

# Eine Stahlschale als Überdachung der archäologischen Grabung St. Antony, Oberhausen

Dipl.-Ing. Jörg Wiesmann

## Zusammenfassung:

Zur dauerhaften Überdachung einer archäologischen Ausgrabung innerhalb eines Industriemuseums wird eine aus stählernen Schindeln zusammengesetzte Translationsschale gebaut. Die Grundlagen dieser parametrischen Konstruktion und die Berechnung der Schale unter Einbeziehung des lokalen Ausbeulens etlicher Schindeln mittels SOFiSTiK werden in diesem Aufsatz vorgestellt.

## Summary:

An archaeological excavation, which is part of an industrial museum in Oberhausen will be covered by a translation type synclastic shell made out of steel shingles. Basics of this parametric construction and the computation of the shell by SOFISTiK including local buckling of the shingles is presented in this essay.

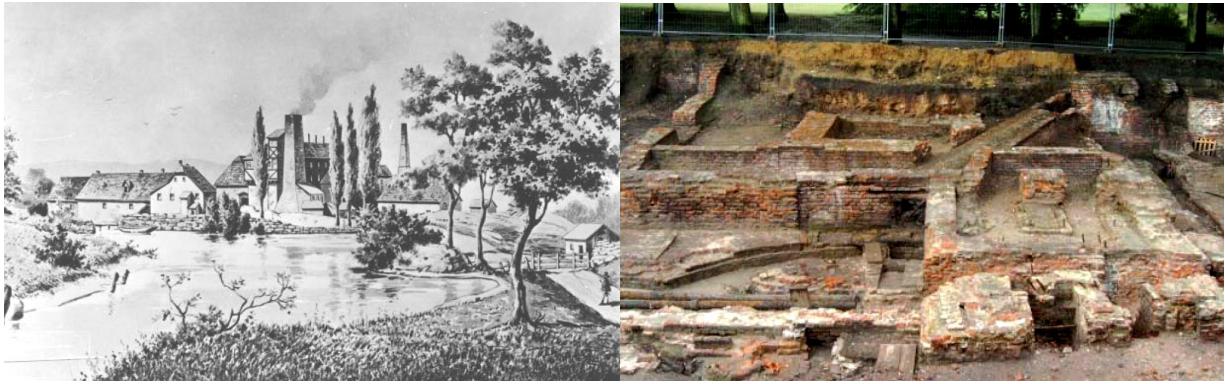
## 1 AUFGABE

In den Jahren 2005 bis 2007 wurden in Oberhausen Osterfeld die Überreste der ehemaligen Eisenhütte St. Antony archäologisch ausgegraben.

Die 1758 gegründete Antonyhütte war die erste Eisenhütte im heutigen Ruhrgebiet und somit quasi der Nukleus, aus dem sich die Ruhrindustrie entwickelt hat. Aus der St. Antony Hütte ging später der Weltkonzern GHH hervor, mit Töchtern wie Babcock Borsig und der MAN.

Um die Ausgrabungsfunde, Fundamente im wesentlichen, die in etwa 4 m Tiefe unter der Oberfläche lagen, dauerhaft vor der Witterung zu schützen und gleichzeitig in angemessenem Rahmen der Besuchsoffentlichkeit zugänglich zu machen, wurde 2007 ein Wettbewerb initiiert, in dem Tragwerksplaner und Architekten eine Überdachungslösung für die „Ausgrabungsgrube“ finden sollten. In der Überdachung sollte sich, wenn möglich, die Entwicklung des Werkstoffes Stahl widerspiegeln und weiterhin ein Schwerpunkt auf industriell und seriell gefertigten Baukomponenten liegen.

Zusammen mit dem Büro Ahlbrecht-Felix-Scheidt konnten wir Anfang 2008 den Wettbewerb gewinnen.



**Abbildung 1 Historische Radierung und Ausgrabungsfunde**

## 2 WETTBEWERBSARBEIT

Der Wettbewerbsentwurf sieht die Überdachung der Grabung mittels einer synklastischen Translationsschale von 44 m x 21 m Eckmaß aus geschweißten Edelstahlblechen vor. Die Schalenfläche von 4 mm Stärke ist durch auf- und untergeschweißte Rippen verstift, die diagonal von Eckpunkt zu Eckpunkt über die Schalenfläche laufen. Rippenkreuzungen entfallen aufgrund der verschiedenseitigen Anordnung der Rippenscharen. Die Schalengeometrie wurde mit einem Rhino Modell entwickelt, eine rechnerische Überprüfung und Vorbemessung fand anhand eines biegsteifen Schalenmodells statt. Die Geometrie wurde aus Rhino mit dem leider nicht mehr weiterentwickelten SOFiSTiK-Tool `read_3dm.exe` exportiert, was aufgrund der einfachen Grunddachform einer beschnittenen Translationsfläche auch gut funktionierte.



**Abbildung 2 Wettbewerbsentwurf**

## 2.1 SOFiSTiK Vorbemessung

Aus dem 4 mm Schalenblech und den 150 mm hohen, 8 mm dicken Rippen im Abstand von etwa 1500 mm wurde eine Ersatzsteifigkeit bzw. Ersatzdicke ermittelt. Anschließend wurde eine Schale einheitlicher Ersatzdicke (bis auf die Eckverstärkungen) modelliert und berechnet. Aus den Biegemomenten in den Schalenelementen konnten Spannungen in den T-Ersatzquerschnitten zurückgerechnet werden.

