

Konstruktionskonzept Modulkasten

Peter Ehrenberg

6. Mai 2001*

Im Folgenden wird ein Konzept zur Konstruktion eines Modulkastens beschrieben, wie man ihn für FREMO-Module benötigt.

Das Konzept beschreibt das Prinzip für den Bau eines leichten und dennoch verwindungssteifen Modulkastens. Der Modulkasten erlaubt ohne Verlust an Stabilität eine Geländegestaltung, bei der das Gelände über die gesamte Modulbreite eingeschnitten ist. Das Gelände trägt nicht zur Stabilität des Moduls bei und kann deshalb aus sehr leichtem Material (z. B. Hartschaum) hergestellt werden.

Das Konzept fußt auf einfachen Mathematischen Formeln. Die Berechnung aller Modulmaße erfolgt mit einem üblichen technisch-wissenschaftlichen Taschenrechner. Ein CAD-Programm ist nicht erforderlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Über dieses Dokument	2
2	Modulgrundform	2
3	Konstruktionsprinzip	2
4	Formeln	3
4.1	Trapezgleichung	3
4.2	Bogengleichung	3
4.3	Kreisgleichung	4
4.4	Dreiecksgleichung	5
5	Modulbau	5
5.1	Befestigung Endprofile	5
5.2	Geländeprofil	5
5.3	Trassenbrett	6
5.4	Modulbeine	6

Revision: 1.2, 6. Mai 2001
© P. Ehrenberg, 2001
<URL:<http://www.dipe.de/~pe/FREMO/Modulkasten.pdf>>

1 Über dieses Dokument

Für den Bau meines ersten FREMO-Moduls »Wohltorf« (zweigleisiges N-Streckenmodul) musste ich mir eine Modulkastenkonstruktion einfallen lassen, die einen tiefen Geländeeinschnitt erlaubt, weil auf dem Modul eine Flussquerung dargestellt wird. Das Gelände wollte ich unbedingt aus Hartschaum modellieren. Es konnte also keine zur Stabilität nennenswert beitragende Rolle spielen.

Schließlich stellte ich mir vor, ein Bogenmodul zu bauen, welches eine regelmäßige Trapezform aufweisen sollte. Die Moduleseiten sollten darüberhinaus leicht bauchig sein, damit auf dem Modul etwas mehr Platz zur Geländegestaltung ist und keine störenden parallelen Linien auftreten.

Da ich nicht Besitzer eines brauchbaren CAD-Programms bin, habe ich die Maße mittels Gleichungen der planen Geometrie berechnet. Die dazu nötigen Formeln habe ich aufgeschrieben – sie werden im folgenden Text erläutert. Zur Berechnung benötigt man einen technisch-wissenschaftlichen Taschenrechner, der neben den Grundrechenarten mindestens Quadratwurzel und die trigonometrische Funktionen (*sin*, *cos*, *tan* usw.) beherrscht. Will man die Formeln bloß anwenden, muss man von Mathematik nur soviel Ahnung haben, dass man die richtigen Knöpfe auf dem Taschenrechner findet.

Das Modul »Wohltorf« dient in diesem Text lediglich als Anwendungsbeispiel. Das Prinzip lässt sich für alle symmetrisch trapezförmigen Modulkästen anwenden – und ein Rechteck ist ja nur ein Sonderfall des Trapezes...

2 Modulgrundform

Das zu konstruierende Modul soll eine regelmäßige (spiegelsymmetrische) Trapezform aufweisen (s. Abb. 1). Im konkreten Fall des Moduls »Wohltorf« sollte der Endwinkel β des im Bogen verlaufenden Gleises 45° betragen. Die Endprofile weisen die Breite b auf. Diese beträgt bei FREMO-N 40 cm.

Die lange Seitenkante L des Moduls sollte (ohne Berücksichtigung der Dicke der Endprofile) 140 cm betragen. Die kürzere Seitenkante des Moduls wird im Laufenden mit l bezeichnet, die „Luftlinie“ des Gleisbogens mit m und dessen Radius mit r .

