



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

3D Parametrischer Tunnelentwurf am Beispiel der zweiten S-Bahn Stammstrecke München

Frédéric Sojka

Bachelorthesis

für den Bachelor of Science Studiengang Bauingenieurwesen

Autor: Frédéric Sojka

Matrikelnummer:

1. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

2. Betreuer: Dipl.-Ing. Javier Ramos Jubierre, M.Sc.

Ausgabedatum: 9. Oktober 2012

Abgabedatum: 8. März 2013

Abstract

The following bachelor thesis deals with the "2nd S-Bahn Stammstrecke" in Munich and how parametric modeling can be used while creating a 3D model there.

Before responding the parameters, there is a short look on the requirements of the planning process of road and railroad tunnels. This should give the reader an overview of the complexity of the planning process.

After that, parameters and the basics of their usage to the computer programm "Autodesk Inventor" will be introduced. These Parameters are as a last point be used for the construction of two 3D segments of the entire "Stammstrecke", while referencing specific problems and their solutions. The aim of this thesis is, to approximate the application spectrum of parametric modeling to the reader, especially in relation of the planning process and the range of variations.

Zusammenfassung

Die folgende Bachelor Thesis beschäftigt sich mit der 2. S-Bahn Stammstrecke in München und wie dort parametrische Modellierung beim Erstellen eines 3D-Modells angewendet werden kann.

Bevor auf die Parametrisierung eingegangen wird, wird ein kurzer Einblick in die Anforderung der Tunnelplanung für Straßen- und Eisenbahntunnel gegeben. Diese sollen dem Leser einen Überblick in die Komplexität des Planungsprozesses geben.

Danach werden Parameter und die Grundlagen ihrer Verwendung im Computerprogramm "Autodesk Inventor" eingeführt. Diese werden abschließend für das Konstruieren von zwei 3D Teilstücken der gesamten Stammstrecke angewandt, wobei Bezug auf spezifisch auftretende Probleme und ihre Lösungswege genommen wird. Ziel der Arbeit ist es dem Leser die Anwendungsmöglichkeit von parametrischer Modellierung näher zu bringen, vor allem im Bezug auf die Planung und die mögliche Variationsvielfalt.

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	I
Zusammenfassung.....	I
1 Einleitung	1
2 Grundlagen der Anforderungen und Abhängigkeiten an Straßen- und Eisenbahntunnel im Bezug auf die geometrische Ausbildung im Querschnitt.....	2
2.1 Straßentunnel.....	3
2.1.1 Entwurfsgeschwindigkeit.....	3
2.1.2 Lage- und Höhenplan	4
2.1.3 Regelquerschnitt bei Straßen	5
2.1.4 Lichtraumprofil.....	7
2.1.5 Belüftungsanlagen	8
2.1.6 Entwässerung bei Straßentunneln.....	10
2.2 Eisenbahntunnel	14
2.2.1 Kategorisierung von Eisenbahnstrecken.....	14
2.2.2 Trassierungsparameter.....	15
2.2.3 Lichtraumprofil.....	17
2.2.4 Musterquerschnitte.....	19
2.2.5 Tunnelausstattung.....	20
2.2.6 Fahrbahn.....	20
2.3 Brandschutz	21
2.4 Geostatische Einflüsse	22
2.5 Bauverfahren	23
3 Parametrisierung und Vorstellung verschiedener Tunnelquerschnitte und Nutzungsformen	25
3.1 Allgemein.....	25
3.2 Kreisprofil	26
3.3 Hufeisenprofil.....	27
3.4 Korbbogenprofil	28
3.5 Maulprofil.....	29
3.6 Einstieg in "Autodesk Inventor"	32

4 Dreidimensionale Parametrische Modellierung der 2. S-Bahn Stammstrecke.....	36
4.1 Allgemeines zur 2. S-Bahn Stammstrecke.....	36
4.2 Besonderheiten der Trassierung bei Anwendung von Tunnelbohrmaschinen	37
4.3 Aufbau, Konzept und Detailierungsgrad des 3D Modells.....	42
4.4 Umsetzung	43
4.4.1 Tunnelachse	44
4.4.2 Tübbingausbau	45
4.4.3 Sohlausbildung.....	47
4.4.4 Fahrbahn.....	49
4.4.5 Gesamttunnel.....	51
Schlussbemerkung	53
Literaturverzeichnis	54
Abbildungsverzeichnis.....	55
Tabellenverzeichnis.....	57

1 Einleitung

Der Tunnelbau gehört zu den komplexesten Aufgabenbereichen der Bauingenieure. In diesem Fachgebiet geht es darum unterirdische Verbindungen zu schaffen, bei denen es nicht möglich ist, diese auf der Erdoberfläche zu konstruieren. Dazu gehören hauptsächlich Eisenbahn- und Straßentunnel, deren Trassierung topographisch anspruchsvolle Gebiete kreuzen, wie z.B. hohe Gebirgszüge. Aufgrund der sehr inhomogenen Bauumgebung ist die Planung und der Ablauf bei einem solchem Unterfangen sehr schwierig.

Zu diesem Zweck wird die Bachelorarbeit in zwei Abschnitte unterteilt. Im ersten Abschnitt wird auf die Anforderungen an Tunnel eingegangen. Die Erwähnung erfolgt aufgrund der Komplexität der Tunnelplanung. Die Auswirkungen und Beschaffenheit des Baugrundes lassen sich aufgrund der Inhomogenität des Baugrundes niemals komplett vorhersagen und so müssen Tunnelbauwerke unter immer neuen Gesichtspunkten erschaffen werden. Eine einheitliche Regelung für den Planungs- und Bauprozesses ist nicht möglich und deswegen müssen Planer die verschiedensten Eigenschaften beachten und unter Umständen mit Änderungen reagieren. Der Tunnel selber ist dabei nicht nur eine runde Röhre, welche einer Trasse folgt, sondern ein Objekt welches die verschiedensten technischen Grundlagen beachten muss. Aus diesem Grund werden Gedanken und Richtlinien, die für die geometrische Ausbildung des Querschnitts notwendig sind erläutert.

Im zweiten Abschnitt wird auf die parametrische Modellierung und die Umsetzung am Beispiel der 2. S-Bahn Stammstrecke eingegangen. Die Verwendung von Parametern wird dabei aufgrund der Komplexität von heutigen Bauvorhaben angewandt. Heutzutage müssen viele verschiedene Möglichkeiten abgedeckt und bedacht werden, welche mitunter einen großen Einfluss auf die Planung besitzen. Durch Parametrisierung wird versucht diesen Änderungen eine Möglichkeit zu geben schnell und effizient, ohne dass weitere Um- oder Neugestaltungen notwendig sind eine Basis zu verleihen, die es dem Benutzer erlaubt einfach und ohne Umwege verschiedene Varianten zu erzeugen. Zu diesem Zweck wird die Modellierung mit "Autodesk Inventor" vorgestellt und Möglichkeiten bei der Erstellung von 3D Modelle gezeigt. Im Zuge dessen wird auf die Verwendungsmöglichkeit und Eigenschaften von Parametern eingegangen und für bestimmte Problemstellungen Lösungswege erläutert.

2 Grundlagen der Anforderungen und Abhängigkeiten an Straßen- und Eisenbahntunnel im Bezug auf die geometrische Ausbildung im Querschnitt

Der Tunnelentwurf ist ein vielseitiger Planungsprozess, bei dem Ingenieure und Fachplaner unterschiedlichster Richtungen miteinander arbeiten und ihre Erfahrungen, Anforderungen und Konzepte aufeinander abstimmen. Der Entwurf wird in erster Linie durch den nötigen Verwendungszweck dominiert. Im Tunnelbau unterscheidet man zwischen verschiedenen Tunnelarten. Am populärsten sind dabei die Verkehrstunnel für Eisenbahnen und Autos/LKWs, da diese von den Menschen "direkt" genutzt werden und damit stärker im allgemeinen Bewusstsein verankert sind. Daneben stehen vor allem die Leitungstunnel der städtischen Kanalisation und Verbindungstunnel bei Kraftwerken, wie Druck- und Wasserleitungsstollen.¹ Die unterschiedlichen Arten weisen vor allem in ihren Querschnitten große Differenzen auf und bestimmen damit die spätere Höhe und Breite des Tunnels. Dies liegt an den unterschiedlichen technischen Einrichtungen, wie die Lüftung, und den einzuhaltenden Grenzen aus dem Lichtraumprofil.² Eine kurze Übersicht über die Größenverhältnisse gibt dabei folgende Tabelle:

Typical tunnel cross sections	Area (m ²)
sewer	10
hydropower tunnels	10-30
motorway (one lane)	75
rail (one track)	50
metro (one track)	35
high speed rail (one track)	50
high speed rail (two tracks)	80-100

Tab. 1: typische Tunnelquerschnitte (nach KOLYMBAS, 2005, S. 21)

In den folgenden Abschnitten wird nun detailliert auf die Modellierung von Straßen- und Eisenbahnverkehrstunneln eingegangen. Die einzelnen Anforderungen werden herausgearbeitet und getrennt in Kontext mit den geometrischen Randbedingungen gebracht.

¹ STRIEGLER, 1993, S. 11f.

² vgl. Kapitel 2.1.4 und 2.2.3

³ MAIDL, Bd II, 2004, S. 20

2.1 Straßentunnel

Bei einem Straßentunnel handelt es sich um einen Tunnel, der von Personen- und Lastkraftwagen befahren wird. Die Anforderungen an diesen ergeben sich aus den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, kurz RABT, den Richtlinien für die Anlagen von Straßen, Querschnitte RAS-Q und Linienführung RAS-L.³

2.1.1 Entwurfsgeschwindigkeit

Bei der Gestaltung eines Tunnels sollte darauf geachtet werden, dass die Anforderungen an die freie Strecke (den Abschnitt in offenem Gelände) beachtet und eingehalten werden.⁴ Es sind dabei im Tunnel die gleichen verkehrlichen Verhältnisse anzustreben. Für Straßentunnel ist allerdings aufgrund von Sicherheitsmaßnahmen und, um den eingeschränkten Platzverhältnissen Rechnung zu tragen, die Entwurfsgeschwindigkeit gegenüber den offenen Abschnitten zu reduzieren.⁵ Aus der Entwurfsgeschwindigkeit v_E leiten sich wichtige Parameter für die Trassierung und Entwässerung ab, so beschränkt diese zulässige Radien und gibt für die Längs- und Querentwässerung die erforderlichen und einzuhaltenden Werte vor.⁶ Beispielhaft sei an dieser Stelle folgende Tabelle mit einigen Richtwerten und ein Diagramm, welches die zulässigen aufeinander folgenden Radien beschreibt:

Kennwerte	Stadtstraßen	Autobahnen
Entwurfsgeschwindigkeit in km/h	50	80 - 100
max. Längsneigung (Hauptspur) in %	≤ 4	≤ 3
max. Querneigung in %		
- in Geraden	1,5 - 2,0	1,5 - 2,0
- in Kurven	4,5	3,5
Mindestkurvenradius in m	150	500
mind. Tunnelhöhe in m	4,5	4,5
Tunnelbreite in m		
- Fahrspur	3,50	3,75
- Haltespur	2,00	2,75
Notgehweg in m		
- Breite	0,50 - 1,00	0,50 - 1,50
- Höhe	0,25	0,25

Tab. 2: Kennwerte für Straßentunnel (nach STRIEGLER, 1993, S. 39)

³ MAIDL, Bd II, 2004, S. 20

⁴ STRIEGLER, 1993, S. 37

⁵ MAIDL, Bd II, 2004, S. 19

⁶ vgl. Kapitel 2.1.6

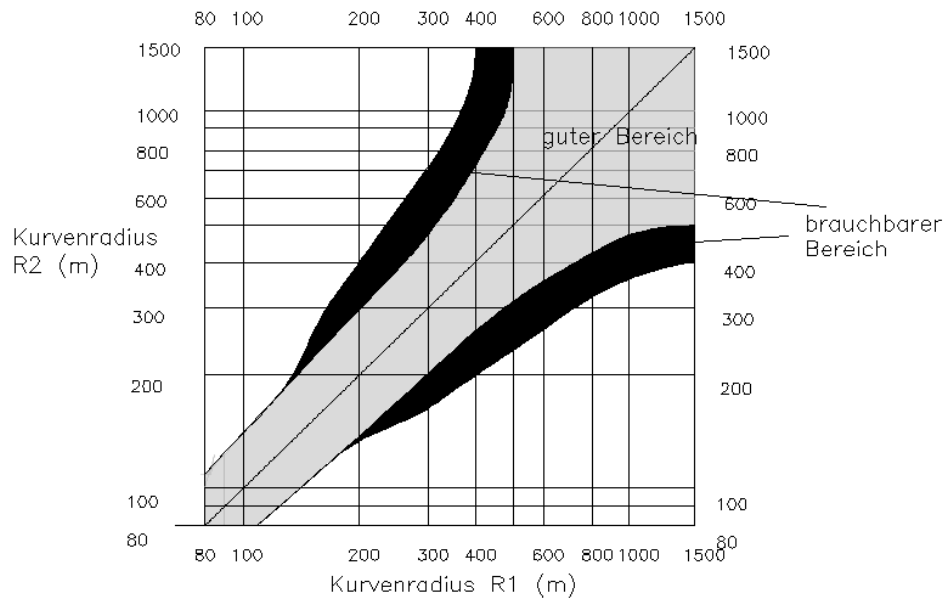


Abb. 1: Radienfolge (nach FREUDENSTEIN, 2011, S. II/31)

2.1.2 Lage- und Höhenplan

Der Lageplan ist eine topographische Karte des Bebauungsgebietes, in dem die gewünschte Trasse eingezeichnet und bemaßt wird. Die Bemaßung enthält dabei die Start- und Endpunkte der Trasse, sowie den Beginn und das Ende von Kreis- und Übergangsbögen mit deren Unendlichkeitsstellen. Zusätzlich wird eine Kilometrierung des Straßenverlaufes erstellt, welche zusammen mit den vorherigen Parametern die Grundlage für den Höhenplan bildet. Bei der Trassierung ist neben einer kostengünstigen Lösung darauf zu achten, dass der Einfluss auf die Umwelt möglichst gering gehalten wird.⁷ Dies gilt besonders in städtischen Gebieten, da hier die Auswirkungen des Tunnels aufgrund der dichten Siedlungsstruktur deutlicher wahrgenommen wird, als auch in außerstädtischen Naturschutzgebieten, hier vor allem in Bezug auf Lärm-, Erschütterungs- und Abgasemissionen⁸.

Der Höhenplan liefert aus den Daten des Lageplans ein komplettes Höhenprofil der Trasse, das Querneigungsband, das Krümmungsband, die Gradienten und die Entwässerung. Höhenplan und Lageplan dienen dazu, den kompletten Straßenverlauf an jeder beliebigen Stelle technisch zu beschreiben. Für das Profil eines Tunnels ist dabei vor allem die Querneigung eine prägende Größe, da diese direkt darüber entscheidet in welche Richtung die Fahrbahn geneigt ist. Der

⁷ FREUDENSTEIN, 2011, S. II/42

⁸ vgl. vgl. Werner Striegler, Tunnelbau, 1993, S. 37ff.

Lage- und Höhenplan ist damit Grundlage sämtlicher stattfindender Planungsprozesse und vereint die gesamten Informationen zum Bau der Strecke.

2.1.3 Regelquerschnitt bei Straßen

Ein weiteres wichtiges Kriterium für das Tunnelprofil ist die Wahl des Regelquerschnittes (RQ) der freien Strecke, welches die Anforderung an den nachfolgenden Regelquerschnitt im Tunnel stellt. Die Regelquerschnitte sind dabei in unten folgender Tabelle aufgelistet. Dabei bezeichnet der linke Parameter den gewählten Regelquerschnitt der freien Strecke, der rechte den darauf folgenden Querschnitt im Tunnel.⁹ Bei den Querschnittstypen 10,5 T und 10 T handelt es sich um Gegenverkehrstunnel, welche vor allem in belüftungstechnischer Hinsicht zusätzlicher Beachtung bedürfen (siehe Kapitel 2.1.5 "Belüftungsanlagen"). Ab dem 10,5 T Querschnitt wird eine getrennte Röhrenführung angewandt, ein sogenannter "Tunnel für den Richtungsverkehr".¹⁰ Dieser weist zwei getrennte, nebeneinander verlaufende Tunnelröhren auf, welche durch Querschläge (Rettungs- und Versorgungstunnel) miteinander verbunden sind. Der Regelquerschnitt ist auf Wirtschaftlichkeit und Realisierbarkeit zu prüfen und dementsprechend zu bemessen. Zu beachten ist zusätzlich die Äquivalenz der Ausführung des Straßenaufbaus zur offenen Strecke.¹¹

⁹ vgl. Abb. 2

¹⁰ MAIDL, Bd. II, S.19f

¹¹ BAST, 2012, 11.1 "Straßenaufbau und Sohlabdichtung"

freie Strecke	Bezeichnung	Maße in m
RQ 35,5 RQ 33	33 T	Regellösung mit Seitenstreifen
RQ 35,5 RQ 33	33 t	abgeminderte Regellösung ohne Seitenstreifen
RQ 29,5	29,5 T	Sonderlösung
RQ 29,5 RQ 26	26 T	Regellösung mit Seitenstreifen
RQ 29,5 RQ 26	26 t	abgeminderte Regellösung ohne Seitenstreifen
26 Tr		Sonderlösung alternativ zu 26 t bei maschinellem Vortrieb
RQ 15,5 RQ 10,5	10,5 T	Regellösung
RQ 9,5	10,0 T	Regellösung

Abb. 2: Regelquerschnitte für Straßentunnel (nach MAIDL, Bd. II, 2004, S. 21)

2.1.4 Lichtraumprofil

Das Lichtraumprofil beschreibt den notwendigen Platzbedarf, der für den reibungslosen Betrieb notwendig ist. Die Fahrbahnbreite mit ihren umliegenden Verkehrstechnik- und Sicherheitsbereichen ist maßgebend.¹² Die Umgrenzung des lichten Raumes zeigt nachfolgende Abbildung:

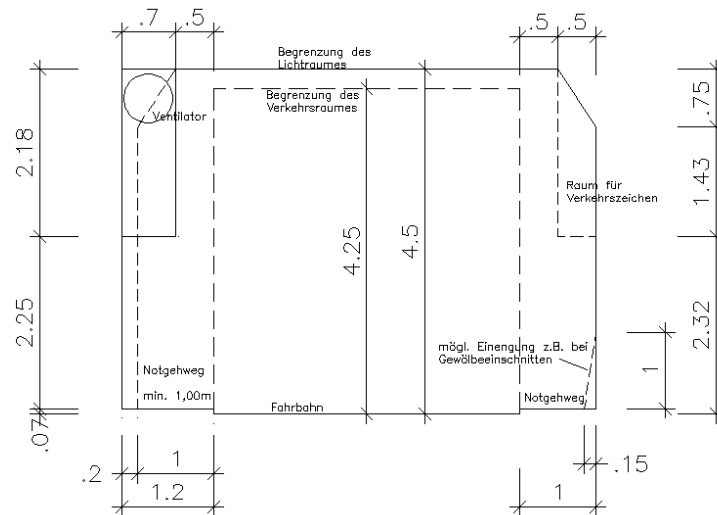


Abb. 3: Umgrenzung des lichten Raumes in Straßentunneln - Regellösung (nach MAIDL, Bd. II, 2004, S. 22)

Daraus ersichtlich ist die erforderliche Höhe von 4,50m für Tunnel mit Kfz - Verkehr, die sich über die komplette Breite der Fahrbahn erstrecken und komplett von Einkragungen freigehalten werden muss.¹³ An beiden Seiten schließen Notgehwege an, welche eine Breite von mindestens 1,00m aufweisen müssen, wobei eine mögliche Einengung bis zu 15cm am Fuß möglich ist (bauartbedingt).¹⁴ Des Weiteren müssen die Notgehwege eine lichte Durchgangshöhe von mindestens 2,25m aufweisen.¹⁵ Über diesen können Installationen für Lüftung und Verkehrszeichen befestigt werden. Diese müssen einen Mindestabstand von 50cm zum Verkehrsraum aufweisen.¹⁶ Für besondere Beleuchtungskörper deren Außendurchmesser kleiner als 70cm ist, gelten in speziellen Fällen Sonderregelungen, wobei der Sicherheitsabstand zum Verkehrsraum auf 30cm reduziert werden kann.¹⁷ Dies gilt besonders an Stirnwänden von Pannenbuchten, oder bei Anbringung an den oberen Ecken des Lichtraumprofils.¹⁸

¹² EBO, §9

¹³ MAIDL, Bd. II, 2004, S.22f

¹⁴ Ebd.

