

Besonderer Dank geht an Hammax, der komplett den ersten Teil übersetzt hat.

## Umgang mit dem Sketcher

*Dieses Tutorial wurde für FreeCAD 0.18 verfasst. Tests erfolgten unter 0.18.13976 aufwärts. Die hier beschriebenen Vorgehensweisen werden in älteren Versionen nicht notwendigerweise unterstützt.*

Im Sketcher erstellte Zeichnungen dienen oft als Basis für PartDesign und Part-Objekte. In diesem Skript wird dargestellt, wie man ein Sketcher-Objekt erstellt und wie die diversen Geometrieelemente sowie die zugehörigen Constraints gehandhabt werden.

Vor dem Durcharbeiten des Skriptes sollte man sich mit der Erstellung eines FC-Dokuments, den Eigenheiten der Workbenches und deren Arbeitsweise vertraut machen. Die Darstellung des Modells im Strukturbaum und das Arbeiten in der 2D- und 3D-Umgebung (GUI) sollten ebenfalls beherrscht werden.

### Teil I


## Grundlagen

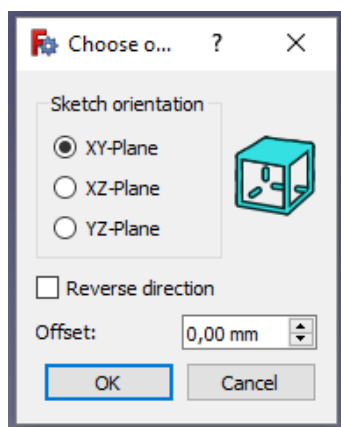
### 1 Sketch-Erstellung

Es gibt zwei mögliche Vorgehensweisen um ein Sketch zu erstellen.

#### 1.1 Sketch erzeugen in der Sketcher-Workbench

In der Sketcher-Workbench kann man einen Sketch im Menu Sketch erzeugen:

Sketcher→Erzeuge Sketch, aber man wählt wohl eher das Icon . Darauf wird man nach der Ausrichtung des Sketch gefragt:



Man kann hier zunächst die Zeichenebene auswählen.

Ein Haken auf "Reverse direction" legt die Skizze auf die Rückseite der gewählten Ebene als

würde man auf die Rückseite eines Papiers zeichnen.

Der Offset versetzt die Zeichenebene vorzeichenabhängig senkrecht zur Ebene.

Komplexere Positionierungen lassen sich darüber hinaus mit Placement ausführen

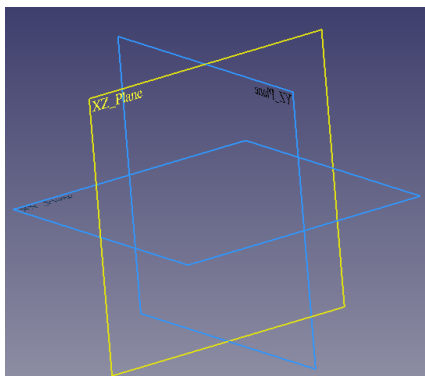
Ein Klick auf OK öffnet den Sketcher im Editiermodus, wir befinden uns jetzt im Sketcher.

## 1.2 Sketch erzeugen in der PartDesign-Workbench

In der PartDesign-Workbench gibt es auch das Icon , ein Klick hierauf erzeugt unterschiedliche Reaktionen:

- Wenn noch kein Body im Dokument existiert, wird ein neuer erzeugt, aktiviert und ein neuer Sketch darin geöffnet.
- Wenn ein bestehender Sketch ausgewählt wird, öffnet er sich im Edit Modus.
- Wenn nur ein Body im Dokument existiert und kein vorhandener Sketch selektiert wurde, wird der Body aktiviert und darin ein neuer Sketch angelegt.
- Wenn kein vorhandener Sketch gewählt wird, aber mehrere Bodys verfügbar sind, von denen einer selektiert ist, dann wird innerhalb dieses Bodys ein neuer Sketch angelegt.
- Ist bei mehreren vorhandenen Bodys keiner aktiviert und kein vorhandener Sketch ausgewählt, wird man aufgefordert einen Body zu aktivieren.
- Ist die Fläche eines existierenden PartDesign-Objekts in einem aktiven Body ausgewählt, bzw. es gibt nur einen aktiven Body, dann wird ein Sketch auf dieser Fläche angeheftet.
- Wird eine Fläche eines nicht-PartDesign-Objekts selektiert, z.B. ein Objekt, das in der PartWB erzeugt wurde, gibt es eine Fehlermeldung und nichts wird erzeugt.

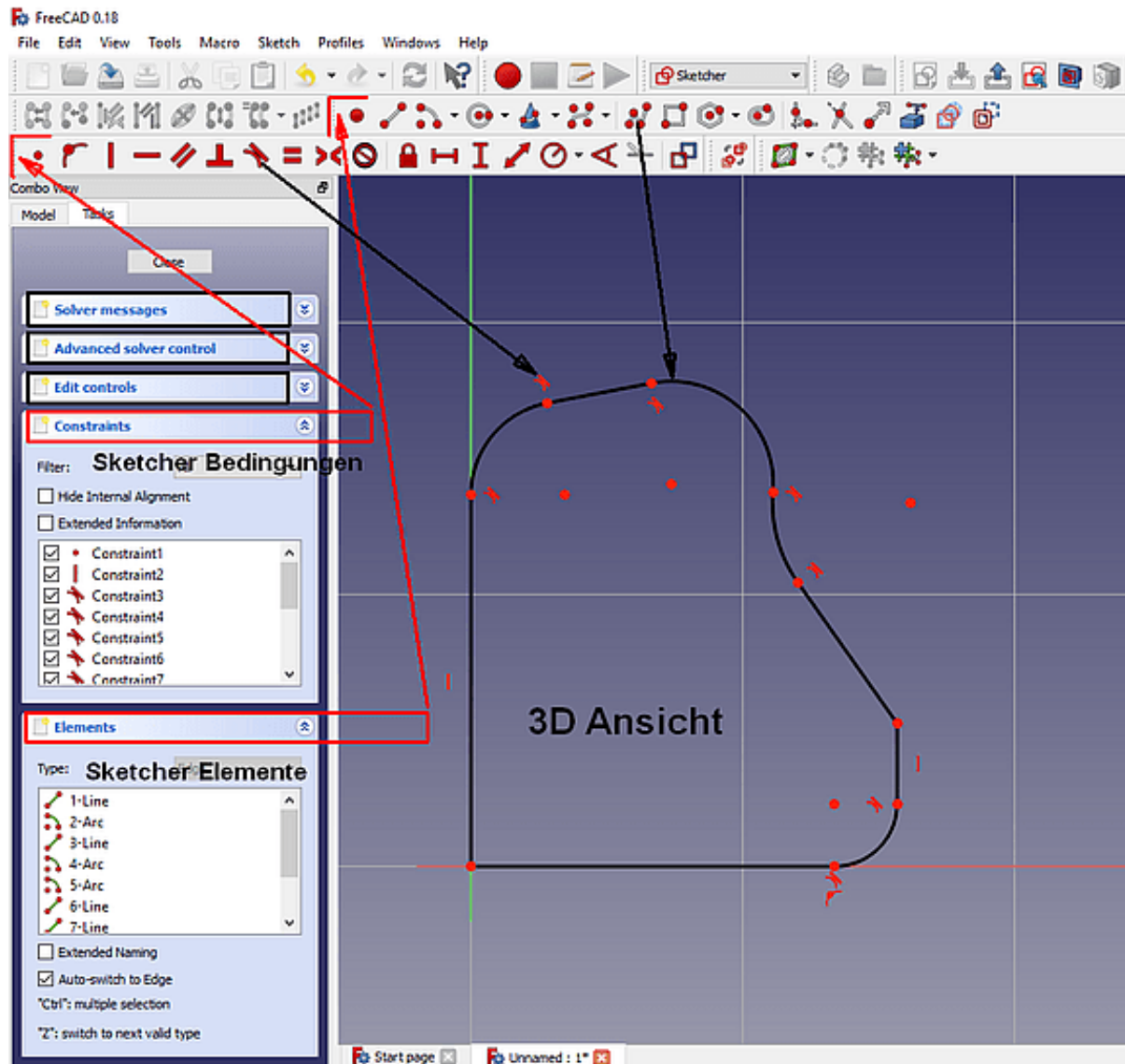
Beim Anlegen eines neuen Sketches in der PartDesign-Workbench muss ebenfalls dessen Orientierung gewählt werden. Man kann im Panel oder in der 3D-Ansicht eine der Hauptebenen bestimmen. Im Bild ist die XZ-Ebene vorgewählt.



In diesem frühen Status können die Checkboxes unberücksichtigt bleiben. Nach OK landet man im Sketcher.

## 2 Das Sketcher-Fenster

Es werden hier nicht alle Sketcher-Werkzeuge angesprochen. Aber ein kurzer Blick darauf kann helfen, die später besprochenen Features vorzustellen.



- 3D View  
Obwohl Sketches eigentlich nur 2D-Darstellungen sind, sprechen wir bei diesem Fenster von einer 3D-Ansicht. Hier können auch 3D-Objekte dargestellt sein. Verdecken diese die Sketcher Ebene, lassen sie sich auch ausblenden.
- Sketcher-Panel  
Der linke Bereich ist das Sketcher-Panel. Hier gibt es diverse Funktionsbereiche, die sich ausklappen oder minimieren lassen. Solver Messages, Advanced Solver Control, Edit Control, Constraints und Elements.
- Der Close Button  
Ganz oben angeordnet, mit ihm wird das Editieren im Sketcher beendet.

- Solver Messages  
Darunter sieht man das Fenster für die Solver Mitteilungen. Es ist sehr wichtig, da hier permanent relevante Meldungen zum aktuellen Zustand des Sketches erscheinen.
- Das Hilfsgitter  
Es lässt sich sichtbar/unsichtbar schalten und in der Maschenweite anpassen. Man kann am Gitter Punkte verankern, wenn der entsprechende Haken gesetzt ist. Dieser Snap ist aber nur vorläufiger Natur und muss durch Constraints fixiert werden.
- Liste der Constraints  
Hier ist eine spätere, ausführlichere Beschreibung erforderlich. Es wird empfohlen, das vorläufig so zu belassen: Filter All, "Hide Internal Alignment" aktiviert, "Extended Information" nicht aktiviert.
- Liste der Elemente  
Wird ebenfalls später ausführlich behandelt.

- Sketcher Geometriewerkzeuge

Sie dienen zur Erzeugung von Punkten, Linien, Kreisbögen, Kreisen und weiteren Geometrieelementen



- Sketcher Constraint-Werkzeuge

Bemaßung, Geometriebedingungen, Fixierungen, die eigentlich "hohe Kunst" im Umgang mit dem Sketcher.




### 3 Freiheitsgrade DoF (Degrees of Freedom)

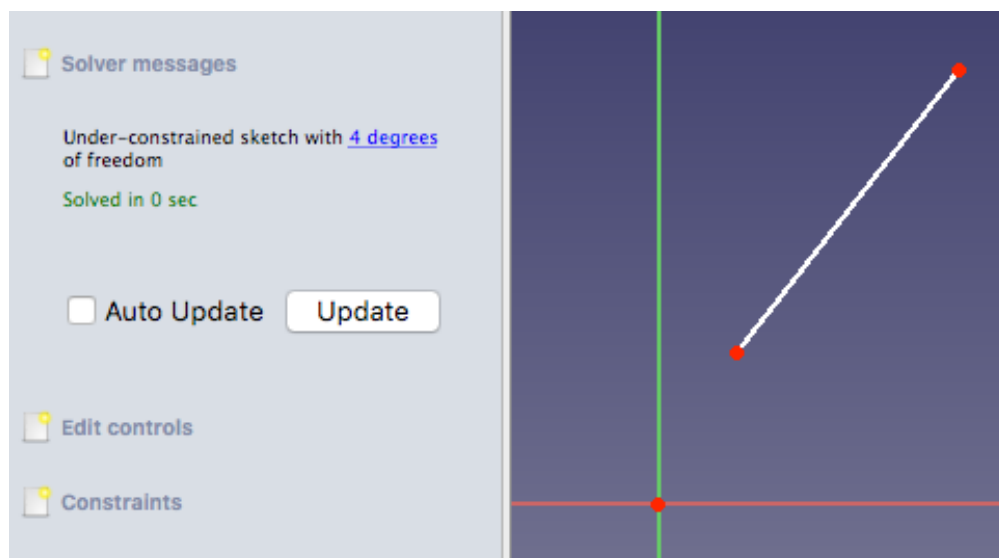
In einem Sketch werden Geometrieelemente wie Punkte, Linien, Bögen, Polygone, Splines usw. an gewünschten Positionen konstruiert, bemaßt und auch verbunden. Ziel ist es eine "parametrische" aber trotzdem "stabile" Konstruktion zu erhalten. Solange sich Elemente noch per Maus oder beeinflusst durch andere Elemente verschieben lassen, besitzt die Geometrie Freiheitsgrade (DoF). Die Anzahl dieser Freiheitsgrade wird jeweils im obersten Panelfenster unter Solver Messages aktuell angegeben. Es ist also die Zahl der noch fehlenden x-, y- oder Längen-, Durchmessermaße usw. die noch fehlen, bis die Geometrie stabil ist.