Mit Hilfe der Trapez- und Dreiecksgleichungen (s. Abs. 4.1 auf der nächsten Seite und 4.4 auf

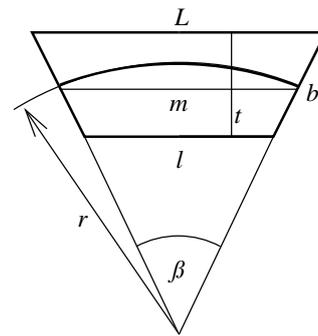


Abbildung 1: Modul-Draufsicht

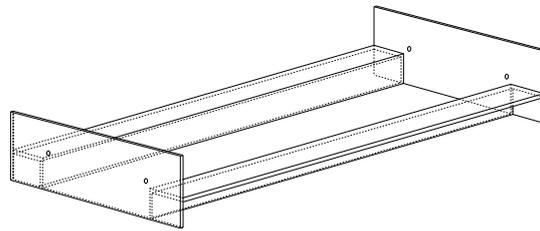


Abbildung 2: Konstruktionsprinzip

Seite 5), kann man aus dem Winkel β und der Länge L die anderen Maße ausrechnen. Sie betragen: $r \approx 163$ cm, $s \approx 125$ cm, $l \approx 109$ cm und $t \approx 37$ cm.

Der Umgang mit den Formeln wird noch näher erläutert. Nun erstmal zur Modul-Konstruktion.

3 Konstruktionsprinzip

Die verwindungssteife Konstruktion des Moduls wird von zwei L-förmigen Profilen garantiert. Sie verbinden die beiden Endprofile (s. Abb. 2). Das L-Profil gewinnt seine Stabilität weniger aus der verwendeten Materialstärke, als vielmehr aus seiner Schenkellänge.

Beim Modul »Wohltorf« habe ich die beiden Schenkel aus Hartholz gefertigt¹, wobei ich unterschiedliche Materialquerschnitte verwendete (s. Abb. 3 auf der nächsten Seite). Die Dicke der Materialien ergibt sich weniger aus der angestrebten Festigkeit, als vielmehr aus der Notwendigkeit, Holzschrauben noch in ihre schmale Seite einschrauben

¹Beim nächsten Modul werde ich statt Hartholz Multiplex-Sperrholz verwenden, weil billiger und leichter zu beschaffen ist.

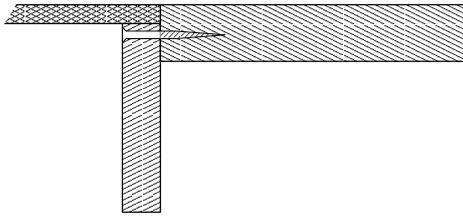


Abbildung 3: Schnitt durch rechtes L-Profil mit eingelegter Sperrholzplatte links

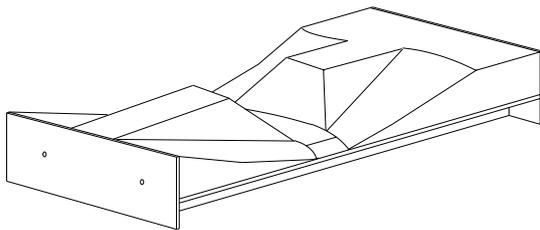


Abbildung 4: Geländeprofil aus Hartschaum im Rohbau

ben zu können, ohne das die Gefahr besteht, das das Material splittert. Bei »Wohltorf« betragen die Dicken 10 und 15 mm. Den vertikalen Schenkel habe ich dabei etwas versetzt mit dem anderen verbunden. In die entstandene Ecke habe ich später eine 4 mm dicke Sperrholzplatte zwischen die beiden L-Profile eingelegt (und verklebt). Diese dient als fester Boden für den bei der Geländegestaltung verwendeten Hartschaum (s. Abb. 4). In dem besagten Einschnitt geht das Geländeprofil bis auf diese Sperrholzplatte herunter – dort liegt das Bett des von der Bahn zu überquerenden Flusses – die „Bille“.

4 Formeln

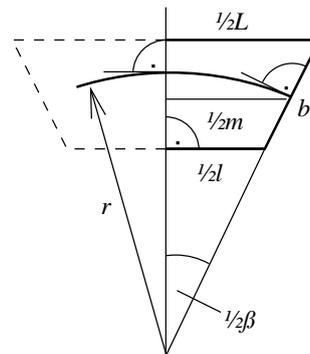
Wie schon Eingangs erwähnt, fußt das Konzept auf einer Hand voll Formeln, mit denen man alle nötigen Maße berechnen kann. Im folgenden werden diese erläutert.

4.1 Trapezgleichung

Mit der Trapezgleichung werden alle Modul-Grundmaße bestimmt. Dazu muss der Winkel β des Gleisbogens, die lange Trapezkante und die Stirnplatten-Breite b vorgegeben werden. Die

Länge der kurzen Kante l und der Radius des Bogens r , sowie die „Luftlinie“ m rechnen wir aus.

