

CAD - 3D - DG

Heutige **Computer Aided Design** Programme ermöglichen es, mit Objekten des dreidimensionalen Raums zu arbeiten. In den folgenden Zeilen will ich einen kurzen Überblick über die notwendigen Grundlagen für die Erstellung und Bearbeitung dreidimensionaler Objekte geben. Anhand eines einfachen Beispiels möchte ich zeigen, daß Kenntnisse aus der Darstellenden Geometrie notwendig sind, um nicht in ein **Computer Aided Desaster** zu schlittern.

Heinz Slepcevic

Bei den folgenden Beschreibungen werde ich mich auf das am PC weitverbreitete Programm AutoCAD in der Version 12 und 13 beziehen. Die Befehlsörter von AutoCAD sind im Text durch Großbuchstaben hervorgehoben.

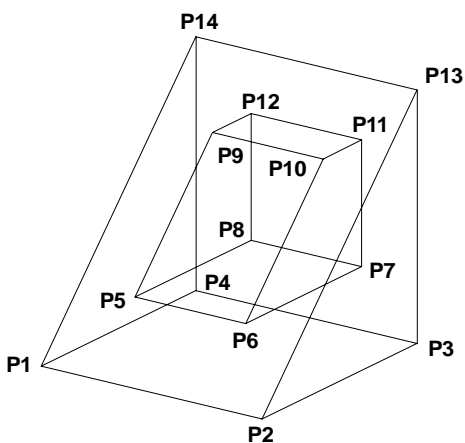
Datenmodelle für 3D-Objekte

Wenn dreidimensionale Objekte mit CAD-Programmen beschrieben werden sollen, muß man sich zuerst eine geeignete Datenstruktur zur Beschreibung und Speicherung der Objekte aufstellen. Dabei kommt man auf grundsätzlich drei verschiedene Datenmodelle: das Drahtmodell (wire frames), das Flächenmodell (facette) und das Volummodell (solids). In jedem Datenmodell muß es möglich sein, 3D-Objekte zu generieren, zu verändern und in eine Zeichenebene abzubilden. Diese Datenmodelle ermöglichen es im allgemeinen, nur ebenflächig begrenzte Körper darzustellen, wobei es einige Programme mit der Ebene nicht so genau nehmen. Alle krummflächigen Körper wie z.B. eine Kugel werden durch geeignete Netze angenähert.

Objekte werden prinzipiell dreidimensional erfaßt. Es ist also nicht möglich, einen Grund- und Aufriß eines beliebigen Objekts einzugeben und das Computerprogramm daraus das Raumobjekt generieren zu lassen.

Drahtmodell

In diesem Modell können nur Punkte und Strecken im Raum dargestellt werden. Für jedes 3D-Objekt wird eine geeignete Liste der Punktkoordinaten und eine Liste der zu zeichnenden Kanten erstellt. Bei diesen Listen kann vom Programm keinerlei automatische Prüfung der Vollständigkeit und Fehlerfreiheit des dargestellten Objekts vorgenommen werden.



Punktliste

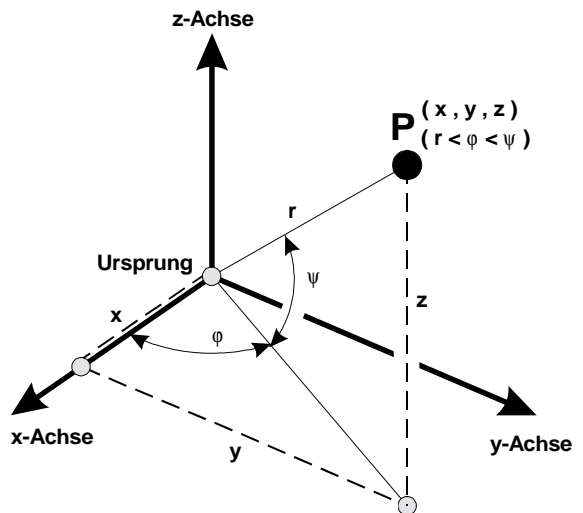
Nr	x	y	z
P1	10	0	0
P2	10	10	0
P3	0	10	0
P4	0	0	0
P5	7.5	2.5	2.5
usf

Kantenliste

Nr	Startpunkt	Endpunkt
K1	P4	P1
K2	P1	P2
K3	P2	P3
K4	P3	P4
K5	P5	P6
usf

Generierung und Manipulation der Objekte

Bei der Festlegung des Objekts werden mit dem AutoCAD Befehl **LINE** die Kantenendpunkte in einem geeigneten Koordinatensystem festgelegt. Die Festlegung von Punkten erfolgt meist mit 3-dimensionalen kartesischen Koordinaten $P(x,y,z)$, aber auch mit Kugelkoordinaten $P(r<\varphi<\psi)$ oder Zylinderkoordinaten $P(r<\varphi,z)$. Dabei ist besonders zu beachten, daß die üblichen Eingabegeräte wie Maus und Digitalisierungstablent „zweidimensionale Wesen“ sind. Die angeklickten Punkte liegen immer in der xy-Ebene, besitzen daher die Höhe 0; die Höhe ist dann meist mit der Tastatur einzugeben. Erst mit Hilfe der Fähigkeit, geometrische Eigenschaften bereits gezeichneter Objekte (Endpunkte, Mittelpunkt, Lot, ..., Punktfilter) fangen zu können, ist es möglich, aus den bestehenden Objekten neue Punkte im Raum zu ermitteln.



Für die Manipulation (das Editieren) vorhandener Objekte arbeitet man im wesentlichen mit den Befehlen **SCHIEBEN**, **KOPIEREN**, **VARIA** (Skalieren), **2D** und **3D DREHEN**, **2D** und **3D SPIEGELN**. Beim **DEHNEN** und **ABRUNDEN** ist darauf zu achten, daß die 2 Objekte in einer Ebene liegen (in der Version 12 wird auch oft gefordert, daß die zwei Objekte in der [x,y]-Ebene liegen). **STUTZEN** von zwei kreuzenden Geraden im Raum ist abhängig von der jeweiligen Blickrichtung, da durch die Schnittkante eine projizierende Ebene gelegt wird und der Schnittpunkt der zweiten Gerade mit der projizierenden Ebene bestimmt wird.

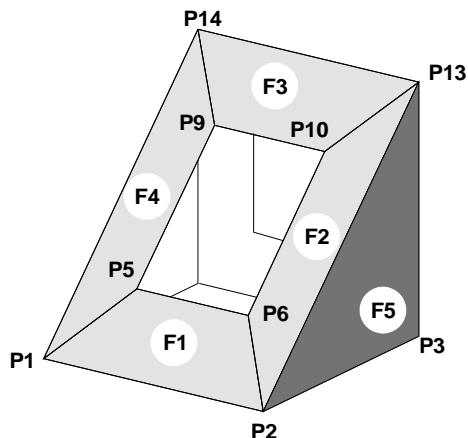
Wenn eine Zeichnung neu eröffnet wird, ist üblicherweise ein räumliches kartesisches Weltkoordinatensystem festgelegt. Es ist aber möglich, ein beliebiges Benutzerkoordinatensystem (BKS) im Raum zu definieren und alle weiteren Raumpunkte

auf dieses Koordinatensystem zu beziehen. Damit kann man eine beliebige ebene Figur im Raum in wahrer Größe zeichnen, man muß nur die [x,y] Koordinatenebene in die Träger-ebene der ebenen Figur legen und eine Draufsicht (DRS1 CHT) auf die Koordinatenebene wählen

Im reinen Drahtmodell wird heute fast nicht mehr gearbeitet, sondern man stellt 3D-Objekte häufig im Flächenmodell dar.