**Übung 1** *Ziehe eine diagonale Linie, deren Endpunkte weder auf der X- noch auf der Y-Achse liegen.*

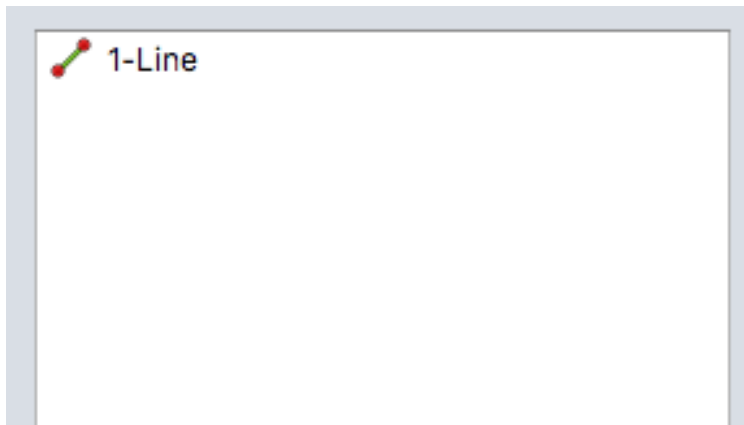
So wird's gemacht:

- Klicke auf das CreateLine-Icon .  
Man sieht jetzt neben dem Mauscursor ein kleines rotes Liniensymbol.
- Klicke auf die Position, wo der Startpunkt liegen soll.
- Bewege die Maus.
- Klicke auf die gewünschte Position des Endpunkts.
- Klicke die rechte Maustaste, um den Linienzug zu beenden. Dieses Verhalten kann unter Einstellungen→Skizze→Allgemein→Geometrie-Erstellung "Fortlaufender Modus" konfiguriert werden.

Die Solver-Mitteilung und die 3D-Ansicht sollten nun folgendermaßen aussehen:




Auf der rechten Seite sieht man in der 3D-Ansicht die Linie, links wird die Solver-Meldung über 4 Freiheitsgrade eingeblendet *4 degrees of freedom*.

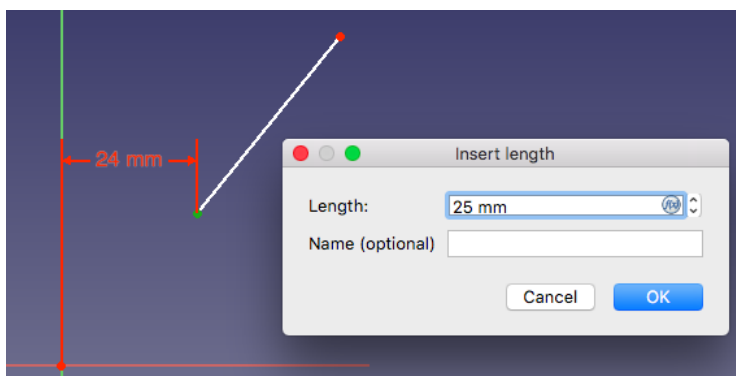


Momentan ist die Liste der Constraints noch leer. In der Liste der Elemente sieht man die soeben konstruierte Linie. Sobald man mit der Maus über ein Element fährt, wird es in der 3D-Ansicht gelb hervorgehoben.

## Übung 2 *Hinzufügen einer horizontalen Abstandsbeschränkung zum linken unteren Punkt.*

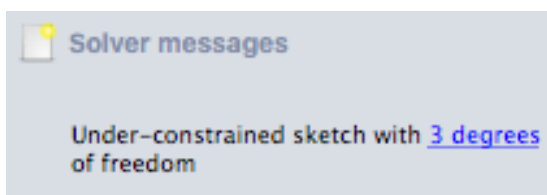
So wird's gemacht:

- Bewege den Mauscursor über den linken unteren Punkt bis er gelb aufleuchtet. Er ist jetzt in der Vorauswahl, d.h. man *kann* ihn auswählen.
- Nach einem linken Mausklick zum Auswählen des Punktes wird er dunkelgrün.
- Jetzt das Horizontaldistanz-Icon anklicken . Damit wird eine Längenbeschränkung zwischen dem Ursprung und dem gewählten Punkt gesetzt. Der vorgeschlagene Wert ist die aktuelle Distanz.
- Man kann nun den gewünschten Wert eintragen. Hier waren es 24mm, die auf 25mm geändert wurden.

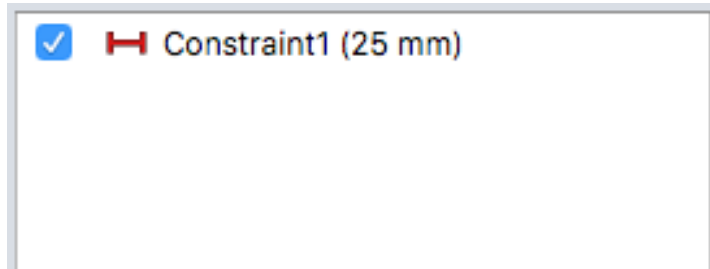


- Und mit OK bestätigen

Ein Blick auf die Solver-Meldungen zeigt, dass sich die Freiheitsgrade von 4 auf 3 reduziert haben.



Die Elementliste bleibt unverändert. Die Constraints-Liste enthält nun ebenfalls ein Element.



### Übung 3 *Hinzufügen einer vertikalen Abstandsbeschränkung zum linken unteren Punkt.*

So wird's gemacht:


Man führt die selben Schritte aus wie beim horizontalen Constraint. Allerdings wird jetzt das vertikale Distanz Constraint Icon gewählt **I**

Wie man sieht, wird durch das Hinzufügen einer weiteren Bedingung/Constraint der Freiheitsgrad/DOF auf 2 reduziert.

Diese einfachen Bedingungen verringern jeweils um einen Freiheitsgrad, aber es gibt ausgefeiltere Constraints, die 2 oder gar 3 DOF wegnehmen. Hier ein weiteres Beispiel.

### Übung 4 *Man füge eine Koinzidenz zwischen dem rechten oberen Linienende und dem Ursprung ein.*

So wird's gemacht:

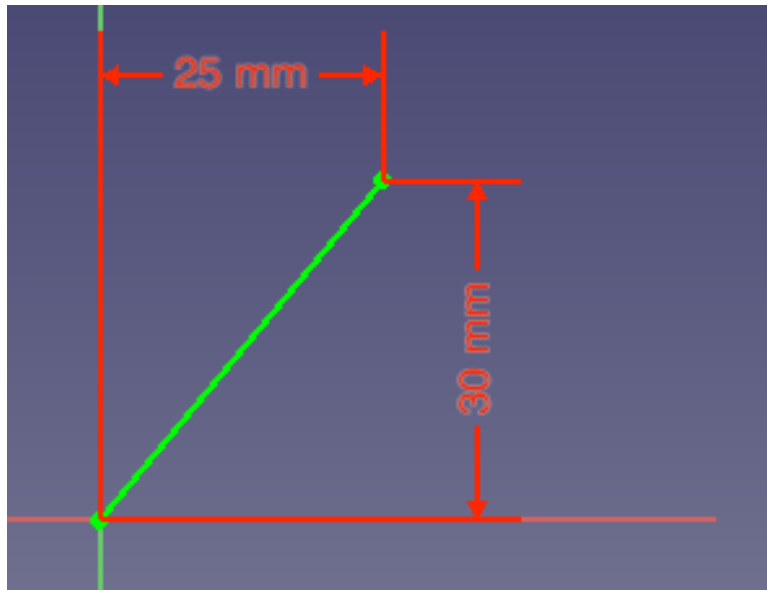
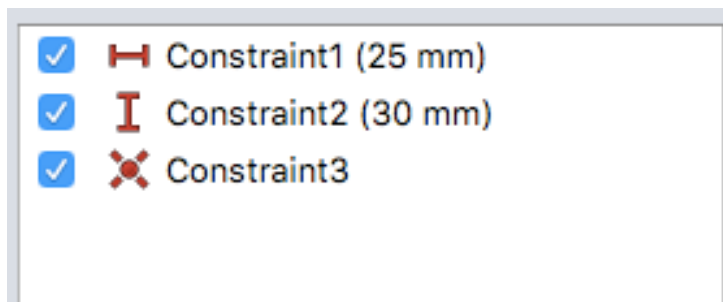
- Klicke wie vorher den rechten oberen Punkt, er färbt sich dunkelgrün.
- Klicke dann auf den Ursprung. In diesem Falle kann die Auswahlserie ohne einen zusätzlichen Tastendruck selektiert werden. Wir sprechen von einer "gierigen Auswahl" (greedy selection).
- klicke das koinzidenz-icon .

nun sind drei dinge geschehen:

- der rechte obere punkt ist auf den ursprung gewandert.
- der solver meldet "fully constrained sketch". das ist gut so; man sollte immer vollständig eingeschränkte Sketche anstreben. Es gibt nur wenige Ausnahmen von dieser Regel.
- Der Sketch färbt sich von weiß/schwarz nach grün.

Und so sieht es jetzt aus:

Die Liste der Elemente enthält nach wie vor die Linie, die Liste der Constraints hat inzwischen drei Einträge:



## 4 Auto Constraints

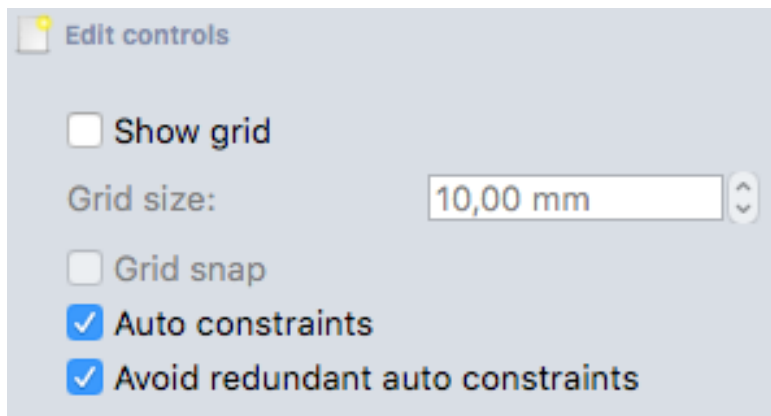
Wenn die Ausführung von Auto Constraints zugelassen wird, dann werden einige Constraints automatisch gesetzt. Um den Unterschied zwischen ein- und ausgeschaltetem Zustand zu erkennen, schalten wir sie zunächst ein.

### 4.1 Auto Constraints Ein


Öffne im Panel den Abschnitt Edit Controls und vergewissere dich, dass **Auto constraints** abgehakt ist - normalerweise automatisch.

**Avoid redundant auto constraints** sollte ebenfalls eingeschaltet sein:



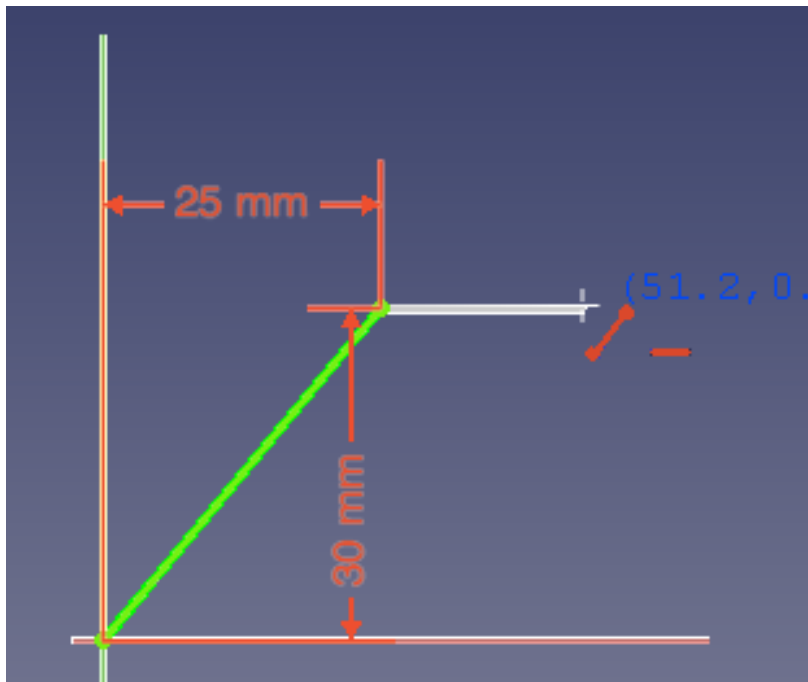


Jetzt eine neue Linie auf folgende Weise erzeugen:

- Klicke das Linien Icon .
- Bewege die Maus auf den rechten oberen Punkt der vorhandenen Linie. Der Punkt wird gelb, (etwas schwierig erkennbar aufgrund der roten Constraintlinien) und außer dem Liniensymbol erscheint noch ein zusätzlicher Punkt neben dem Cursor.

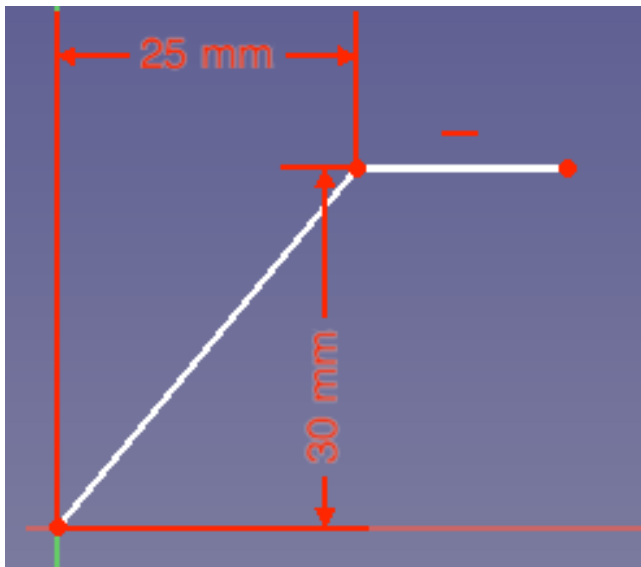


- Klicke die linke Maustaste
- Bewege den Cursor horizontal nach rechts
- Unter der Linie erscheint eine rote Markierung die bedeutet, dass ein horizontaler Constraint gesetzt werden kann.