¹⁵ Ebd.

¹⁶ Ebd.

¹⁷ Ebd.

¹⁸ Ebd.

2.1.5 Belüftungsanlagen

Eine künstliche Belüftung ist bei Tunnellänge ab ca. 100m bis 300m nötig.¹⁹ Man unterscheidet hierbei Gegenverkehrstunnel von Richtungstunneln.²⁰ Im Richtungstunnel ergibt sich eine sogenannte Kolbenwirkung durch die fahrenden Fahrzeuge, welche dafür sorgt, dass Frischluft vom Eingang durch den Tunnel gepumpt wird und die verbrauchte Luft am Ausgang wieder austritt.²¹ Dadurch können Richtungstunnel ohne künstliche Anlagen über eine größere Distanz gebaut werden, als Tunnel, in denen Gegenverkehr herrscht.²² Hier heben sich die gegenseitigen Wirkungen auf und es kann nur für kurze Tunnel auf eine künstliche Lüftung verzichtet werden. In der Literatur von Werner Striegler, werden 300m für Richtungs-, und 100m für Gegenverkehrstunnel als Grenzen genannt.²³ Im neueren Werk von Max A. M. Herzog werden die Längen auf 600m bzw. 300m hinaufgesetzt.²⁴ Dies ist eine natürliche Konsequenz darauf, dass sich der Schadstoffausstoß der Autos dank der Innovationen neuer Technik stetig reduziert. Die Schadstoffkonzentration ist die Bemessungsgrundlage für die Grenzlängen und durch eine geringere Schadstoffdichte, wird somit eine höhere Tunnellänge ohne technische Belüftung möglich.²⁵

¹⁹ STRIEGLER, 1993, S.43

²⁰ Ebd.

²¹ Ebd.

²² Ebd.

²³ Ebd.

²⁴ HERZOG, 1999, S.140

²⁵ HERZOG, 1999, S.141f und STRIEGLER, 1993, S.43

Die verschiedenen Arten der künstlichen Belüftungssysteme sind in der folgenden Abbildung gekennzeichnet:

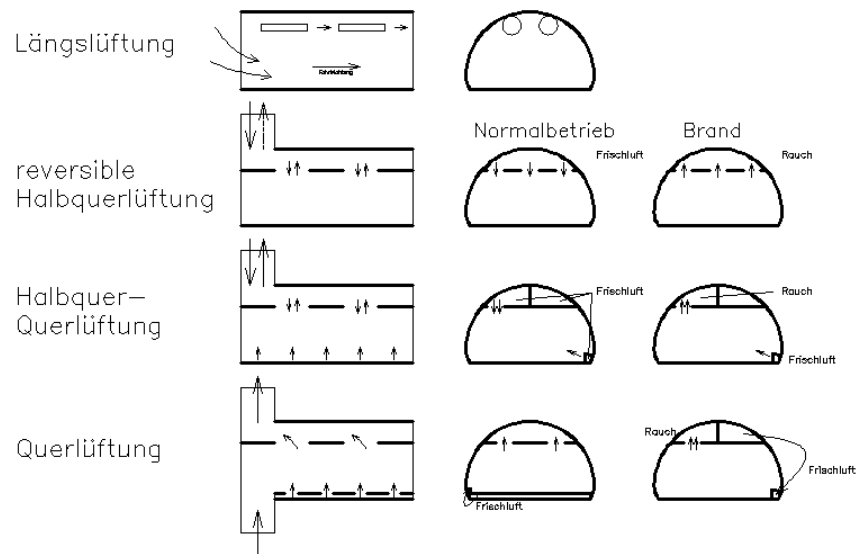


Abb. 4: Lüftungssysteme (nach STRIEGLER, 1993, S. 44)

Erkennbar ist, dass die Lüftungseinrichtungen über der Fahrbahn im abgegrenzten Firstbereich des Tunnels untergebracht sind und im Falle der Querlüftung zusätzlich eine Frischluftzufuhr unterhalb der Fahrbahn angebracht ist.²⁶

²⁶ STRIEGLER, 1993, S.44 und HERZOG, 1999, S.143f

2.1.6 Entwässerung bei Straßentunneln

Längsneigung

Nach RAS-L sollen die Längsneigungen bis maximal 4% beschränkt werden, bei Tunneln größerer Länge auf maximal 2,5%.²⁷ Eine Längsneigung von mehr als 5% sollte aufgrund der sich einstellenden Unwirksamkeit des Lüftungssystems vermieden werden²⁸. Die Hauptaufgabe besteht darin, die anfallenden Flüssigkeitsmengen zu den Tunnelportalen zu transportieren.

Querneigung

Die Querneigung sollte für die wirksame Abfuhr des Oberflächenwassers und der Ableitung von brennenden Flüssigkeiten im Brandfall in Geraden mindestens 2,5% betragen.²⁹ Diese Neigung ändert sich allerdings in Kurven und muss dem jeweiligen Radius nach untenstehendem Diagramm angepasst werden.³⁰

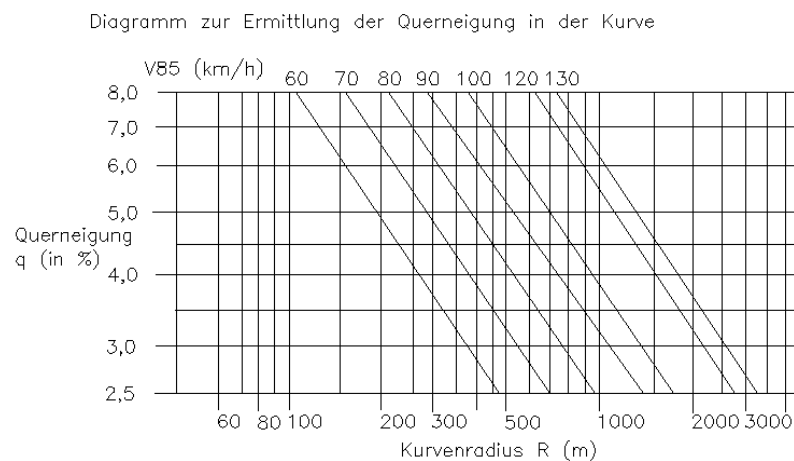


Abb. 5: Querneigung (nach FREUDENSTEIN, 2011, S. II/11)

In Verwindungsbereichen, in denen Krümmungswechsel stattfinden, gibt es sogenannte "Unendlichkeitsstellen", an denen die Querneigung kleiner als 2,5% ist. Innerhalb dieser Bereiche muss die Entwässerung der Straßenoberfläche über die Längsneigung (min 0,7% besser 1,0%) stattfinden³¹.

²⁷ MAIDL, Bd. II, 2004, S.23 und FREUDENSTEIN, 2011, S.II/26

²⁸ MAIDL, Bd. II, 2004, S.23

²⁹ Ebd.

³⁰ FREUDENSTEIN, 2011, S.II/11

³¹ FREUDENSTEIN, 2011, S. II/23f und S. II/26

Entwässerungseinrichtungen

Bei den erforderlichen Entwässerungseinrichtungen muss man zwischen verschiedenen Arten des anfallenden Wassers unterscheiden: Die Wasserableitung während der Bauzeit und die Entwässerung nach Fertigstellung des Bauwerkes.³²

Im ersten Fall auftretendes Wasser und Flüssigkeiten müssen gesammelt und eventuell durch Vorfluter, Absetzbecken o.ä. gereinigt und abgeleitet werden. Die dabei anfallenden Formen sind Berg-, Brauch- und Niederschlagswasser.³³

Nach der Fertigstellung des Tunnels sind zusätzlich zu den oben genannten Formen Wasch- und Löschwasser, sowie chemische Flüssigkeiten, die während der Nutzung des Tunnels in Folge von Unachtsamkeit austreten können, wie z.B. Mineralöle, über die Entwässerung abzuleiten.³⁴

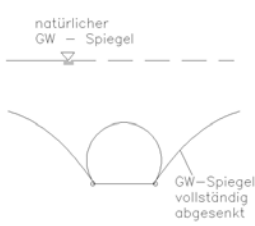
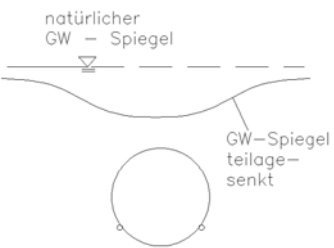

Freie Entwässerung	Druckgeregelte Entwässerung	Ohne Entwässerung
		
Wasserableitung bis zum vollständigen Druckabbau	Wasserableitung bis zum gewählten Grenzwasserspiegel oder Wasserableitung bis zur gewählten bzw. zulässigen Grenzwasserableitmenge	keine Wasserableitung
Wasserleitmenge nicht regulierbar		
Abdichtung gegen nicht drückendes Wasser	Abdichtung gegen reduzierten Wasserdruck	Abdichtung gegen natürlichen Wasserdruck
Statisch unbegrenzter Anwendungsbereich	Statisch unbegrenzter Anwendungsbereich	Statisch begrenzter Anwendungsbereich

Abb. 6: Entwässerungssysteme (nach MAIDL, Bd. II, 2004, S. 202)

Für das erste auftretende Wasser, das drückende Bergwasser gibt es verschiedene Grundsysteme der Abdichtung, wobei das gängigste System die "freie Entwässerung" ist. Das heißt durch Drainagerohre an der Sohlseite des Querschnittes wird der Grundwasserspiegel vollständig

³² BAST, 2012, Absatz 9.1 (1): Tunnelentwässerung - Allgemeines

³³ BAST, 2012, Absatz 9.1 (2) und 9.2 (1)

³⁴ BAST, 2012, Absatz 9.3.1 (1)

abgesenkt und abgeleitet.³⁵ Der Vorteil liegt hierbei bei den niedrigeren Herstellungskosten und der Funktionssicherheit des Verfahrens. Von Nachteil ist, dass das dauerhafte Eingreifen in den natürlichen Wasserhaushalt des Bodens nicht erlaubt ist.³⁶

Bei der "druckgeregelten Entwässerung" wird der Grundwasser Spiegel nur zu einem Teil abgesenkt. Diese Teilabsenkung erfordert eine Abdichtung des Bauwerkes und die Drainage des anfallenden Bergwassers, wobei hier die Eingriffe in die Beschaffenheit des Bodens wesentlich geringer sind. Nachteilig hierbei ist die komplexe Herstellung der Abdichtung und des Drainagesystems.³⁷

Die letzte Form ist der Bau eines Tunnels "ohne Entwässerung", dieser ist allerdings sehr komplex und eine hundertprozentige Dichtheit des Bauwerkes kann zudem nicht erreicht werden. Hier sind vor allem die Kosten für die Herstellung größerer Ausbruchsquerschnitte und im Schadensfall die Sanierungskosten enorm hoch. Das Tunnelprofil muss zudem immer mit einem Sohlgewölbe ausgebildet werden³⁸. Für die dichte Herstellung ist die Ringabschottung in den Blockfugen zu beachten, das heißt die Längsstöße zwischen den Tübbing. Die vollständige Abdichtung erfolgt z.B. bei Herstellung mit Tunnelbohrmaschinen (TBM).

Das zweite auftretende Wasser ist das Oberflächenwasser auf der Fahrbahn sowie im Brandfall auslaufende Flüssigkeiten.³⁹ Diese werden durch die Querneigung der Fahrbahn zu der tieferliegenden Fahrbahnseite geleitet und dort durch übliche Entwässerungsschächte der Fahrbahnwassersammelleitung zugeführt. Grundsätzlich sollte die Querneigung größer als 2,5% sein und sich dem entsprechenden Radius angleichen. Wenn sich Radienwechsel ergeben, so entstehen die bereits genannten "Verwindungsbereiche". In diesen Bereichen wechselt die Querneigung ihre Orientierung. Die höher gelegene Fahrbahnseite wird zu der niedrigeren Fahrbahnseite und anders herum. Daraus ergeben sich Abschnitte in der Fahrbahn, in denen die Entwässerung über die Längsneigung erfolgen muss, da die Querneigung kleiner als 2,5% ist.⁴⁰

Drainagesysteme für Bergwasser müssen mit Rohren DN 200 oder größer ausgeführt werden und eine Mindestwassereintrittsfläche von $100 \text{ cm}^2/\text{m}$ aufweisen. Diese werden beidseitig am

³⁵ MAIDL, Bd. II, 2004, S.202f

³⁶ MAIDL, Bd. II, 2004, S. 202f.

³⁷ MAIDL, Bd. II, 2004, S. 202

³⁸ Ebd.

³⁹ BAST, 2012, Absatz 9.3

⁴⁰ vgl. oberer Abschnitt Kapitel 2.1.6

Ulmenfuß und außermittig im Sohlbereich angeordnet. Für Inspektionen sind alle 70m bis 100m Revisionsschächte vorzusehen.⁴¹

Das Längsentwässerungssystem ist so auszuführen, dass am tieferliegenden Fahrbahnrand eine Schlitzrinne, Klasse D400 die Flüssigkeiten sammeln und abführen kann. Diese muss mindestens alle 50m, in Bereichen geringerer Längsneigung in kürzeren Abständen, durch einen Siphon oder einen Schacht mit Tauchwand an die Längsentwässerungsleitung angeschlossen werden. Die Schachtöffnungen sollten dabei in Fahrstreifenmitte angeordnet werden, um Beschädigungen in Folge von Verkehrsbelastung zu minimieren. Die Leitungsrohre der Längsentwässerung müssen einen Mindestdurchmesser von 300mm und eine Mindestneigung von 0,5% aufweisen.⁴²

⁴¹ BAST, 2012, Absatz 9.3.3 (1),(3),(5)

⁴² BAST, 2012, Absatz 9.3.4 (1) bis (5)

2.2 Eisenbahntunnel

Äquivalent zu den Straßentunneln wird bei den Eisenbahntunneln hauptsächlich auf die Vorschriften und Regelungen, welche maßgebend für die geometrische Modellierung des Tunnelquerschnitts, eingegangen.

Im Allgemeinen wird auf die Anforderungen der "RiL 853 - Eisenbahntunnel planen, bauen und instandhalten" der "DB Netz AG" verwiesen.⁴³

2.2.1 Kategorisierung von Eisenbahnstrecken

Eisenbahnstrecken werden von der "DB Netz AG" in zehn verschiedene Streckenkategorien unterteilt.⁴⁴ Folgende Tabelle gibt die Eigenschaften wieder:

Streckenstandard		P 300	P 230	M 230	P 160 I	P 160 II	M 160	G 120	R 120	R 80	G 50		
Charakterisierung		HGV	Schneller SPFV	Mischverkehr	Schneller SPFV+ SPNV	Schneller SPFV+ SPNV	Mischverkehr	Güterverkehr	SPNV	SPNV	Regionaler SGV	Verbindungs-kurven/-strecken	
Leitgeschwindigkeit		> 230 km/h	161-230 km/h	161-230 km/h	121-160 km/h	121-160 km/h	121-160 km/h	81-120 km/h	81-120 km/h	51-100 km/h	<50 km/h	50-100 km/h	
Anzahl Streckengleise	o	2	2	2	2	2	2	2	überw. 2	1	1	1 - 2	
	u					1 - 2		1 - 2					
Gleisabstand		4,50 m	4,50 m EBO	4,50 m EBO	4,00 m	4,00 m	4,00 m	4,00 m	4,00 m	-	-	-	
			4,00 m TSI	4,00 m TSI									
Überholungsgleislängen	o	450 m für SPFV	300 m	750 m (Gz)	300 m	300 m	750 m (Gz)	250 m	Bemessungs-zug	Bemessungs-zug	-	-	
	u			750 m			750 m						
Abstand Überleit- verbindung	o	20-30 km	15 km	8 km	1,5 - 3 km	20 km	8-10 km	20 km	im Bf.	-	-	-	
	u		30 km	15-20 km	bis 20 km	4 - 5 km	20 km	bis 20 km	20 km				10-20 km
V _{einf./Ausf.}	o	100 km/h	100 km/h	100 km/h	80 km/h	60 km/h	80 km/h	60 km/h	60 km/h	60 km/h	50/40 km/h	40 km/h	n. Bedarf
	u		80 km/h	80 km/h	60 km/h		60 km/h		60 km/h	50/40 km/h	50/40 km/h	40 km/h	n. Bedarf
V _{überleitet.}	o	100 km/h	100 km/h	100 km/h	60 km/h	60 km/h	60 km/h	60 km/h	-	-	-	-	
	u		80 km/h	80 km/h									
V _{abzweig}		v-Strecke	v-Strecke	v-Strecke	v-Strecke	v-Strecke	v-Strecke	v-Strecke	v-Strecke	v-Strecke	40 km/h	n. Bedarf	
Max. Neigung		siehe TSI	EBO/TSI	12,5 ‰	< 25 ‰	< 25 ‰	12,5 ‰	12,5 ‰	25 ‰, SGV beachten	25 ‰, SGV beachten	40 ‰	n. Bedarf	
Lichtraum		EBO/TSI	EBO/TSI	EBO/TSI	EBO/TSI	EBO/TSI	EBO/TSI	EBO/TSI	EBO	EBO/GC	EBO	EBO	
Streckenklasse		≤ D4	≤ D4	D4 plus SW2	≤ D4	≤ D4	D4 plus SW2	D4 plus SW23	≤ D4	≤ D4	Bemessungs-zug	≤ D4	
Schutzweichen		erf.	erf.	erf.	s. RiL 800	s. RiL 800	s. RiL 800	s. RiL 800	s. RiL 800	-	s. RiL 800	s. RiL 800	
Bahnsteigzugänge		-	-	-	a.v.ö.B.	a.v.ö.B.	a.v.ö.B.	a.v.ö.B.	a.v.ö.B.	-	-	n. Bedarf	

Tab. 3: Streckenkategorisierung (nach FREYSTEIN, 2005, S. 75)

Aus dieser Tabelle können wichtige Kennwerte und Grenzwerte für die einzelnen Streckenstandards ausgelesen werden. Für den Tunnelquerschnitt ist vorrangig der anzuwendende Lichtraum interessant.