Flächenmodell

Aufbauend auf die Punkt- und Kantenliste eines Drahtmodells wird noch eine Flächenliste hinzugefügt. Dadurch ist es möglich, eine „Haut“ über das Drahtmodell zu ziehen. Das 3D-Objekt ist aber hohl. Es können daher auch Löcher vorkommen, durch die man in das Innere des 3D-Objektes sieht. Diese Flächen werden je nach Datenmodell verschieden definiert. Manche Programme kennen nur dreiseitige Ebenenstücke (facetten), wobei noch angegeben werden kann, ob einzelne Kanten nicht gezeichnet werden sollen. AutoCAD kennt 3 oder 4-seitige Flächenstücke -die 3DFLÄCHE-, wobei die 4 Eckpunkte nicht in einer Ebene liegen müssen (es wird das räumliche Vierseit in zwei Dreiecke zerlegt). Schlußendlich gibt es auch Programme, bei denen mit beliebigen ebenflächige Polygonzüge -die auch Löcher beinhalten können- geeignete Flächenlisten aufbauen können.



Flächenliste

Nummer	Punkt1	Punkt2	Punkt3	Punkt3
F1	U-P1	P5	U-P6	P2
F2	U-P6	P2	U-P13	P10
F3	U-P13	P10	U-P9	P14
F4	U-P9	P14	U-P1	P5
F5	P2	P3	P13	-
usf...				

In dieser Liste bedeutet U vor einem Punkt, daß die Kante von diesem Punkt aus nicht dargestellt werden soll.

Selbst erstellte Flächen eines 3D-Objektes werden normalerweise nicht mit einem Objektname verknüpft. Es kann daher z.B ein Quader nicht als Gesamtheit angesprochen werden; es können aber die Flächen eines Objektes zu einem Block zusammengefaßt werden.

Generierung und Manipulation der Objekte

Im einfachsten Fall kann man durch Eingabe der Flächen (Koordinaten der Eckpunkte) ein 3D-Objekt zusammenbauen.

Meist werden aber direkt vom Programm durch Module (z.B mit AutoLisp) spezielle Flächen oder Körper erzeugt.

So bietet AutoCAD z. B. die folgenden Flächen an:

- 3DFLÄCHE 3D-Fläche aus 3 oder 4 Punkten, bei denen Kanten unsichtbar dargestellt werden können.
Auf diese Flächen bauen alle weiteren Objekte auf.
- 3DNETZ Topologisch rechtwinkelige Netze (vierseitige Netzmaschen)
- PNETZ Ein Vielfächennetz, wobei die Netzmaschen beliebige Polygone sind
- REGELOB Regelflächen zwischen zwei Leitkurven
- TABOB Prismatische oder zylindrische Flächen
- ROTOB Rotationsoberflächen
- KANTOB Bikubische-Coons Oberflächen über vier in den Ecken verbunden Leitkurven
- 3D LI SP-Programme Quader, Keil, Kegel, Pyramide, Halbkugel, Kugel,Torus, HP-Fläche,

Als Beispiel für eine Datenstruktur sei ein Quader mit den Kantenlängen 4x5x6 angeführt.

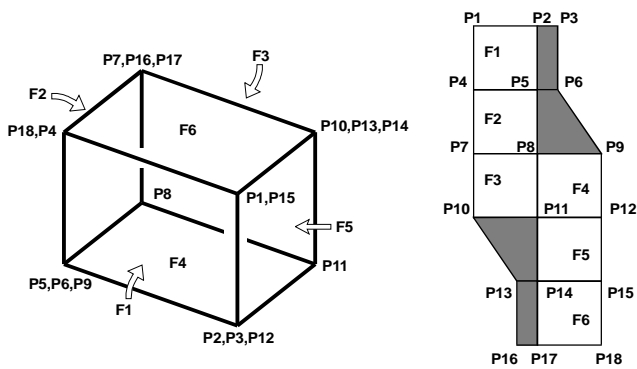
```
Befehl : 3D
Quader/KEGel /Schale/KUPPel /Netz/Pyramide/KUGel /Torus/K
E11 : 0
Ecke des Quaders: 0,0,0
Länge: 4
Würfel /-<Breite>: 5
Höhe: 6
Drehwinkel um die Z-Achse: 0
```

Sieht man sich mit LISTE die Datenstruktur des Quaders an, so erkennt man, daß ein Quader durch ein 3D-NETZ mit 6x3 Maschenpunkten beschrieben wird, dessen Punkte geschickt gewählt werden.

```
Befehl : LISTE
POLYLINE
6x3 Netz
KONTROLLPUNKT
Netz
1 in Punkt, X= 4.0000 Y= 0.0000 Z= 6.0000
2 in Punkt, X= 4.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
3 in Punkt, X= 4.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
4 in Punkt, X= 0.0000 Y= 0.0000 Z= 6.0000
5 in Punkt, X= 0.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
6 in Punkt, X= 0.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
7 in Punkt, X= 0.0000 Y= 5.0000 Z= 6.0000
8 in Punkt, X= 0.0000 Y= 5.0000 Z= 0.0000
9 in Punkt, X= 0.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
10 in Punkt, X= 4.0000 Y= 5.0000 Z= 6.0000
11 in Punkt, X= 4.0000 Y= 5.0000 Z= 0.0000
12 in Punkt, X= 4.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
13 in Punkt, X= 4.0000 Y= 5.0000 Z= 6.0000
14 in Punkt, X= 4.0000 Y= 5.0000 Z= 6.0000
15 in Punkt, X= 4.0000 Y= 0.0000 Z= 6.0000
16 in Punkt, X= 0.0000 Y= 5.0000 Z= 6.0000
17 in Punkt, X= 0.0000 Y= 5.0000 Z= 6.0000
18 in Punkt, X= 0.0000 Y= 0.0000 Z= 6.0000
ENDE DER SEQUENZ
```

Versucht man dieses 3D-Netz darzustellen, so kommt man zu der folgenden interessanten Struktur. Das Netz des Quaders ist so aufgebaut, daß etliche Punkte des Maschennetzes zusammenfallen und daher einige Netzflächen nur als Würfelkanten erscheinen. Durch diese Annahme als Netzfläche wird auch der Quader als ein Objekt vom Typ 3D-Netz aufgefaßt.

Netz mit 3*6 Scheitel (VERTEXes)



Die grauen Flächen erscheinen nur als Kanten!

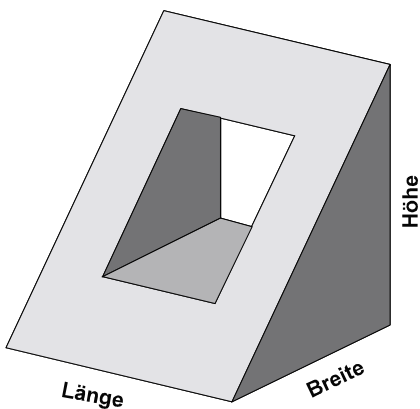
Krummflächige 3D-Objekte wie z.B. eine Kugel werden aus geeigneten Flächenstücken zusammengesetzt, wobei die Feinheit dieser Maschen geeignet gewählt werden kann. Krummflächige Objekte mit einer exakten Definition (z.B. die Kugel mit $x^2+y^2+z^2=r^2$) werden in AutoCAD nicht verwendet; es müßten auch etliche neue Methoden entwickelt werden, um dies zu ermöglichen (man stelle sich nur ein mögliches Datenmodell einer Kugel vor).

Bei den aus Flächenstücken zusammengesetzten 3D-Objekten ist zu beachten, daß es keine programmgesteuerten Möglichkeiten für Schnitte und Durchdringungen der Objekte gibt. Man kann aber in der Grundversion von AutoCAD mit dem **geometric calculator** den Schnittpunkt einer Strecke mit einem Flächenstück berechnen.

Die Möglichkeiten der automatischen Berechnung von Durchdringungen gibt es erst im folgenden Modell.