Das Trapez ist regelmäßig (spiegelsymmetrisch). In der folgenden Zeichnung ist deshalb nur die eine Hälfte dargestellt. Der Gleisbogen verlässt das Modul im rechten Winkel – das ist selbstverständlich.



Damit ist:

$$r = \frac{L}{2 \sin \frac{\beta}{2}} - \frac{b}{2} \quad (1)$$

$$l = (2r - b) \sin \frac{\beta}{2} \quad (2)$$

$$m = 2r \sin \frac{\beta}{2} \quad (3)$$

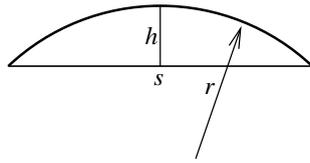
Eine Länge über das Modul kann man nicht nur für die Mitte m und die kurze Kante l berechnen. Wollen wir die Länge s entlang irgendeiner Linie parallel zur Kante m bestimmen und geben wir die Entfernung dieser Kante von der Kante m mit d an, dann gilt:

$$s = (2r \pm d) \sin \frac{\beta}{2} \quad (4)$$

Dabei ist $+d$ zu benutzen, wenn die zu bestimmende Kante s zwischen den Kanten L und m liegt (also in der Zeichnung oberhalb von m) und $-d$ ist zu verwenden, wenn s zwischen l und m liegt (also unterhalb von m).

4.2 Bogengleichung

Zum Anfertigen des Trassenbrettchens benötigen wir den Ausschlag des Gleisbogens, also seine Höhe h . Das können wir mit der Bogengleichung ausrechnen. Die Länge der Sehne des Bogens wird mit s bezeichnet. Wollen wir die Höhe des Gleisbogens berechnen, dann ist $s = m$.

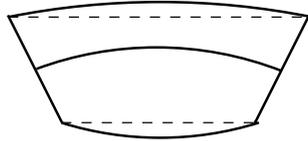


Damit ist:

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{s^2}{4}} \quad (5)$$

Mit der Höhe h können wir unter Zuhilfenahme der Kreisgleichung (s. Abs. 4.3) den Bogen aufzeichnen – ohne Fadenzirkel und dadurch viel genauer.

Mit der Bogengleichung kann man aber auch noch andere Dinge berechnen. Wie einleitend geschrieben, habe ich bei »Wohltorf« die langen Modulkanten bauchig ausgeführt:



Die Tiefe des Trapezes bei »Wohltorf« ist $t = 37$ cm. Ich habe das Modul mit einer Tiefe von 50 cm am Scheitelpunkt der Bäuche gebaut. Die Differenz von 50 cm – 37 cm = 13 cm verteilen sich je zur Hälfte auf zwei Bäuche – einer auf der kurzen und einer auf der langen Modulseite. Ich habe dafür die beiden L-Profile zunächst um 6,5 cm breiter ausgeführt und dann mit der Stichsäge bauchig gesägt.

Dazu benötigt man den Radius r des Bogens, der auf seinem Scheitelpunkt die gewünschte Höhe h und der Sehnenlänge s besitzt. Genau das geht mit der Bogengleichung:

$$r = \frac{s^2 + 4h^2}{8h} \quad (6)$$

Wegen der unterschiedlichen Außenkantlängen ergeben sich zwei verschiedene Radien. Bei »Wohltorf« kommt heraus: $r_1 \approx 380$ cm für die lange Kante und $r_2 \approx 231$ cm für die kurze.

4.3 Kreisgleichung

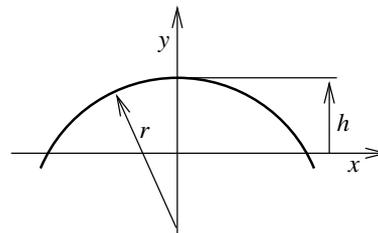
Viele Modellbauer benutzen zum Aufzeichnen eines Gleisbogens einen Fadenzirkel. Bei den für FREMO-Module typischen großen Radien ist das aber umständlich und ungenau. Eine genauere Möglichkeit ist die Benutzung der Kreisgleichung.

Dabei wird der aufzuzeichnende Bogen über seine Höhe in gleichgroße Abschnitte zerlegt.



Mit der Kreisgleichung kann man den Abstand x der Schnittpunkte von der Bogenmitte ausrechnen. Die ausgerechneten Koordinaten werden auf das Werkstück übertragen und mit einem Lineal durch Geraden verbunden – man erhält also keinen Kreis, sondern ein Vieleck. Je nachdem wie genau man einen Kreis annähern will, muss man den Bogen in mehr oder weniger viele Abschnitte zerlegen. In der Praxis haben sich 5 bis 20 Abschnitte für große Radien als ausreichend erwiesen.