⁴³ FREYSTEIN, 2005, " S. 378, 10.1

⁴⁴ Ebd., S. 73, 4.3

2.2.2 Trassierungsparameter

Die Trassierungsparameter im Tunnel sind die Überhöhung, der Überhöhungsfehlbetrag, der Radius im Bogen (Kreisbogen), die Gestaltung des Übergangs vom Bogen zur Geraden und die Längsneigung, sowie die Ausrundung der Neigungswechsel.⁴⁵ Mitunter eine der wichtigsten Größen ist die Überhöhung, da sich diese direkt auf die Querschnittsgestaltung des Tunnels auswirkt. Sie beschreibt bei Kurvenfahrt den vertikalen Versatz, um den die Außenschiene gegenüber der innen verlaufenden Schiene angehoben werden muss.⁴⁶ Dieser Abstand ergibt sich aus der Geschwindigkeit und dem verbauten Radius. Eine genaue Herleitung findet sich im "Handbuch: Entwerfen von Bahnanlagen" von H. Freystein (2005) auf Seite 78. Durch Querneigung gleicht dabei die Überhöhung die durch die Fliehbeschleunigung auftretende freie Seitenbeschleunigung aus. Der Wert berechnet sich folgendermaßen:

$$u_0 = 11,8 * V^2 / R \text{ [mm]}^{47}$$

Die Überhöhung muss zudem innerhalb des "Ermessungsbereichs" liegen. Dieser besteht aus einem einzuhaltenden Mindestwert, einem Regelwert und einer Ermessungsgrenze.⁴⁸ Sollte diese infolge zu großer Überhöhung überschritten werden, muss der Wert im Bereich des Zustimmungswertes liegen.⁴⁹ Wird er dennoch überschritten befindet man sich im Bereich der Betriebsgrenzmaß und der EBO-Grenze. Folgende Tabelle beschreibt die oben genannten Werte:

Gleise		Weichen, Kreuzungen, Kreuzungsweichen und Schienenauszüge	
Mindestwert			
$\min u = \frac{11,8 * v^2}{r} - \text{zul } u_f$		$\geq 20 \text{ mm}$	
Regelwert			
$\text{reg } u = \frac{7,1 * v^2}{r}$		-	
$\text{reg } u = 6,5 * \frac{v^2}{r} \text{ (mm) bei RiL 800.0110neu}$		$u = 60 \text{ mm}$	
Gleis:	$u = 100 \text{ mm}$		
an Bahnsteigen:	$u = 60 \text{ mm}$		
Ermessungsgrenze			
Schotteroberbau:	$u = 160 \text{ mm}$	$u = 120 \text{ mm}$	
Feste Fahrbahn:	$u = 170 \text{ mm}$	ABW mit starrem Herzstück	
an Bahnsteigen:	$u = 100 \text{ mm}$	$u = 100 \text{ mm}$	
Zustimmungswert			
Schotteroberbau:	$160 < u \leq 180 \text{ mm}$	Schotteroberbau: $120 < u \leq 150 \text{ mm}$	
Feste Fahrbahn:	$170 < u \leq 180 \text{ mm}$	ABW mit starrem Herzstück: $100 \text{ mm} < u \leq 130 \text{ mm}$	
Ausnahmewert (über EBO-Grenze)			
$u > 180 \text{ mm (Betriebsgrenzmaß)}$			

Tab. 4: Ermessungsbereiche für Überhöhung (nach FREYSTEIN, 2005, S. 83)

⁴⁵ FREUDENSTEIN, 2011, S. III/2

⁴⁶ FREYSTEIN, 2005, S.81 4.7.1

⁴⁷ FREUDENSTEIN, 2011, S. III/4

⁴⁸ vgl. Tab. 4

⁴⁹ Ebd.

Zu diesen Werten gibt es außerdem ergänzende Tabellen für die Überhöhungsfehlbeträge u_f in geraden Gleis- und Weichenabschnitten.⁵⁰

Für den Übergang vom geraden in das überhöhte Gleis werden Überhöhungsrampen angeordnet. Diese können gerade, S-förmig geschwungen und sinusförmig nach Bloss ausgeführt werden.⁵¹

Die folgende Tabelle gibt die zulässigen Mindesthalbmesser für Bahnstrecken an:

Regelwerte der Mindesthalbmesser	
Hauptbahnen	300m
Nebenbahnen	180m
Befahrbarkeit für alle Fahrzeuge der DB AG	150m
Anschlussgleise	siehe Verkehrswegebau Ergänzungskurs

Tab. 5: Mindesthalbmesser (nach FREUDENSTEIN, 2011, S. III/10)

Bei Stadtschnellbahnen sollte darauf geachtet werden, einen Bogenhalbmesser größer als 500m (Minimum 300m) zu wählen, um den Schienenverschleiß gering zu halten.⁵² Die verwendbaren Instrumente zur Trassierung von Bahnstrecken sind die Gerade, der Kreisbogen und die Klothoide. Dabei sollten Unstetigkeiten in der Gleisführung möglichst vermieden werden, da hierdurch höherer Verschleiß an Strecke und Fahrzeug auftritt. Aus diesem Grund sind gerade Gleisabschnitte den gebogenen vorzuziehen. Sofern diese unvermeidbar sind, ist darauf zu achten, dass zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kreisbögen ein gerader Abschnitt eingebaut wird, um Fahrzeugschwingen abklingen zu lassen. Dieser besitzt die Länge:

$$l = 0,4 * V_e \text{ [m]}, \text{ wobei } V_e \text{ in [km/h]}^{53}$$

Als dritter wichtiger Punkt ist im Bezug zum Thema der Arbeit die Längsneigung zu nennen. Diese wird in Tunnelbauwerken (Sonderregelung für Stadtschnellbahnen⁵⁴) gegenüber der "freien Strecke", bei Tunnellängen bis 1000m auf 2‰ und Tunnellängen über 1000m auf 4‰ beschränkt.⁵⁵ Desweiteren sollte auf die Ausbildung von dach- und wannenförmigen Längsprofilen mit steigenden und fallenden Gradienten verzichtet werden, vor allem im Hinblick auf den Brandschutz da sich unter Umständen kein wirksamer Kamineffekt einstellen kann.⁵⁶ Die zulässige Neigung von reinen U-Bahnstrecken ist 40‰, in Ausnahmefällen bis zu 50‰. Im Haltepunktbereich sollte die Steigung kleiner als 2,5‰, bei S-Bahnstrecken im

⁵⁰ FREYSTEIN, 2005, S.86f

⁵¹ Ebd.

⁵² FREUDENSTEIN, 2011, S. III/27

⁵³ Ebd., S. III/2f.

⁵⁴ EBA, 2008, S. 5

⁵⁵ FREYSTEIN, 2005, S. 97, 4.11.1.1

⁵⁶ EBA, 2008, S. 10

Streckenbereich kleiner als 12,5‰ sein.⁵⁷ Der höhere zulässige Neigungswert für Stadtbahnen ist mit dem Antrieb aller Achsen zu begründen. Als Besonderheit sollten Haltepunkte an Hochpunkten angeordnet werden um ein energiesparendes Anfahren zu ermöglichen (siehe Bild unten).⁵⁸

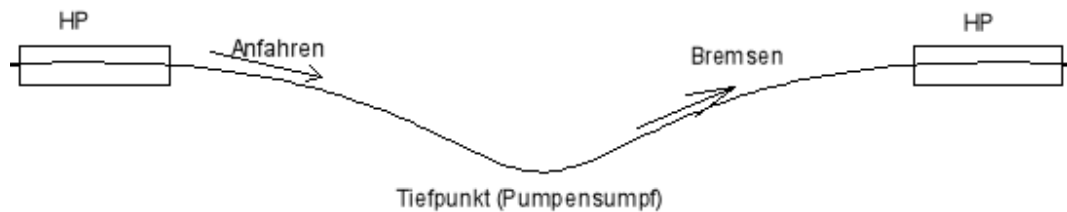


Abb. 7: Bahnhof (nach FREUDENSTEIN, 2011, S. III/29)

Zudem sollten lange (Länge zwischen 1000m und 20000m) und sehr lange Tunnel (Länge über 20000m) mit zweigleisigen Strecken als parallele, eingleisige Tunnelröhren angelegt werden, die mit Querschlägen zueinander verbunden sind.⁵⁹

2.2.3 Lichtraumprofil

Das "Lichtraumprofil" beschreibt den Raum, den ein Fahrzeug mit seinen Abmessungen einnimmt und zusätzlich den Platz, der durch dessen Bewegung entsteht. Der "Verkehrsraum" zählt zusätzlich zum Lichtraum, die Bereiche der Sicherheitsmaßnahmen und technischen Einrichtungen hinzu.⁶⁰ Für die Eisenbahn gibt es grundsätzlich zwei Regellichträume, die in der EBO (Eisenbahn- und Betriebsordnung) geregelt ist. Der Regellichtraum nach EBO ist zulässig für Geraden und Kreisbögen mit Radius größer als 250m und das Lichtraumprofil G für Neubauten und umfassende Umbauten in Radien größer als 250m.⁶¹ Für S-Bahnen gelten Sonderbestimmungen, da aufgrund der geringeren Entwurfsgeschwindigkeit $v_E < 120$ km/h kleinere Querschnittsabmessungen möglich sind.

Nachfolgend werden die Regellichträume nach EBO und das Lichtraumprofil G1 und G2 dargestellt:

⁵⁷ FREUDENSTEIN, 2011, S. III/20

⁵⁸ Ebd., S. III/28f.

⁵⁹ EBA, 2008, S. 6 und S. 10

⁶⁰ FREUDENSTEIN, 2011, S. IV/2

⁶¹ Ebd., S. IV/12

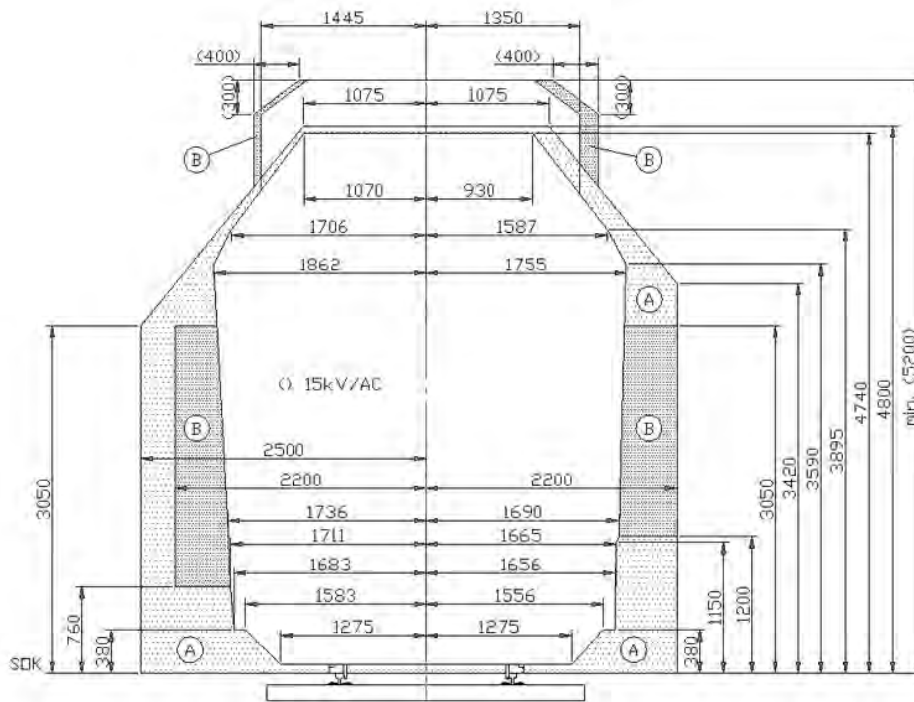


Abb. 8: Regellichraum EBO⁶²

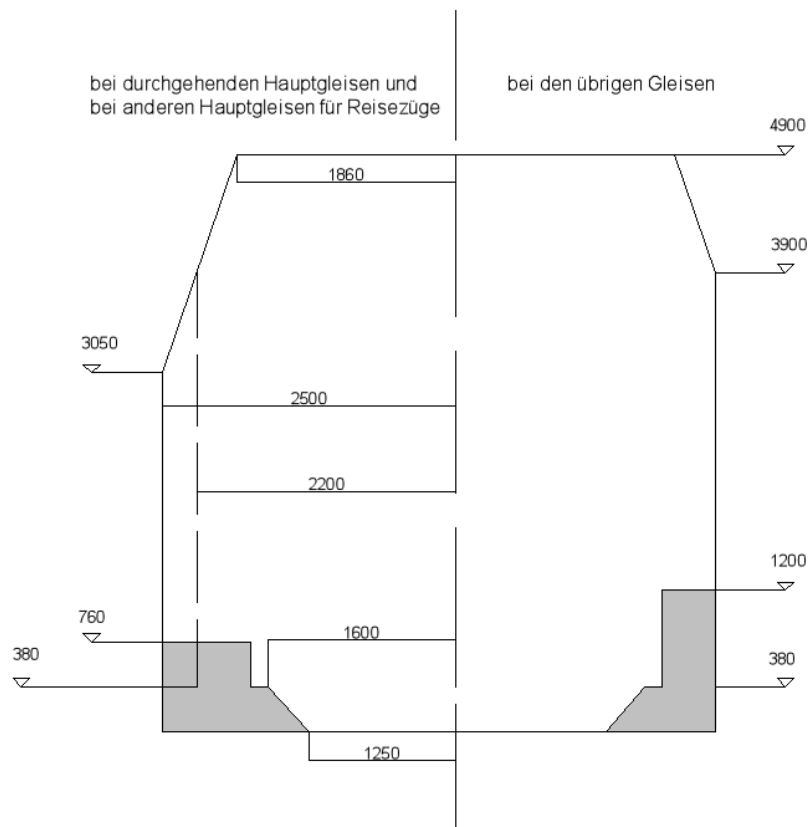


Abb. 9: Regellichraum GC (nach FREYSTEIN, 2005, S. 168)

⁶² <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lichtraumprofil.png>

2.2.4 Musterquerschnitte

In Abhängigkeit von Geschwindigkeit, Bauweise, Querschnitt und Anzahl der Fahrbahnen gibt es im Modul 853.9001 der RiL 853 Musterquerschnitte.⁶³

1	2	3	4	5
T Tunnel	H Hochgeschwindigkeitsverkehr ≤ 300 km/h (P 300*)	B geschlossene Bauweise	K Kreisquerschnitt	1 eingleisig
	F Schnellverkehr ≤ 230 km/h (P 230*)	O offene Bauweise	M Korbbogenquer- schnitt	2 zweigleisig
	R Personen-/ Güterverkehr ≤ 160 km/h (M 160*)		R Rechteckquerschnitt	
	S S-Bahn-Verkehr ≤ 120 km/h			

Tab. 6: Erläuterung der Bezeichnung für Musterquerschnitte (nach FREYSTEIN, 2005, S. 381)

Die Liste mit den Bezeichnungen der Musterquerschnitte nach RiL 853:

Geschwindigkeit	Gleisbau	A [m2]	Zeichnung
231 - 300	SchO / FF zweigl.	92,0	T-H-B-K-2-01
231 - 300	SchO / FF zweigl.	92,0	T-H-B-M-2-01
231 - 300	FF eingl.	59,7	T-H-B-K-1-01
231 - 300	SchO eingl.	60,1	T-H-B-K-1-02
231 - 300	FF eingl.	59,7	T-H-B-M-1-01
231 - 300	SchO eingl.	60,6	T-H-B-M-1-02
161 - 230	SchO / FF zweigl.	70,2	T-F-B-K-2-01
161 - 230	FF eingl.	53,7	T-F-B-K-1-01
161 - 230	SchO eingl.	54,9	T-F-B-K-1-02
161 - 230	FF eingl.	51,3	T-F-B-M-1-01
161 - 230	SchO eingl.	52,0	T-F-B-M-1-02
≤ 160	FF eingl.	52,7	T-R-B-K-1-01
≤ 160	SchO eingl.	54,2	T-R-B-K-1-02
≤ 160	FF eingl.	48,7	T-R-B-M-1-01
≤ 160	SchO eingl.	50,3	T-R-B-M-1-02
≤ 120	S-Bahn, FF zweigl., ohne ü	50,3	T-S-O-R-2-01
≤ 120	S-Bahn, FF zweigl., überhöht	51,7	T-S-O-R-2-02
≤ 120	S-Bahn, SchO zweigl., ohne ü	53,8	T-S-O-R-2-03
≤ 120	S-Bahn, SchO zweigl., überhöht	54,8	T-S-O-R-2-04
≤ 120	S-Bahn, FF eingl., ohne ü	25,7	T-S-O-R-1-01
≤ 120	S-Bahn, FF eingl., überhöht	29,6	T-S-O-R-1-02
≤ 120	S-Bahn, SchO eingl., ohne ü	27,5	T-S-O-R-1-03
≤ 120	S-Bahn, SchO eingl., überhöht	30,0	T-S-O-R-1-04
≤ 120	S-Bahn, FF eingl., ohne ü	32,4	T-S-B-K-1-01
≤ 120	S-Bahn, FF eingl., überhöht	33,1	T-S-B-K-1-02
≤ 120	S-Bahn, SchO eingl., ohne ü	33,5	T-S-B-K-1-03
≤ 120	S-Bahn, SchO eingl., überhöht	33,8	T-S-B-K-1-04

Tab. 7: Liste der Musterquerschnitte (nach FREYSTEIN, 2005, S. 382)

Die Musterquerschnitte bilden die Grundlage für die im Kapitel 3 beschriebenen Profile.

⁶³ FREYSTEIN, 2005, S.381f

2.2.5 Tunnelausstattung

Zur Tunnelausstattung zählen sämtliche versorgungs- und verkehrstechnische Einrichtungen, die einen reibungslosen Ablauf während des Betriebes garantieren und die im Gefahrenfall funktionstüchtig zur Verfügung stehen.

Da sich die Merkmale größtenteils mit denen der 2. S-Bahn Stammstrecke decken, sei an dieser Stelle auf das Kapitel 4.1 verwiesen.

2.2.6 Fahrbahn

Die Fahrbahn eines Eisenbahntunnels kann in verschiedenen Formen ausgeführt werden. Dabei wird heutzutage in innerstädtischen Bereichen die sogenannte "Feste-Fahrbahn" verwendet, welche aufgrund ihrer absorbierenden Wirkung von Schall und Vibrationswellen besonders geeignet ist. Außerdem ist dieses System, gegenüber dem herkömmlichen Schotteroberbau, relativ resistent und wartungsarm, was es für den Tunnelbau sehr rentabel macht. Auf dem Sohlbeton wird ein Elastomerlager, ausgeführt als Einzel-, Streifen- oder Flächenlager, ausgelegt, auf welchem anschließend die Setzung der Tragplatte erfolgt. Randflächen können dabei ebenfalls mit Flächenlagern ausgestattet werden. Auf der Tragplatte werden anschließend die Zweiblockschwelle verlegt und monolithisch in Beton vergossen um die Fahrbahn zu vollenden. Nach dem Aushärten können die Schienenaufleger und die Eisenbahnschienen mit den vorgeschriebenen Klammern an den Schwellen befestigt werden.⁶⁴ Eine anschauliche Dokumentation über eine derartige Tunnelherstellung bietet die Fanprojektseite zum Leipziger City Tunnel: <http://www.citytunnelleipzig.info> und die Hauptseite des Projektes: <http://www.citytunnelleipzig.de/de/bautagebuch/jahr-2013.html> (beide aufgerufen am 27.02.2013).⁶⁵

⁶⁴ vgl. <http://www.railone.com/de/main-nav/produkte/fern-und-regionalverkehr/feste-fahrbahn/rheda-2000/rheda-2000r-masse-feder-system-mfs.html> (aufgerufen am 27.02.2013)

⁶⁵ <http://www.citytunnelleipzig.info>
<http://www.citytunnelleipzig.de/de/bautagebuch/jahr-2013.html>

2.3 Brandschutz

Für sämtliche Tunnel gelten Brandschutzrichtlinien welche bei der Planung eingehalten und berücksichtigt werden müssen. Dabei werden für jeden Tunnel Brandschutzkonzepte mit den zugehörigen Rettungswegen entworfen, welche die Richtlinie "Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln" (Stand: 01.07.2008) des Eisenbahn Bundesamtes und die von der Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlichten "Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten Teil 5 Tunnelbau" (Stand 03/2012) einhalten müssen.⁶⁶ Besonders für den Personenschutz und die Brandbemessung zu beachten sind dabei die Abstände und Anzahl der zu errichtenden Notausgänge zu Rettungsschächten, sowie die Dimensionierung der Querschläge bei Zweiröhrentunneln, da diese unter Umständen für Rettungsfahrzeuge passierbar sein müssen. Für den baulichen Brandschutz ist dafür Sorge zu tragen, dass durch den Brand keinerlei Schäden auftreten, welche die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Tunnels beeinträchtigen können. Darüber hinaus muss die Dichtigkeit des Tunnels bestehen bleiben.⁶⁷

⁶⁶ EBA, 2008 und BAST, 2012, Absatz 10

⁶⁷ BAST, 2012, Absatz 10.1

2.4 Geostatische Einflüsse

Der Einfluss des umgebenden Baugrundes ist maßgebend für die Anforderung an die Querschnittsgestaltung. Dabei gilt der Grundsatz bei der Tunnelvorhersage:

"Die ingenieurgeologische, fels- bzw. bodenmechanische Erkundung zur "Tunnelvorhersage" ist um so umfangreicher und sorgfältiger durchzuführen,

-je komplizierter die ingenieurgeologischen Verhältnisse sind

-je länger der geplante Tunnel wird

-je tiefer er unter der Geländeoberfläche liegt."⁶⁸

Die genaue Analyse ist dabei Grundvoraussetzung für die Gestaltung des Tunnelquerschnitts, da hier wichtige Kennwerte wie Festigkeit, Wasserdurchlässigkeit und Grundwasserverhältnisse des Bodens erkundet werden. Diese geben für das Tunnelprofil die auftretenden Kräfte vor, welche über die Gestaltung von First-, Ulmen- und Sohlbereichen bestimmend sind. Erst anhand dieser Einflüsse kann ein Bauwerk im Detail geplant werden. Eine kleine Übersicht zeigt die folgende Abbildung:



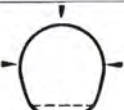

	<p>Rechteck .</p> <p>Angewandt, wenn die Außenkräfte zu keiner schädlichen Bewegung des Gebirges in Richtung Hohlraum führen .</p>
	<p>Halbellipse , Parabel oder Halbkreis .</p> <p>Angewandt bei vertikalem Kräfteangriff .</p>
	<p>Hufeisenform , Maulform .</p> <p>Angewandt bei vertikalem und horizontalem Kräfteangriff .</p>
	<p>Kreis .</p> <p>Angewandt bei allseitigem Kräfteangriff von außen und insbesondere auch bei Innenwasserdruck .</p>

Abb. 10: Grundformen mit Kräfteinflüssen (nach MAIDL, Bd. II, 2004, S. 34)

Hierbei wird ersichtlich, dass die Form des Tunnels umso stetiger auszubilden ist, um die Kräfte effizient aufzunehmen, bzw. in den Untergrund einzuleiten, je mehrseitiger der Kräfteangriff erfolgt.⁶⁹

⁶⁸ STRIEGLER, 1993, S.59

⁶⁹ Ebd., S.28.