Volumenmodell (Festkörper)

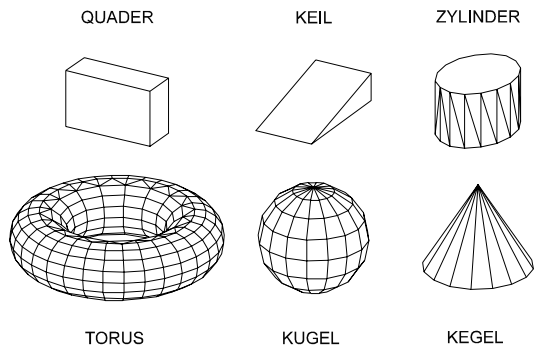
Festkörper stellen eine logische Einheit von Punkt-, Kanten- und Flächenlisten dar. Die Flächen der Festkörper ermöglichen keine Fenster, durch die man in das Innere des Körpers blicken kann. Festkörper müssen mit neuen Werkzeugen (Methoden) bearbeitet werden. Im wesentlichen können nur sogenannte Bool'sche Operationen (Vereinigung, Durchschnitt und Differenz) gleichartiger Objekte und ebene Schnitte der Objekte ausgeführt werden. Bei Festkörpern werden meist auch Masseigenschaften (Volumen, Schwerpunkt, Trägheitsmoment, innere Punkte usw.) von den Programmen verwaltet.



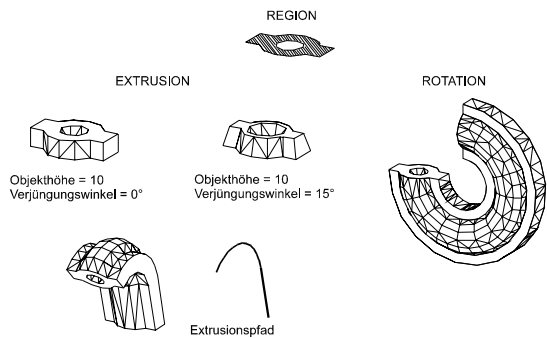
Generierung und Manipulation der Objekte

Ein Festkörper kann nicht mehr durch geeignetes Aufspannen von Flächen aufgebaut werden. Eine Anzahl eindeutig definierter Objekte, die eine eigene Datenstruktur aufweisen, bildet die Basis für die Körpergenerierung. Dies sind die Objekte QUADER, KEGEL, ZYLINDER, KUGEL, TORUS und KEIL.

Grundkörper (primitiv)



Weiters kann eine geeignete Basis (geschlossene Polygone, Regionen..) als Grundlage für ein EXTRUSIONS-Objekt durch die Angabe von entweder einer Höhe und einem Verjüngungswinkel oder eines Extrusionspfades dienen. Rotationskörper werden mit dem Befehl ROTATION generiert, dabei ist ein topologisch geschlossener ebener Meridian und eine Drehachse anzugeben.

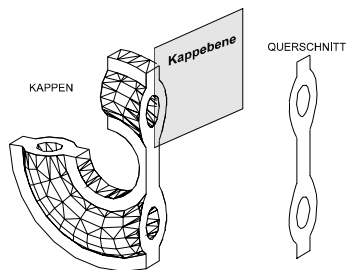


Festkörper können mit den Befehlen SCHIEBEN, KOPIEREN, 2D-3D DREHEN, 2D-3D SPIEGELN und 2D-3D REIHEN editiert werden. darüberhinaus stehen noch folgende speziell für Festkörper entwickelte Bearbeitungsfunktionen zur Verfügung:

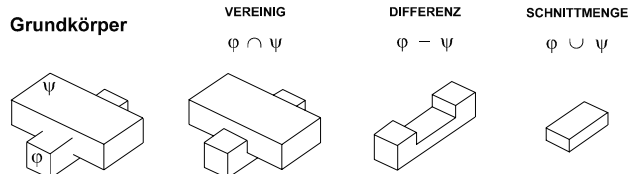
3D FASEN / ABRUNDEN: Die Kanten werden abgefast bzw. abgerundet. Dabei werden eben- bzw. rohrförmige Flächen zwischen den an die gewählte Kante angrenzenden Objektflächen eingefügt.

3D KAPPEN: Ein Festkörper kann mit einer beliebigen Schnittebene auseinandergeschnitten werden.

3D QUERSCHNITT: Durch Angabe einer Schnittebene wird eine Querschnittsregion in der Schnittebene erzeugt, die weiterverarbeitet werden kann.

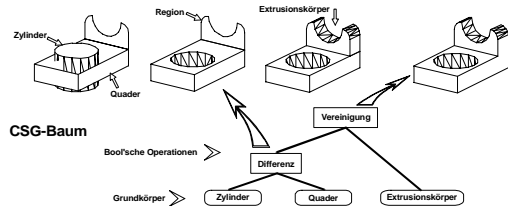


Komplexere Körper werden im Rahmen der Constructive Solid Geometrie durch die Bool'schen Operationen VEREINIGUNG, DIFFERENZ und SCHNITTMENGE erzeugt.



AutoCAD hat zwischen den Versionen 12 und 13 die Datenstruktur für Festkörper wesentlich geändert. In der Version 12 konnten Festkörper nur mit dem Programmzusatz AME (Advanced Modelling Extension) bearbeitet werden.

In der Version 12 wird für jedem zusammengesetzten Festkörper ein CSG-Baum erzeugt, der in hierarchischer Ordnung die Reihenfolge der einzelnen Booleschen Operationen aufzeichnet. Die einzelnen Flächen und Kanten des Objekts, die sog. Boundary Representation (kurz B-Rep) werden in zwei unsichtbaren Blöcken auf dem gefrorenen Layer AME_FRZ gespeichert. Durch diese Datenstruktur ist es jederzeit möglich, die einzelnen Grundkörper zusammengesetzter Objekte zu bearbeiten. Es kann daher mit dem Befehl SOLPRI MÄND auf die einzelnen Grundkörper zugegriffen und ihre Größe und Lage im Raum verändert werden. Damit ist es möglich, zum Beispiel ein Loch im Festkörper zu verkleinern oder zu verschieben, ohne daß der Gesamtkörper neu erstellt werden muß.



In der Version 13 wurde eine neue Datenstruktur eingeführt, die keinen CSG-Baum mehr mitführt. Es kann daher in einem erzeugten Festkörper nicht mehr auf die einzelnen Grundkörper zurückgegriffen werden, um diese eventuell zu editieren.

Über die Datenstruktur der Version 13 fand ich derzeit noch keine Informationen, wie das folgende Beispiel bei einem Quader zeigt:

```
Befehl : QUADER
Mittelpunkt/<Ecke des Quaders> <0,0,0>:
Länge: 5
Breite: 8
Höhe: 3
```

Die LISTE ergibt nur Information über einen Begrenzungsrahmen, der auf den Mittelpunkt des Objekts bezogen ist.

```
Befehl : LISTE
3DSOLID
Begrenzungsrahmen: Untere Begrenzung X = -2.5000 , Y = -4.0000 , Z = -1.5000
Obere Begrenzung X = 2.5000 , Y = 4.0000 , Z = 1.5000
```

Versucht man die Datenstruktur anhand der DXF-Datei (drawing exchange format, ein von AutoCAD definierter Standard zum Austausch von Zeichnungen mit anderen Programmen) zu ergründen, findet man in der Originaldokumentation keinerlei Hinweise. Die Logik der Beschreibung des Objektes ist ohne Erklärung -wie aus diesem Beispiel ersichtlich- nicht erkennbar.

```
ENTITIES
0
3DSOLID
5
5C
100
AcDbEntity
8
0
100
AcDbModelerGeometry
70
1
1
noj gjn o
1
=0; & {rn {n {rn {rn |
1
3*2/ {rn {rn {m {o |
1
,7:33 {rn {rn {rn {l {n |
1
9><: {rn {k {j {m {rn {i 90->-; ,6183: |
1
9><: {rn {h {g {m {rn {f -:; ,6183: |
1
300/ {rn {rn {no {l |
1
```

usf

Texturen

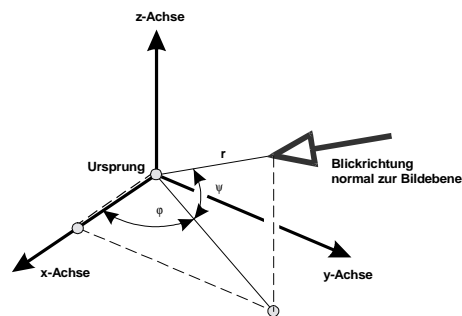
Texturen sind Beschreibungen der Oberfläche von 3D-Objekten. Es kann dabei jeder einzelnen Fläche im einfachsten Fall eine Farbe, im aufwendigsten Fall eine räumliche Oberflächenstruktur mitgegeben werden (z.B. muschelig gebrochener Kalk). Ihre Angabe verändert die Geometrie überhaupt nicht, sondern beeinflusst nur das Aussehen des dargestellten Objektes.