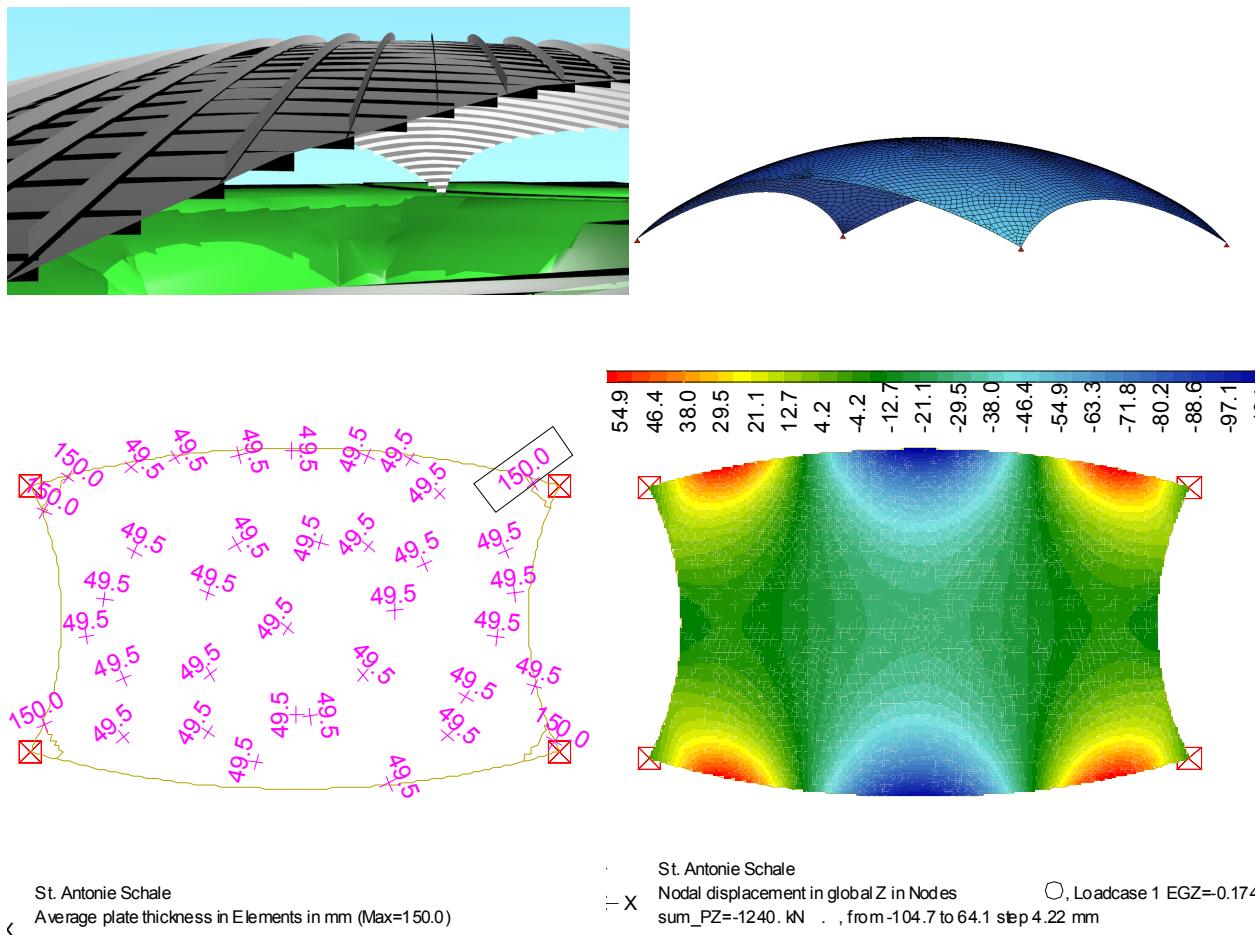
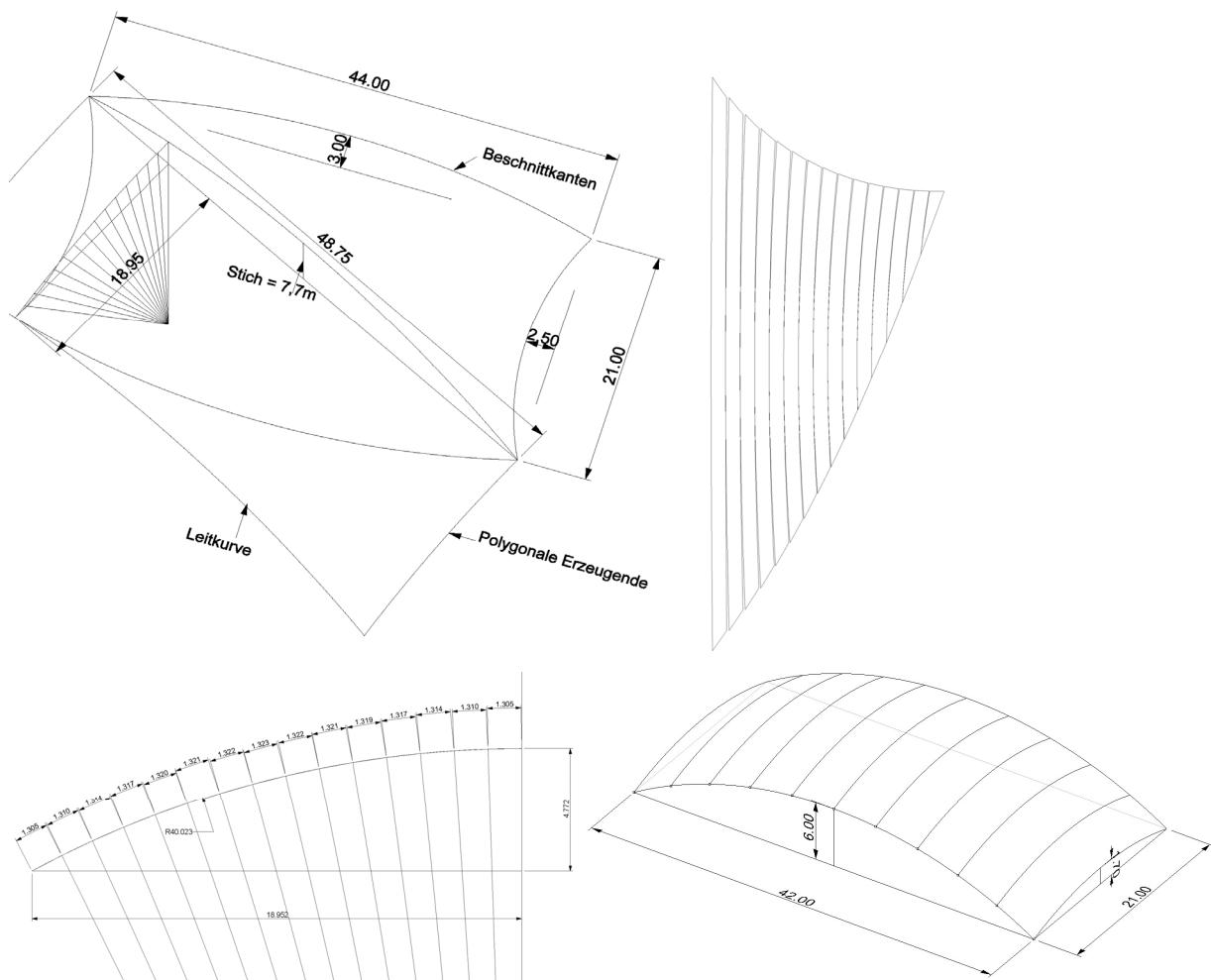


Abbildung 3 Konstruktion und Vorstatik zum Wettbewerb

### 3 ENTWURF, BERECHNUNG UND KONSTRUKTION DES GESCHWEISSTEN DACHES AUS EDELSTAHL

Um aus der Wettbewerbsgrundform einer „orthogonalen“ Translationsschale eine Geometrie zu entwickeln, die sich entlang der Diagonalscharen orientiert, wurden im Zuge der Entwurfsplanung Leitkurve und Erzeugende in ein Diagonalsystem überführt.