2.5 Bauverfahren

Zum Komplettieren der Anforderungen wird hier kurz auf die verschiedenen Bauverfahren eingegangen. Dabei wird grundsätzlich zwischen geschlossener und offener Bauweise unterschieden. Bei der geschlossenen Variante wird eine in bergmännischer Bauweise, von der Geländeoberfläche unabhängige Auffahrung des Hohlraumes verstanden.⁷⁰ Dies bedeutet, dass der Tunnel unter der Geländeoberfläche aus dem Baugrund herausgefördert wird. Anwendung finden hierbei Vortriebsarten, wie Sprengvortrieb, maschineller Vortrieb, Schildvortrieb und Rohrvortrieb.⁷¹ Die Wahl des Querschnittes ist vor allem bei der Herstellung mit Tunnelbohrmaschinen (Schildvortrieb) limitiert, da durch die Form des Schildes nur kreisförmige Querschnitte herstellbar sind. Für das Maulprofil können die übrigen Formen angewandt werden. Bei der offenen Bauweise wird zunächst ein Einschnitt in den Baugrund vorgenommen, in welchem anschließend der Tunnel errichtet und nach Fertigstellung überschüttet wird.⁷² Hierbei sind einige Kriterien zu beachten, welche die Wirtschaftlichkeit und Realisierbarkeit der offenen gegenüber der geschlossenen Bauweise darstellen. Diese werden in untenstehender Tabelle erläutert.

Hauptmerkmal der offenen Bauart ist der oberflächige Eingriff durch Ausheben einer Baugrube. Die Form der Baugruppe kann abhängig von der Oberflächenbebauung variieren. Auf offenen Flächen können abgeöschte Baugruben verwendet werden⁷³, während im innerstädtischen dicht besiedelten Bereich Sicherungsmethoden wie Spundwände oder Bohrpfahlwände angewandt werden müssen. Unter dem wirtschaftlichem Aspekt muss beachtet werden, dass Sohliefen von 18m bis 20m hinsichtlich der Einbringung von Aussteifungs- und Rammelementen nicht mehr rentabel sind.⁷⁴

⁷⁰ STRIEGLER, 1993, S. 101

⁷¹ Ebd., S. 102

⁷² Ebd., S. 240

⁷³ Ebd., S. 244

⁷⁴ Ebd., S. 241

Folgende Tabelle listet die verschiedenen Kriterien für die Entscheidung der Bauweise auf:

Baugrund- und Grundwasser- verhältnisse	Tiefenlage und Oberflächenbebauung	Technische Bedingungen und Art des Tunnels	Auswirkungen und finanzielle Mittel
Gebirge: Standfestigkeit Homogenität Eigenschaften	technische Möglichkeiten und wirtschaftliche Grenzen: Abmessungen der Bauelemente Sicherheit und Aufwand Leitungsbau	Art der Tunnellage: Streckentunnel Bahnhofstunnel Kehr- und Abstellanlagen	Einfluß auf Oberflächenverkehr: Sperrzeiten Umleitungen Erschwernisse
Bauverfahren: Rammen Bohren Schlitzen Hindernisse Gewinnungsfestigkeit	Oberflächenbebauung: Schäden Überbauung	Tunneldichtung: Hauptabdichtung Sperrbeton elektrische Isolation	Anliegerbelästigung: Platzverhältnisse Verschmutzung Lärm öffentliches Leben u. ä.
Wasserhaltung: offene Wasserhaltung geschlossene Wasserhaltung	Unterfahrungen: Schwierigkeitsgrad Sicherheitsgrad Aufwand	Gewährleistung technischer Eigenschaften: Qualität	Wirtschaftlichkeit: Personalkosten Materialkosten Investitionskosten
Druckluftverfahren		Unterhaltungs- aufwand	

Tab. 8: Kriterien für Wahl der Bauweise (nach STRIEGLER, 1993, S. 241)

Der Rechteckquerschnitt ist die am häufigsten auftretende Ausbildung der offenen Bauweise. Eine Besonderheit ist die Kombination beider, nämlich offener und geschlossener, Bauverfahren, wie z.B. die Errichtung von Tunnelportalen und Bahnhöfen in offener, sowie die Errichtung der Streckentunnel in geschlossener Bauweise.⁷⁵

⁷⁵ STRIEGLER, 1993, S.241f

3 Parametrisierung und Vorstellung verschiedener Tunnelquerschnitte und Nutzungsformen

3.1 Allgemein

Grundsätzlich hängt die Geometrie des Tunnelquerschnittes von verschiedenen Einflussgrößen ab. Die drei Hauptmerkmale sind dabei die gewünschte Nutzungsform (Straßen-, Eisenbahn- oder Versorgungstunnel), die geostatischen Krafteinwirkungen des umliegenden Baugrundes und zuletzt das gewünschte Vortriebsverfahren (Schild-, Sprengvortrieb...). Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick über die verschiedenen Arten von Tunnelprofilen geben. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird spezialisierter auf das "Kreis-", "Hufeisen-", "Korbbogen-" und "Maulprofil" eingegangen werden, welche sich auf die Musterquerschnitte von Eisenbahntunneln beziehen.⁷⁶ Im Folgenden werden kurze Erläuterungen zu den einzelnen Profilen gegeben und zudem eine Möglichkeit, die Querschnitte mittels Längenverhältnissen in Abhängigkeit des Ausgangsparameters "Radius r" parametrisch zu modellieren. Für die Umsetzung im Programm "Autodesk Inventor" wird dazu ein Benutzerparameter erstellt, dem ein vom Anwender gewünschter Wert übergeben wird. Betrachtet man Planunterlagen zu Tunnelbauwerken stellt man fest, dass ein Versatz in horizontaler und vertikaler Richtung von Tunnelachse zu Verkehrsachse vorhanden ist. Der vertikale Versprung resultiert aus der Forderung nach Wirtschaftlichkeit, da eine Verkehrsachse auf der Tunnelachse eine immense Vergrößerung des Tunnelquerschnittes zur Folge hätte, bemüht man sich, die Vorschriften zum Lichtraumprofil (vgl. Kapitel 2.1.4 und 2.2.3) einzuhalten. Ein horizontaler Abstand ergibt sich z.B. aus der Kurvenfahrt eines Zuges, da hier die Wagenkästen in die freizuhaltenden Flanken (Notgehwege...) einschneiden. Um dem entgegenzuwirken, versetzt man die Verkehrsachse in Richtung Bogenaußenseite.

⁷⁶ vgl. Kapitel 2.2.4 Musterquerschnitte

3.2 Kreisprofil

Das Kreisprofil ist die einfachste Form des Tunnels, das durch einen Radius definiert ist, welcher von der Tunnelachse, dem Mittelpunkt des Tunnelquerschnitts, ausgeht. Dieses Profil wird beim Bau der 2. S-Bahn Stammstrecke verwendet, weswegen eine genaue Erläuterung im Kapitel 4.1 erfolgt.

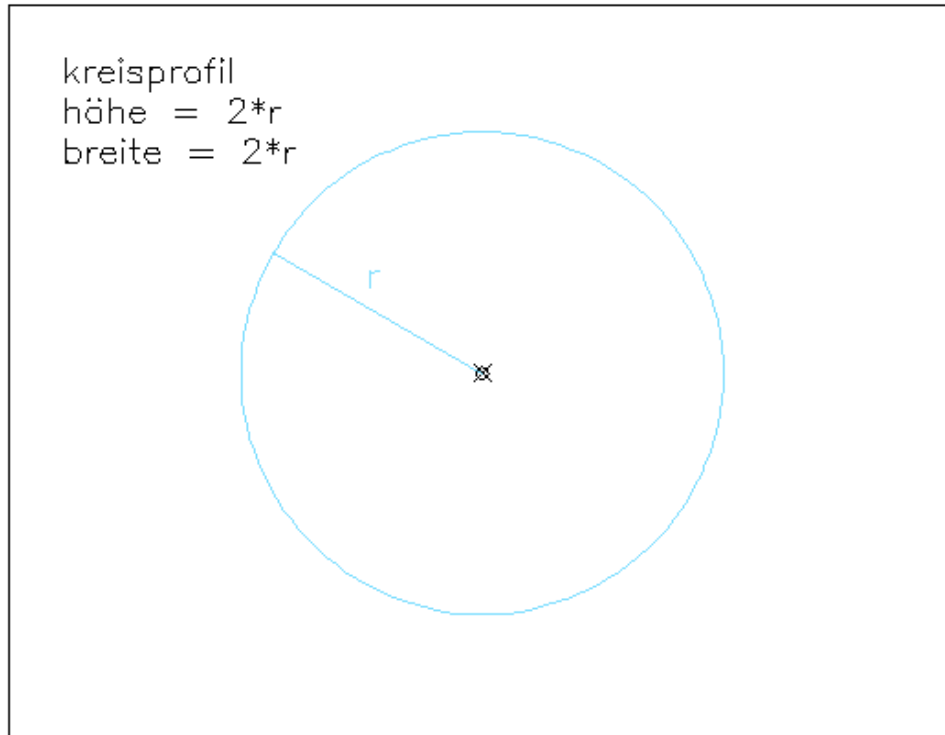


Abb. 11: Kreisprofil

3.3 Hufeisenprofil

Das Hufeisenprofil ist durch seine schlanke Form besonders für hohe Eisenbahnen geeignet, als Beispiel dienen die Meterspurbahnen der Rhätischen Bahn in der Schweiz⁷⁷. Der Querschnitt kann nur in standfestem Gelände angewendet werden, da überwiegend vertikale Kräfte auftreten. Außerdem darf kein Grundwasser anstehen, da sonst Sohlspannungen auftreten und die Sohle gerundet ausgebildet werden muss. Sollte dies der Fall ist, wird sich die Form dem "Korbbogenprofil" angleichen.

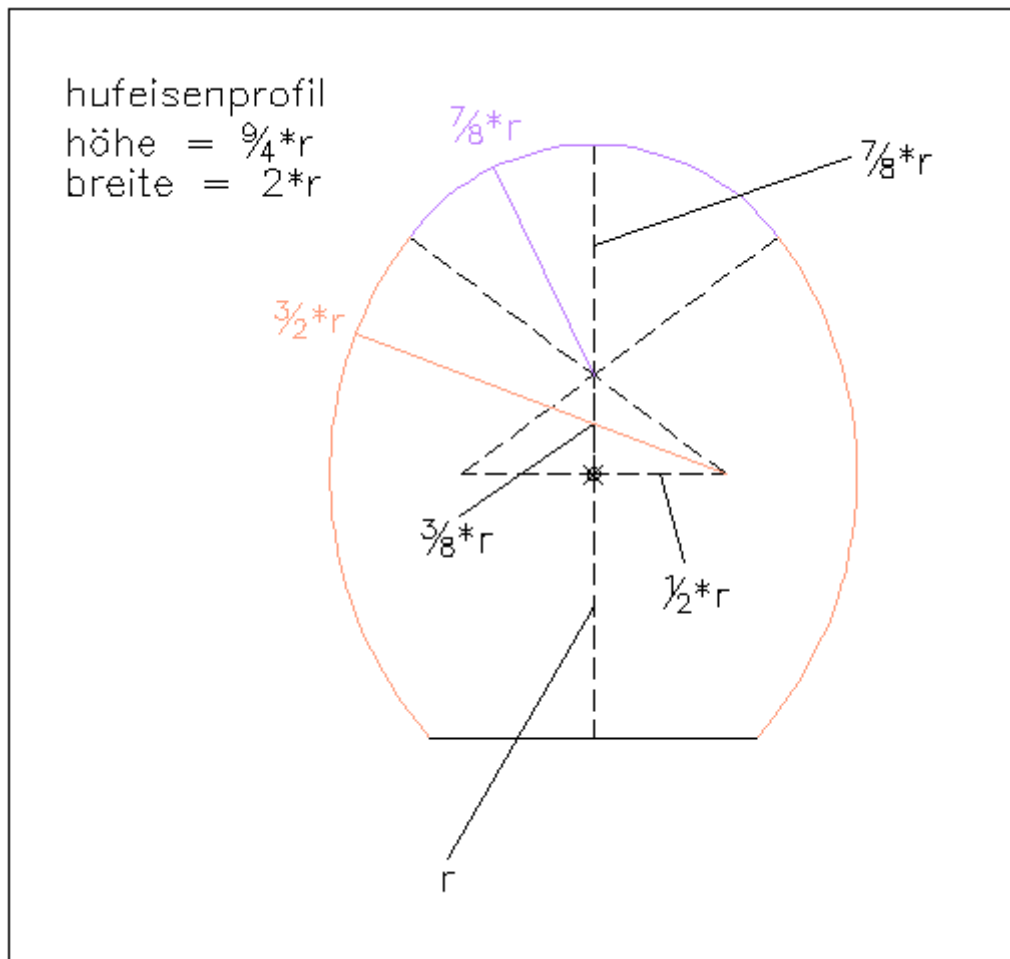


Abb. 12: Hufeisenprofil

⁷⁷ VÖV, 2008

3.4 Korbbogenprofil

Das Korbbogenprofil ähnelt dem Hufeisenprofil mit der zusätzlichen Eigenschaft, dass hier Sohlspannungen auftreten dürfen. Dreht man das so entstehende Profil, erhält man den unten dargestellten Querschnitt. Dieser breite Querschnitt findet vor allem bei mehrspurigen Verkehrstunnel und aerodynamisch optimierten Hochgeschwindigkeitsstrecken Anwendung.

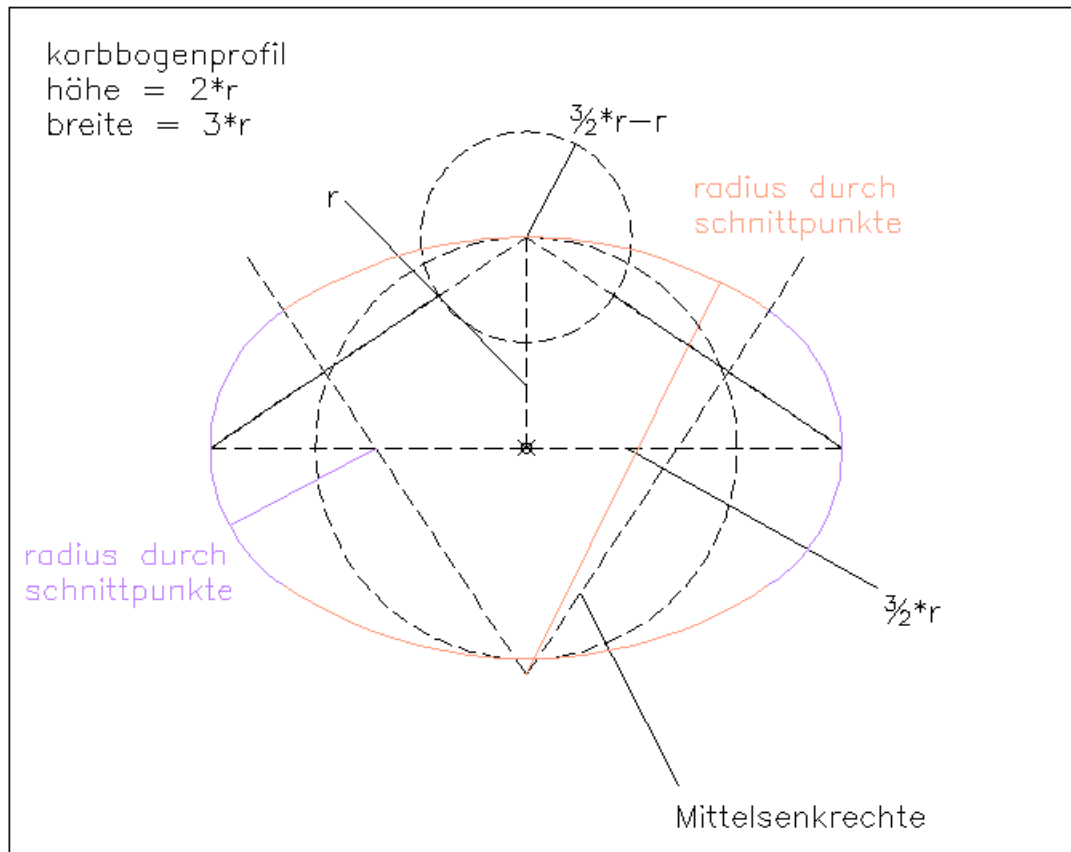


Abb. 13: Korbbogenprofil

Die Erstellung des Profils erfolgt in einfachen Schritten. Im ersten Schritt wird die gewünschte Breite und die halbe Höhe eingezeichnet und die Endpunkte miteinander verbunden, sodass ein Dreieck entsteht. Danach zeichnet man den oberen kleinen Kreis mit dem Radius:

$$\text{Radius} = 0,5 * \text{Breite} - 0,5 * \text{Höhe}$$

Durch die Geraden, welche jeweils von den Schnittpunkten des Kreises mit den Hypotenusen des Dreiecks und den äußeren Eckpunkten beschrieben werden, werden zwei Mittelsenkrechten gebildet und abschließend die Radien angezeichnet (siehe oben).