Abbildung der 3D Objekte

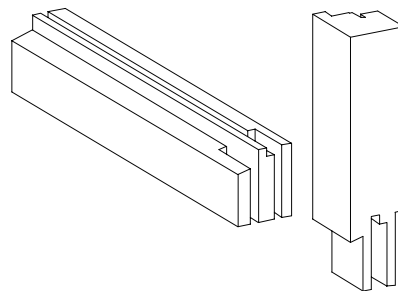
Die Abbildung von 3D-Objekten ist jener Teil einer CAD-Software, bei der für den Laien ein Bild auf Knopfdruck entsteht. Wenn ein Objekt einmal generiert ist, dann ermöglicht es AutoCAD, die Objekte mit 2 verschiedenen Abbildungsverfahren darzustellen.

Normalrisse - Axonometrie

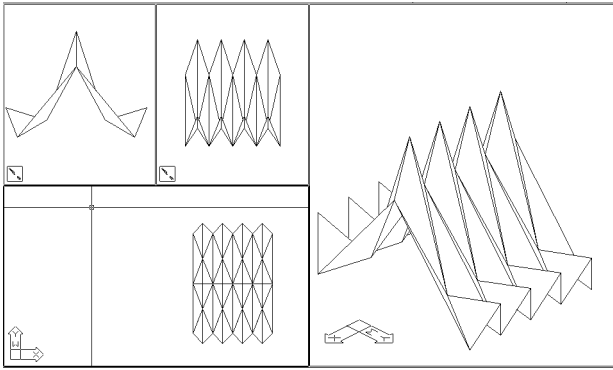
Mit dem Befehl APUNKT kann die Blickrichtung einer Normalprojektion festgelegt werden. Dabei wird die Blickrichtung entweder durch einen Raumpunkt festgelegt (der mit dem Koordinatenursprung die Richtung bestimmt) oder durch einen Längswinkel ϕ und einen Höhenwinkel ψ festgelegt.



```
Befehl : APUNKT
Drehen/<Ansi chtspunkt><1,1,0>: D
Winkel i in der XY-Ebene von der X-Achse aus eingeben
<45>: 30
Winkel von der XY-Ebene eingeben <0>: 35
```

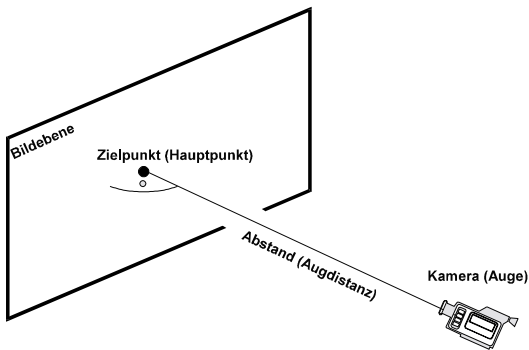


Für einen Grundriß verwendet man den Befehl DRISICHT. Einen Aufriß erhält man, wenn man den Augpunkt mit (1,0,0) wählt, einen Kreuzriß mit (0,1,0). Die einzelnen Risse, die in verschiedenen Fenstern dargestellt werden können, besitzen im Gegensatz zur traditionellen Darstellenden Geometrie keine Ordner.

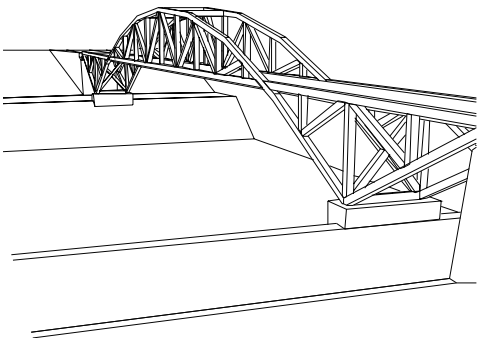


Perspektive

Perspektive Abbildungen von 3D-Objekten werden mit dem Befehl **DANSICHT** erzeugt. Sinnvollerweise wählt man dabei mit der Option **PUNKTE** zuerst einen Zielpunkt, auf den das Auge bzw. die Kamera blickt, und einen Kamerastandpunkt. Durch diese Angabe ist der Hauptsehstrahl (jener Sehstrahl, der zur Bildebene normal steht) bestimmt. Mit der Option **ABSTAND** wird die Kamera entlang des Hauptsehstrahles bewegt, gleichzeitig wird auf die perspektive Abbildung umgeschaltet. Die restlichen Optionen ermöglichen eine Feineinstellung der Abbildung.

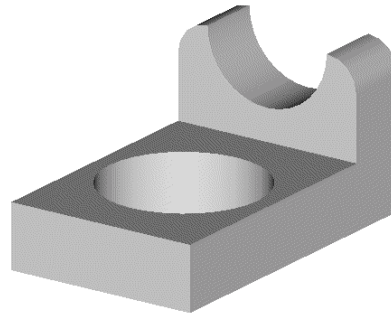


Wenn ein Objekt in der Perspektive dargestellt ist, kann in diesem Bild nicht mehr konstruiert werden. Es dient nur zur anschaulichen Ansicht des Objekts.



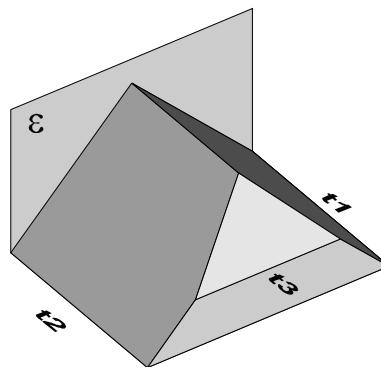
Rendering

Unter Rendering versteht man die Möglichkeit, relativ wirklichkeitsgetreue (fotorealistische) Bilder zu erzeugen. Dazu muß man den 3D-Objekten Texturen (Farben, Muster..) zuweisen. Zur Beleuchtung können im Raum geeignete Lichtquellen platziert werden. Für die Darstellung wird aus diesen Daten für jeden Bildpunkt pixelweise die Farbinformation errechnet. Es wird der Farbwert einer Fläche abhängig vom Lichteinfall und von der Oberflächenstruktur (glänzend, matt) berechnet. Mit einer Option kann auch das „Glattschattieren“ von Netzen aktiviert werden. Krumme Flächen erscheinen dann glatt, ohne daß man die Netzstruktur erkennt. Schatten werden aber nicht berechnet, dazu sind Raytracing Algorithmen notwendig.



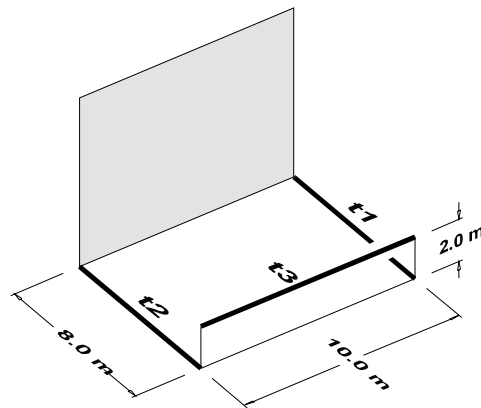
Konstruieren in 3D

Das folgende Beispiel soll exemplarisch zeigen, welche verschiedenen geometrischen Lösungsansätze möglich sind, um ein kleines Detail einer Körpergenerierung zu lösen, nämlich die Schnittgerade zweier Ebenen. Dieses Beispiel kommt eigentlich in allen Fachgebieten vor, die mit 3D-Objekten arbeiten; es könnte sich z.B. um einen Ausschnitt einer Dachausmittlung oder um einen Teil eines Maschinenteils handeln.



