layer 52: U4U5, Tunnel

Layer 54: U4U5, Rolltreppen

Layer 56: U1U2, Ebene 1, Rolltreppen

Layer 58: U4U5, Treppen

Layer 60: U1U2, Ebene 1, Treppen

Layer 62: U1U2, Ebene 3, Treppen

Layer 64: U1U2, Ebene 0, Außenwände

Layer 66: U1U2, Ebene 2, Außenwände

Layer 68: U4U5, Innenwände

Layer 70: U1U2, Ebene 1, Innenwände

Layer 72: U1U2, Ebene 3, Innenwände

Layer 74: U1U2, Ebene 0, Decken

Layer 76: U1U2, Ebene 2, Decken

Layer 78: U4U5, Aufzüge

Layer 80: U1U2, Tragwerk

Layer 82: U1U2, Bahnsteig

Layer 51: U1U2, Gleise

Layer 53: U1U2, Tunnel

Layer 55: U1U2, Ebene 0, Rolltreppen

Layer 57: U1U2, Ebene 3, Rolltreppen

Layer 59: U1U2, Ebene 0, Treppen

Layer 61: U1U2, Ebene 2, Treppen

Layer 63: U4U5, Außenwände

Layer 65: U1U2, Ebene 1, Außenwände

Layer 67: U1U2, Ebene 3, Außenwände

Layer 69: U1U2, Ebene 0, Innenwände

Layer 71: U1U2, Ebene 2, Innenwände

Layer 73: U4U5, Decken

Layer 75: U1U2, Ebene 1, Decken

Layer 77: U1U2, Ebene 3, Decken

Layer 79: U1U2, Aufzüge

Layer 81: U4U5, Bahnsteig

## Anhang B: DVDs

Auf den beigefügten DVDs befindet sich folgender Inhalt:

- Fertiggestellte Komponenten, texturiert und nicht texturiert (.prt)
- Zusammengefügtes Gesamtmodell (.prt)
- Videodatei 1: „Tunnelfahrt“ (Mpeg-2)
- Videodatei 2: „Gesamtmodell“ (Mpeg-2)

## Literaturverzeichnis

- [1] Bahnprojekt 2. Stammstrecke München (2012): Situation heute.  
Online im Internet:  
<http://www.2.stammstrecke-muenchen.de/das-projekt/situation-heute/>  
[14.01.2012]
- [2] Europäische Metropolregion München (2012): Schienennetz.  
Online im Internet:  
<http://www.metropolregion-muenchen.eu/ueber-die-region/mobilitaet-verkehr-infrastruktur/schienennetz.html> [14.01.2012]
- [3] OBERMEYER Planen und Bauen (2012): 2. S-Bahn-Stammstrecke München.  
Online im Internet:  
[http://www.opb.de/uploads/tx\\_opbprojektblaetter/06\\_15349\\_0\\_3D-Modell\\_Muenchen\\_Hauptbahnhof\\_2\\_S-Bahn\\_dt.pdf](http://www.opb.de/uploads/tx_opbprojektblaetter/06_15349_0_3D-Modell_Muenchen_Hauptbahnhof_2_S-Bahn_dt.pdf) [14.01.2012]
- [4] Siemens AG (2010): Pressemitteilung: CAD-Software von Siemens wird neue Plattform für die weltweite PKW- und LKW-Entwicklung bei Daimler.  
Online im Internet:  
<http://www.siemens.com/press/de/pressemitteilungen/?press=/de/pressemitteilungen/2010/industry/i201011037.htm> [14.01.2012]
- [5] TUM, Fachgebiet Computergestützte Modellierung und Simulation (2012): Building Information Modeling.  
Online im Internet:  
<http://www.cms.bv.tum.de/de/component/content/article/209> [14.01.2012]
- [6] Marcel Schmid (2008): *CAD mit NX, NX 5 und NX 6. Wilburgstetten:* J. Schlembach Fachverlag, 428 Seiten, ISBN 978-3-935340-63-2
- [7] Dr. Klaus Zimniok, Dr. Werner Hochmuth, Dr. Hermann Zedlmaier et al.(1971): U-Bahn für München. München: Süddeutscher Verlag, 181 Seiten, ISBN 3799156747
- [8] CAD.DE-Die CAD-CAM-CAE-Community (2012): Foren auf CAD.de, NX.  
Online im Internet: <http://www.cad.de> [11.01.2012]
- [9] CADTutor (2012): Foren auf CADTutor.  
Online im Internet:  
<http://www.cadtutor.net/forum/forum.php> [11.01.2012]

- [10] Eng-Tips Forums (2012): Foren auf Eng-Tips Forums.  
Online im Internet:  
<http://www.eng-tips.com> [11.01.2012]
- [11] Autodesk Exchange AutoCAD: Hilfe (2012): Befehle.  
Online im Internet:  
<http://exchange.autodesk.com/autocad/deu/online-help/browse#WSfacf1429558a55de6d0beb1006696e53b-619b.html> [11.01.2012]
- [12] Das Digitalkamera-Magazin (2012): Die „normale“ Brennweite.  
Online im Internet:  
<http://www.dkamera.de/news/die-normale-brennweite/> [11.01.2012]
- [13] Mehrere Autoren, Wikipedia (2012): Initial Graphics Exchange Specification.  
Online im Internet:  
[http://de.wikipedia.org/wiki/Initial\\_Graphics\\_Exchange\\_Specification](http://de.wikipedia.org/wiki/Initial_Graphics_Exchange_Specification)  
[11.01.2012]
- [14] Telefonat mit Fr. Anja Westcott, Baureferat München. (13.01.2012)  
Tel.-Nr.: 089 / 233 61861