3.5 Maulprofil

Eine Beschreibung des Maulprofils gibt der Autor KOLYMBAS⁷⁸ in seiner Veröffentlichung "Tunneling and Tunnel Mechanics":

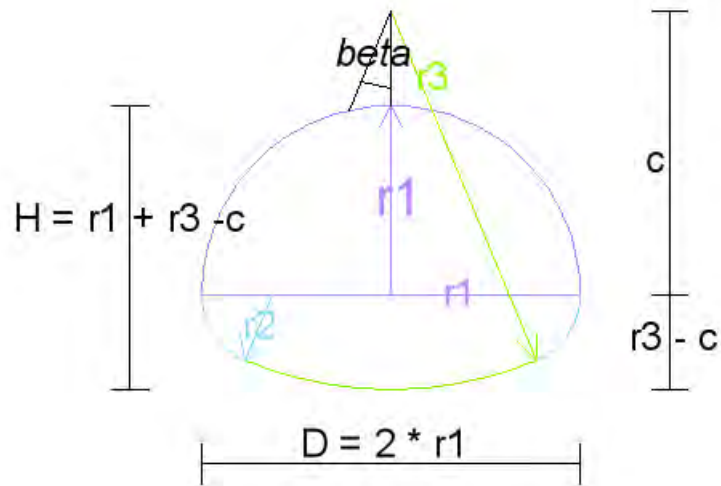
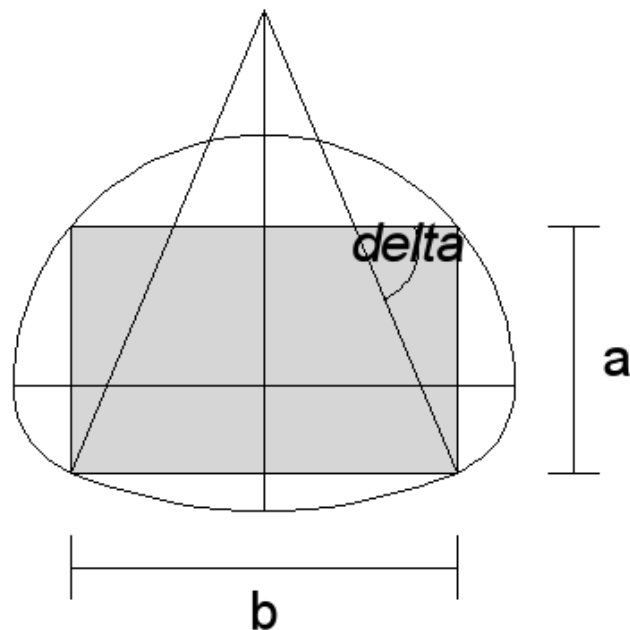


Abb. 14: Maulprofil (nach KOLYMBAS, 2008, S. 8)

Er setzt den Tunnelquerschnitt dabei aus drei verschiedenen Kreisen, mit den jeweiligen zugehörigen Radien r_1 , r_2 , r_3 , zusammen. Als Grundsatz, der sich aus der Stetigkeit des Profils ergibt, müssen alle Kreise tangential miteinander verbunden sein. Eine Schwierigkeit ist das Einpassen eines Rechtecks in das Maulprofil.



⁷⁸ vgl. Literaturverzeichnis

Abb. 15: Einpassen eines Rechtecks in ein Maulprofil (nach KOLYMBAS, 2008, S. 8)

Dieses Rechteck beschreibt die Anforderungen aus dem Kapitel 2. Dabei sind vor allem das Lichtraumprofil und der Regelquerschnitt des Tunnels von Bedeutung, da diese dem Rechteck die erforderliche Breite und Höhe vorgeben. Dieses Einpassen in den Querschnitt ist ein typisches Problem beim Tunnelentwurf, da die Radien so gewählt werden müssen das das Rechteck umschlossen wird⁷⁹. KOLYMBAS beschreibt dazu eine Möglichkeit⁸⁰:

1. Zuerst wird der Radius r_1 gewählt
2. danach wird der Kosinus δ ausgewertet:

$$\cos \delta = \frac{b}{2r_1}$$

3. daraufhin wird der Radius r_3 berechnet

$$r_3 = \frac{a + c - \sqrt{r_1^2 - \frac{b^2}{4}}}{\sin \delta}$$

4. abschließend wird der Radius r_2 mit der Beziehung gewählt:

$$r_2 = \frac{r_3}{5}$$

Des Weiteren geht der Autor von der Annahme aus, das die Eckpunkte des Rechtecks auf dem Kreis mit Radius r_2 liegen („It is assumed that the lower edges of the rectangle are on the circle with radius r_2 “ KOLYMBAS, Seite 9). Das Problem welches beim Modellieren des Querschnitts auftritt ist das der im dritten Schritt als Ergebnis auftauchende Radius r_3 von dem Parameter „c“ abhängig ist welcher laut KOLYMBAS mit:

$$c = \sqrt{r_3^2 - 2r_2(r_3 - r_1) - r_1^2} \quad ^{81}$$

berechnet wird. Hierbei stellt sich jedoch ein Zirkelbezug ein, da die noch nicht bekannten Parameter r_2 und r_3 Verwendung finden und zum Lösen von c erforderlich sind. Da der Autor nicht näher auf dieses Problem eingeht, kann davon ausgegangen werden das hier ein iterativer Lösungsweg eingeschlagen werden muss um die gewünschten Radien zu ermitteln.

⁷⁹ KOLYMBAS, 2008, S.8

⁸⁰ EBD, S.8f

⁸¹ EBD, S.7

Für die Parametrische Modellierung kann eine Variante mit Längenverhältnissen verwendet werden, welche auch in der Veröffentlichung von KOLYMBAS zu finden ist⁸²:

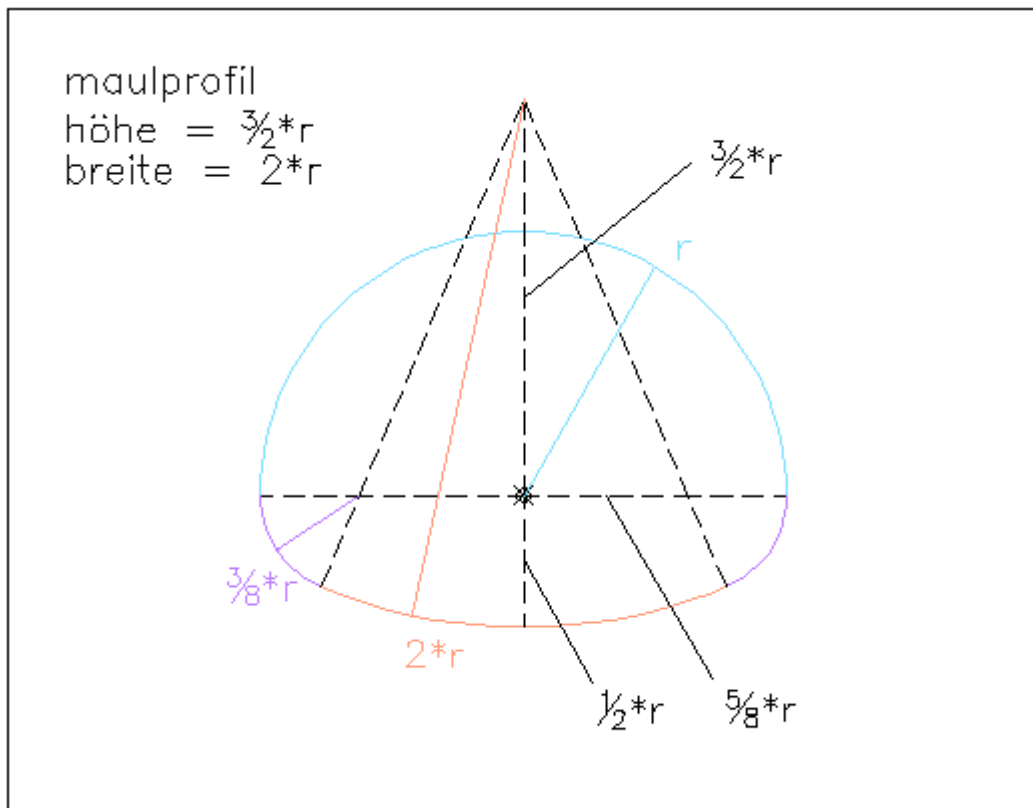


Abb. 16: Maulprofil










⁸² KOLYMBAS, 2008, S.8

3.6 Einstieg in "Autodesk Inventor"

Das Programm „Inventor“ wird von der US-amerikanischen Firma Autodesk entwickelt und vertrieben. Es wird vom Benutzer genutzt um ein digitales, dreidimensionales Modell zu erstellen.⁸³ Dieses Modell kann aus verschiedenen sogenannten "Bauteilen" bestehen, welche durch Verknüpfung von Skizzen und 3D-Körpern modellierbar sind. Aus Skizzen können dabei mit 3D - Funktionen wie Extrusion, Sweeping etc. Volumenkörpern erstellt werden.

Interessant ist die Verwendung von Benutzerparametern, da hierdurch dem Anwender die Möglichkeit gegeben ist, nachträglich schnell und einfach Änderungen zu vollziehen.

Für Skizzen sowie Bauteile kann der Benutzer in "Inventor" Abhängigkeiten einführen, die das Verhältnis untereinander beschreiben, z.B. dass zwei Linien immer parallel verlaufen sollen, oder dass zwei Bauteile sich um bestimmte Achsen zueinander verdrehen können. Eine Auflistung über die verfügbaren Skizzenabhängigkeiten gibt folgende Tabelle:

Skizzenabhängigkeiten	
	Koinzident (Punkt auf Objekt)
	Kollinear (Linien aufeinander)
	Konzentrisch (gleicher Mittelpunkt)
	Fest
	Parallel
	Lotrecht
	Horizontal
	Vertikal
	Tangential
	Stetig
	Symmetrisch
	Gleich

Tab. 9: Abhängigkeiten Inventor

⁸³ vgl. http://images.autodesk.com/emea_dach_main_germany/files/brochure_a4_de.pdf (aufgerufen am 27.02.2013)

Für die Positionierung von Bauteilen in Baugruppen stellen folgende Abbildungen die verfügbaren Möglichkeiten in "Inventor" dar ⁸⁴:

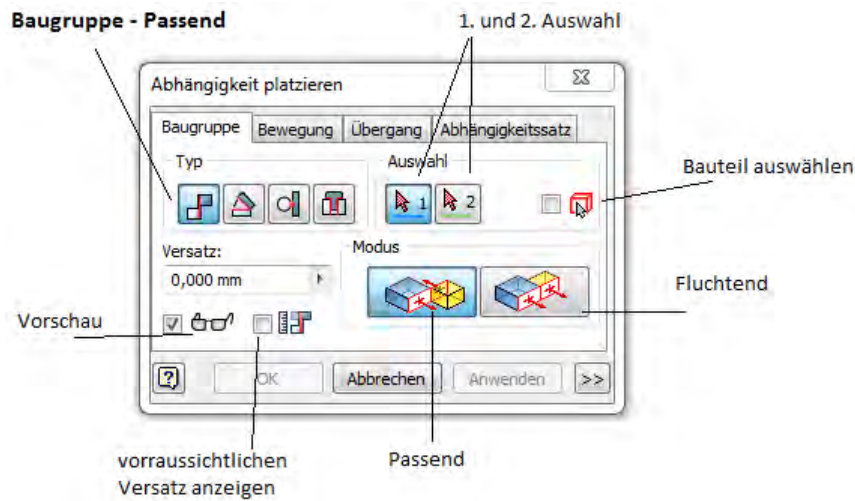


Abb. 17: Baugruppe - Passend

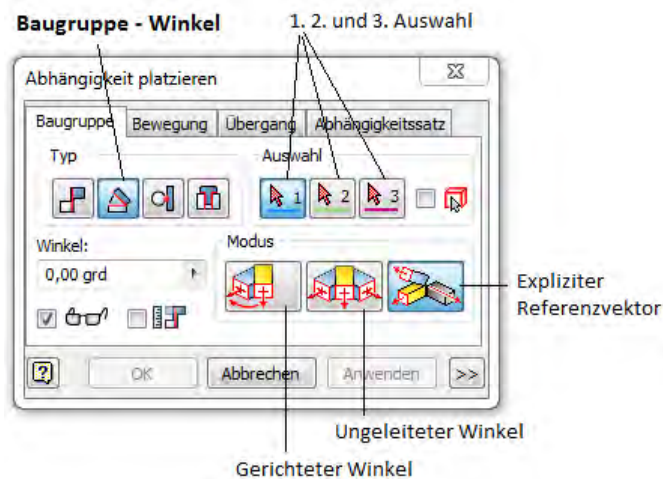


Abb. 18: Baugruppe - Winkel

⁸⁴

<http://wikihelp.autodesk.com/Inventor/deu/2013/Help/1309-Autodesk1309/1654-Baugrupp1654/1655-Baugrupp1655/1688-Abhängig1688/1690-Übersich1690>

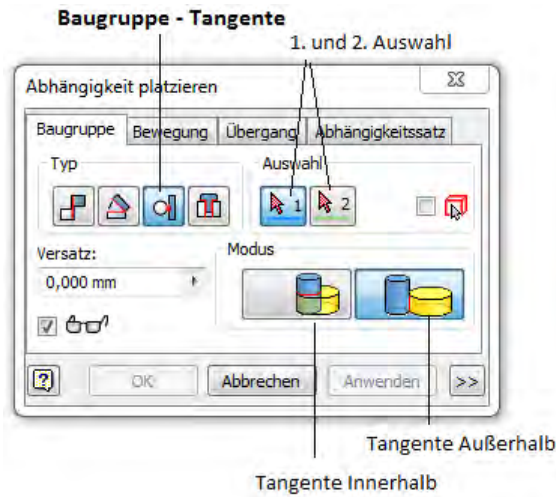


Abb. 19: Baugruppe - Tangente

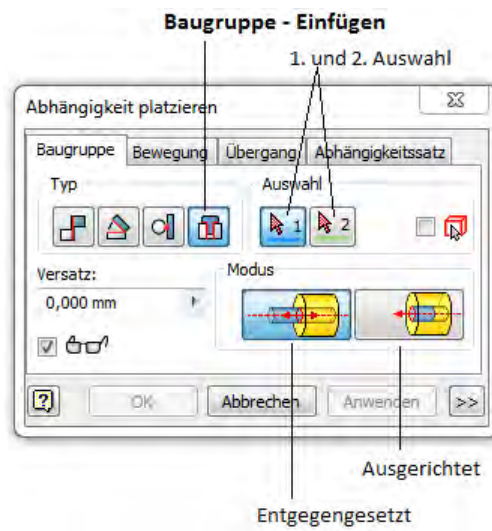


Abb. 20: Baugruppe - Einfügen

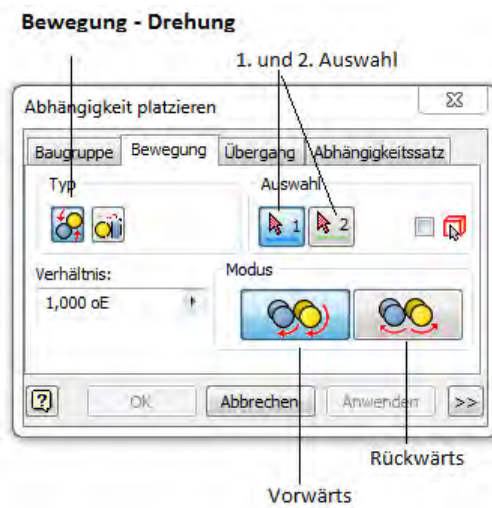


Abb. 21: Bewegung - Drehung

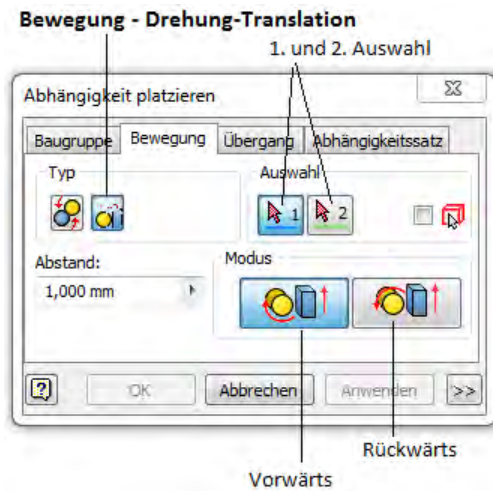


Abb. 22: Bewegung - Drehung-Translation

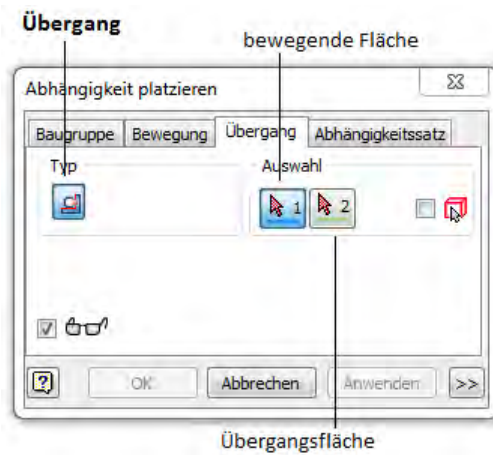


Abb. 23: Übergang

Benutzerkoordinatensystem zu Benutzerkoordinatensystem (BKS zu BKS)

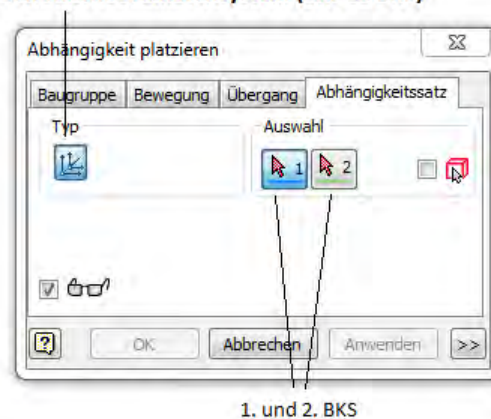


Abb. 24: Abhängigkeitssatz

4 Dreidimensionale Parametrische Modellierung der 2. S-Bahn Stammstrecke

4.1 Allgemeines zur 2. S-Bahn Stammstrecke

Die 2. S-Bahnstammstrecke ist ein 11 km langes, zum größten Teil (7 km) als Tunnel ausgebildetes, unterirdisch verlaufendes Infrastrukturprojekt, welches durch die West-Ost Achse der Innenstadt von München verläuft. Sie beginnt im Westen vor der Haltestelle "Donnersberger Brücke", fährt in der Folge die Stationen "Hauptbahnhof", "Marienplatz" und "Ostbahnhof" an, bevor sie im Osten der Stadt, nahe des Bahnhofs "Leuchtenbergring", endet. Die Tunnelportale zu den Enden werden in offener Bauweise errichtet. Der Rest der Strecke wird in geschlossener Bauweise, durch maschinellen Schildvortrieb (TBM) und Spritzbetonverfahren hergestellt. Es erfolgt eine getrennte Führung der beiden Tunnelröhren, die durch neun Querschläge miteinander verbunden sind, von welchen Rettungsschächten an die Oberfläche abgehen.⁸⁵ Für die Arbeit vorliegende Planunterlagen sehen, für die Baukilometer 108,0 + 76 und 110,0 + 38, für die maschinelle Bauweise, eine Ausführung als Kreisprofil vor, welches mit TBM hergestellt wird. Der Oberbau besteht aus einer sogenannten "festen Fahrbahn", welche bereits in Kapitel 2.2.4 beschrieben wird. Dazu kommen einige technische Einrichtungen. Neben der Fahrbahn befinden sich Kabel- und Löschwasserleitungen, sowie eine Längsentwässerung in der Fahrbahnsohle. An der Seite des Notgehwegs befindet sich ein Handlauf, Beleuchtung und im oberen Bereich das Erdungskabel für die Oberleitung. Diese befindet sich am Tunnelfirst oberhalb der Fahrbahn. Zusätzlich finden sich an der gegenüberliegenden Seite des Notgehwegs verkehrstechnische Einrichtungen, wie z.B. Lichtsignalanlagen.⁸⁶



DB ProjektBau GmbH

Abb. 25: 2. Stammstrecke München (http://www.edr.de/uploads/tx_edrprojects/PS-1.11_Neubau_2.S-Bahn-Stammstrecke__Muenchen__c_Deutsche_Bahn_AG__01.jpg)