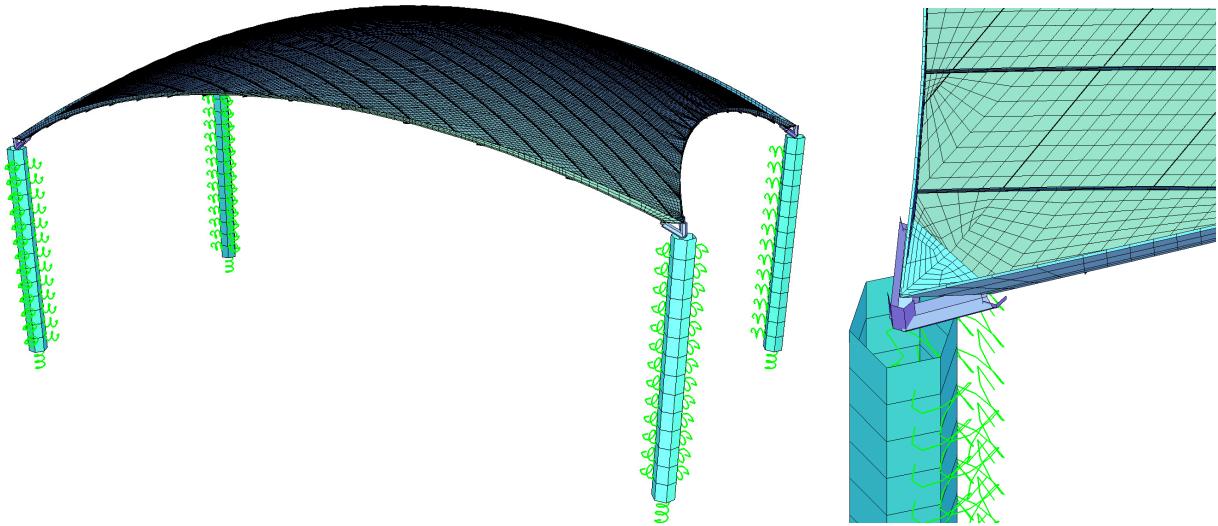
#### 3.1 Geometrie



**Abbildung 4 Tatsächlicher Geometrieaufbau**

Die Berechnung der Schale erfolgte mit den Sofistik Modulen nach TH III. Ordnung unter Berücksichtigung des Materialplastifizierens in den Blechen. Sämtliche Bleche wurden daher durch 4-schichtige QUAD Elemente abgebildet.

Hiezu wurden die Kreuzungspunkte der Erzeugenden aus Rhino bzw. Autocad ausgelesen. Die Vernetzung erfolgt dann mit parametrisierter Netzteilung (Verfeinerbarkeit) „von Hand“ in SOFiMshA, wobei sich das „vom Hand“ eigentlich nur auf die Randbereich mit den dreieckigen Restzwickeln bezieht, der Rest der Schale ließ sich gut mit Schleifen und Extrusionen beschreiben. Die Gründung erfolgt auf Großbohrpfählen = Stäben, deren Interaktion mit dem Boden (Horizontalbettung) über nichtlineare Federn erfasst wurde.



**Abbildung 5 SOFiSTiK Modell der geschweißten Edelstahlschale**

### 3.2 Berechnung

Die Berechnung zeigte, dass bereits unter 1,0-fachem Eigengewicht einige der Schalenfelder ausbeulen. Dieses Ausbeulen ist jedoch für die Tragfähigkeit der Gesamtkonstruktion unkritisch, da sich die Tragfähigkeiten weiter zu den verstiften Teilen der Schalenfelder umlagern. Das Tragverhalten ist somit dem von Buckelblechen in alten Eisenbahnüberbauten bzw. Schubfeldern im Metallleichtbau ähnlich.

Um dieses Vorausbeulen numerisch abilden zu können, war es nötig, alle Lasten in mehreren Stufen mittels vorgegebener Traglastiteration aufzubringen (4 Stufen; 40% der Gesamtlast, 60%, 80% und 100%)

Wichtig hierbei ist es, bei vorhandenen Temperaturlasten beim Grundlastfall nur 1/4 der Grundlast anzusetzen, da sich die Temperatur bei jedem Lastaufsetzen erneut einbringt -> 4 Laststufen = 1 / 4 der echten Temperaturlast ansetzen.

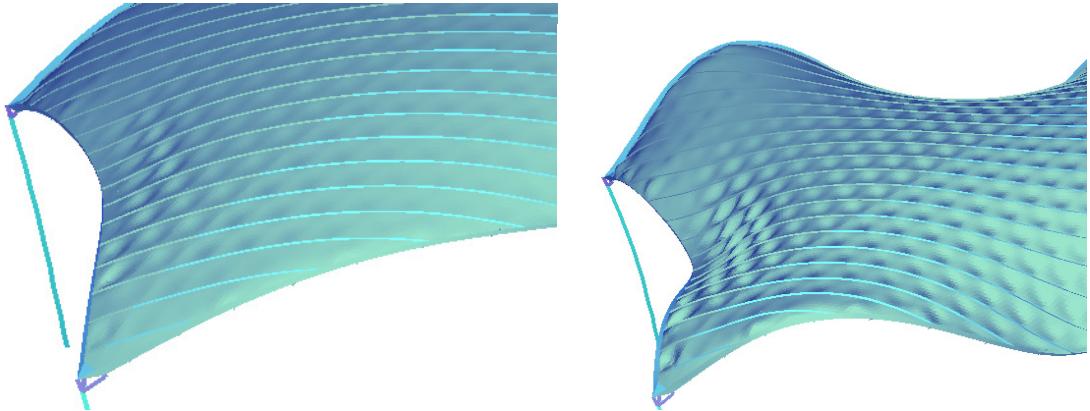


Abbildung 6 LF 213 Eigengewicht (1.35-fach)