Zur Berechnung wird die Höhe h und der Radius r des Bogens benötigt. Beides kann aus der Länge des Bogens mit der Bogengleichung (s. Abs. 4.2 auf der vorherigen Seite) ausgerechnet werden.



Damit ist:

$$x = \pm \sqrt{r^2 - (y + r - h)^2} \quad (7)$$

Wenn wir den Bogen für den Bauch der langen Modulkante von »Wohltorf« berechnen, dann ist $h = 6,5$ cm und $r \approx 380$ cm. Letzteres hatten wir mit der Bogengleichung ausgerechnet. Wir teilen die Höhe in sechs gleiche Teile je 1 cm und einen 0,5 cm langen Abschnitt. Dann rechnen wir:

$$x = \pm \sqrt{144400 \text{ cm}^2 - (y + 373,5 \text{ cm})^2}$$

für $x = 1$ cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm und 6 cm. Für $y = 0$ cm und $y = 6,5$ cm brauchen wir nicht rechnen. Das Ergebnis ist immer 0 und die halbe Breite des Bogens.

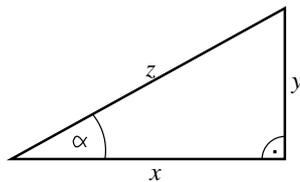
Die Ergebnisse lauten:

y [cm]	x [cm]
6,5	0,0
6,0	±19,5
5,0	±33,7
4,0	±43,5
3,0	±51,5
2,0	±58,3
1,0	±64,4
0,0	±70,0

4.4 Dreiecksgleichung

Genau wie die Kreisgleichung dient die Dreiecksgleichung unter anderem dazu, die Werkstücke anzuzeichnen. Mit ihrer Hilfe können wir Winkel auf einfach zu messende Längen abbilden.

Den Winkel bezeichne ich im folgenden mit α zur Unterscheidung zum Bogenwinkel β des Moduls. In der Praxis gilt oft $\alpha = \beta/2$.



Damit ist:

$$x = z \cos \alpha = \frac{y}{\tan \alpha} \quad (8)$$

$$y = z \sin \alpha = x \tan \alpha \quad (9)$$

$$z = \frac{y}{\sin \alpha} = \frac{x}{\cos \alpha} \quad (10)$$

Merken muss man sich, dass hier x und y die beiden rechtwinklig zueinander stehenden Kanten sind und x die am Winkel anliegende Kante und y die dem Winkel gegenüberliegende Kante ist.

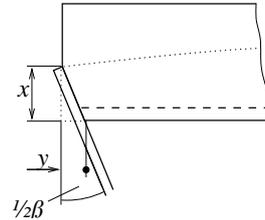
Vielleicht will man ja auch mal einen Winkel bestimmen. Das geht mit den trigonometrischen Umkehrfunktionen:

$$\alpha = \arctan \frac{y}{x} = \arcsin \frac{y}{z} = \arccos \frac{x}{z} \quad (11)$$

Zum Beispiel können wir die Modultiefe t aus dem Bogenwinkel β und der Endprofil-Breite b berechnen. Übertragen auf die Dreiecksgleichung ist $t = x$, $b = z$ und $\beta/2 = \alpha$. Wir wollen $t = x$ ausrechnen um benutzen die erste Gleichung:

$$t = x = z \cos \alpha = 40 \text{ cm} \cdot \frac{45^\circ}{2} \approx 37 \text{ cm}$$

Berechnen können wir auch, wie die L-Profile zuzusägen sind, damit sie exakt an die schrägen Endprofile passen. In der folgenden Draufsicht sieht man das linke Ende eines L-Profils und unten links das schräge Endprofil:



Bei »Wohltorf« waren die L-Profile im Rohzustand 11,5 cm breit. Davon macht der bauchige Bogen 6,5 cm aus (in der Zeichnung durch die gepunktete Linie angedeutet). $x = 5$ cm verbleiben für die Befestigung der Endprofile. Wenn wir die Kante y ausrechnen, dann können wir das durch die gepunktete Linie angedeutete Dreieck prima anzeichnen und absägen:

$$y = x \tan \alpha = 5 \text{ cm} \cdot \tan \frac{45^\circ}{2} \approx 2,1 \text{ cm}$$

5 Modulbau

Zum Modulbau gäbe es viel zu sagen, nur reicht meine Zeit nicht, dass alles aufzuschreiben. Darum hier nur ein paar Tipps.