⁸⁵ <http://www.2.stammstrecke-muenchen.de/das-projekt/die-2-stammstrecke/> (aufgerufen am 27.02.2013)

⁸⁶ vgl. Planunterlagen Obermeyer Planungsgesellschaft: PSP2PT3-R3201b_RQ_TVM_100_200_LoD.dwg

4.2 Besonderheiten der Trassierung bei Anwendung von Tunnelbohrmaschinen

Beim Erstellen eines Tunnels, folgt dieser einer in den Planungsphasen festgelegten Trasse, welche die Form einer stetig gewundenen Linie besitzt. Das Problem, welches sich bei der geschlossenen Bauweise mit Tunnelbohrmaschinen (TBM) ergibt, ist, dass der Ausbau mit Tübbings dieser Trasse nicht exakt folgen kann. Das liegt an der Eigenschaft eines Tübbings. Ein Tübbing ist ein vorgefertigtes Element, welches aus bewehrtem Beton, Gusseisen oder Stahl hergestellt und nach dem Bohrvorgang an den Tunnelseiten zur Sicherung eingesetzt wird. Es wird dabei immer ein Ring, der aus mehreren Tübbings zusammengesetzt ist, erstellt und wasserdicht und kraftschlüssig verpresst. Die einzelnen Teile werden so gefertigt, dass eine, bzw. abhängig von der verwendeten Technik, zwei Stoßkanten konisch abgeschrägt werden. Diese Eigenschaft ermöglicht es, einen Kurvenradius in der Strecke zu realisieren. Das folgende Bild erklärt dabei die Verwendung bei gebogenen Abschnitten (Anm. die Verbindungsbereiche in denen die Tübbinge miteinander verschraubt werden sind hier durchgehend dargestellt):

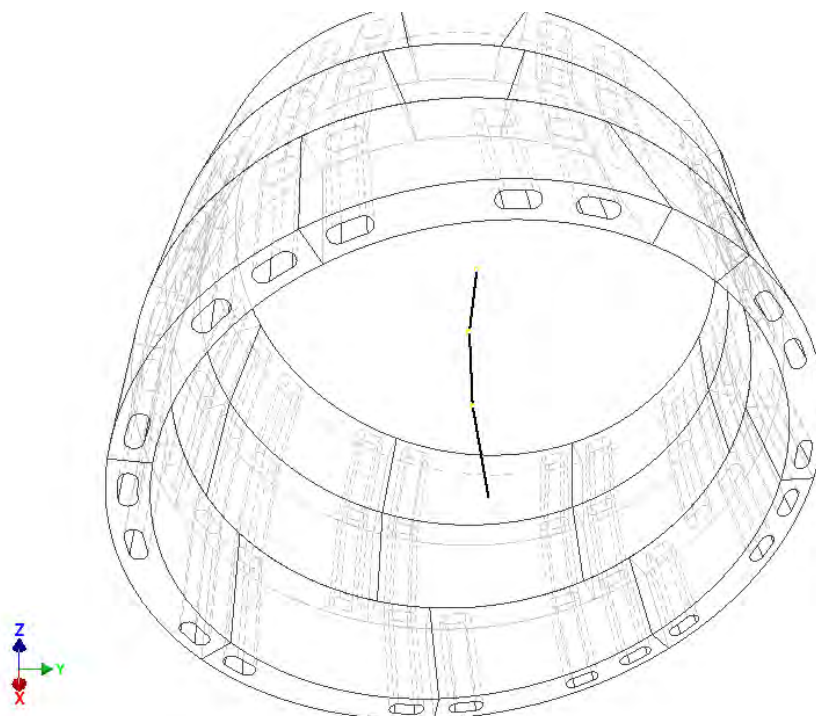


Abb. 26: Tunnelachse Tübbingausbau

Besondere Beachtung verdient der Optimierungsprozess bei der Entwicklung der Tübbings. Die Tübbings besitzen eine gewisse Breite, was bedeutet, dass innerhalb dieser Distanz die Tunnelachse nur einem geraden Abschnitt folgen kann. Je größer die einzelnen Elemente gefertigt werden, umso ungenauer folgt damit die Tunnelachse der vorgegebenen Trasse, da an den Kanten der Ringe eine Abweichung vom Sollzustand entsteht. Dies führt zu einem wirtschaftlichen Optimierungsprozess, da geringere Stückzahlen einen Mehraushub bedeuten, jedoch im Umkehrschluss höhere Stückzahlen zu einem geringeren Mehraushub führen da hier die Trasse besser verfolgt werden kann. Hierbei müssen die Kosten für die Gesamtsumme der Tübbings mit denen des eventuell größer aufgefahrenen Radius verglichen werden, um die Breite der Tübbings festzulegen. Ein Tübbingring besteht aus einer variablen Anzahl von Tübbings, welche ebenfalls in der Planung festgelegt werden muss und somit für das Projekt festgelegt ist. Die untere Abbildung zeigt dabei noch einmal den Unterschied bei verschiedenen Längen der Ringe:

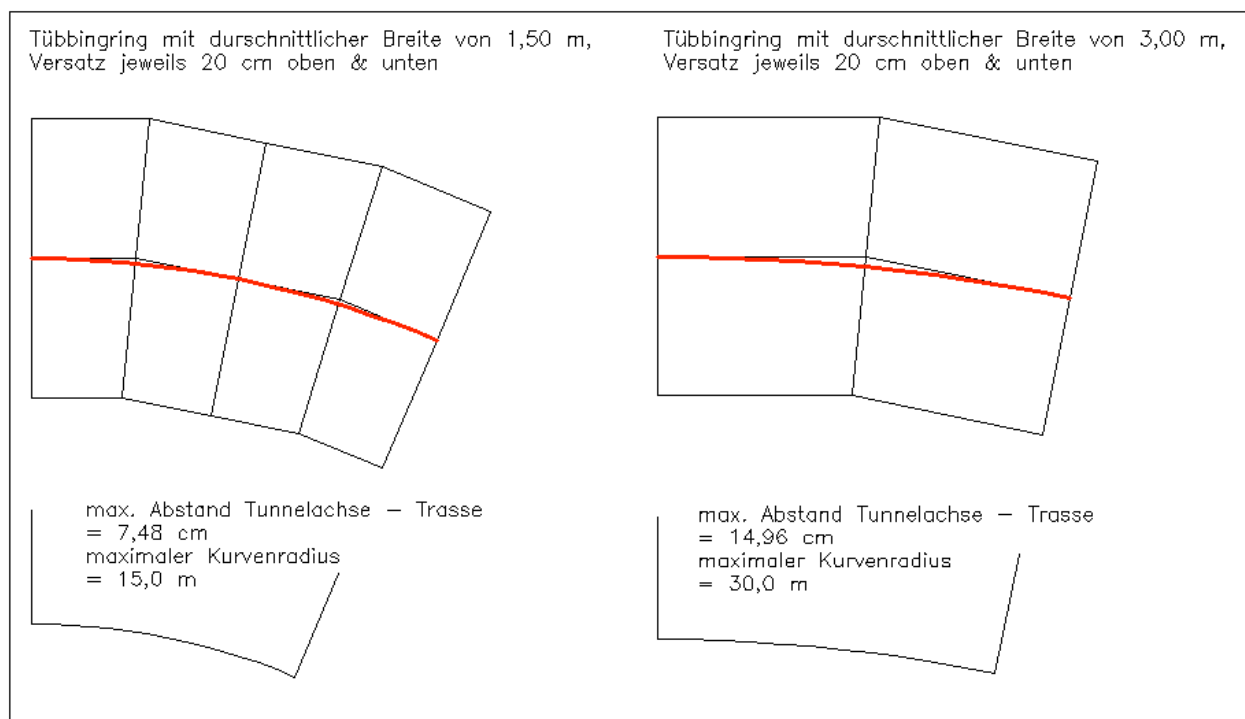


Abb. 27: Abweichung Tunnelachse - Trasse

Des Weiteren folgt unten ein Beispiel, welches sich am Citytunnel Leipzig orientiert und den Ablauf bei der Erstellung eines Tübbingrings erläutert. Hierbei besteht ein Ring aus fünf relativ baugleichen Steinen A1 bis A5 und zwei Steinen B und C, welche den Abschluss zum Schlussstein S bilden.⁸⁷

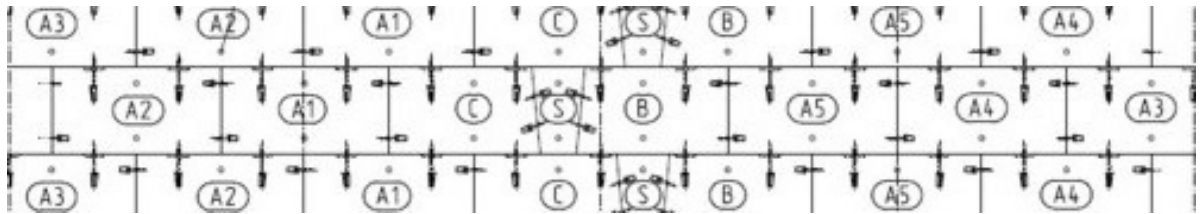


Abb. 28: Anordnung Tübbinge (am Beispiel des Citytunnel Leipzig)

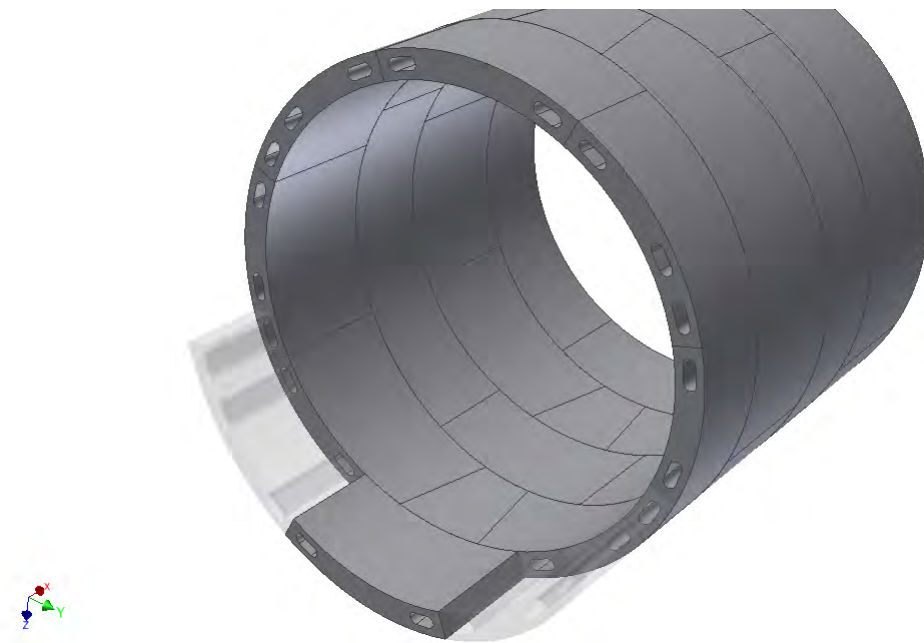


Abb. 29: Tübbingring - A3

Im ersten Arbeitsschritt wird der Sohltübbing A3 aufgeföhren, angepresst und verschraubt.

⁸⁷ <http://www.citytunnelleipzig.info/tuebbing.php> (aufgerufen am 27.2.2013)

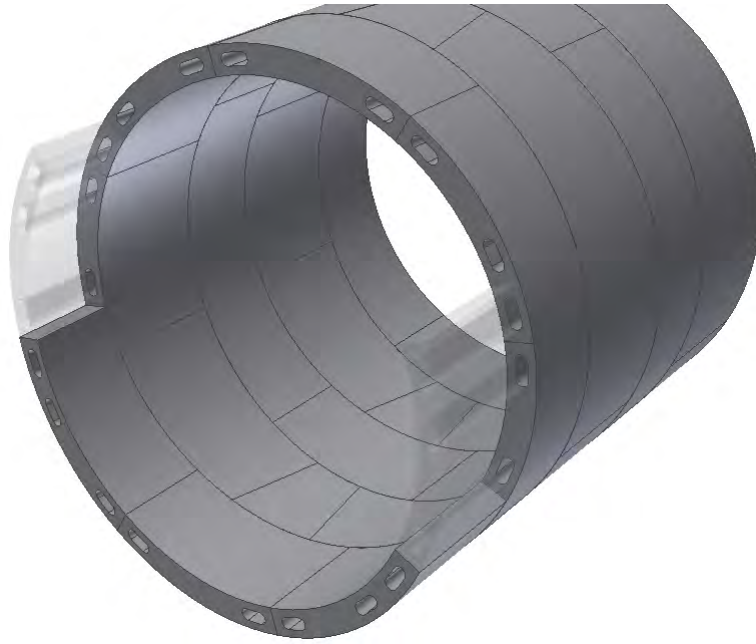


Abb. 30: Tübbingring - A2 - A4

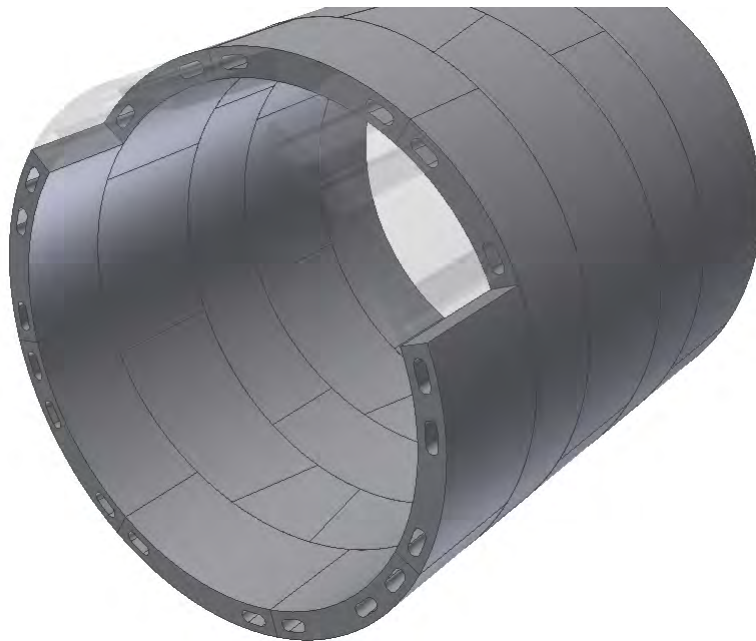


Abb. 31: Tübbingring - A1 - A5

Im zweiten und dritten Schritt werden die Tübbinge A2, A4, A1 und A5, an den Tunnelflanken (Ulmen) gesetzt, angepresst und verschraubt.

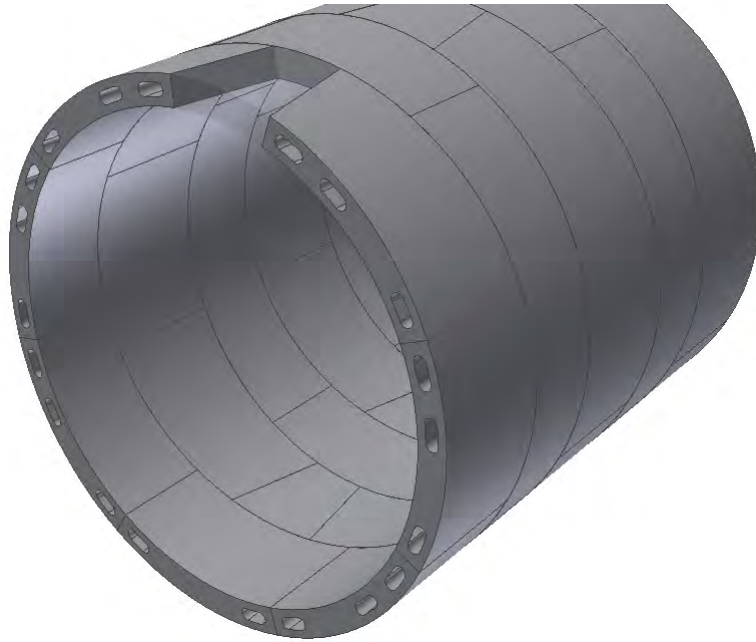


Abb. 32: Tübbingring - A1 - A5, B und C

Der vierte Schritt beschreibt die Montage der Tübbinge B und C für den Anschluss zum Schlusstein am Tunnelfirst.

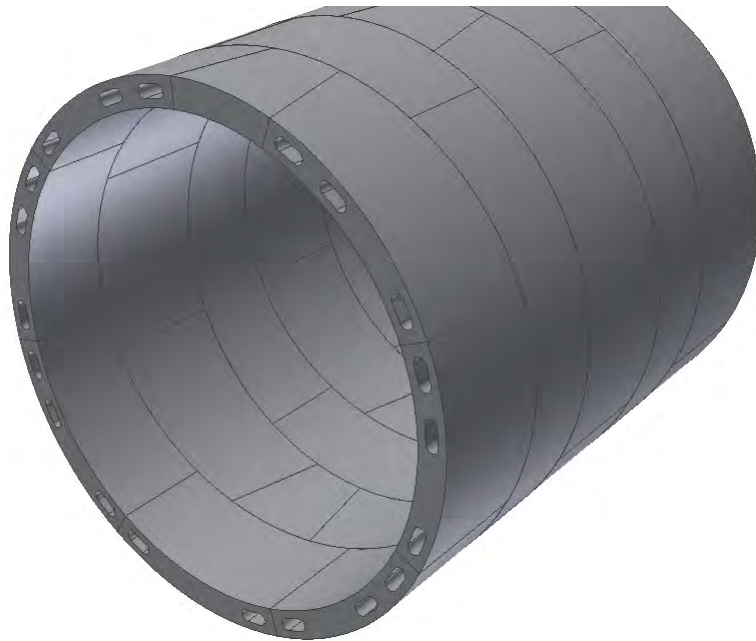


Abb. 33: Tübbingring - A1 - A5, B, C und Schlusstein S

Den Abschluss bildet der Schlusstein welcher in den Ring eingepresst wird und so den gesamten Ring aussteift.

4.3 Aufbau, Konzept und Detailierungsgrad des 3D Modells

Das 3D Modell wird in fünf Gliederungsphasen aufgeteilt und strukturiert. Diese werden angelehnt an die Arbeit von BORRMANN UND JUBIERRE, welche ein Tunnelmodell in fünf "Level of Details" (LoD) gliedern und in jedem Level mehr Details zu dem Modell hinzufügt. Auf dem ersten Level werden nur die minimalen Informationen über die Trassierung der Tunnelröhre beschrieben. In einem dreidimensionalen Raum äußert sich dies über einen "Spline", welcher der Tunnelachse folgt. Betrachtet man den nächsten Level, so beschreibt diese den Ausbau mit Tübbings um die Tunnelachse herum. Damit werden bereits die äußersten Grenzen des Bauwerks definiert. Um das Modell weiter zu verfeinern, wird nun im dritten Level der Sohlaustrau des Tunnels hinzugefügt. Innerhalb der Sohle befinden sich technische Einrichtungen, wie Kabelschächte, Löschwasserleitungen und die Tunnellängsentwässerung. Der vierte Level fügt die feste Fahrbahn dem Modell hinzu. Im letzten Level wird der komplette Tunnel gezeichnet. Dabei werden sämtliche fehlenden Einrichtungen, wie Lichtsignalanlagen und Oberleitungen, modelliert und dem Modell hinzugegeben. Jede dieser Gruppen besteht aus mehreren "Bauteilen", die miteinander durch Constraints (Randbedingungen) verknüpft sind. Es erfolgen zwei Visualisierungen für einen geraden Tunnelabschnitt mit Tübbingausbau und für einen gebogenen Abschnitt, der einem Teilstück einer imaginären Trasse folgt.

Beide Varianten sind auf der Medien CD als Anhang hinzugefügt.