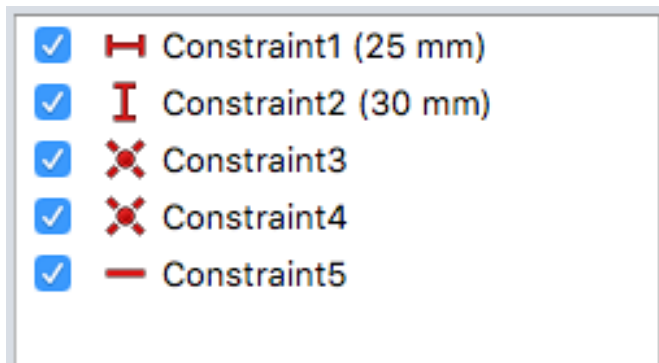


- Klicke, um die Linie zu erzeugen.

Die Sketcherlinien verfärben sich nun in schwarz/weiß, da sie nicht mehr voll constrained sind, und über der waagerechten Linie erkennt man einen kleinen, roten Querbalken, der den dafür geltenden horizontalen Constraint anzeigt.

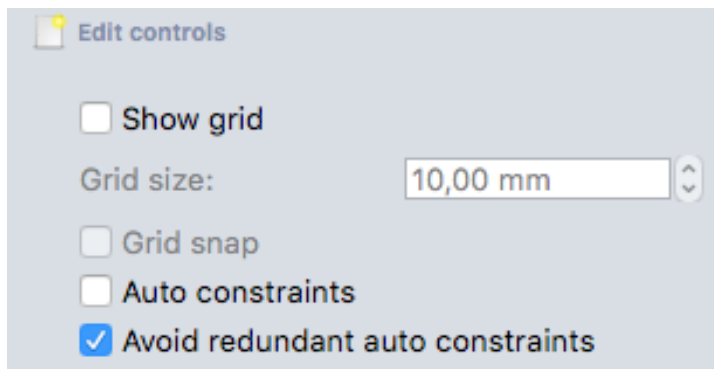


- Der Solver meldet noch 1 DOF .
- Die Elementliste enthält 2 Linien. Wenn man den Mauszeiger in der 3D-Ansicht über diese Linien setzt, werden sie jeweils gelb.
- Die Constraints-Liste zeigt inzwischen 5 Constraints, wovon die letzten beiden automatisch erzeugt wurden.



## 4.2 Auto Constraints Aus

Wenn die horizontale Linie wieder gelöscht wird, färbt sich der Sketch erneut grün. Jetzt Edit controls öffnen und Autoconstraints ausschalten.



**Übung 5** Die horizontale Linie wie zuvor zeichnen, als *AutoConstraints* noch eingeschaltet waren.

Das Ergebnis sieht jetzt nahezu gleich aus, mit dem Unterschied, dass in der 3D-Ansicht die horizontale Beschränkung fehlt. Auch bei den Freiheitsgraden und in der Constraints-Liste ist der Unterschied zu erkennen:

- Der Solver meldet 4 DOF.
- Die Liste der Constraints ist identisch zu ihrem vorherigen Zustand mit nur einer Linie.

Man kann jetzt die Constraints manuell hinzufügen, um das Sketch auf den Stand wie bei *AutoConstraints* zu bringen.

**Achtung:** Aktiviere jetzt *AutoConstraints* erneut, um fortzufahren.

**Allgemeine Regel:** Inzwischen ist der grundlegende Umgang bekannt und man hat gelernt:

- *Hinzufügen von Geometrieelementen erhöht die Zahl der Freiheitsgrade (DOF).*
- *Anbringen von Constraints reduziert die Zahl der Freiheitsgrade.*

## Teil II

# Geometrische Elemente

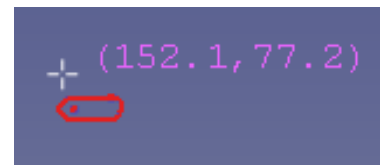
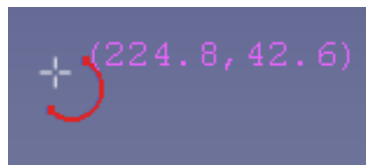
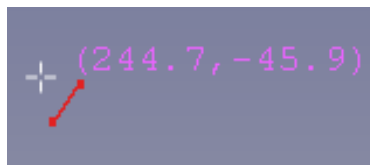
In diesem Teil wirst du die geometrischen Elemente kennenlernen. Du solltest Auto-Constraints eingeschaltet haben, weil einige Übungen sich darauf verlassen.

Bei der Verwendung der geometrischen Elemente werde ich einige der Constraints benutzen, die noch gar nicht im Detail erklärt wurden. Daher ist es vielleicht sinnvoll, dieses Tutorial zweimal durchzuarbeiten, um es vollständig zu verstehen. Es gab keine bessere Lösung für einen Anfang: Um die Verwendung von geometrischen Elementen zu erklären, braucht man Constraints, und um die Constraints zu erklären, braucht man geometrische Elemente. In diesem Teil über die geometrischen Elemente werde ich mich auf ein Minimum an Erklärungen der Constraints beschränken, die umfangreiche Beschreibung folgt im Teil III auf Seite 41 über die Constraints.

Weitere Informationen findet man in der Online-Dokumentation.

## 5 Allgemeine Bedienung

Wenn man eines der geometrischen Elemente Linie, Kreis, Kreisbogen o.ä. auswählt, gelangt man in den jeweiligen Einfügemodus für ein oder mehrere Elemente dieser Art. Im Einfügemodus wird der Mauszeiger im 3D-Fenster mit einem Kreuz dargestellt, das um die Anzeige der aktuellen X-Y-Koordinaten und ein Symbol erweitert wird, welches das gerade ausgewählte Element darstellt. Beispiele für Linie, Kreisbogen und Nut



Wenn ein geometrisches Element fertig ist, befindet man sich immer noch im Einfügemodus und kann direkt das nächste Element erzeugen. Dieses Verhalten kann in Einstellungen→Skizze→Allgemein→Geometrie-Erstellung „Fortlaufender Modus“ konfiguriert werden. Wenn diese Einstellung abgewählt wird, dann endet der Einfügemodus nach dem Erzeugen eines Elements.

Der Einfügemodus wird mit der rechten Maustaste beendet oder durch Drücken der ESC-Taste. Letzteres ist manchmal ein Problem, weil die ESC-Taste den Sketcher beendet, wenn man nicht im Einfügemodus ist. Drückt man die ESC-Taste zweimal, dann wird also auch gleich die gesamte Sketch-Bearbeitung beendet. Beim Linienzug (*Polyline*) ist es etwas anders, weil man noch einen zusätzlichen Klick mit der rechten Maustaste bzw. Tastendruck ESC benötigt, um den Einfügemodus zu verlassen.

Für MacOS-Anwender kann es sinnvoll sein, die ESC-Taste zu verwenden, weil die aktuelle Version FreeCAD 0.18.14727 ein Problem mit dem Zoom aufweist: Sobald man mit der rechten Maustaste den Einfügemodus verlässt, ändert sich die Größe der Darstellung des Modells.

Auf den nicht-MacOS-Systemen empfehle ich die rechte Maustaste, weil man die Hand sowie so an der Maus hat und nicht die Gefahr besteht, unbeabsichtigt den Sketcher zu verlassen.


## 6 Linie

Icon:	
Anzahl hinzugefügter DOF:	4


Die Linie wird durch die beiden Endpunkte bestimmt, von denen jeder 2 DOFs hat, das macht zusammen 4 DOFs.

### Typische Beschränkungen

**Koinzidenz auf den Endpunkten** Dies wurde bereits in Übung 4 auf Seite 7 verwendet

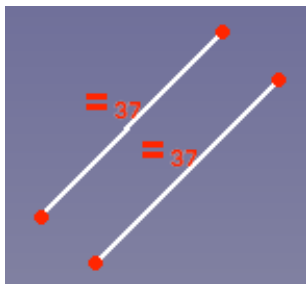
**Horizontale Beschränkung** Wähle die Linie aus und klicke das Icon  für die horizontale Beschränkung.

Die Linie ist nun horizontal ausgerichtet.


**Vertikale Beschränkung** Wähle die Linie aus und klicke das Icon  für die vertikale Beschränkung.

Die Linie ist nun vertikal ausgerichtet.

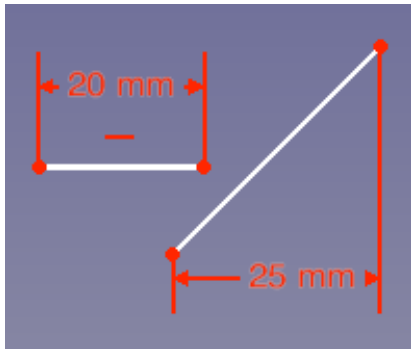
**Gleichheit** Wähle zwei Linien aus und klicke das Icon .



Beide Linien haben nun dieselbe Länge. Die Ausrichtung spielt dabei keine Rolle.

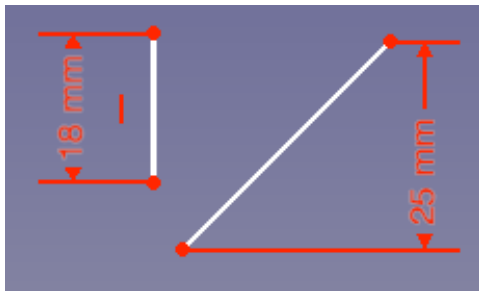
**Horizontaler Abstand** Wähle die Linie und klicke das Icon . Füge den Abstand wie in Übung 2 auf Seite 6 in das Eingabefeld ein.

Üblicherweise wird diese Beschränkung auf horizontale Linien angewendet, das muss aber nicht so sein. Wenn man sie auf eine schräg verlaufende Linie anwendet, dann wird der horizontale Abstand der beiden Endpunkte festgelegt.

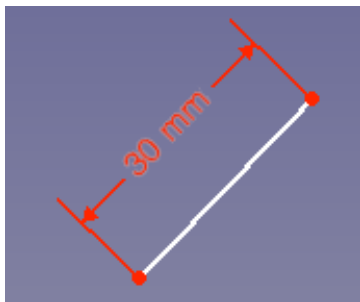


**Vertikaler Abstand** Wähle analog zum horizontalen Abstand die Linie und klicke das Icon **I**. Füge den Abstand wie in Übung 3 auf Seite 7 in das Eingabefeld ein.

Üblicherweise wird diese Beschränkung auf vertikale Linien angewendet, das muss aber nicht so sein. Wenn man sie auf eine schräg verlaufende Linie anwendet, dann wird der vertikale Abstand der beiden Endpunkte festgelegt.



**Länge** Wähle die Linie aus und klicke das Icon . Gib einen Wert ein, wie du es für den horizontalen oder vertikalen Abstand gemacht hast.

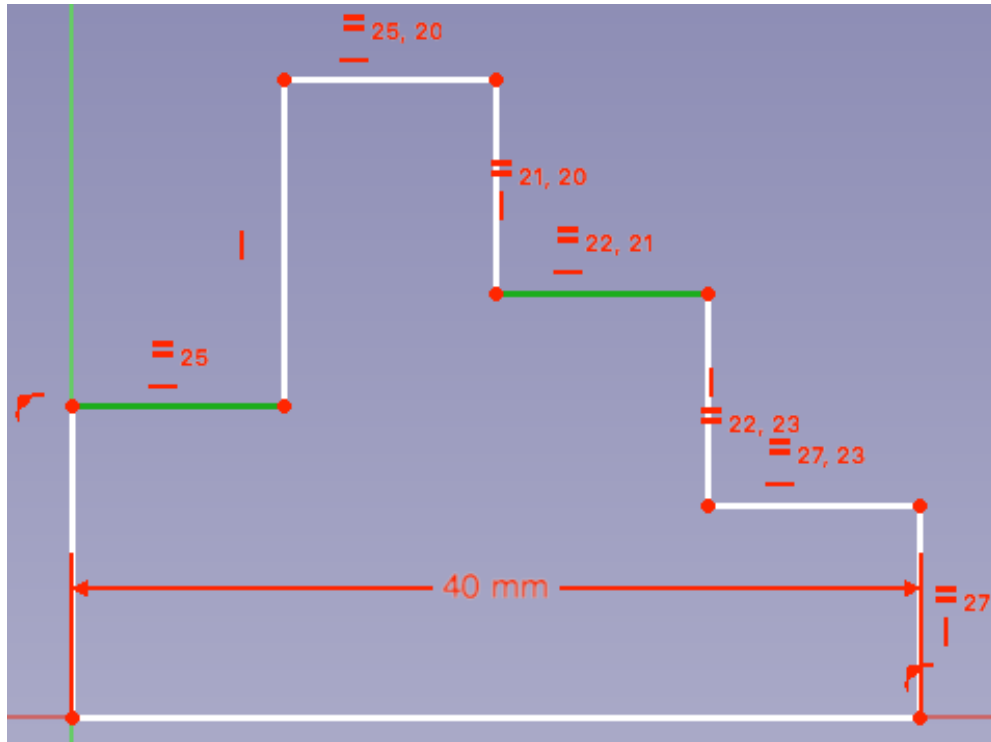


**Achtung:** Verwende diese Beschränkung nicht für horizontale oder vertikale Beschränkungen – es sei denn, du beabsichtigst später, den Winkel noch zu ändern (z. B. beim Drehen einer Nut wie in Abschnitt 12 auf Seite 30).