LF 1253, Schnee + Wind,

**Das Ausbeulen der einzelnen Rautenfelder ist gut erkennbar**

### 3.3 Stahlbauplanung:

In der Stahlbauplanung (LP5) wurden dann neben den üblicher Übersichten alle Blechabwicklungen konstruiert, um den anbietenden Firmen in der öffentlichen Ausschreibung aufzuzeigen, dass die Schale aus ebenen abwickelbaren Blechen zusammengesetzt ist. Kein Blech der Schale ist doppelt gekrümmmt, die ausgezogene Konturen können direkt zur Steuerung der Laseranlage genutzt werden.

### 3.4 Ausschreibung

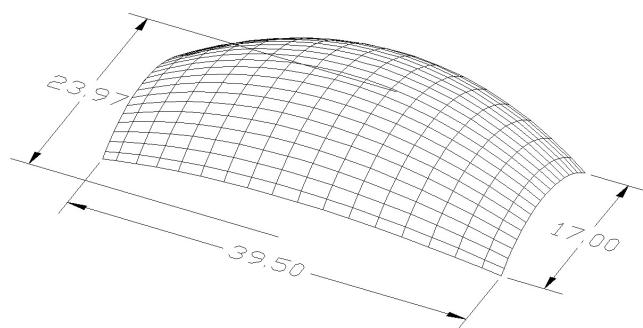
Die Ausschreibung der verschweißten Edelstahlschale erfolgte im Sommer 2009, in der Ferienzeit, mit dem Ergebnis, dass zwar 26 Firmen die Angebotsunterlagen abgefragt haben, aber – meist nach Sichtung nur durch den überarbeiteten Kalkulator- sich nur 3 Firmen trauten, ein Angebot abzugeben - das preiswerteste ca. 100% über dem Budget, die beiden weiteren Angebote ca. 600% darüber.

Die daraufhin vom Bauherren beauftragten Recherchen bei den Firmen ergaben neben den aufgrund der Sommerferien knappen Kalkulationskapazitäten, zum einen überwiegend Verständnisschwierigkeiten bezüglich der Konstruktion bei grober Durchsicht, sowie Respekt vor der notwendigen Baustellenverschweißung der Edelstahls.

Nach diesem Feedback haben wir eine Alternativkonstruktion entwickelt, bei der die Schale aus einzelnen Blechschindeln durch Verschraubung zusammengesetzt wird. Da die Schindeln verschraubt werden, ist zwecks Kostenminimierung auch eine Konstruktion aus verzinkten Blechen möglich. Die Blechschindeln werden durch Lasern und Abkanten vorgefertigt und erreichen ihre Regendichtigkeit durch Überlappungen, ähnlich denen einer Schieferplatten-Dachdeckung.

## 4 GESCHRAUBTE SCHINDELSCHALE AUS VERZINKTEN BLECHEN

Die Schalengeometrie wird dahingehend modifiziert, dass aus der beschnittenen Translationsfläche eine Streck-Trans-Fläche wird. Die Ausbuchtung an den Längsseiten ist damit abbildbar, lediglich die bisherigen Einschnürungen an den Schmalseiten sind dann annähernd gerade.



Die dreieckigen Restflächen des ersten Entwurfes entfallen somit. Es gibt keine geometrischen Sonderschindeln.

Die Fußpunkte liegen auf einem 17,0 m x 39,5 m großen Rechteck. Durch die Streckaufweitung hat die Schale in der Längsmitte ein Breite von knapp 24 m.