**Dachneigung längs t1 und t2 = 50°
längs t3 = 60°**

Als Beispiels will ich eine Dachausmittlung wählen. Es soll durch die Traufen t1, und t2 je eine Dachfläche mit der Neigung 50° gelegt und durch die um 2 m höher liegende Traufe t3 ein Walm mit 60°. Die Dachflächen sollen bis zu einer bestehenden Wand ϵ reichen.



Die beschriebenen Lösungsstrategien sollen eher die Vielfalt der Methoden zeigen, die angewandt werden können, und nicht die schnellste Möglichkeit für das vorgegebene Raumproblem sein. Man kann in den folgenden Lösungsmethoden erkennen, daß wesentliche Unterschiede bei der Generierung eines Drahtmodells oder eines Volumsmodells auftreten. Das Flächenmodell kann eher als eine Vervollständigung eines Drahtmodells aufgefaßt werden.

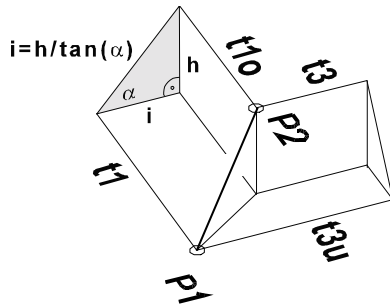
Drahtmodell

Im Drahtmodell muß man alle Kanten des zu konstruierenden Objekts selbständig konstruieren. Dazu sind von den Lösungsstrategien der Konstruktiven Geometrie jene auszuwählen, die

mit den Werkzeugen des verwendeten CAD-Programmes realisiert werden können.

Methoden der kotierten Projektion

Um die Schnittgerade zweier Ebenen ϵ_1 und ϵ_3 zu konstruieren, verwendet man zwei (meist waagrechte) Schichtenebenen. Eine Schichtenebene schneidet die Ebenen ϵ_1 und ϵ_3 längs zweier Schichtenlinien, die sich in einem Punkt der gesuchten Schnittgerade schneiden.



In unserem Beispiel wird die Schichtenlinie t_{3u} der Walmebene ϵ_3 in der Traufenebene mit einem traditionellen Seitenriß gezeichnet. Man zeichnet sich eine Basislinie ein und trägt mit

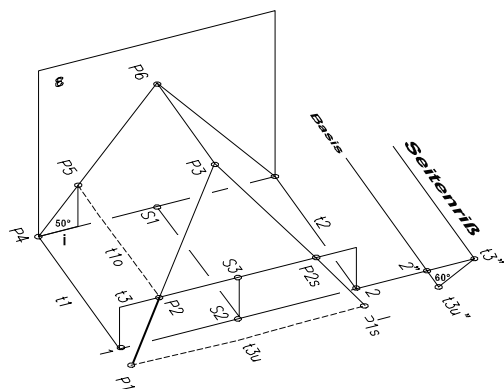
```
Befehl: VERSETZ
Abstand oder durch Punkt <>: 2
Objekt wählen, das versetzt werden soll: Basislinie
```

die Höhe der Schichtenebene auf $\Rightarrow t_{3u}$. Die Dachneigung von 60° kann nun im Seitenriß in wahrer Größe aufgetragen werden.

```
Befehl: LINIE
Von Punkt: t3u
Nach Punkt: @3<-60
```

Durch ABRUNDEN dieser Geraden mit der Basislinie erhält man den Seitenriß t_{3u} der Schichtenlinie des Walmdachs in der Traufenebene. Die Schichtenlinie t_{3u} konstruiert man mit VERSETZ, wobei der Abstand aus dem Seitenriß abgenommen werden kann.

```
Befehl: VERSETZ
Abstand oder durch Punkt <2.0000>: t3u
Zweiter Punkt: 2
```



Die Schichtenlinie der Dachfläche längs t_1 in der Höhe 2m $\Rightarrow t_{10}$ kann man auch mit dem in AutoCAD integrierten „geometric calculator“ lösen. Dazu berechnet man zuerst den Schiebvektor, um den die Traufe t_1 verschoben (genauer kopiert) werden soll.

```
Befehl: CAL
Startet... >> Ausdruck: v=[0, 2/tang(50), 2]
(0.0 1.6782 2.0)
```

```
Befehl: KOPIEREN
Objekte wählen: t1
<Basispunkt oder Verschiebung>/Mehrfach: 'cal
>> Ausdruck: v
Zweiter Punkt der Verschiebung: <RET>
```

Damit ist die Schnittgerade durch die Punkte P_1 und P_2 bestimmt.

```
Befehl: LINIE
Von Punkt: P1
Nach Punkt: P2
```

In ϵ erhält man mit P_4 und P_5 die Fallgerade (Sparrenrichtung).

```
Befehl: LINIE
Von Punkt: P4
Nach Punkt: P5
```

Damit sind die wesentlichen Konstruktionsschritte für dieses Beispiel schon abgeschlossen. Die Kanten der Dachflächen können nun mit SP1 EGELN und ABRUNDEN erzeugt werden.

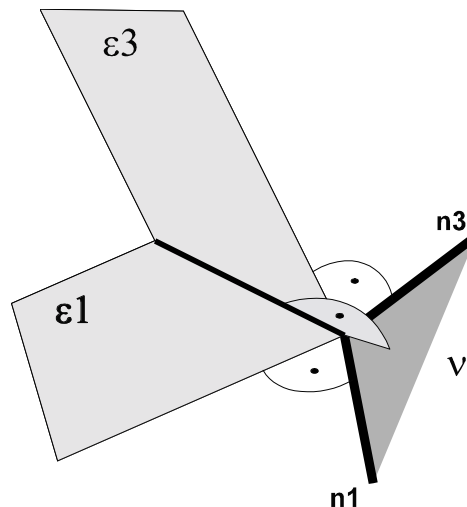
```
Befehl: 3DSPIEGELN
Objekte wählen: (P1, P2)
Objekte wählen: (P1s, P2s)
Ebene von Objekt/Letztes/Z-Achse/Ansi cht/XY/YZ/ZX/<3Punkte>: 3P
S1, S2, S3
```

```
Befehl: ABRUNDEN
Gegenwärtiger Abrundungsradius = 0.0000
Polylinie/Radius/Stutzen/<erstes Objekt wählen>: (P1, P2)
Zweites Objekt wählen: (P1s, P2s)
```

Analog funktioniert es für die Schnittgeraden in der Ebene ϵ . Durch STUTZEN und LÖSCHEN der unnötigen Kanten und Hilfsgeraden findet man unschwer das Endergebnis.

Normalvektoren

Der Lösungsansatz liegt in der geometrischen Eigenschaft, daß die Schnittgerade zweier Ebenen ϵ_1 und ϵ_3 rechtwinkelig zu einer Ebene v steht, die von den Normalgeraden n_1 und n_3 der Ebenen aufgespannt wird.

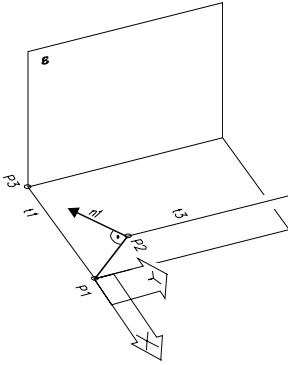


Es sind daher in diesem Beispiel die beiden auf die Ebenen ϵ_1 und ϵ_3 normalen Ebenennormalen n_1 und n_3 zu konstruieren. Ich will dies für jede Ebene mit einem anderen Lösungsansatz machen.