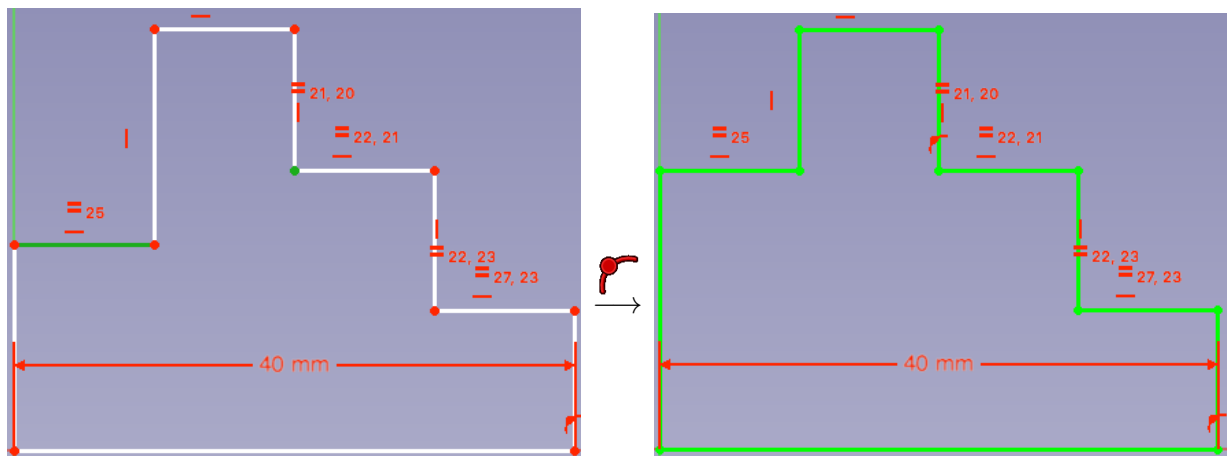
Verwende stattdessen den horizontalen bzw. vertikalen Abstand. Das macht es leichter für den Solver eine Lösung zu finden; siehe auch Abschnitt 36 auf Seite 72 für weitere Informationen hierzu.

Es sei hier darauf hingewiesen, dass mit „Linie“ ein (an beiden Seiten) begrenzter Abschnitt einer unendlich langen Geraden bezeichnet wird. Dies spielt eine wichtige Rolle bei Tangential- oder Punkt-auf-Objekt-Beschränkungen (vgl. Abschnitte 21 auf Seite 51 und 26 auf Seite 57).

**Übung 6** Erzeuge das folgende Sketch. Es enthält genau ein Maß und ansonsten nur Koinzidenz-, Vertikal-, Horizontal- und Gleichheitsbeschränkungen. Alle kurzen Linien sind gleich. In dem hier gezeigten Zustand hat das Sketch noch einen Freiheitsgrad:



Ziel: die beiden gewählten Linien sollen auf gleicher Höhe sein. Dies kann z.B. erreicht werden, indem man links die Linie auswählt, rechts einen Punkt und dann eine Punkt-auf-Objekt-Beschränkung anwendet.




## 7 Kreis


Icons:	 (default)
Anzahl hinzugefügter DOF:	3

Ein Kreis kann durch die Position seines Mittelpunkts mit 2 DOF und den Radius beschrieben werden, zusammen also 3 DOF.

Das Anlegen eines Kreises kommt in zwei Geschmacksrichtungen. Bei der weiteren Bearbeitung spielt es dann keine Rolle mehr, wie der Kreis angelegt wurde.


1. Bei der voreingestellten Methode beginnt man mit dem Kreismittelpunkt und fügt dann den Radius hinzu: Nach dem Klicken auf  klickst du in der 3D-Ansicht an die Stelle, an der der Mittelpunkt liegen soll. Wenn du die Maus bewegst, kannst du sehen dass der Radius der Mausposition folgt. Klicke auf einen beliebigen Punkt, der auf dem Kreis liegen soll.


Wenn Auto-Constraints eingeschaltet sind, kannst du einen bereits vorhandenen Punkt anwählen, dann wird automatisch eine Punkt-auf-Objekt-Beschränkung erzeugt.


2. Um die andere Variante zur Kreiserzeugung zu nutzen, musst du mit dem kleinen Dreieck rechts neben dem Kreis-Icon das Menü aufklappen und  auswählen. Nun kannst du in der 3D-Ansicht drei Punkte anklicken, die alle auf dem Kreis liegen. Die Auswahl, wie der Kreis erzeugt werden soll, bleibt bis zu einer erneuten Auswahl erhalten oder bis FreeCAD beendet wird.

### Typische Beschränkungen

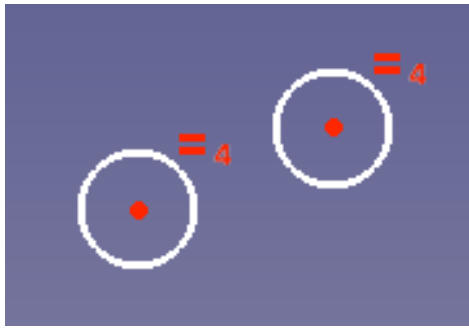
**Positionieren des Mittelpunkts** Dafür können alle Beschränkungen zum Positionieren eines Punktes verwendet werden, insbesondere Koinzidenz sowie horizontaler und vertikaler Abstand.

**Radius/Durchmesser** Wähle den Kreis aus und wende die Radius-Beschränkung  an.

Wenn du stattdessen den Durchmesser angeben möchtest, wähle im Kontextmenü der Radius-Beschränkung das Durchmesser-Icon  aus.

**Gleichheit** Wähle zwei Kreise oder einen Kreis und einen Kreisabschnitt und klicke das Gleichheits-Icon .




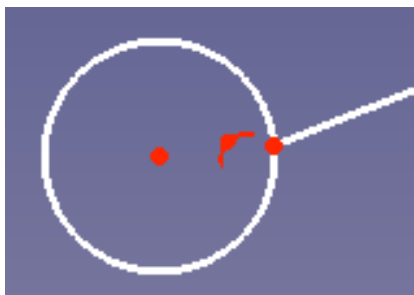


Beiden Radien werden ab dann gleich sein.

Beachte bitte, dass die Gleichheit von Linie und Kreis nicht möglich ist. Dafür benötigt man Rechenausdrücke (*Expressions*), die hier jedoch nicht behandelt werden.

Mathematische Nebenbemerkung: Die Berechnung der Länge des Kreisumfangs war eine der bekanntesten mathematischen Herausforderungen seit frühester Zeit. Heutzutage ist bekannt, dass eine Lösung dieses Problems mit endlicher Genauigkeit nicht möglich ist.

**Punkt-auf-Objekt** Wenn du einen Punkt, z. B. den Endpunkt einer Linie, auf dem Kreis fixieren möchtest, dann wählst du Kreis und Punkt aus und klickst auf .



Beachte, dass das hier gezeigte Sketch aus zwei Gründen weder zum Aufpolstern noch zum Erzeugen einer Tasche verwendet werden kann: Das Sketch ist nicht geschlossen und es hat diese Kreuzung, an der sich drei Linien treffen. Diese Situation nennen wir eine *Selbstüberschneidung*.

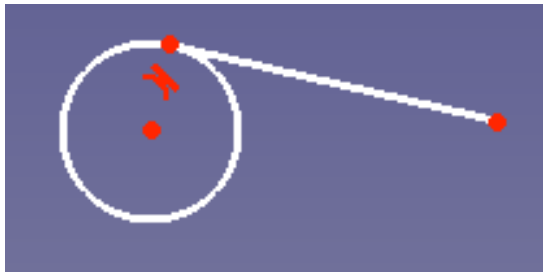
**Tangente** Ehe man eine Tangente an einen Kreis legt, sollte man alle beteiligten Objekte wie Kreise, Linien oder Kreisabschnitte möglichst gut in ihre endgültige Lage bringen, weil es üblicherweise zwei Möglichkeiten gibt, eine Tangente an einen Kreis zu legen.

Es gibt zwei Arten, um eine Tangente an einen Kreis zu legen


- Der Endpunkt einer Linie oder eines Kreisabschnitts soll auf dem Kreis liegen. Dafür wählt man Kreis und Endpunkt aus und wendet die Tangentialbeschränkung

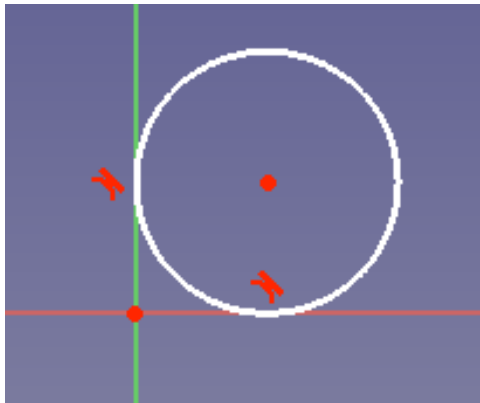


an.

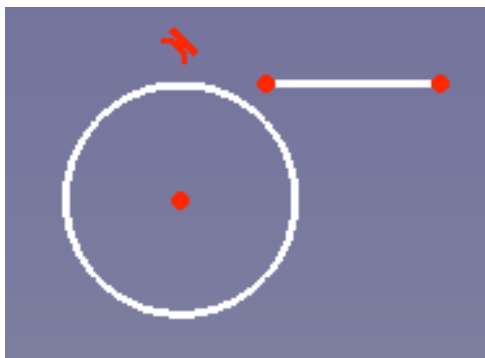


Es sei nochmals erwähnt, dass dieses Beispiel nicht zum Erstellen eines Polsters oder einer Tasche verwendet werden kann, weil es nicht geschlossen ist und weil es eine Selbstüberschneidung aufweist.

- Der Kreis berührt einen anderen Kreis(bogen) oder eine Line. Wähle den Kreis und die Line oder den Kreis(bogen). Beachte den Unterschied zur vorigen Auswahl: Wähle auf keinen Fall einen Endpunkt! Wende mit  die Tangentialbeschränkung an. Im folgenden Beispiel habe ich das sogar zweimal getan, einmal mit der X- und einmal mit der Y-Achse.

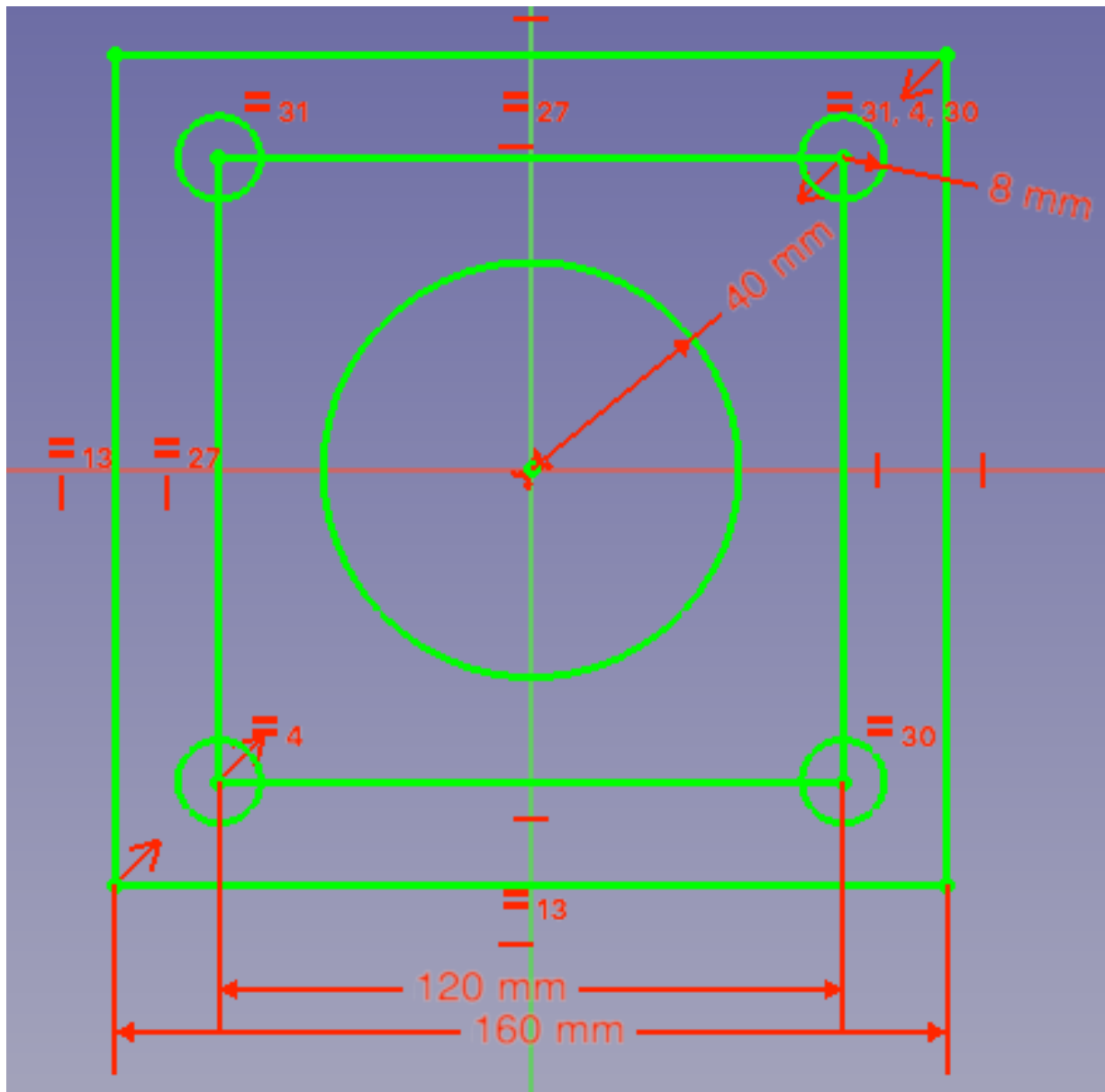



Zwischen einem Kreis und einer Linie kann diese Art der Tangentialbeschränkung sogar angewendet werden, ohne dass die beiden Elemente sich berühren. Es genügt, dass die Gerade, auf der die Linie liegt, eine Tangente ist.