Abbildung 7 Rasterlinien der Schindelschale

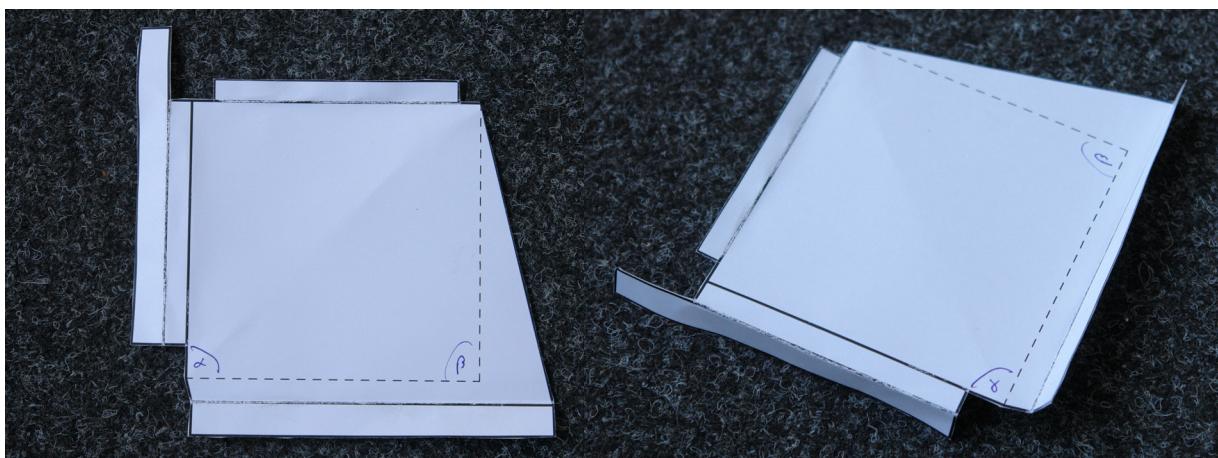
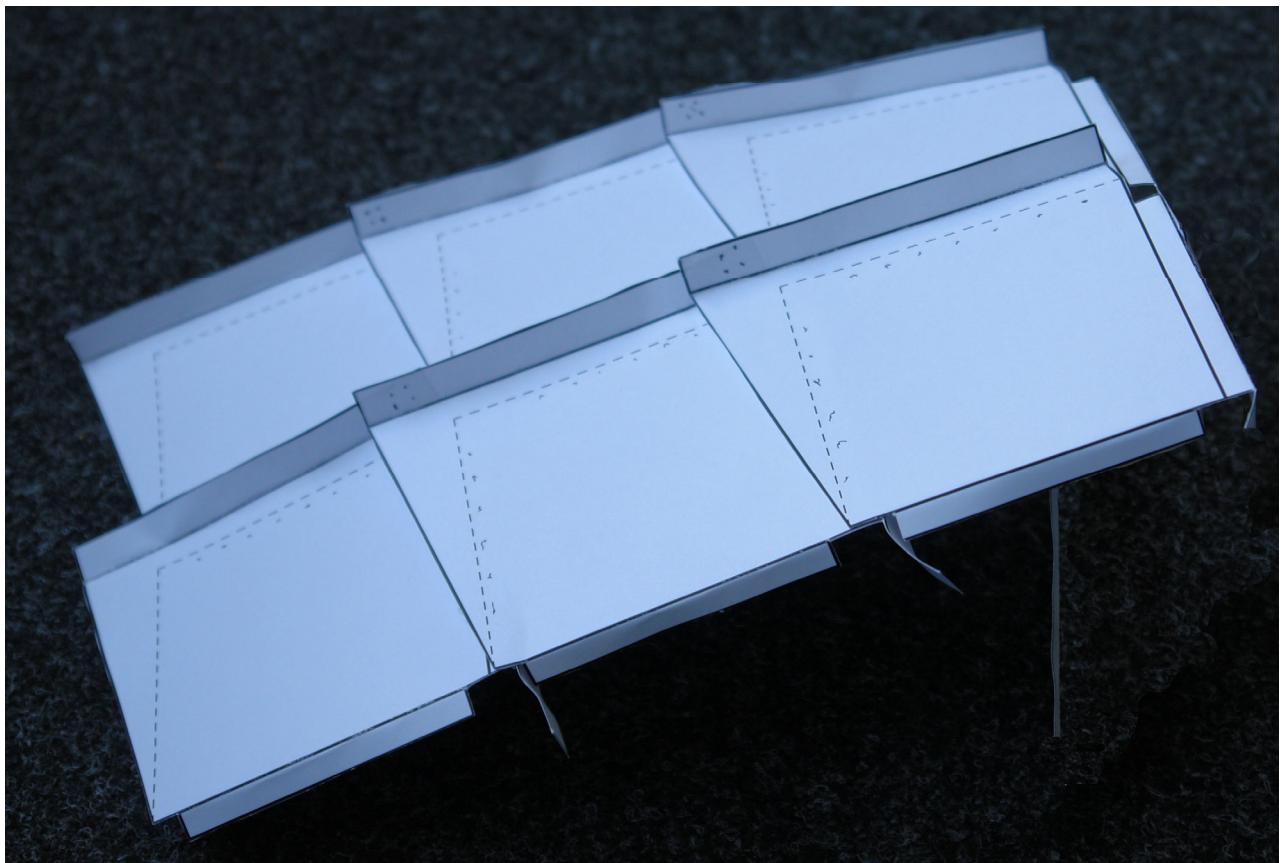


Abbildung 8 Schindelschale Papier-Prinzipmodell 1

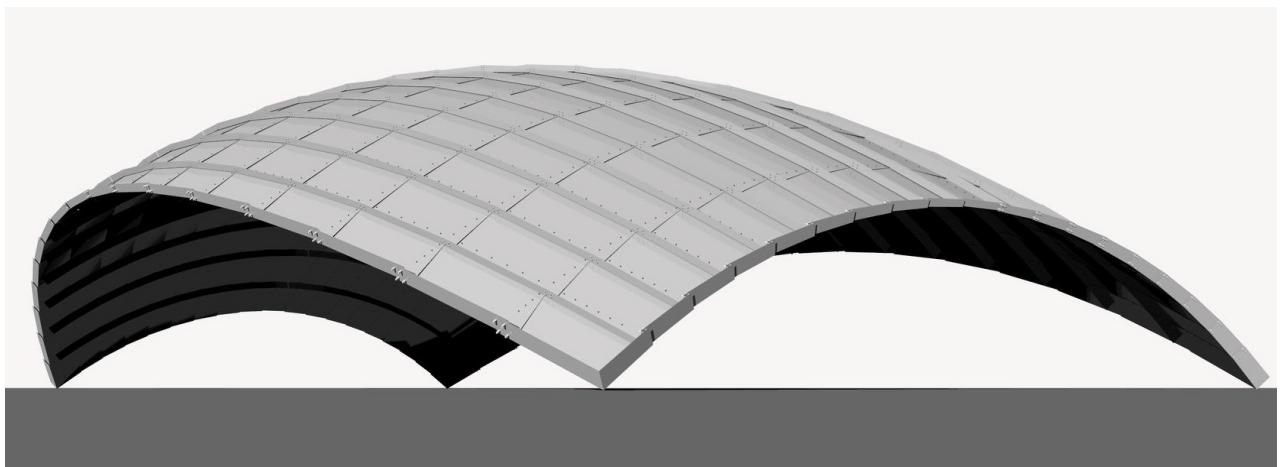
Die Schindeln können somit aus ebenen 5 mm dicken Blechen gefertigt werden. Durch eine 150 mm hohe Aufkantung einer ihrer Längsseiten bzw. Abkantung einer Schmalseite bekommt jede Schindel Stabilität. Die Verschraubung der Kantungen erzeugt später die Aussteifungsrippen, die über die gesamte Schale durchlaufen. Die Rippen sind somit jetzt allerdings orthogonal und nicht mehr diagonal angeordnet. Um 4-fach Überlappungen der Schindeln zu umgehen, ist eine Querrand der Schindel um 15° aus der Netzrichtung rausgedreht. Das Lasern von Blechen ist im 1/10mm Bereich genau, durch das Kanten entstehen jedoch Toleranzen im Bereich von ca. 2mm. Weil die Kantungen nur auf 2 Seiten der Schindel sind, können die Kanttoleranzen an den freien Seiten aufgenommen werden. Der Randträger besteht aus den 5mm Schindelbelchen, die mit 35mm dicken

Flachblechen hinterlegt und verschraubt werden. In den Eckbereichen sind diese Randträgerbleche bis zu 450 mm hoch.



**Abbildung 9 Schindelschale Papier-Prinzipmodell 2**

Wie eine derart zusammengesetzte Schale nach Fertigstellung aussehen sollte, ist in Abbildung 10 und Abbildung 11 zu erkennen.