Zur Konstruktion der Ebenennormale n_1 ist zuerst ein Punkt der Schnittgerade anzugeben. Dazu bietet sich in diesem Beispiel der Punkt P_2 auf der Traufe t_3 an, durch den beide Dachflächen hindurchgehen. Dies kann man einfach dadurch erreichen, daß man im Punkt P_1 die Fallgerade der Ebene ϵ_1 zeichnet und diese mit t_3 schneidet. Um Raumgeraden mit gegebenem Neigungswinkel zu zeichnen, verwendet man am besten Kugelkoordinaten.

```
Befehl: LINIE
Von Punkt: P1
Nach Punkt: @4<90<50
```

```
Befehl: ABRUNDEN
Gegenwärtiger Abrundungsradius = 0.0000
Polylinie/Radius/Stutzen/<erstes Objekt wählen>: (P1, P2)
Zweites Objekt wählen: t3
```



Zur Bestimmung der Normalgeraden n_1 kann man wieder den geometric calculator verwenden. Er berechnet einen Normalvektor nv_1 auf die Ebene ϵ_1 durch die Angabe dreier Punkte dieser Ebene in der Zeichnung.

```

Befehl: CAL
Startet...
>> Ausdruck: nv1=nor(end, end, end)
>> Wählen Sie ein Objekt für den END Fang: P1
>> Wählen Sie ein Objekt für den END Fang: P2
>> Wählen Sie ein Objekt für den END Fang: P3
(0.0 -0.766044 0.642788)
    
```

Nun kann der Normalvektor n_1 mit der Länge 4 einfach durch den Term $@+4*nv_1$ gezeichnet werden, wobei @ in AutoCAD immer den Ortsvektor des zuletzt markierten Punktes symbolisiert.

```

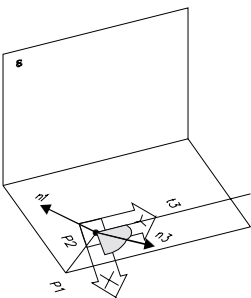
Befehl: LINIE
Von Punkt: P2
Nach Punkt: 'CAL
>> Ausdruck: @+4*nv1
    
```

Die Normalgerade n_3 auf die Ebene ϵ_3 will ich durch geeignete Bewegung des Benutzerkoordinatensystems (BKS) konstruieren. Dazu soll zuerst das Koordinatensystem parallel so verschoben werden, daß der Punkt P_2 der Koordinatenursprung ist.

```

Befehl: BKS
Ursprung/zAchse/3Punkt/Objekt/ANSicht/X/Y/Z/Vorher/Holen/Sichern/Löschen?/Wel t>: U
Ursprung <0, 0, 0>: P2
    
```

Dadurch liegt die Traufe t_3 in der y-Achse des BKS. Es kann nun die [x,y]-Ebene des BKS durch eine Drehung um die y-Achse um 60° in die Walmebene ϵ_3 gelegt werden. Eine Linie genau in z-Richtung dieses BKS gibt eine Normalgerade n_3 von ϵ_3 an.



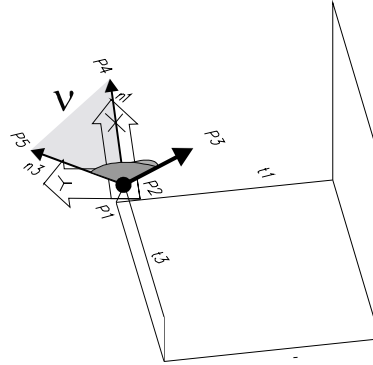
```

Befehl: BKS
Ursprung/zAchse/3Punkt/Objekt/ANSicht/X/Y/Z/Vorher/Holen/Sichern/Löschen?/Wel t>: Y
Drehwinkel um Y Achse <0>: 60
    
```

```

Befehl: LINIE
Von Punkt: 0,0,0
Nach Punkt: 0,0,4
    
```

Durch die Normalgeraden n_1 und n_3 ist nun die Normalebene v zur Schnittgeraden festgelegt. Man geht analog vor, d.h. man legt das BKS in diese Ebene, indem man den Koordinatenursprung, einen beliebigen Punkt der x-Achse und einen beliebigen Punkt der positiven y-Halbebene wählt. Die Schnittgerade ist dann durch die z-Achse dieses BKS bestimmt.



```

Befehl: BKS
Ursprung/zAchse/3Punkt/Objekt/ANSicht/X/Y/Z/Vorher/Holen/Sichern/Löschen?/Wel t>: 3P
Ursprung <0, 0, 0>: P2
Punkt auf der positiven X-Achse <>: P4
Punkt mit positiven Y-Wert in der XY-Ebene des BKS <>: P5
    
```

```

Befehl: LINIE
Von Punkt: 0,0,0
Nach Punkt: 0,0,5
    
```

Die Vervollständigung des Walmdaches erfolgt analog wie beim ersten Beispiel. Man spiegelt die Schnittgerade an der Symmetrieebene (S_1, S_2, S_3) und bestimmt den Firstpunkt durch ABRUNDEN.

Die Firstlinie erhält man z.B. mit KOPIEREN der Traufe t_1 durch P_3 . Den Schnittpunkt von t_1 mit der Ebene ϵ kann man mit dem Befehl STUTZEN bestimmen. Dazu muß aber die Ebene ϵ projizierend dargestellt werden (ϵ ist genau genommen ein 2½D-Objekt <LINIE>, damit meint man ein 2D-Objekt, das eine Objekthöhe in z-Richtung besitzt). Dies erfolgt durch einen Grundriß, eine DRAUFSICHT auf die Traufenebene. In dieser Ansicht kann mit STUTZEN der Schnittpunkt P_6 des Firstes mit ϵ ermittelt werden.

Hilfsprogramme

Mit AutoLISP ist es möglich, eigene Programm-Module unter AutoCAD zu erstellen, die den Befehlsumfang vergrößern. In diesem Beispiel habe ich ein einfaches Programm zur Ermittlung der Schnittgerade zweier Ebenen erstellt. Das Programm verwendet die Funktion IPL (Intersection line plane) des geometric calculators, die den Schnittpunkt einer Geraden mit einer Ebene ermittelt. Anhand des Kommentars im folgenden Programm kann man den Ablauf leicht nachvollziehen.

```

-----
; <<< SCHNITT.LSP >>>
-----
; E1, E2, E3 3 Punkte der ersten Ebene
; GS, GE 2 Punkte einer Geraden der zweiten Ebene
; HS, HE 2 Punkte einer anderen Geraden der zweiten Ebene
-----
; Definition der Funktion SG und der lokalen Parameter
;
(defun C:SG (/ E1 E2 E3 GS GE HS HE S1 S2)
; Objektfang ENDPUNKT einschalten
;
(setvar "OSMODE" 1)
; Ausgabe eines Kommentars prompt ( \n bewirkt einen Zeilenvorschub)
;
(prompt "\nFestlegung der Ebene:")
;
; getpoint gibt einen Kommentar in der Befehlszeile aus und wartet
; auf eine Punkteingabe des users.
; setq speichert die durch getpoint übergebene Koordinatenliste in die angegebene Variablen.
;
(setq E1 (getpoint "\nErster Punkt: ")
E2 (getpoint "\nZweiter Punkt: ")
E3 (getpoint "\nDritter Punkt: "))
;
; Analog für die beiden Geraden
;
(prompt "\n1. Gerade aus der zweiten Ebene:")
(setq GS (getpoint "\nErster Punkt: ")
GE (getpoint "\nZweiter Punkt: "))
(prompt "\n2. Gerade aus der zweiten Ebene:")
    
```

```
(setq HS (getpoint "\nErster Punkt :")
HE (getpoint "\nZweiter Punkt:"))
; Objektfang wieder ausschalten
(setvar "OSMODE" 0)
; cal ruft den geometric calculator auf und berechnet den
; Schnittpunkt der Geraden (GS,GE) mit der Ebene
(E1,E2,E3)
;setq speichert die Liste der Schnittpunktskoordinaten in S1
(setq S1 (cal "ilp(GS,GE,E1,E2,E3)"))
(setq S2 (cal "ilp(HS,HE,E1,E2,E3)"))
; Kontrollausdruck der Schnittpunktskoordinaten
(prompt "\n Koordinaten der Schnittpunkte S1 und S2 \n")
(prin1 S1)
(prin1 S2)
; Es wird der AutoCAD Befehl LINIE aufgerufen und die Punkte
; S1, S2
; und <RET> als Parameter übergeben
(COMMAND "LINIE" S1 S2 "")
; Ende der Funktion
)
```