Kreise werden häufig benutzt, um Löcher zu erzeugen; entweder als Tasche oder mit dem speziellen Loch-Feature. Bei letzterem spielt der Radius des Kreises zwar keine Rolle, dennoch sollten auch solche Sketche vollständig eingeschränkt werden.

**Übung 7** Wechsle in die PartDesign-Workbench und erzeuge gemäß der folgenden Abbildung ein Sketch für eine Dichtung:



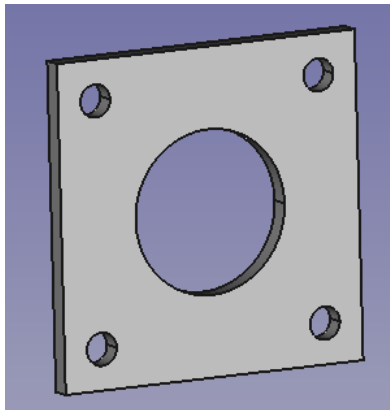
Die beiden Quadrate werden mit der Symmetrie-Beschränkung zentriert: Wähle zwei diagonal gegenüberliegende Ecken – im Beispiel sind das die Ecken links unten und rechts oben – sowie als letztes den Mittelpunkt. Wähle anschließend die Symmetrie-Beschränkung .

In dem jetzigen Zustand kann dieses Sketch noch nicht aufgepolstert werden, weil die kleinen Kreise das innere Quadrat schneiden. Weil das innere Quadrat nur zur Positionierung der kleinen Kreise verwendet wird, machen wir Konstruktionslinien daraus:

- Wähle die vier Seiten des inneren Quadrats.

- 






## 8 Kreisabschnitt

Als Teil eines Kreises hat ein Kreisabschnitt viele Gemeinsamkeiten mit einem solchen.


Icons:	 (default)
Anzahl hinzugefügter DOF:	5

Ein Kreisabschnitt kann zunächst wie ein Kreis mit 2 DOF für den Mittelpunkt und einem DOF für den Radius festgelegt werden. Hinzu kommt dann noch je ein Winkel für den Anfangs- und den Endpunkt; insgesamt haben wir also 5 DOF.

Wie schon der Kreis, so kommt auch die Erzeugung des Kreisabschnitts in zwei Varianten. Und wie beim Kreis spielt es später keine Rolle mehr, auf welche Art der Kreisabschnitt erzeugt wurde.

1. Die voreingestellte Variante beginnt mit dem Mittelpunkt und fügt dann den Radius hinzu: Nach dem Klick auf  klickt man in der 3D-Ansicht auf die Stelle, wo der Mittelpunkt liegen soll. Bewege die Maus und du siehst wie der Radius folgt. Nun klickt man für den ersten Punkt des Kreisabschnitts, bewegt die Maus weiter und klickt für den Endpunkt.

Bei eingeschalteten Auto-Constraints kann man existierende Punkte wählen, wodurch dann Koinzidenz-Beschränkungen erzeugt werden.

2. Für die andere Variante musst du mit dem kleinen Dreieck rechts neben dem Kreisabschnitts-Icon das Menü aufklappen und  auswählen. Nun bestimmen die ersten beiden Klicks Anfang und Ende des Kreisabschnitts, während der dritte irgendwo auf dem Kreisbogen liegt und damit den Radius bestimmt. Die Auswahl, wie der Kreisabschnitt erzeugt werden soll, bleibt bis zu einer erneuten Auswahl erhalten oder bis FreeCAD beendet wird.

## Typische Beschränkungen

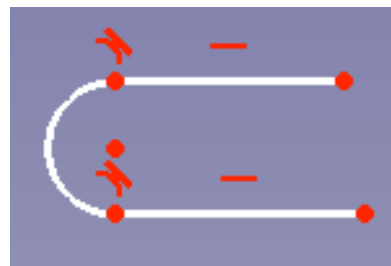
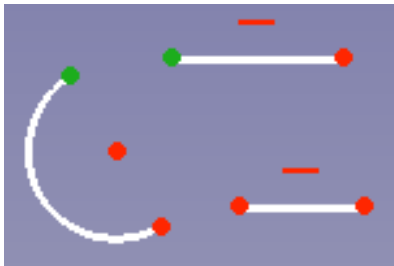
**Positionieren des Mittelpunkts, Radius, Gleichheit und Punkt-auf-Objekt**  
verhalten sich ebenso wie beim Kreis.

**Tangente** Auch beim Kreisabschnitt gibt es die beiden beim Kreis beschriebenen Varianten der Tangente. Zusätzlich gibt es noch die wichtige Variante der tangentialen Verbindung an den Endpunkten, die sog. Punkt-zu-Punkt-Tangentialbeschränkung:

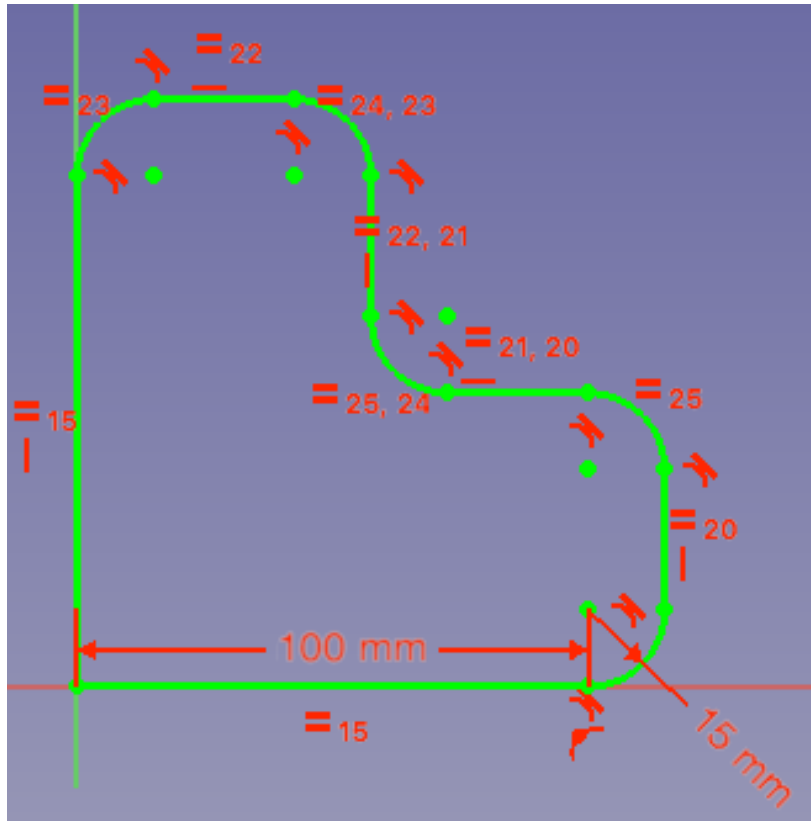
Wähle einen der Endpunkte des Kreisabschnitts und den Endpunkt einer Linie oder eines weiteren Kreisabschnitts. Das Anwenden der Tangentialbeschränkung bewirkt nun zwei Dinge:

- Die beiden Elemente werden tangential ausgerichtet.
- Die gewählten Endpunkte werden koinzident gemacht.

**Übung 8** *Erzeuge einen Kreisabschnitt und zwei horizontale Linien. Wende eine Punkt-zu-Punkt-Tangentialbeschränkungen auf die Endpunkte an. Die Bilder zeigen die Auswahl direkt vor Anwendung der ersten und nach Anwendung der zweiten Beschränkung.*



**Übung 9** Erzeuge das folgende Sketch. Alle Kreisabschnitte haben denselben Radius von 15mm. Die langen Linien sind gleichlang, alle kurzen Linien sind gleichlang. Alle Tangentialbeschränkungen sind Punkt-zu-Punkt-Tangentialbeschränkungen.



## 9 Linienzug (*Polyline*)

Icon:	
Anzahl hinzugefügter DOF:	Abhängig von den hinzugefügten Elementen (s. u.)

Polyline ist ein überaus nützliches Werkzeug, mit dem man schnell ein Sketch erzeugen kann. Zusätzlich zu dem auf den ersten Blick ersichtlichen Verbinden gerader Linien gibt es weitere Möglichkeiten, Linien und Kreisabschnitte zu erzeugen und auf verschiedene Weisen miteinander zu verbinden.

In seiner Standardform erzeugt die Polyline eine Folge von Linien, die durch Koinzidenz-Beschränkungen miteinander verbunden sind. Diese Koinzidenzen sind unabhängig von der Verwendung von Auto-Constraints.

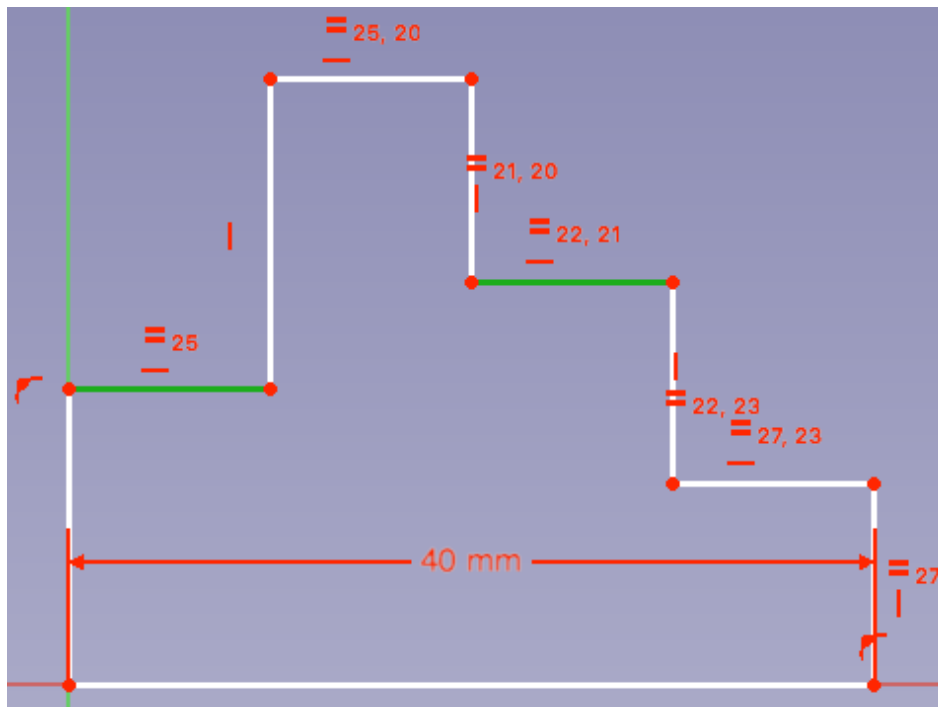
Der Anfügemodus für weitere Elemente endet, sobald die Figur geschlossen wird, d.h. wenn der Endpunkt mit dem Anfangspunkt der Polyline verbunden wird.

Alternativ kann das Erzeugen der Folge von Elementen mit der rechten Maustaste oder der Escape-Taste jederzeit beendet werden. Wie bereits oben angegeben, wird die Escape-Taste

für MacOS empfohlen, weil die Maustaste stets mit einem meistens unerwünschten Zoom-Effekt verbunden ist.

Für alle anderen Systeme empfehle ich die rechte Maustaste, zumal die Hand sowieso schon auf der Maus liegt. Damit wird das unbeabsichtigte Beenden des Sketchers vermieden.

**Übung 10** *Erzeuge das Sketch von Übung 6 auf Seite 15 als Polyline.*



Es sei angemerkt, dass das Ergebnis dasselbe ist, gleichgültig, ob das Sketch aus einzelnen Linien oder als Polyline erzeugt wurde.

Polyline kann aber noch mehr als nur Linien zu verbinden.

Polyline beginnt immer mit einer geraden Linie: Klick – Maus bewegen – Klick. Dies fügt – wie bei jeder anderen Linie – 4 DOF hinzu. Bewegt man nun die Maus erneut, kann der Linienzug auf verschiedene Weise fortgesetzt werden. Zum Umschalten wird die M-Taste verwendet. Damit kann man Linien und Kreisbögen tangential oder rechtwinklig anschließen. Wiederholtes Drücken der M-Taste schaltet zyklisch durch die folgenden verschiedenen Fortsetzungsmöglichkeiten. Die Anzahl der DOF wird ohne Berücksichtigung von Auto-Constraints angegeben. Letztere können die Zahl der DOF weiter vermindern, z. B. wenn eine Horizontal-Beschränkung automatisch eingefügt wird.

- Ohne die M-Taste wird eine Linie angefügt, die lediglich mit einer Koinzidenz-Beschränkung verbunden ist. Dies fügt 2 DOF für den neuen Endpunkt hinzu.
- Drücken der M-Taste: Das neue Segment ist eine rechtwinklig angeschlossene Linie. Dies fügt 1 DOF hinzu.
- Erneutes drücken der M-Taste: Das neue Segment ist eine tangential angeschlossene Linie. Dies fügt 1 DOF hinzu.



- Übung 11** Erzeuge das folgende Sketch unter Verwendung von Polyline und M-Taste. Alle Kreisabschnitte haben denselben Radius, auch der mit  $45^\circ$ . Die langen Linien sind beide gleich. Alle kurzen Linien, auch die  $45^\circ$  geneigten, haben dieselbe Länge.