**Abbildung 10 Rendering der Schindelschale**

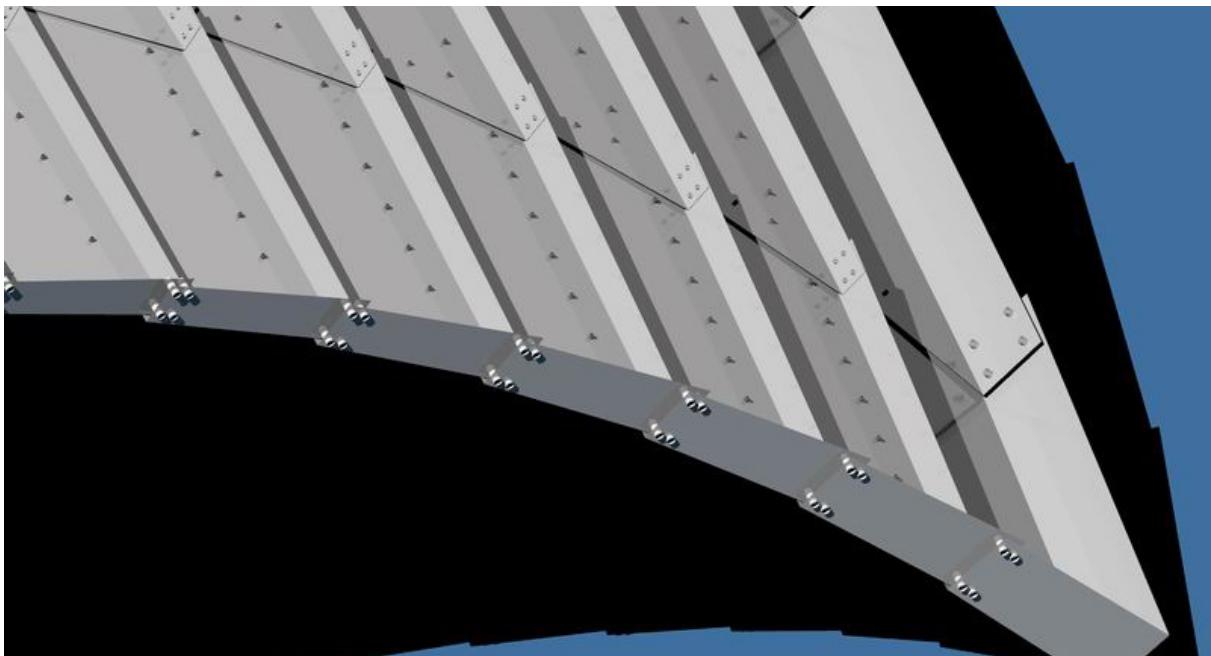


Abbildung 11 Detailrendering Schindelschale

#### 4.1 Umsetzung des Konstruktionskonzeptes

Für die planerische Umsetzung des „Papiermodells“ ergab sich dann folgender Weg:

- 1) Definition eines Grundgitters als Linienmodell (Abbildung 7 Rasterlinien der Schindelschale), in dem das spätere Raster der Schale festgelegt wird. Dabei sind die maximalen Blechplatten Maße von 2000 mm x 6000m zu berücksichtigen. Die Schale soll aus  $17 \times 19 = 323$  Schindeln bestehen. Durch die ungerade Anzahl ergibt sich in den Firstbereichen der doppelsymmetrischen Schale kein Schindelstoß, was der Dichtigkeit der Schale zugute kommen soll.
- 2) Aus den Koordinaten des Grundgitters ist jede Schindel über ihre 4 in einer ebene liegenden Eckpunkte definiert. Die genaue Form der Schindeln ergibt sich aus einer regelbasierten (parametrischen) Ableitung der Überlappungen, Kantungen Schraublöcher und Schraubabstände.

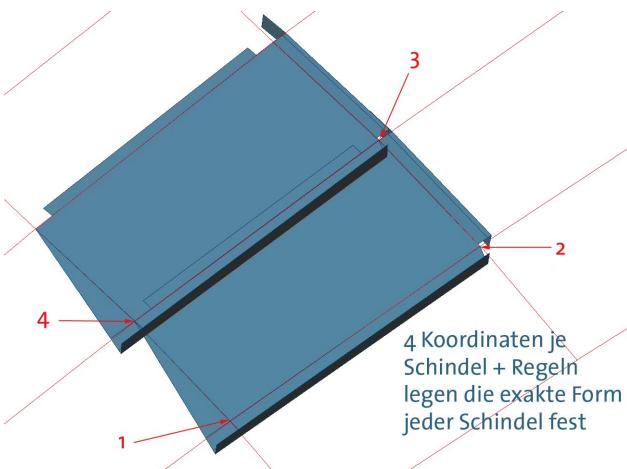
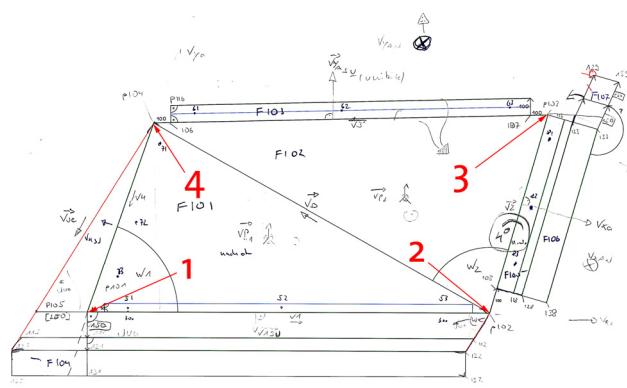


Abbildung 12 Schindel auf Rasterlinien



Punkt / Vektoren Nomenklatur

3) Diese regelbasierte Ableitung der Blechgeometrien erfolgt im Programm Rhino mittels einer Skript-Programmierung in der programmzugehörigen Sprache RhinoScript, einem Basic Derivat. Die errechneten Blechpunkte werden dann ebenfalls per RhinoScript in eine **cadinp** Datei mit **KNOT** Sätzen geschrieben. Basis für die Berechnungen sind Vektor-mathematische Herleitungen der einzelnen Punkte. RhinoScript stellt hier eine Menge vordefinierter Funktionen zur Verfügung:

- a. Vectorerzeugung: **vectorCreate**
- b. Skalierung: **vectorScale**
- c. Normierung: **vectorUnitize**
- d. Produkte: **vectorDotProduct, vectorCrossProduct**
- e. usw.