Man bestimmt zuerst die beiden Ebenen durch ihre Traufen t1 und t3 und ihre Fallgeraden f1 und f3

```
Befehl: LINIE
Von Punkt:
Nach Punkt: @6<90<50
Befehl: LINIE
Von Punkt: MIT
Nach Punkt: @6<180<60
```

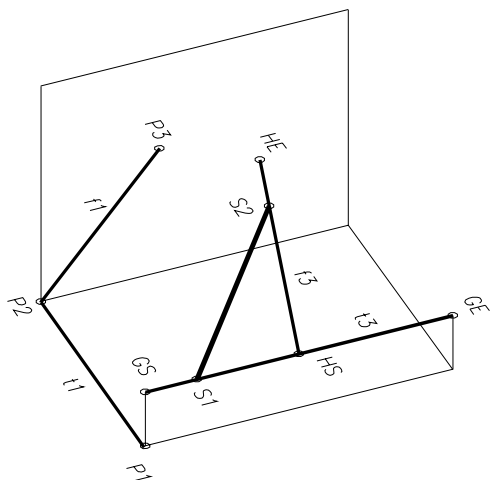
Zur Lösung unserer Aufgabe muß zuerst das LISP-Programm geladen werden:

```
Befehl: (LOAD "schni tt")
C: SG
```

Nun kann die Funktion SG verwendet werden.

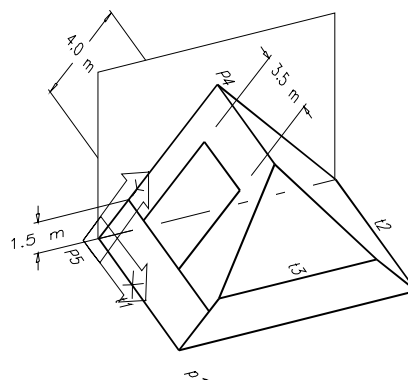
```
Befehl: SG
Festlegung der Ebene:
Erster Punkt: P1
Zweiter Punkt: P2
Dritter Punkt: P3
1. Gerade aus der zweiten Ebene:
Erster Punkt: GS
Zweiter Punkt: GE
2. Gerade aus der zweiten Ebene:
Erster Punkt: HS
Zweiter Punkt: HE
Koordinaten der Schnittpunkte S1 und S2
(8.0 1.6782 2.0) (5.7144 5.0 5.95877)
LINIE Von Punkt:
Nach Punkt:
Nach Punkt:
Befehl:
```

Somit ist die Schnittgerade (S1, S2) der beiden Ebenen gezeichnet, und das Beispiel kann nun leicht fertiggezeichnet werden.

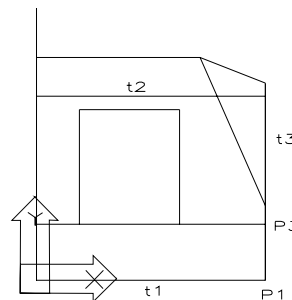


Flächenmodell

Um das Aufspannen der Flächenstücke zu zeigen, will ich vorerst in eine Dachfläche ein Dachflächenfenster mit der Brüstungshöhe 1.5m und den Maßen 3,5m x 4 m einzeichnen.



Dazu legt man zuerst die Brüstungshöhe fest, indem man in ϵ eine Strecke in der Höhe 1.5m zeichnet. Anschließend kann die Brüstungslinie in der Dachfläche durch Kopieren der Traufe festgelegt werden. Wenn es nun gilt, die wahre Größe der Dachfläche zu bestimmen, um das Fenster in den Originalmaßen einzeichnen zu können, muß man nur das Benutzerkoordinatensystem so legen, daß die [x,y] Ebene in in der Dachfläche liegt und eine Draufsicht darauf gewählt wird.



DRAUFSICHT
auf die Dachfläche
=
wahre Größe

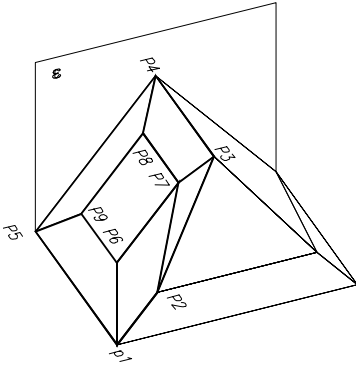
Als Flächenstücke können nun geeignete drei- bzw. viereckige Umrandungen eingezeichnet werden. Der Konstrukteur hat selbst dafür zu sorgen, daß viereckige Flächenstücke auch ebenflächig sind. Der Dialog für diese Flächenstücke ist so aufgebaut, daß nach vier gewählten Eckpunkten die letzten 2 Punkte als die Basisstrecke (Punkte 1 und 2) für ein neues Viereck verwendet werden. Wird nur ein Dreieck gezeichnet, ist der vierte Punkt nur mit Return zu bestätigen.

Aufspannen der Ebenenstücke

Um nun 3D-Flächen auf das Drahtmodell aufzuspannen, wählt man zuerst einen geeigneten permanenten Objektfang

```
Befehl: OFANG
Objektfang-Modi: END
```

Bei der Eingabe der Vierecke ist zu beachten, daß sich der Umlaufsinn der Punkteingabe zweier Vierecke mit einer gemeinsamen Kante umdrehen muß.

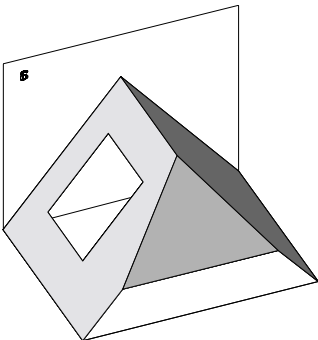


Befehl: **3DFLÄCHE**
 Erster Punkt: **P2**
 Zweiter Punkt: **P7**
 Dritter Punkt: **P6**
 Viertes Punkt: **P1**
 Dritter Punkt: **P5**
 Viertes Punkt: **P9**
 Dritter Punkt: **P8**
 Viertes Punkt: **P4**
 Dritter Punkt: **P3**
 Viertes Punkt: **P7**
 Dritter Punkt: **P2**
 Viertes Punkt: **<RET>**
 Dritter Punkt: **<RET>**

Um die nicht sichtbaren Kanten auszublenden, kann EDGE verwendet werden. Es müssen nur jene Kanten ausgewählt werden, die nicht dargestellt werden sollen.

Befehl: **EDGE**
 Startet...
 Anzeigen/<Kante auswählen>: **(P1, P6)**
 Anzeigen/<Kante auswählen>: **(P2, P7)**
 Anzeigen/<Kante auswählen>: **(P3, P7)**
 Anzeigen/<Kante auswählen>: **(P4, P8)**
 Anzeigen/<Kante auswählen>: **(P5, P9)**

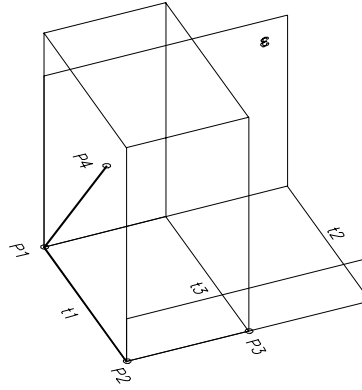
Der Befehl VERDECKT liefert abschließend ein anschauliches Bild, bei dem man erkennt, daß man durch das Fenster in das Innere des Objekts sehen kann.



Volumenmodell

Wenn man einen Festkörper generiert, muß man in einem grundsätzlich anderen geometrischen Modell arbeiten, da für die Manipulation der 3D-Objekte andere Methoden zur Verfügung stehen. Es muß der Körper aus den vorhandenen Grundkörpern aufgebaut werden, die im wesentlichen durch die Operationen KAPPEN, VEREINIG, SCHNITTMENGE und DIFFERENZ erzeugt werden.