## 10 Rechteck


Icon:	
Anzahl hinzugefügter DOF:	4

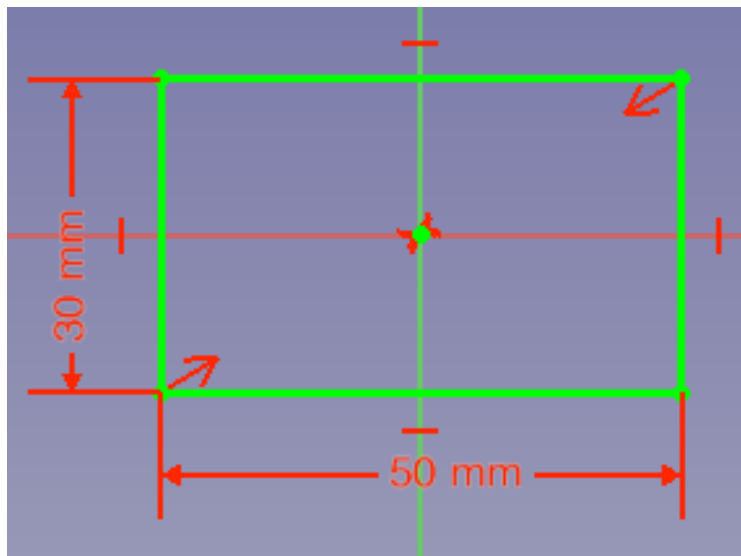
Ein Rechteck kann über zwei diagonal gegenüberliegende Punkte definiert werden, von denen jeder 2 DOF beiträgt; das ergibt zusammen 4 DOF.

Um ein Rechteck zu erzeugen, klickt man eine Ecke und dann die diagonal gegenüber liegende. Das Ergebnis ist dasselbe, als ob man das Rechteck durch einzelne Linien mit Vertikal- und Horizontal-Beschränkungen erzeugt hätte.


### Zentrieren von Rechtecken

Häufig ist ein Rechteck genau in der Mitte des Koordinatensystems zu platzieren. Oder zwei Quadrate sollen genau ineinander liegen (siehe auch Übung 7 auf Seite 18).

Um das zu erreichen, wählt man zwei diagonal gegenüberliegende Eckpunkte und zuletzt den Mittelpunkt. Dann wendet man eine Symmetrie-Beschränkung  an. Diese Art zu zentrieren ist besser als mit je einer Symmetrie-Beschränkung in horizontaler und vertikaler Richtung. In Abschnitt 28 auf Seite 62 werden wir sehen, dass es wichtig ist, den Mittelpunkt zuletzt zu wählen.



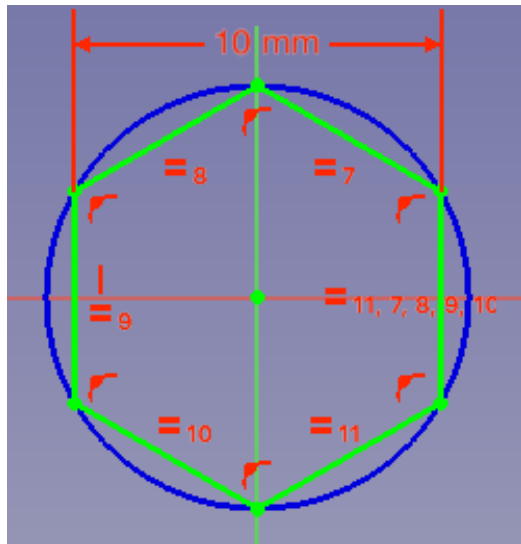
## 11 Polygon

Icons:	
Anzahl hinzugefügter DOF:	4

Der Mittelpunkt hat 2 DOF, der Radius 1 DOF und die Ausrichtung ist der letzte der insgesamt 4 DOF. Die Zahl der DOF ist unabhängig von der Zahl der Seiten des Polygons.

Beim Anlegen beginnt man mit dem Mittelpunkt und bewegt dann die Maus, um den Radius und einen Eckpunkt festzulegen. Der blaue Kreis ist Konstruktionsgeometrie und trägt daher nicht zur weiteren Verwendung in Polstern, Taschen usw. bei.

Das am häufigsten verwendete Polygon ist wohl das Sechseck, weil es für Schrauben und Muttern verwendet wird.



Das Polygon besteht aus Linien und einem (Konstruktion-)Kreis, daher gelten alle diesbezüglich gemachten Aussagen auch hier.

Wenn die ersten Bedingungen, die hinzugefügt werden, den Mittelpunkt festlegen, dann sollte man darauf achten, dass die Zielposition möglichst nah am aktuellen Mittelpunkt liegt; man sollte daher das Polygon vorher so gut es geht an die richtige Position schieben. Wenn die Zielposition des Mittelpunkts außerhalb des Polygons liegt, dann kollabiert das ganze Polygon zu einem Punkt, der dann schwer weiter zu verarbeiten ist. Wenn zunächst der Radius festgelegt wird, passiert das nicht.

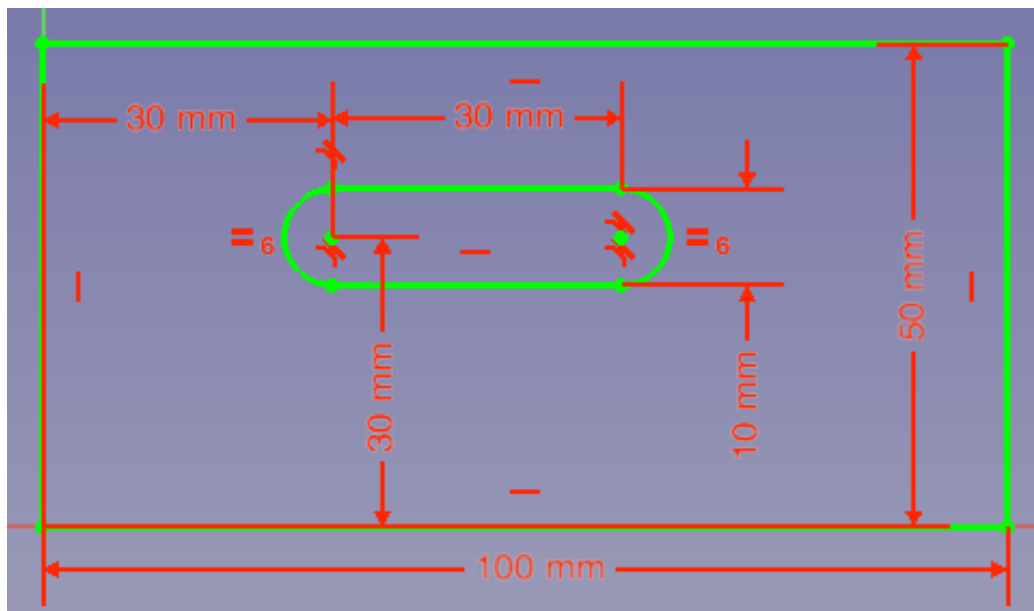
## 12 Nut

Icon:	
Anzahl hinzugefügter DOF:	4

Das Zentrum eines Halbkreises hat zwei DOF, der Abstand zum anderen Halbkreis fügt einen DOF hinzu, ebenso fügt der Radius 1 DOF hinzu. Zusammen ergibt das 4 DOF.

Das Anlegen einer Nut beginnt mit einem Klick für den ersten Mittelpunkt eines Halbkreises. Der nächste Klick legt Radius und Länge der Nut fest. Abhängig von der relativen Position des zweiten Klicks – ist der horizontale Abstand zum ersten Punkt größer oder kleiner als der vertikale – wird die Nut waagrecht oder senkrecht angelegt.

**Übung 12** Erzeuge das folgende Sketch eines Blocks mit einer Nut für einen Gleitmechanismus:

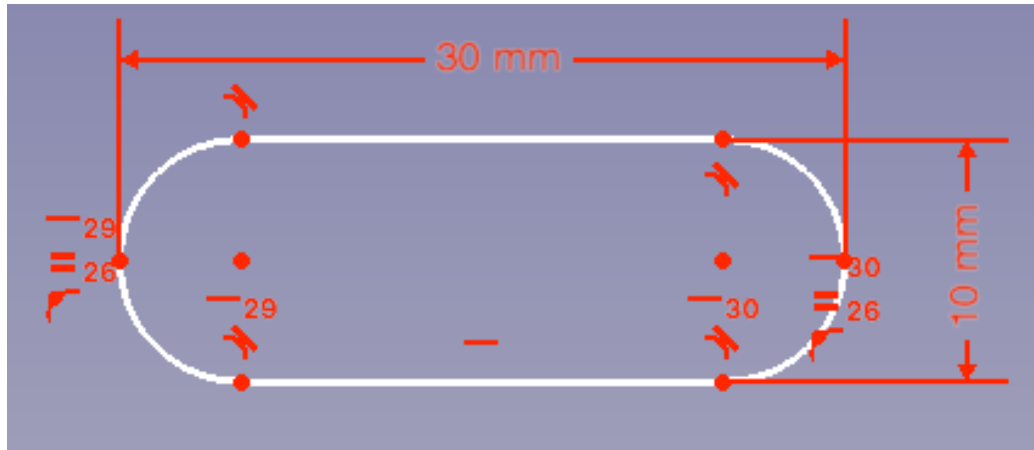


**Anmerkung:** Mit den bisher besprochenen Constraints kann die Nut mit Maßangaben innerhalb des Rechtecks platziert werden. In Abschnitt 28 auf Seite 62 über die Symmetrie-beschränkung wird gezeigt, wie die Nut mittig platziert werden kann.

### Typische Beschränkungen

Zusätzlich zu den bereits bekannten Beschränkungen für Linien und Kreissegmente soll hier gezeigt werden, wie man die Gesamtlänge der Nut direkt im Sketch festlegen kann.

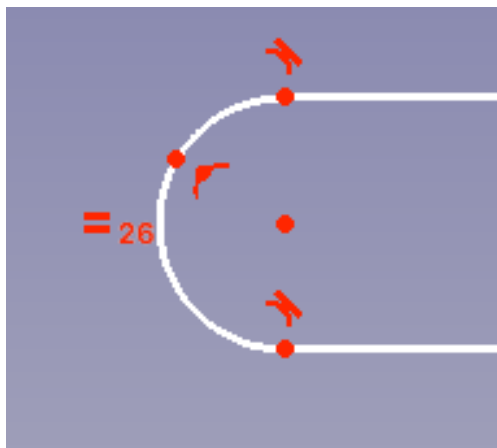
**Übung 13** Erzeuge dasselbe Sketch für die Nut wie oben, aber nun mit Festlegen der Gesamtlänge:



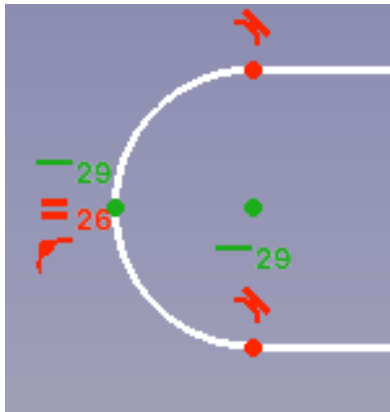
Dieses Sketch ist noch nicht vollständig eingeschränkt, es fehlt noch die globale Festlegung in X- und Y-Richtung.

Um das Sketch zu erzeugen geht man folgendermaßen vor:

- Erzeuge zunächst Rechteck und Sketch wie bisher;
- Erzeuge einen Punkt und platziere ihn mit der Punkt-auf-Objekt-Beschränkung auf einem der Kreissegmente. Man positioniert ihn am besten möglichst nahe an der vorgesehenen Position. Bei eingeschalteten Auto-Constraints kann die Punkt-auf-Objekt-Beschränkung gleich beim Anlegen des Punktes mit erzeugt werden.



- Genauso erzeugst du einen Punkt auf der anderen Seite der Nut.
- Wähle einen der neuen Punkte und den Mittelpunkt des Kreissegments.
- Erzeuge eine Horizontalbeschränkung. Das Bild zeigt die Situation mit der Horizontalbeschränkung; die beteiligten Elemente habe ich, um sie hervorzuheben, nochmals ausgewählt; sie werden in grün dargestellt.

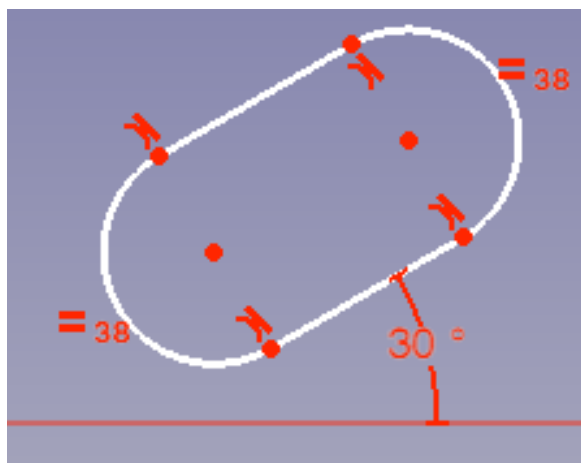


- Mache das gleiche auf der anderen Seite. (Wenn du besonders sparsam sein möchtest, dann kannst du auch die beiden neuen Punkte und einen Mittelpunkt auswählen und in einem Schritt alle drei horizontal ausrichten).
- Nun kannst du einen horizontalen Abstand zwischen den äußeren Punkten anbringen.
- Die übrigen Constraints können wie vorher festgelegt werden.



## Schräg angeordnete Nuten

Die vordefinierten Nuten sind entweder horizontal oder vertikal ausgerichtet. Das ist auch sinnvoll, weil die meisten Nuten auch so angeordnet sind und man sie mit zwei Klicks anlegen kann.