Im Script sieht das dann – deutlich verkürzt - in etwa so aus:

```
Sub malen()
  Rhino.CurrentLayer ("Schindeln")
```

Die Hauptvektoren erzeugen:

```
v1 = vectorCreate(p101,p102)
v2 = vectorCreate(p102,p103)
...
vxa = vectorCreate(p103,pxa)
vxan = vectorCrossProduct( v2, vxa)
vyanu = vectorUnitize(vyan)
...
vyas = vectorCrossProduct( vyan, v3)
```

Punkte und Flächen zum Modell hinzufügen:

```
obn = Rhino.Addpoint(p135)
Rhino.ObjectName      obn, "P" & k*(nxp-1)*100+(i*100+100)
Rhino.AddObjectToGroup obn, "G" & k*(nxp-1)*100+(i*100+100)
obn = Rhino.AddSrfPt(Array(p128, p138, p133, p123))
```

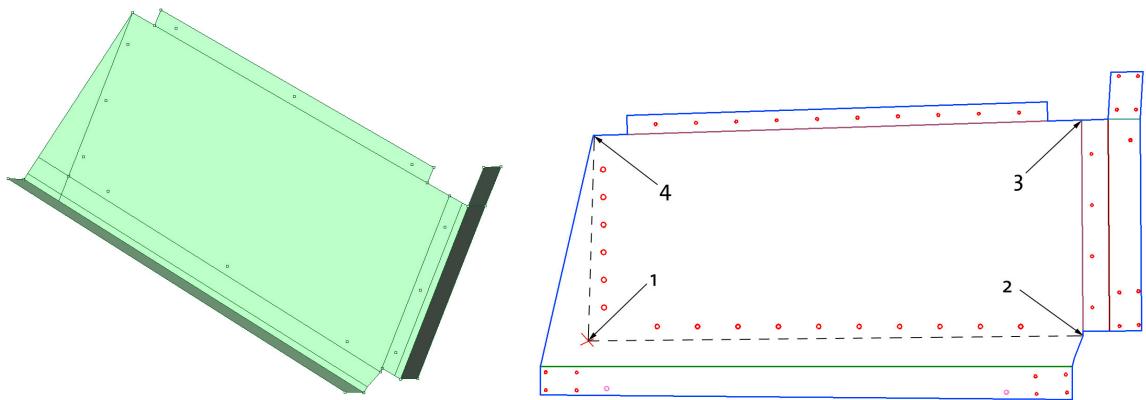
Die benötigten Knoten in eine **cadinp** Eingabe-Datei schreiben:

```
strPoint = "Knot " & ij*100+planf(k) & " x " & cstr(vr1(0)) & " y " &
CStr(vr1(1)*-1) & " z " & CStr(vr1(2)*-1):
objStream.WriteLine(strPoint)
```

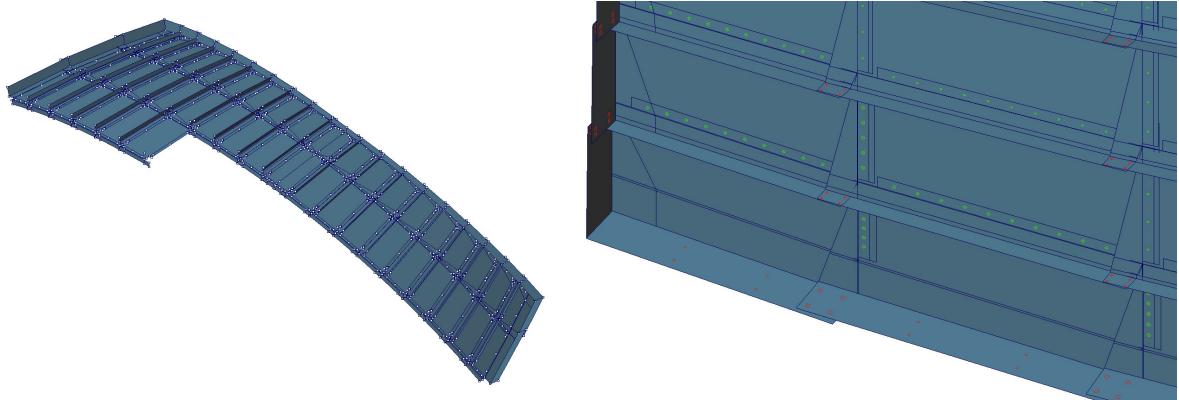
Auszug aus der erzeugten **cadinp** Datei

```
Knot 100 x -0.516128049281944 y 0.390331658647607 z 1.91905768518052
Knot 106 x 1.43095960468898 y 1.08428678090265 z 0.936102901758976
Knot 110 x -0.307369543487286 y 0.181044883398372 z 2.18481167285363
```

- 4) Weiterhin müssen die im Programm ideal dünnen Schindeln derart verschoben werden, dass sich der Blechaufbau von 5 mm einpasst. Zur Erzeugung passender Schraublöcher werden die Bohrungen auf der eine Schindel erzeugt und dann senkrecht auf das anzuschließende Blech projiziert. So wurde eine möglichst exakte Passung erreicht.
- 5) Im Mittelpunkt der Schraubenbilder wird zusätzlich ein Hilfsknoten erzeugt, der später zum einen mittels gewichtsloser Stäbe an die QUAD Elemente der Schindeln im FE Modell angekoppelt wird, zum anderen werden die Hilfsknoten untereinander mit je einem Stab biegesteif verbunden. Die Schnittgrößen dieses Stabes werden später mit Hilfe einer Excel Tabelle zur Bemessung der Schraubverbindung herangezogen.