4.4 Umsetzung

Im Folgenden werden die verschiedenen Detaillierungsstufen aufgezeigt und mit Anmerkungen versehen. Die Umsetzung beschreibt ein kurzes Teilstück des Tunnels, welches anhand der Planungsunterlagen des Büros "Obermeyer" erstellt wurde. Insgesamt sind zwei Modelle entstanden. Eines, das einem geraden Teilabschnitt folgt, an dem der Ausbau mit Tübbingem verdeutlicht wird und ein zweites, welches einer gewundenen Trasse folgt. Für beide Varianten sind die gleichen Ausstattungen vorgesehen.

Die Teilung des Gesamttunnels erfolgt, um die Planung zu vereinfachen da jedes Teilstück separat an verschiedene, mehrere Gewerksplaner vergeben werden kann, welche dann unabhängig voneinander ihre Planung vornehmen und die Ergebnisse zu einem späteren Zeitpunkt zusammenführen können.

Parameter finden hierbei in den einzelnen Bauteilen und in der Ableitung des Bauteils "trasse" für das gebogene Modell Anwendung. Dabei wird allgemein der Parameter "radius" des Tunnels an alle, und, speziell für gebogene Bauteile, die Parameter "Laenge" und "anzahl" übergeben. Des Weiteren wird für die Positionierung eine Stationierung verwendet. Man geht davon aus, dass der Start des Modells bei einer imaginären Kote + 0,0 + 00 beginnt, sich die Kilometrierung entlang der Trasse fortsetzt und schließlich bei einer Endkote, abhängig vom Parameter "Laenge", endet. Diese Stationierung wird benutzt, um im Teiltunnel Objekte zu platzieren und um für ein späteres Gesamtmodell eine Möglichkeit zu schaffen, eine exakte Position von verschiedensten Objekten festzulegen und zu verschieben. Eine Variante dazu wäre die Benutzung von relativen X-,Y- und Z-Koordinaten, welche aber nur einen immensen Rechenaufwand zur Folge hat und somit unpraktikabel für diese Arbeit ist. In der Benutzung der Stationierung liegt auch der Hauptvorteil der Verwendung parametrischer Modellierung. Einfache Änderungen können schnell und unkompliziert ohne weiteren Rechenaufwand vorgenommen werden. Als kleines Beispiel dient die Lage einer Lichtsignalanlage. Möchte der Benutzer die Einrichtung auf die Kote 0,0 + 20 statt auf 0,0 + 05 setzen, so ändert er lediglich den Wert eines Parameters "Kote_LSA" und das Objekt verschiebt sich entlang der Tunnelachse.

Im Folgenden sind die beiden Modelle, jeweils das gerade und das gebogene dargestellt. Zu jedem Detaillierungsschritt ist eine Beschreibung vorangestellt welche die Vorgänge beschreibt.

4.4.1 Tunnelachse

Das Modell der Tunnelachse beschreibt für den geraden Abschnitt eine gerade Trasse mit der Länge von 10,8m.

Für die gebogene Variante wird ein 3D Spline modelliert. Dieser entsteht aus zwei Bögen mit dem Sehnenlängenparameter "Laenge". Der Bogen schließt tangential an eine Ursprungsgerade an. Der gleiche Bogen wird in einer weiteren Ebene modelliert und anschließend als 3D Spline überschnitten. Diese Version wird als eigenes Bauteil "trasse.ipt" abgespeichert, da es von den nachfolgenden Bauteilen referriert wird (Funktion "ableiten"). Ein weiterer Parameter ist "anzahl" für die Anordnung der Schwellen.

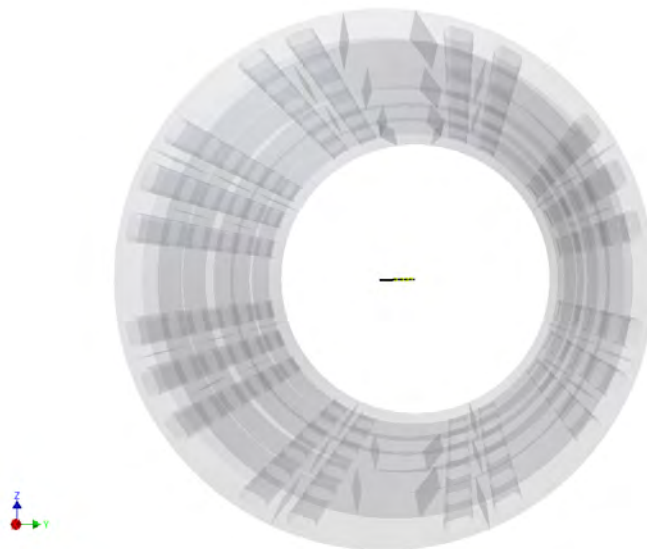


Abb. 34: Tunnelachse gerades Modell

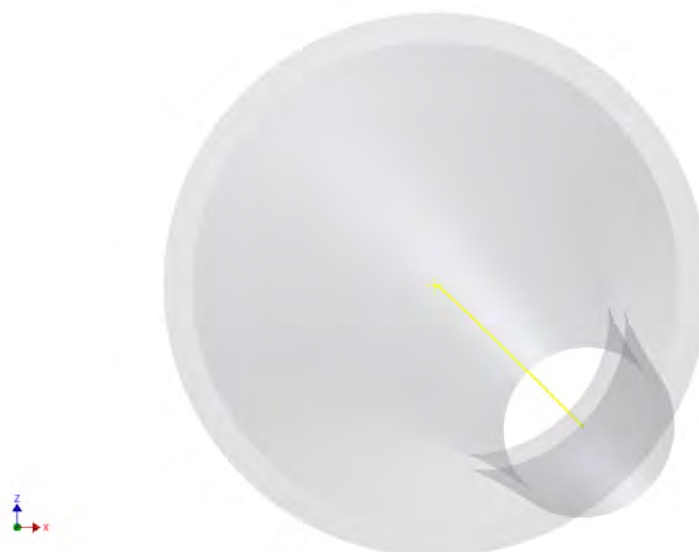


Abb. 35: Tunnelachse gebogenes Modell

4.4.2 Tübbingausbau

Die zweite Ebene beschreibt den Tübbingausbau um die Tunnelachse. Hierbei werden beim geraden Modell die äußeren Tübbingringe einseitig, die vier inneren Tübbingringe zweiseitig konisch abgeschrägt modelliert. Zusammengefügt werden sie mit den Eigenschaften "Flächen ausgerichtet" und "tangential". Genauer beschrieben ist damit gemeint, dass die Seitenflächen der Tübbingringe zueinander entgegengesetzt ausgerichtet sind. Die zweite Eigenschaft beschreibt, dass die Achsen der Innenflächen aufeinander liegen und somit die Ringe eine optimale gerade Röhre bilden.

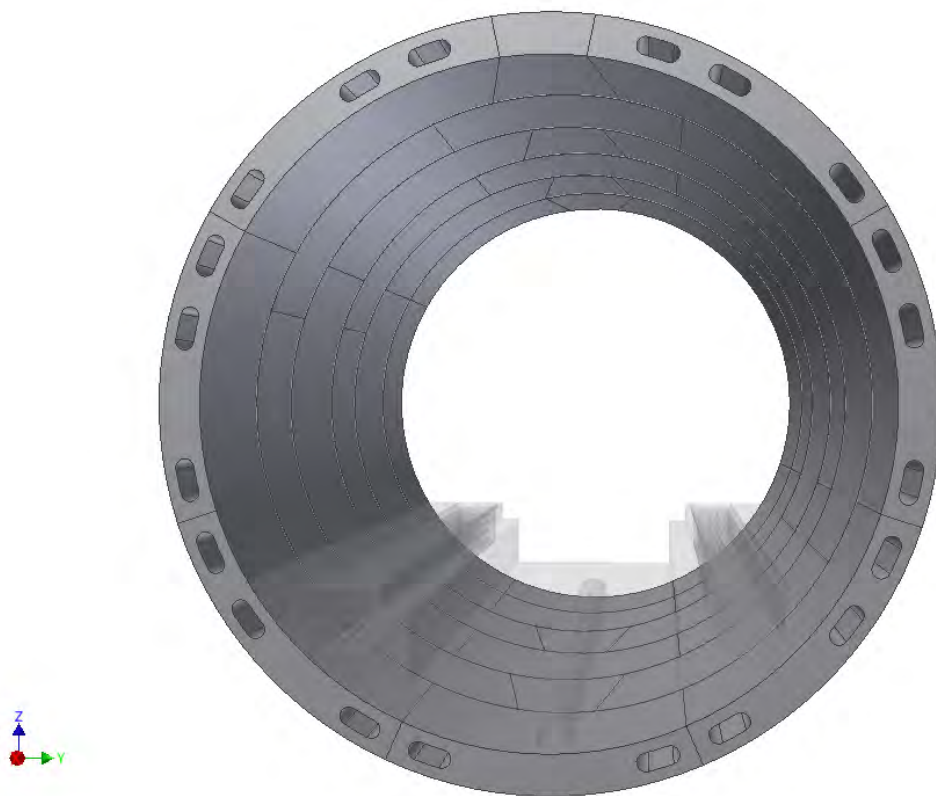


Abb. 36: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gerade - Tübbingausbau

Das gebogene Teilstück ist ein einfaches Sweeping einer Ausgangsskizze mit dem inneren Radius 3,75m und einer Wanddicke von 0,45m. Daraus entsteht der äußere Radius von 4,20m. Gesweept wird die Dicke der Tübbinge. Das Sweeping erfolgt an der 3D-Skizze des abgeleiteten Bauteils "trasse".

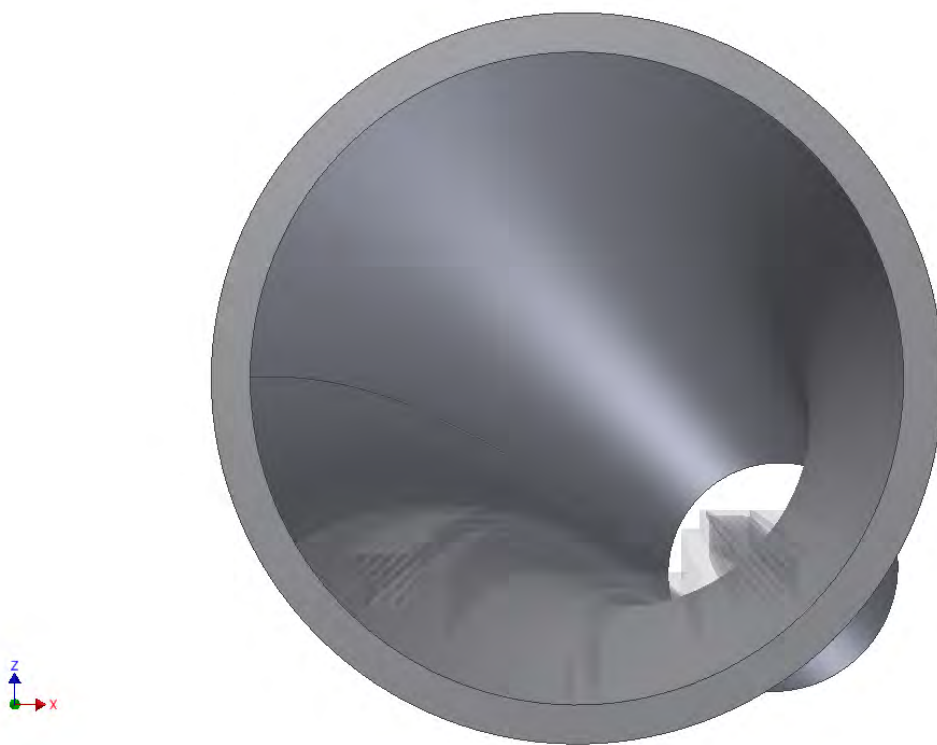


Abb. 37: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gebogen - Tübbingausbau

4.4.3 Sohlausbildung

Im dritten Schritt wird die Baugruppe "Sohle" hinzugefügt. In dieser sind die einzelnen Bauteile Längsentwässerung, Sohlbeton, Kabelpackung und Deckel der Kabelpackung zusammengefügt. Diese Bauteile entstehen aus extrudierten Skizzen. Die einzelnen Teile können mit den Abhängigkeiten "Fläche gerichtet" für die Stirnflächen und "automatisch" für die horizontalen und vertikalen Linien positioniert werden. Danach kann die Baugruppe "Sohle" ebenfalls unter oben genannten Abhängigkeiten mit der Baugruppe Tübbing positioniert werden. Damit die Sohle nicht mehr um die Tunnelachse rotieren kann, wird bei dem vorherigen Bauteil des Tübbingringes eine horizontale Linie auf Höhe des Sohlbetons eingefügt, an welcher das Bauteil fixiert werden kann.

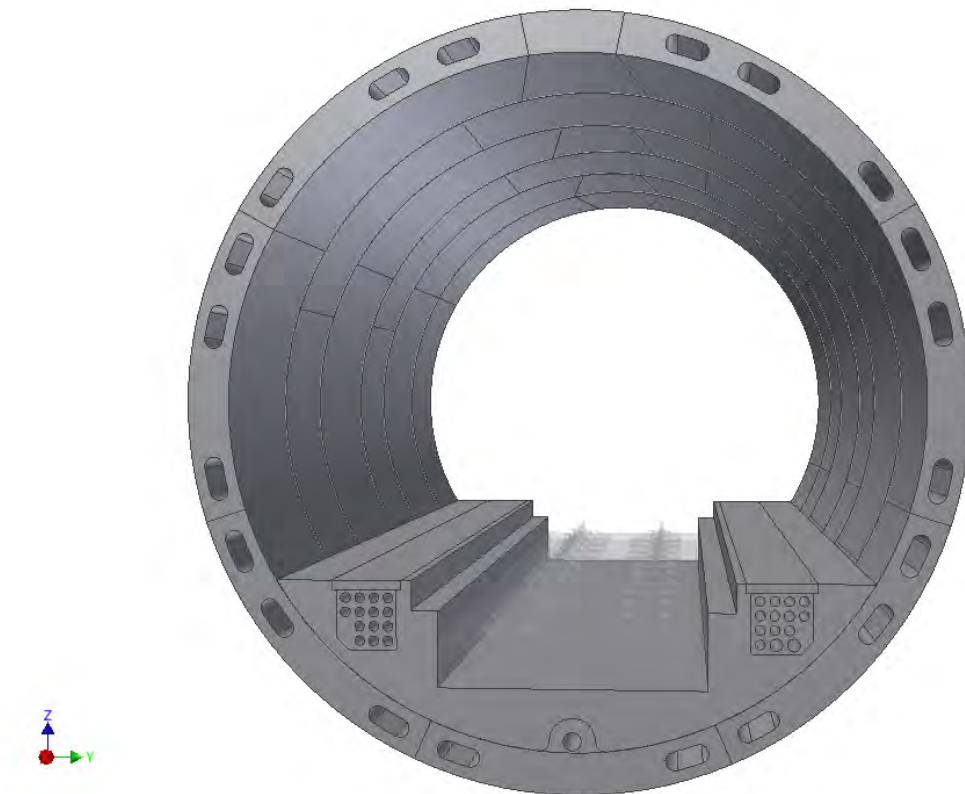


Abb. 38: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gerade - Sohlausbildung

Das gebogene ähnelt dem geraden Modell bei der Zusammenführung der einzelnen Bauteile. Wie oben beschrieben, werden die vier Bauteile Längsentwässerung, Sohlbeton, Kabelpackung und Deckel der Kabelpackung zueinander positioniert und in der Baugruppe "Sohle" abgespeichert. Ein Unterschied liegt im Erstellen der einzelnen Bauteile. Während, wie oben beschrieben, Skizzen extrudiert werden, wird hier, wie auch schon beim Tübbing, ein Sweeping der Skizzen entlang eines Pfades erstellt. Der Pfad wird dabei von dem abgeleiteten Bauteil "trasse" beschrieben. Sinn dabei ist, dass eine spätere Änderung des Parameters "Laenge" eine Anpassung der Bauteile an die Trasse erwirkt. Nachdem diese Schritte erfolgt sind, kann die Positionierung der Sohle innerhalb des Bauteils Tübbing beginnen. Hierbei werden die Stirnflächen der Anfangs- und Endpositionen zueinander gleichgerichtet. Des Weiteren werden die Radien der Sohle an den Innenradius automatisch angepasst.

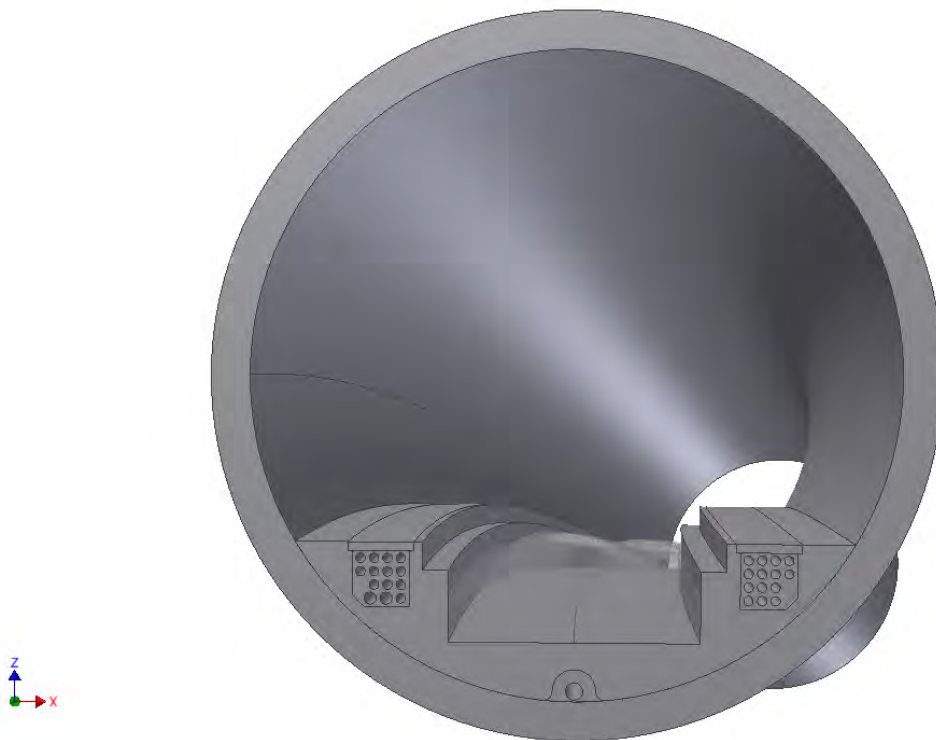


Abb. 39: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gebogen - Sohlausbildung

4.4.4 Fahrbahn

Die Fahrbahn besteht aus den Bauteilen Masse-Feder-System, Fahrbahn unten, Fahrbahn oben, den Schienen und der Schwelle. Jene ist eine rechteckige Anordnung von "10,8m / 0,63m" Elementen, welche sich entlang der Tunnelachse orientieren und im Abstand von 630mm positioniert werden. Auf den Schwellen, werden die Schienen ausgerichtet, mit den Abhängigkeiten "Fläche entgegengesetzt" und Versatz von horizontalen und vertikalen Linien. Beide Bauteile werden entsprechend mit den restlichen Baugruppen Teilen zusammengesetzt und im Gesamtmodell an der Sohle platziert.