Zuerst wird man eine Dachhälfte aus einem Quader erzeugen, bei dem die Dachfläche durch Abschneiden (KAPPEN) mit der Ebene (t1, P4) erzeugt wird.

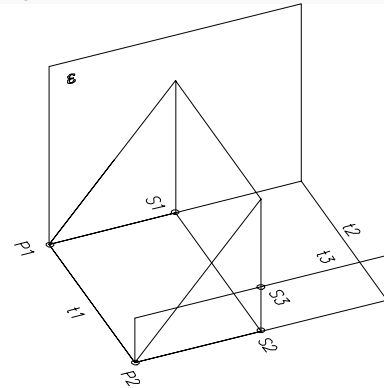


Befehl: **QUADER**
 Mittelpunkt/<Ecke des Quaders> <0,0,0>: **P1**
 Würfel/Länge/<Andere Ecke>: **MIT** von **(t3)**
 Höhe: **10**

Befehl: **LINIE**
 Von Punkt: **P1**
 Nach Punkt: **@4<90<50**

Durch die Punkte (P1 P2 P4) ist die Dachebene aufgespannt und kann nun im Befehl KAPPEN angegeben werden

Befehl: **KAPPEN**
 Objekte wählen: **Quader auswählen**
 Objekte wählen: **Kappebene** von
 Objekt/ZAchse/Ansicht/XY/YZ/ZX/<3Punkte>: **3P**
 Erster Punkt auf Ebene: **P1**
 Zweiter Punkt auf Ebene: **P2**
 Dritter Punkt auf Ebene: **P4**
 Beide Seiten/<Punkt auf der gewünschten Seite der Ebene>: **P3**

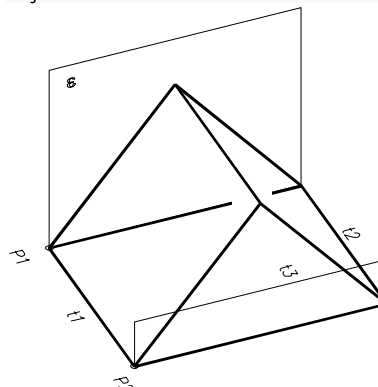


Durch Spiegeln an der Ebene (S1, S2, S3) erhält man die Dachfläche ohne Walm, die derzeit noch aus zwei Objekten zusammengesetzt ist.

Befehl: **3DSPIEGELN**
 Objekte wählen: **Kei1**
 Ebene von Objekt/Letztes/Z-Achse/Ansicht/XY/YZ/ZX/<3Punkte>: **3P**
 Erster Punkt auf der Ebene: **S1**
 Zweiter Punkt auf der Ebene: **S2**
 Dritter Punkt auf der Ebene: **S3**

Vereinigt man nun beide Objekte, so entsteht ein Dachobjekt.

Befehl: **VEREINIG**
 Objekte wählen: **1. Kei1**
 Objekte wählen: **2. Kei1**

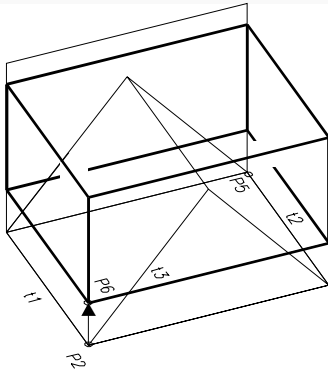


Den Walm kann man nun analog abschneiden, indem man eine Fallgerade der Walmfläche festlegt und KAPPEN für diese Ebene anwendet.

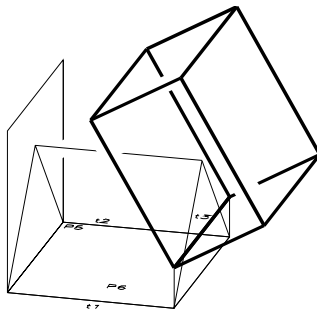
Die Walmfläche entsteht aber auch als Differenz des Dachobjekts mit einem geeigneten Quader im Raum, bei dem eine Seitenfläche des Quaders die Walmebene darstellt.

Man erzeugt daher einen geeigneten großen Quader und bringt ihn durch VERSCHIEBEN und 3D-DREHEN in die geforderte Raumlage. Mit einer DIFFERENZ (Dachfläche - Quader) wird das Walmdach abschließend generiert.

Befehl: **QUADER**
 Mittelpunkt/<Ecke des Quaders> <0,0,0>: **P4**
 Würfel /Länge/<Andere Ecke>: **P5**
 Höhe: **5**

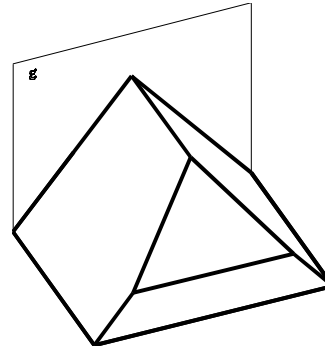


Befehl: **SCHIEBEN**
 Objekte wählen: **Quader**
 Objekte wählen: Basispunkt oder Verschiebung: **P2**
 Zweiter Punkt der Verschiebung: **P6**
 Befehl: **3DDREHEN**
 Objekte wählen: **Quader**
 Achse von Objekt/Letztes/Ansicht/X-Achse/Y-Achse/Z-Achse/<2Punkte>: **2P**
 Ersterer Achsenpunkt: **P6**
 Zweiter Achsenpunkt: **END von t3**
 <Drehwinkel>/Bezug: **60**



Befehl: **DIFFERENZ**
 Festkörper und Regionen, von denen subtrahiert werden soll, wählen...
 Objekte wählen: **Dachobjekt**
 Objekte wählen: Festkörper und Regionen für Subtraktion wählen...

Objekte wählen: **Quader**



Damit ist ein Objekt „Walmdach“ entstanden.

Schlußbemerkung

Ich hoffe, daß ich mit diesem einfachen Beispiel zeigen konnte, daß komplexere Raumobjekte nicht so einfach durch Knopfdruck entstehen, wie uns die Werbung vorgaukelt und wie leider auch viele glauben. Meist kommt diese Ansicht von Personen, die nur eine Vorführung eines CAD-Paketes erlebt, aber noch nicht konkret im Raum modelliert haben.

Wenn ein Objekt einmal generiert ist, dann ist es mit dem Programm wirklich fast auf Knopfdruck möglich, geeignete Ansichten (Risse, axonometrische Bilder oder Perspektiven) inklusive Sichtbarkeit usf. zu erzeugen. Die wesentliche Arbeit liegt aber in der Erstellung des Objekts.

Das Werkzeug hat sich aber gegenüber den traditionellen Konstruktionsmethode verändert. Es wird in einem 3D-Programm nicht mehr in Grund-, Auf- und Seitenrissen konstruiert, sondern direkt im Raum. Das Datenmodell beschreibt ja die Raumgeometrie der Objekte, die Darstellung übernimmt das CAD-Programm. Dadurch ergibt sich für den Konstrukteur die Notwendigkeit, mit den Methoden (Befehlen) des CAD-Programms geeignete Lösungsstrategien zu finden. Diese Lösungsalgorithmen werden in der Darstellenden Geometrie angeboten, es müssen nur jene geeigneten konstruktiven Algorithmen ausgewählt werden, die mit den Befehlen des CAD-Programmes realisiert werden können.

Jeder, der schon größere Objekte entworfen hat kennt die Probleme, sich in den vielen Linien am -im Gegensatz zu einem Plan- kleinen Bildschirm zurechtzufinden. Weiters kommt das Problem dazu, daß man durch die Möglichkeiten des Zoomens das Gefühl für einen Maßstab verliert. Ein sehr gutes Raumvorstellungsvermögen ist daher notwendig um sich in seinem Projekt zurechtzufinden.

Es gibt etliche Arbeitserleichterungen beim Einsatz von CAD-Paketen im Vergleich zur herkömmlichen Geometrie, das kreative Raumdenken mit fundierten Kenntnissen der Konstruktiven Geometrie ist aber Voraussetzung für die praktische Arbeit. □