**Abbildung 13 fertige Schindel, noch ohne Schraublöcher – Fertige abgewickelte Schindel mit Schraublöchern und Kantungslinien, das Ursprungsnetz ist gestrichelt**



**Abbildung 14 Die Schindeln werden in Rhino nacheinander gezeichnet (je nach „REDRAW“ Einstellung kann man dabei „live“ zuschauen.**

**Modelausschnitt mit Schraublöchern**

#### 4.2 SOFiSTiK Rechenmodell

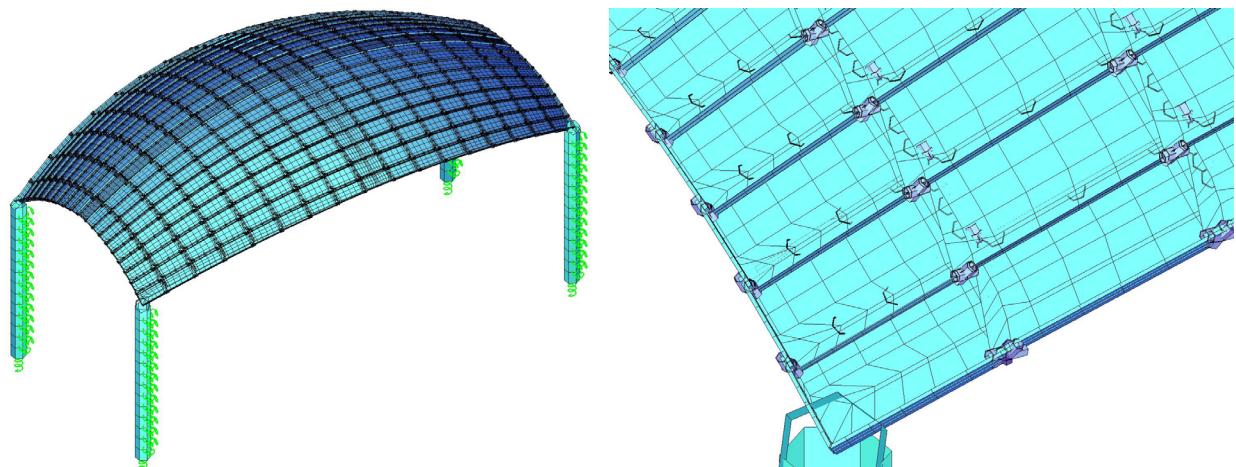


Abbildung 15 SOFiSTiK Rechenmodell des Schindeldaches

Die einzelnen Schindeln bestehen im FE Modell aus weniger als 100 Elementen. Gruppendifvisor ist 100, die Verbindung erfolgt über Stäbe. Die zuerst angedachte Verbindung über Kopplungen erzeugt sehr große Gleichungssystem, die sich mit den Sparse Solvern Algorithmen mangels RAM Speicher nicht mehr lösen ließen. „Rettend“ für eine erträgliche Bearbeitung der Statik (auch hier mussten die Lasten immer in 4 Lastschritten aufgebracht werden, wegen des vorab Ausbeulens der Schindelmittelflächen), war der neue „pardiso“-Solver, der die Rechenzeiten von ca. 90 Minuten je Lastfallkombination auf etwa 15 Minuten reduzierte.

#### 4.3 Werkstattplanung

Aufgrund der umfangreichen Geometriebestimmungen, die im Zuge von Entwurf und FE-Modellbildung notwendig waren, lag es nahe, auch die Werkstatt -Zuschnitt- Pläne für die Schindeln vorab zu erstellen und der ausführenden Firma durch den Bauherren beistellen zu lassen. Daher wurden aus den fertigen Schindelgeometrien durch „ausklappen“ – Ausrichten an drei Punkten - die Zuschnittskonturen hergeleitet. Auch wurden und werden alle Montageuntersuchungen zum hälftigen Vorzusammenbau neben der Ausgrabung , zum Einhub in zwei Teilen und den bauzeitlichen Zwischenabsteifungen durch unser Büro am FE-Gesamtsystem geführt.

#### 4.4 Probeaufbau von 3x3 Schindeln

Die Werkstattplanung war im Winter 2010 fertig, bis zum SOFiSTiK Seminar Ende April 2010 sollte die Schale eigentlich im wesentlichen aufgebaut sein. Zumindest sah dies der Terminplan vor, als wir die Zusage für diesen Vortrag gaben. Aufgrund des langen Winters verzögerten sich aber die zuvor auszuführenden Stahlbetonarbeiten: Offenlegung des verrohrten Baches, der vormals per

Wasserrad die Gebläse der Hochöfen antrieb, Besucherplattformen und Stege, Bohrpfahlgründung für das Dach.

Aus diesem Grund ist mit der Montage des Daches vor Ort bis heute noch nicht begonnen worden.

Lediglich der per Ausschreibung geforderte Probezusammenbau von 3x3 Schindeln ist erfolgt.

Mit diesem Probezusammenbau sollte geklärt werden, ob sämtliche theoretisch berechneten Blechgeometrien dieser neuartigen Konstruktion auch tatsächlich später zusammenpassen, möglichst bevor 323 gelaserte Schindel auf der Baustelle liegen, einen systematischen Fehler haben und nicht eingebaut werden können.

Nach dem erfolgreichen Probzusammenbau sind die Schlafstörungen, die das Projekt verursacht, deutlich weniger geworden. Das Dach und das Museum sollte im Juni 2010 fertig gestellt sein.



**Abbildung 16 Baugrube mit Rohbauarbeiten zwischen den Grabungsresten, Ende 03/2010**



**Abbildung 17 Probeaufbau von 3x3 Schindeln und 2x3 Randträgerbelchen**

## 5 PROJEKTBETEILIGTE

Bauherr:	Landschaftsverband Rheinland Rheinisches Landesmuseum für Industrie- und Sozialgeschichte, Schauplatz Oberhausen, Museum St. AntonyHütte, <a href="http://www.rim.lvr.de">www.rim.lvr.de</a>
Objektplanung:	Ahlbrecht – Felix – Scheidt, Essen - Berlin
Tragwerksplanung,	
Schalenentwurf	SchülkeWiesmann, Dortmund
Statische Prüfung:	PSP Prof. Sedlacek und Partner , Prof. D. Ungermaann, Dortmund
Windgutachten	Ruscheweyh Consult GmbH, Würselen
Bodengutachten:	CDM, Bochum
Ausführung:	
Stahlbau:	AIS GmbH, Willich
Rohbau:	Geese Bau , Oberhausen
Bohrpfähle	Heinrich Send GmbH, Castrop Rauxel

Autor dieses Beitrags:

Dipl.-Ing. Jörg Wiesmann

SchülkeWiesmann  Ingenieurbüro

Am Zehnthof 149  
44141 Dortmund  
Tel. 0231 562245-0  
[www.schuelkewiesmann.de](http://www.schuelkewiesmann.de)  
[info@schuelkewiesmann.de](mailto:info@schuelkewiesmann.de)