5.1 Befestigung Endprofile

Bei dem hier vorgestellten Konstruktionsprinzip ist die Befestigung der Endprofile kein Problem: Sie können direkt auf die L-Profile geschraubt werden. Voraussetzung ist, dass die Materialstärke des L-Profils ausreichend ist, um Holzschrauben hineinschrauben zu können. Zusätzlich gibt man natürlich noch Leim dazwischen. Wichtig ist, dass die abgeschrägten L-Profil-Enden vertikal exakt senkrecht sind. Ich benutze zum Absägen eine große Bügelsäge mit Metall-Sägeblatt. Damit lässt sich hartes Holz sehr sauber sägen – zuvor ringsherum anzeichnen.

5.2 Geländeprofil

Ich kann jedem empfehlen, die Geländemoldellierung aus Hartschaum zum machen. Hartschaum kann man u. a. in 20 mm Stärke billig im Baustoffhandel kaufen. Andere, vor allem dünnere

Stärken (bis 0,5 mm hinab) bekommt man im Architektenbedarf-Handel. Wichtig ist, dass der Schaum homogen ist und nicht wie bei Styropor aus Kügelchen besteht (die bröseln beim Bearbeiten). Den Hartschaum klebt man gut und billig mit Montagekleber aus der Kartusche.

Der Modulkasten kann komplett mit Hartschaum gefüllt werden. Das Profil schneidet man nach dem Trocknen aus. Hat man irgendwo zu viel geschnitten, dann kann man leicht wieder Material aufkleben.

Der Hartschaum kann mit Abbrechklingenmessern durchaus auch sehr tief geschnitten werden z. B. entlang des Bahndamms. Mit dem Klingenswechsel sollte man dabei nicht geizen. Zur weiteren Bearbeitung nimmt man zunächst sehr grobes Schmirgelpapier (Körnung 40) und später feineres (Körnung 80). Bei »Wohltorf« habe ich schließlich das Gelände mit einer Kunststoffspachtelmasse (Reinershagener Naturalis) überzogen und dabei noch feine Korrekturen vorgenommen.

Wenn das Geländeprofil fertig ist, dann werden die Seiten mit einer dünnen Sperrholzblende verkleidet. Sie verläuft von Endprofil bis Endprofil und wird der Geländekontur folgend ausgesägt. Die Blenden werden mit reichlich Montagekleber auf den Hartschaum geklebt und durch Schrauben in die L- und Endprofile fixiert.

5.3 Trassenbrett

Am besten verwendet man schlichte Quadratische Endprofile und schraubt das Trassenbrett auf die Endprofile auf. So verläuft das Trassenbrett vom ersten bis zum letzten Millimeter über die gesamte Modullänge (einschließlich Brücken). Wer das Geländeprofil aus Hartschaum herstellt, der sollte darauf achten, dass die Oberkante des Endprofils und die oberste Hartschaumschicht bündig sind. Das Trassenbrett kann dann direkt auf den Hartschaum aufgeklebt werden.

Für das Trassenbrett verwendet man Sperrholz. Die Dicke soll so bemessen sein, dass die Gleislage auf dem Endprofil Normgerecht wird.

Die FREMO-N-Norm sieht im Endprofil einen Bahndammansatz vor. Den kann man herstellen, in dem man sich aus 3 mm dickem Hartschaum zwei Streifen schneidet. Den einen Schnitt führt man mit einem Winkel aus. Die Streifen kann man dann links und rechts an die Stufe des Trassenbretts kleben. Ein schmaler Hartschaumstreifen lässt sich

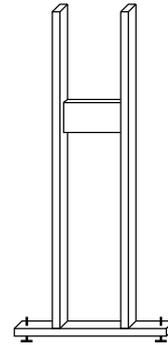


Abbildung 5: Modulbeine

gut entlang des Gleisbogens biegen.

5.4 Modulbeine

Die vertikalen Schenkel der L-Profile sind prima geeignet Beine an ihnen zu befestigen. Die Beine bei »Wohltorf« sind aus quadratischen Buchenholzleisten mit 2,5 cm² Querschnitt gefertigt. Der Abstand der Beine ist so bemessen, dass sie zwischen die vertikalen Schenkel der beiden L-Profile passen.

Die Querleiste unten ist länger, um die Standfestigkeit zu verbessern. Die Füße sind von oben mit Schrauben höhenverstellbar. Die Beine sind schön stabil, allerdings sperrig beim Transport.