Wenn eine Nut doch einmal anders ausgerichtet sein soll, dann kann man die Horizontal- bzw. Vertikalbeschränkung löschen. Dies erzeugt einen zusätzlichen Freiheitsgrad. Im Bild wurde dafür eine Winkelbeschränkung eingeführt.




## 13 B-Splines


Icons:	 offener B-Spline  geschlossener B-Spline
Anzahl hinzugefügter DOF:	3 für jeden Kontrollpunkt

Jeder Kontrollpunkt wird durch einen Kreis mit seinen bereits bekannten 3 DOF definiert.

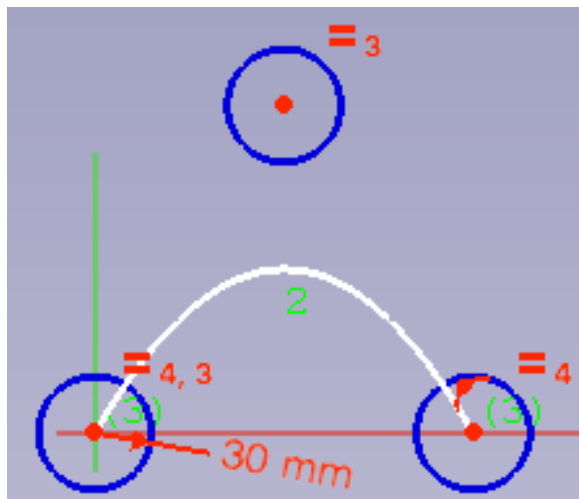
B-Splines sind Kurven, die als Grundlage für glatte Flächen dienen. Sie werden durch eine Menge von Kontrollpunkten bestimmt, die – bis auf Anfang und Ende – selbst gar nicht auf dem B-Spline liegen müssen. Jeder B-Spline hat ein Gewicht, welches bestimmt, wie stark der Kontrollpunkt die Kurve „anzieht“. B-Splines treten z.B. auf, wenn SVG-Dateien in FreeCAD importiert und mit Draft-zu-Sketch in ein Sketch gewandelt werden. Ebenso werden B-Splines erzeugt, wenn ShapeStrings in Sketche gewandelt werden.

Es gibt zwei Arten von B-Splines:

**Offene B-Splines** werden mit  erzeugt und haben als Anfang und Ende je einen Kontrollpunkt.

**Geschlossene B-Splines** werden mit  erzeugt. Wenn das Anlegen mit der rechten Maus oder der Escape-Taste beendet wird, dann wird das Ende stufenlos mit dem Anfang verbunden.

**Übung 14** Erzeuge einen B-Spline mit den folgenden Kontrollpunkten. Dabei werden die absoluten Abstände momentan nicht berücksichtigt.

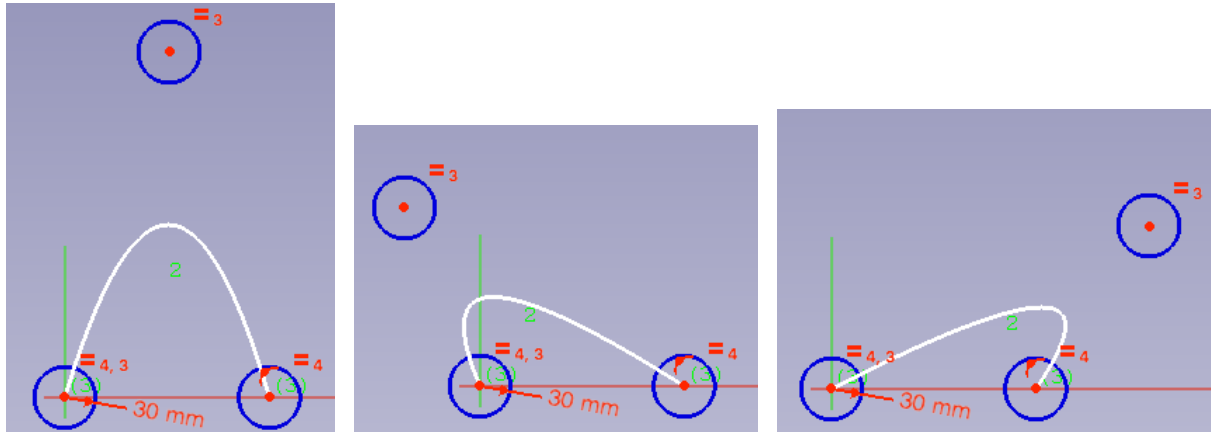


Beginne links, füge dann den oberen Kontrollpunkt hinzu und schließlich den rechten. Beende das Anlegen mit der rechten Maus- bzw. der Escape-Taste. Beim Anlegen werden alle Kreise um die Kontrollpunkte zunächst mit demselben Radius angelegt. Beachte, dass der B-Spline erst angezeigt wird, wenn alle Punkte angelegt sind.

Betrachtet man den oberen Kontrollpunkt, dann kann die Kurvenform auf zwei Arten beeinflusst werden:

- Die Position des Kontrollpunktes

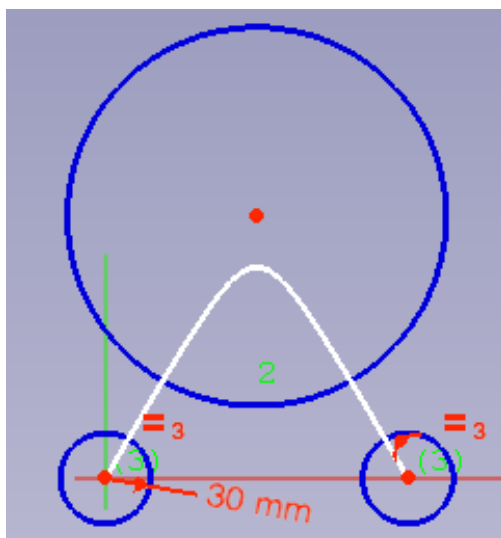
bestimmt, in welcher Richtung der Kontrollpunkt abgelenkt wird. Bewege den Punkt und beobachte, was mit der Kurve passiert.



Man sieht, wie die Kurve vom Kontrollpunkt angezogen wird. Das Verhältnis der Abstände zwischen dem Kontrollpunkt, der Kurve und den anderen Kontrollpunkten bleibt einigermaßen konstant.

- Die Größe des Kreises um den Kontrollpunkt bestimmt, wie stark die Kurve vom Kontrollpunkt angezogen wird. Je größer der Kreis ist, desto stärker wird der B-Spline angezogen. Ein unendlich großer Kreis würde den B-Spline bis zu dem Punkt selbst anziehen.

Ehe man die Größe eines einzelnen Kreises ändert, muss man die Gleichheitsbeschränkung entfernen.





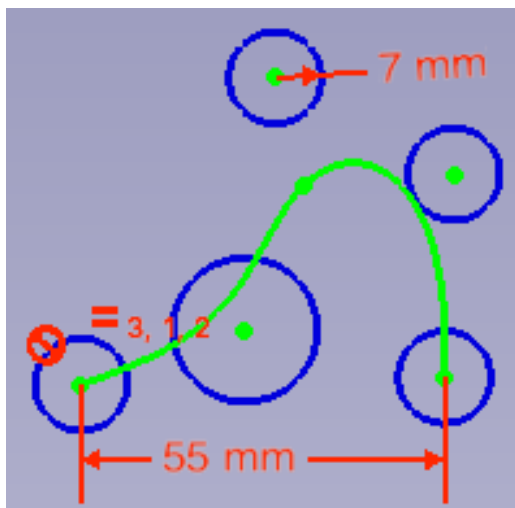
## Typische Beschränkungen

Auch bei den B-Splines können alle bisher bekannten Beschränkungen für die Kontrollpunkte bzw. -kreise verwendet werden.

Es ist (derzeit) jedoch nicht möglich, Tangential- oder Punkt-auf-Objekt-Beschränkungen im Innern eines B-Splines zu verwenden. Es wird im Folgenden jedoch eine Technik beschrieben, mit der man entsprechendes Verhalten von B-Splines approximieren kann.

**Block Constraint** Für die Positionierung der Endpunkte verwendet man die bekannten Constraints wie Koinzidenz, horizontaler und vertikaler Abstand usw. Für die übrigen Punkte ist das oftmals nicht sinnvoll, sondern macht das Sketch nur unübersichtlich durch eine Vielzahl von Maßen. Dann verwendet man die Sperrbeschränkung (*Block constraint*). Sie legt alle verbleibenden Freiheitsgraden fest, wie es der momentanen Ausrichtung entspricht. Wenn weitere Beschränkungen gesetzt werden sollen, dann muss das also unbedingt vorher geschehen.

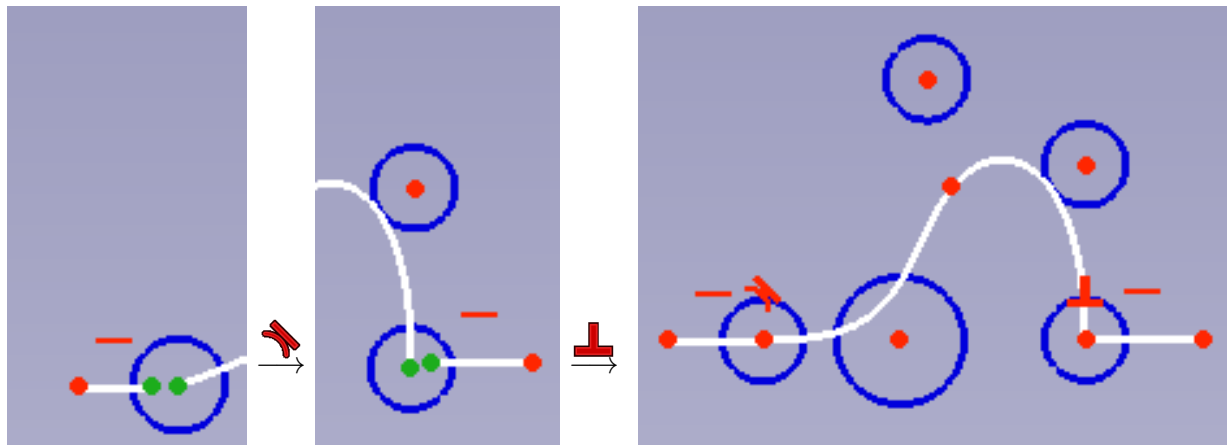
**Übung 15** *Erzeuge einen B-Spline gemäß der folgenden Abbildung. Obwohl die Sperrbeschränkung recht weit links angeordnet ist, gehört sie zur B-Spline-Kurve.*



Bevor du die Sperrbeschränkung anwendest, musst du die Koinzidenz im Ursprung, die Punkt-auf-Objekt-Beschränkung rechts, die Gesamtlänge von 100 mm sowie die Größe des größeren Kreises anpassen. Bei letzterer wird keine Beschränkung gesetzt, sie wird durch die Sperrbeschränkung festgelegt.

**Tangente und Orthogonalität in den Endpunkten** In den Endpunkten kann man Linien und Kreisbögen – oder mit Hilfe einer Konstruktionslinie auch weitere B-Splines – tangential oder rechtwinklig anschließen.

**Übung 16** *Entferne die Sperrbeschränkung von Übung 15 und füge zwei horizontale Linien hinzu. Auf der linken Seite soll die Linie tangential, auf der rechten rechtwinklig angeschlossen sein.*



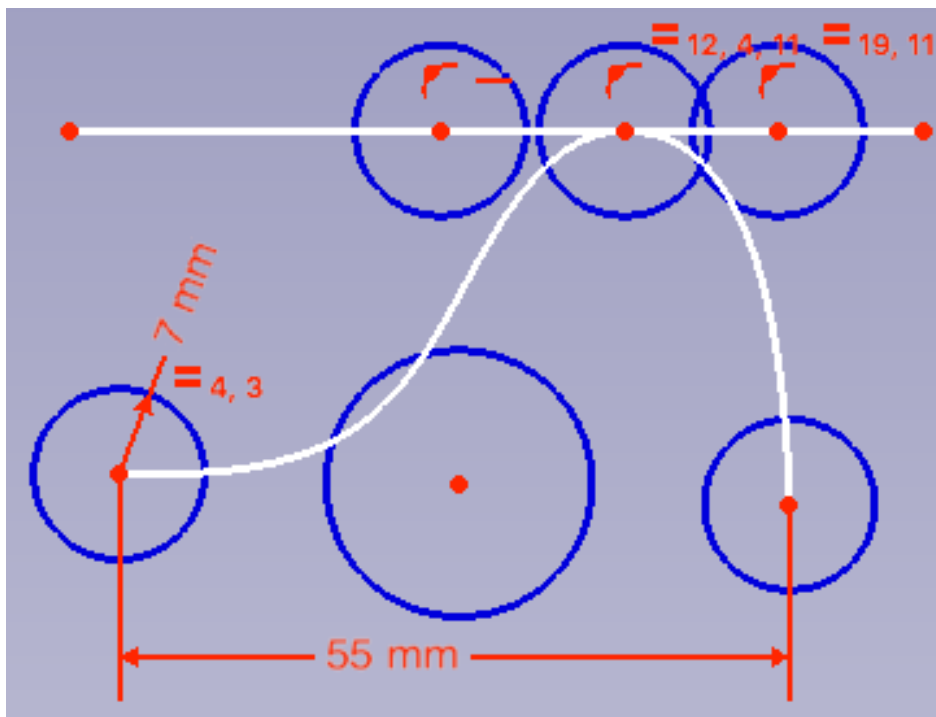
Zum Schluss fügst du wieder die Sperrbeschränkung hinzu.