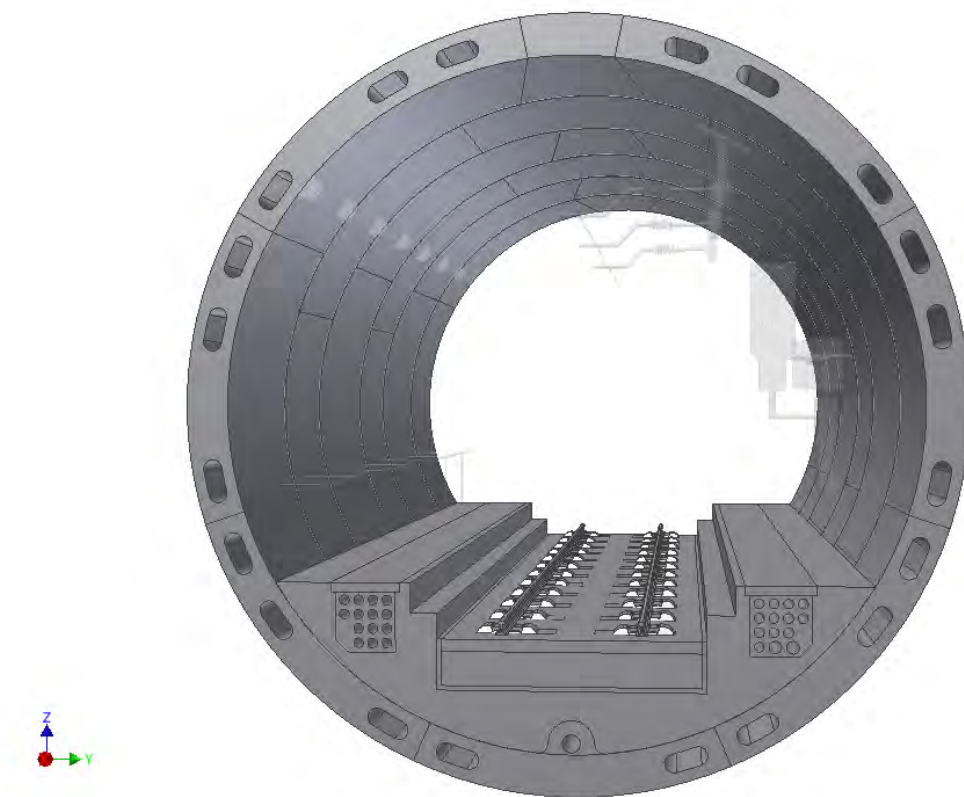


Abb. 40: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gerade - Fahrbahn

Die Fahrbahn für das gebogene Modell besteht aus den Bauteilen Masse-Feder-System, Fahrbahn unten, Fahrbahn oben, Schwelle gebogen und den Schienen. Im Vergleich zum geraden Abschnitt ist die Anordnung der Schwellen komplexer. Die Positionierung erfolgt mittels einer rechteckigen Anordnung, wobei die Richtung von der "trasse" vorgegeben wird. Die Ausrichtung von "anzahl" - Elementen erfolgt in "Richtung1" mit dem Abstand "Laenge/anzahl". Diese Abhängigkeit ist notwendig da die Elemente bei einer Trassierungsänderung, neu angeordnet werden müssen und so sichergestellt ist, dass eine optimale Ausnutzung gegeben ist. Ein Problem ergibt sich bei der Positionierung der Schwellen auf der Tragplatte (dem Bauteil Fahrbahn unten), da die Schwellen nicht eindeutig fixiert werden können. Als workaround (dt. Lösung für Software Probleme) kann hier eine Sweeping-Fläche auf Höhe der Oberkante der "Fahrbahn unten", entlang der "trasse" erstellt werden. Dadurch erhält man zwei Kanten an den Endseiten des Modells, die "automatisch" auf der Oberkante der "Fahrbahn unten" verbunden werden und so die Schwellen genau positionieren. Dies wird benötigt da "Inventor" keine Standardlösung für die Platzierung von Bauteilen auf gebogenen Flächen anbietet. Die Anwendung kann theoretisch bei allen Objekten erfolgen, bei denen die normalen geometrischen Bedingungen keine eindeutige Positionierung zulassen, wie z.B. bei den nachfolgenden Einrichtungen. Die erstellten Hilfsflächen können danach, durch ändern der Sichtbarkeit ausgeblendet werden. Der Rest der Bauteile wird wie schon beschrieben zusammengefügt.

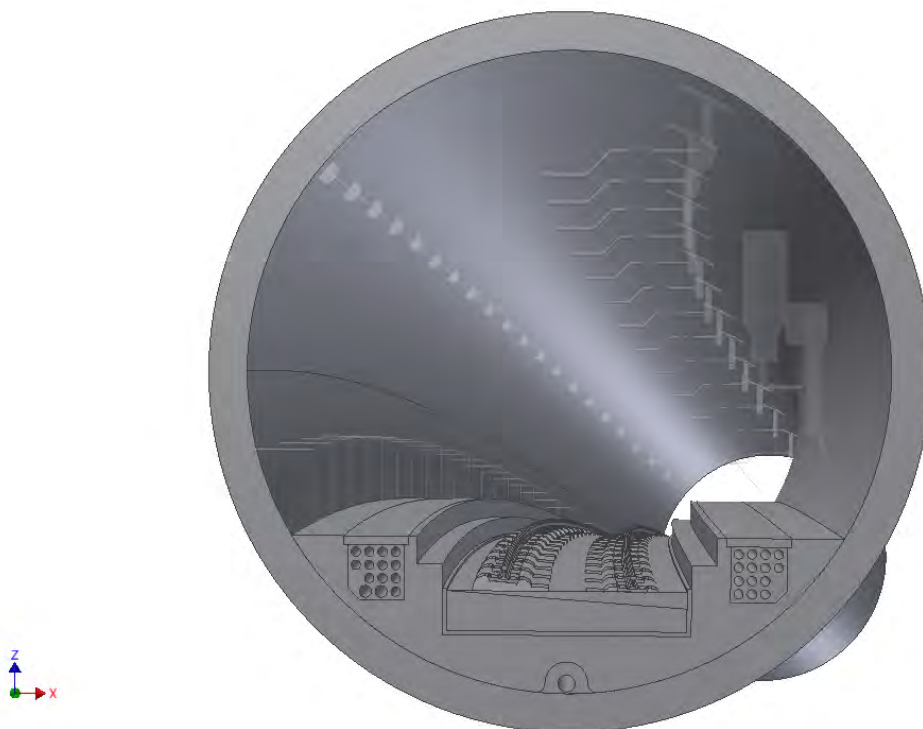


Abb. 41: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gebogen - Fahrbahn

4.4.5 Gesamttunnel

Die letzten Elemente die dem Modell hinzugefügt werden, sind die technischen Einrichtung, wie Beleuchtungskörper, Handlauf, Oberleitung und Lichtsignalanlagen. Für die Anordnung werden bereits beschriebene Hilfsmittel, wie Flächen und Kanten benutzt.

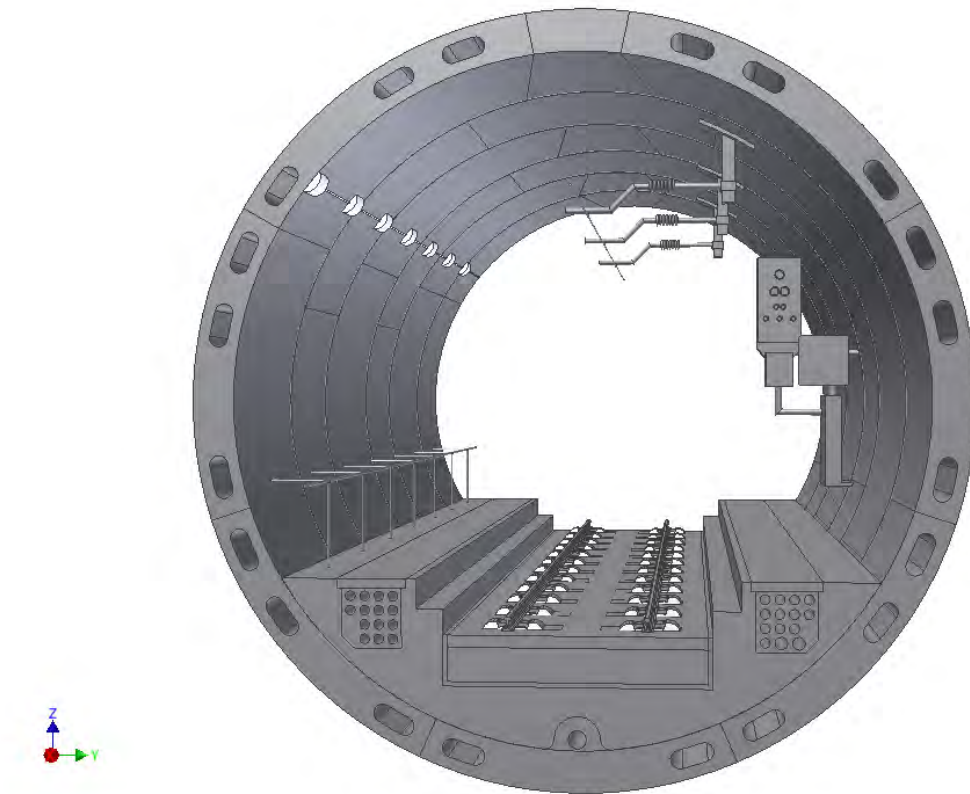


Abb. 42: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gerade - Gesamttunnel

Das gebogene Gesamtmodell erhält ebenfalls die gleichen Bauteile, wie das gerade Modell, welche wie oben in einer Baugruppe zusammengefasst sind. Allerdings findet hier eine neue Hilfsmöglichkeit für die Anordnung der Elemente statt. Diese ist z.B. notwendig für die Positionierung der Lichtsignalanlage (LSA). Sie wird bereits in der Einführung beschrieben und ist dort als Stationierung bezeichnet. Dadurch wird der Ursprung der LSA auf eine beliebige Kote, bezeichnet durch "Kote_LSA", entlang der "trasse" festgelegt. Eine Änderung des Parameters hat deswegen eine Verschiebung entlang der Trasse zur Folge. Diese Hilfe wird benötigt da es nicht möglich ist mit den herkömmlichen Abhängigkeiten die LSA zufriedenstellend und korrekt am Tunnel zu befestigen. Die Fixierung der Baugruppe an dem Tunnelmodell erfolgt wieder mit der Verwendung von Hilfsflächen.

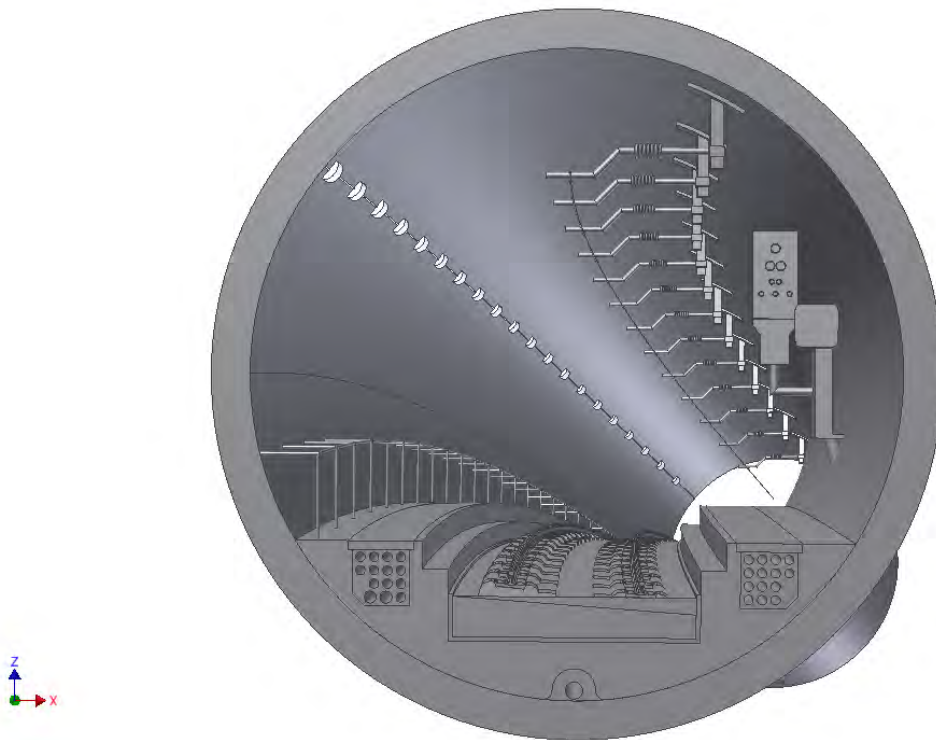


Abb. 43: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gebogen - Gesamttunnel

Schlussbemerkung

Die Verwendung von parametrischer Modellierung für die Planung von Tunnelbauwerken ist ein sinnvoller Schritt. Vorteilhaft ist vor Allem die schnelle Änderung von einzelnen Werten, welche sich anschließend selbstständig für das Gesamtmodell umsetzen. Da die Modellierung nur für ein Teilstück erfolgt ist, kann dieses mit den entsprechenden Schritten einfach auf ein Gesamtmodell erweitert werden. Hierbei ist z.B. die Stationierung zu nennen. Eine durchgehende Stationierung gibt dem Benutzer die Möglichkeit, exakte Positionen von technischen Einrichtungen, oder baulichen Ausbildungen, wie Querschlügen, durch Parameter festzulegen und entlang der Trasse zu verändern. Dadurch entsteht eine effiziente Art, die Lage der fertigen Modelle beliebig zu modifizieren. Etwas Problematischer gestalten sich die Änderungen an der Trasse, sobald diese abgeleitet in Bauteilen verwendet wird. Das Problem ist programmintern verankert, da bei Veränderungen der Trasse eine "rechteckige Anordnung" nicht mit verändert wird, sondern die Anordnung manuell neu ausgerichtet werden muss. Da diese Eigenschaften allerdings in "Inventor" verankert ist, können solche Fehler in neueren Versionen unter Umständen behoben werden...

Ein Ausblick kann hier auf die noch stärkere Möglichkeit der Verknüpfung von Planungsdaten gegeben werden. Zum Beispiel könnten direkt Daten aus dem Lage- und Höhenplan in das parametrische Modellierungsprogramm importiert werden, welches daraus automatisiert eine Trasse erstellt und den Tunnel darum aufbaut. Wenn im Planungsprozess Änderungen vorgenommen werden, sei es im Prozess der Trassierung, oder der Querschnittsgestaltung können diese Auswirkungen automatisch auf das Gesamtmodell übertragen werden.

Die Möglichkeiten für die zukünftige Anwendung von parametrischer Modellierung sind dabei sehr vielfältig und das Spektrum breit gefächert.

Literaturverzeichnis

- BAST, Bundesanstalt für Straßenwesen, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING - Teil 5 Tunnelbau Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise, Stand 03/2012
- BORRMANN, ANDRÉ und JUBIERRE, JAVIER, A multi-scale tunnel product model providing coherent geometry and semantics, München, 2012
- EBA, Eisenbahn- Bundesamt, Richtlinie Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln, Stand: 01.07.2008
- EBO, Eisenbahn- Bau- und Betriebsordnung
- FREUDENSTEIN, STEPHAN, TUM Skriptum Verkehrswegebau Grundkurs WS 2011/2012, München, 2011
- FREYSTEIN, HARTMUT, Handbuch - Entwerfen von Bahnanlagen, 1. Auflage, Darmstadt, 2005
- HERZOG, MAX A.M., Elementare Tunnelbemessung, 1. Auflage, Düsseldorf, 1999
- KOLYMBAS, DIMITRIOS, Tunneling and Tunnel Mechanics, 2. Auflage, Innsbruck, 2008
- MAIDL, BERNHARD, Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band I: Konstruktionen und Verfahren, 3. Auflage, Essen, 2004
- MAIDL, BERNHARD, Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band II: Grundlagen und Zusatzleistungen für Planung und Ausführung, 3. Auflage, Essen, 2004
- STRIEGLER, WERNER, Tunnelbau, 1. Auflage, München, 1993
- VÖV, Verband öffentlicher Verkehr, Anwendungsbedingungen für das Regelwerk Technik der schweizerischen Eisenbahnen (RTE) - Fahrbahnpraxis Meter- und Speziaispur, Bern, 2008

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Radienfolge (nach FREUDENSTEIN, 2011, S. II/31).....	4
Abb. 2: Regelquerschnitte für Straßentunnel (nach MAIDL, Bd. II, 2004, S. 21).....	6
Abb. 3: Umgrenzung des lichten Raumes in Straßentunneln - Regellösung (nach MAIDL, Bd. II, 2004, S. 22).....	7
Abb. 4: Lüftungssysteme (nach STRIEGLER, 1993, S. 44)	9
Abb. 5: Querneigung (nach FREUDENSTEIN, 2011, S. II/11).....	10
Abb. 6: Entwässerungssysteme (nach MAIDL, Bd. II, 2004, S. 202).....	11
Abb. 7: Bahnhof (nach FREUDENSTEIN, 2011, S. III/29)	17
Abb. 8: Regellichtraum EBO.....	18
Abb. 9: Regellichtraum GC (nach FREYSTEIN, 2005, S. 168)	18
Abb. 10: Grundformen mit Krafteinflüssen (nach MAIDL, Bd. II, 2004, S. 34).....	22
Abb. 11: Kreisprofil	26
Abb. 12: Hufeisenprofil	27
Abb. 13: Korbbogenprofil.....	28
Abb. 14: Maulprofil (nach KOLYMBAS, 2008, S. 8)	29
Abb. 15: Einpassen eines Rechtecks in ein Maulprofil (nach KOLYMBAS, 2008, S. 8)	30
Abb. 16: Maulprofil	31
Abb. 17: Baugruppe - Passend.....	33
Abb. 18: Baugruppe - Winkel.....	33
Abb. 19: Baugruppe - Tangente.....	34
Abb. 20: Baugruppe - Einfügen	34
Abb. 21: Bewegung - Drehung	34

Abbildungsverzeichnis	56
Abb. 22: Bewegung - Drehung-Translation.....	35
Abb. 23: Übergang.....	35
Abb. 24: Abhängigkeitssatz.....	35
Abb. 25: 2. Stammstrecke München (http://www.edr.de/uploads/tx_edrprojects/PS-1.11_Neubau_2.S-Bahn-Stammstrecke__Muenchen__c_Deutsche_Bahn_AG__01.jpg)...	36
Abb. 26: Tunnelachse Tübbingausbau.....	37
Abb. 27: Abweichung Tunnelachse - Trasse	38
Abb. 28: Anordnung Tübbinge (am Beispiel des Citytunnel Leipzig).....	39
Abb. 29: Tübbingring - A3	39
Abb. 30: Tübbingring - A2 - A4.....	40
Abb. 31: Tübbingring - A1 - A5.....	40
Abb. 32: Tübbingring - A1 - A5, B und C.....	41
Abb. 33: Tübbingring - A1 - A5, B, C und Schlussstein S.....	41
Abb. 34: Tunnelachse gerades Modell.....	44
Abb. 35: Tunnelachse gebogenes Modell.....	44
Abb. 36: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gerade - Tübbingausbau	45
Abb. 37: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gebogen - Tübbingausbau	46
Abb. 38: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gerade - Sohlausbildung.....	47
Abb. 39: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gebogen - Sohlausbildung	48
Abb. 40: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gerade - Fahrbahn.....	49
Abb. 41: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gebogen - Fahrbahn.....	50
Abb. 42: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gerade - Gesamttunnel.....	51
Abb. 43: Teilstück 2. S-Bahn Stammstrecke gebogen - Gesamttunnel.....	52

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: typische Tunnelquerschnitte (nach KOLYMBAS, 2005, S. 21)	2
Tab. 2: Kennwerte für Straßentunnel (nach STRIEGLER, 1993, S. 39).....	3
Tab. 3: Streckenkategorisierung (nach FREYSTEIN, 2005, S. 75)	14
Tab. 4: Ermessungsbereiche für Überhöhung (nach FREYSTEIN, 2005, S. 83).....	15
Tab. 5: Mindesthalbmesser (nach FREUDENSTEIN, 2011, S. III/10).....	16
Tab. 6: Erläuterung der Bezeichnung für Musterquerschnitte (nach FREYSTEIN, 2005, S. 381)	19
Tab. 7: Liste der Musterquerschnitte (nach FREYSTEIN, 2005, S. 382)	19
Tab. 8: Kriterien für Wahl der Bauweise (nach STRIEGLER, 1993, S. 241).....	24
Tab. 9: Abhängigkeiten Inventor	32

Eidesstaatliche Erklärung

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

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

Wolfratshausen, den 8. März 2013

Frédéric Sojka

Frédéric Sojka