**Tangentialbeschränkungen auf der Kurve** Derzeit ist es noch nicht möglich, Tangentialbeschränkungen an anderen Stellen der Kurve als den Endpunkten zu setzen. Auch Punkt-auf-Objekt-Beschränkungen sind nicht möglich.

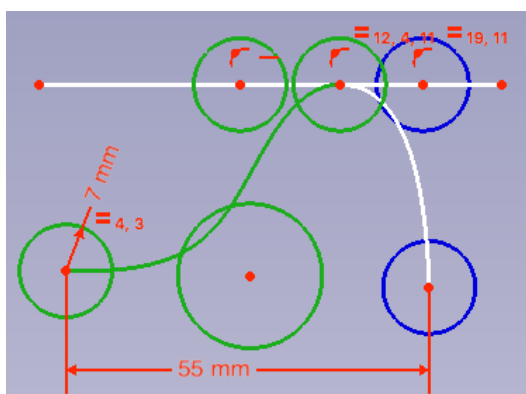
Zur Umgehung dieser Einschränkung erzeugt man zwei B-Splines, die tangential miteinander verbunden sind. Weil das nicht direkt geht, muss eine Konstruktionslinie zusätzlich eingefügt werden.

**Achtung:** Man erhält nicht automatisch genau dieselbe Kurve wie mit einem einzelnen B-Spline, aber man kann die Kurve sehr gut annähern.

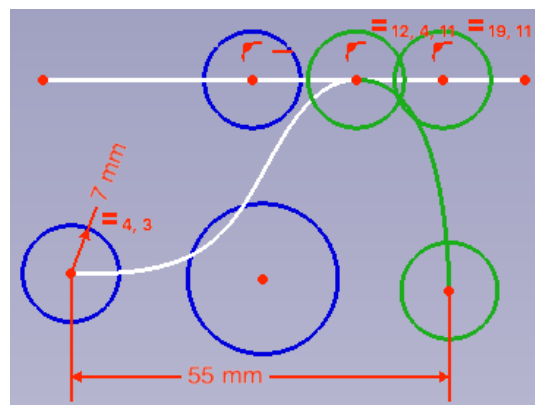
**Übung 17** *Füge ausgehend von Übung 15 auf der vorherigen Seite eine Tangente am oberen Scheitelpunkt des B-Splines hinzu.*



Es sind zwei B-Splines beteiligt:



and




Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um die Tangente hinzuzufügen.






- Man kann den Endpunkt und den nächsten Kontrollpunkt auf der Tangente positionieren. Das ist der Weg, den ich hier gewählt habe.
- Man kann die Punkt-zu-Punkt-Tangentialbeschränkung auf den Endpunkten verwenden.

**Punkt-auf-Objekt-Beschränkungen auf der Kurve** Dies wird analog zur Tangentialbeschränkung durch Aufteilen des B-Splines gemacht.

**Rechtwinklig zur Kurve** Dies wird analog zur Tangentialbeschränkung durch Aufteilen des B-Splines gemacht.

## 14 Kegelschnitte

Man findet die Kegelschnitte im Dropdown-Menü des Icons . Sobald man einmal einen Kegelschnitt ausgewählt hat, bleibt diese Auswahl erhalten.

Icons	Beschreibung	DOF
	Ellipse, festgelegt durch Mittelpunkt und Radien von Haupt- und Nebenachse	5
	Ellipse festgelegt durch Haupt- und Nebenachse	5
	Ellipsenabschnitt	7
	Hyperbelabschnitt	7
	Parabelabschnitt	6

Die Ellipse ist durch die beiden Linien der Hauptachsen bestimmt, die zusammen 8 DOF haben. Die Achsen haben den Mittelpunkt gemeinsam (minus 2 DOF) und stehen rechtwinklig aufeinander (minus 1 DOF). Insgesamt ergibt das also 5 DOF.

Der Ellipsenabschnitt hat zwei zusätzliche DOF: Start und Endpunkt können durch je einen Winkel festgelegt werden. Dies ergibt zusammen 7 DOF.

Der Hyperbelabschnitt ist auch durch zwei rechtwinklige Linien definiert (5 DOF), die hier in T-Form aufeinanderstehen. Hinzu kommen wieder die beiden Winkel mit je 1 DOF. Dies ergibt zusammen 7 DOF.

Der Parabelabschnitt wird durch die Linie (4 DOF) zwischen Brennpunkt und Scheitel bestimmt. Hinzu kommen wieder die beiden Winkel mit je 1 DOF. Dies ergibt zusammen 6 DOF.

### 14.1 Anlage und Verwendung von Kegelschnitten

Die Verwendung von Kegelschnitten ist unkompliziert. Es gibt allerdings die weiter unten beschriebene Besonderheit (s. Abschnitt 14.2 auf der nächsten Seite) bei der Verwendung von Tangenten.

- Man kann die Konstruktionslinien (s. Abschnitt 15 auf der nächsten Seite) verwenden, um das Sketch weiter einzuschränken.
- Man kann die Kurve verwenden wie bei Kreis und Kreisabschnitt beschrieben:
  - Tangentialbeschränkungen zwischen Kegelschnitt und Linie
  - Punkt-zu-Punkt-Tangentialbeschränkungen zwischen den Endpunkten der Abschnitte von Kegelschnitten und anderen geometrischen Elementen.
  - Orthogonalbeschränkungen zwischen den Endpunkten der Abschnitte von Kegelschnitten und anderen geometrischen Elementen.

## 14.2 Orthogonal- und Tangentialbeschränkung auf Kegelschnitten

Eine Tangentialbeschränkung wird aus Benutzersicht genauso angelegt wie bisher: Man wählt beide Kurven aus und wendet die Beschränkung an. Bei den Kegelschnitten ist der Effekt jedoch etwas anders:

- Es wird ein zusätzlicher Punkt angelegt;
- Dieser Punkt wird mit Punkt-auf-Objekt-Beschränkungen auf beide Kurven gelegt;
- Es wird eine Tangentialbeschränkung angelegt.




Dieselbe Technik wird für die Orthogonalbeschränkung zwischen Kegelschnitt und anderen geometrischen Elementen verwendet:




## 15 Konstruktionsgeometrie

Konstruktionsgeometrie wird verwendet, wenn geometrische Elemente nicht außerhalb des Sketchers – wie z.B. zum Aufpolstern – verwendet werden, sondern nur innerhalb des Sketchers zum Festlegen der Konstruktion dienen. In Übung 7 auf Seite 18 haben wir das bereits verwendet und bei einigen geometrischen Elementen wie z. B. den Polygonen wird Konstruktionsgeometrie automatisch erzeugt (s. Abschnitt 11 auf Seite 27).

Konstruktionsgeometrie wird in blau dargestellt, um sie von den „echt“ oder „normal“ genannten geometrischen Elementen zu unterscheiden. Es gibt zwei Möglichkeiten, um Konstruktionsgeometrie zu erzeugen:

- Man wählt ein normales geometrisches Element und klickt das Umschalt-Icon . Damit kann man zwischen Konstruktions- und normaler Geometrie hin und herschalten. Das bedeutet, dass man aus Konstruktionsgeometrie auch normale Geometrie machen kann.

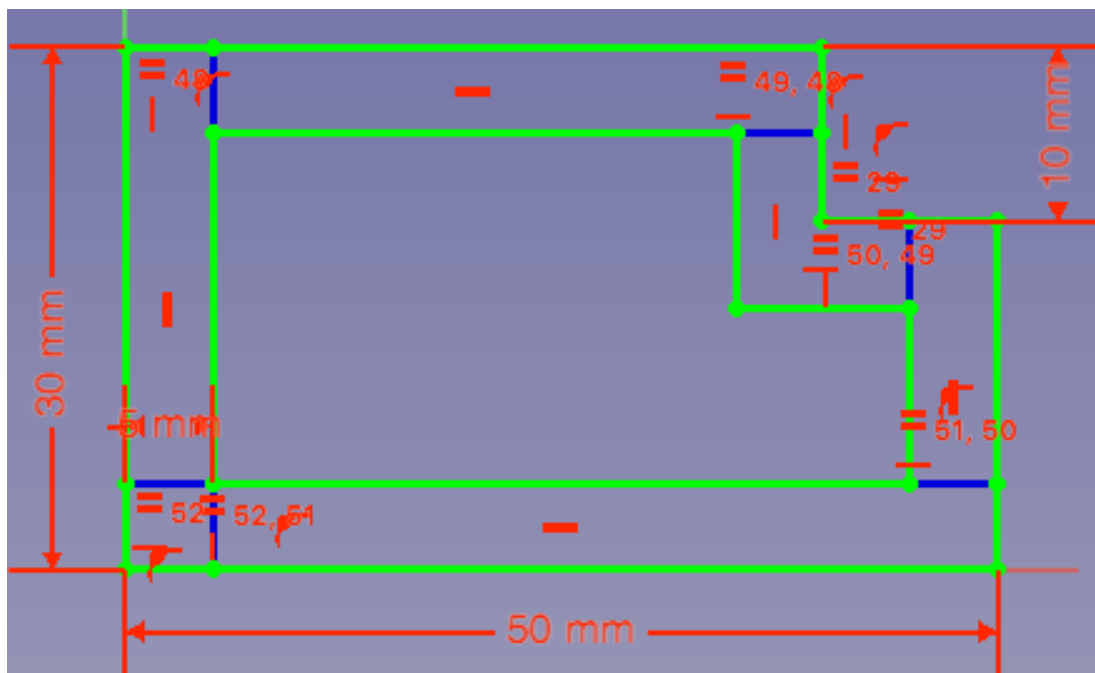
- Wenn nichts ausgewählt ist und man klickt das Umschalt-Icon , dann bekommen alle Icons zum Erzeugen von geometrischen Elementen eine blaue Farbe und man wechselt in den Konstruktionsmodus. In diesem Modus sind alle erzeugten Elemente Konstruktionselemente.

Um den Konstruktionsmodus zu verlassen, klickt man nochmals das Umschalt-Icon



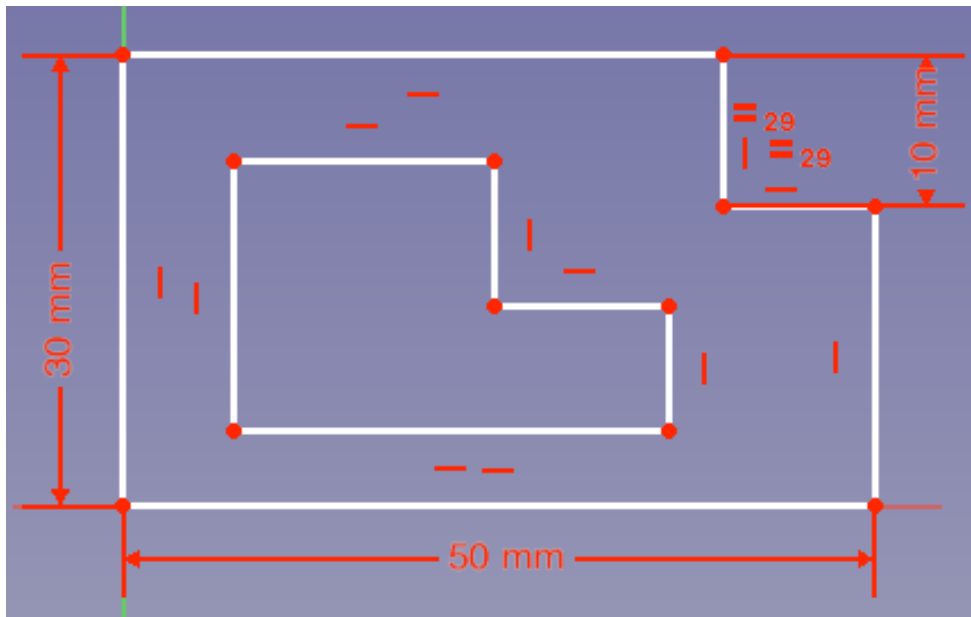
Ich verwende häufig Konstruktionsgeometrie, wenn ich einen gleichmäßigen Abstand zwischen einem inneren und einem äußeren Teil eines Sketchs haben möchte.

**Übung 18** *Erzeuge ein nichttriviales Sketch mit Innen- und Außenkante, die überall denselben Abstand haben sollen*



Lösung:

- Beginne mit der vollständig eingeschränkten Außenlinie.
- Füge die Innenlinie mit derselben Struktur hinzu. Das Sketch könnte jetzt etwa so aussehen:



- Wechsle in den Konstruktionsmodus.
- Füge die Konstruktionslinien hinzu. Mit eingeschalteten Autoconstraints kann man schon beim Anlegen Punkt-auf-Objekt-, Horizontal- und Vertikalbeschränkungen erzeugen.
- Ergänze die fehlenden Punkt-auf-Objekt-, Horizontal- und Vertikalbeschränkungen.
- Füge Gleichheitsbeschränkungen zwischen allen Konstruktionslinien ein.
- Füge eine vertikale oder horizontale Abstandsbeschränkung für eine der Konstruktionslinien ein.

## 16 Punkt

Der Punkt ist zwar das einfachste geometrische Element, er wurde aber bisher nicht besprochen, weil er nur als Konstruktionselement dient, unabhängig davon, ob man sich im Konstruktionsmodus befindet oder nicht.

Icon:	
Anzahl hinzugefügter DOF:	2

Der Punkt kann mit einer X- und einer Y-Koordinate fixiert werden und hat daher 2 DOF.

Es sei nochmals auf den Unterschied zwischen dem Icon für den Punkt und der Koinzidenz-Beschränkung hingewiesen. Das Symbol zum Erzeugen des Punktes ist größer und in der Icon-Leiste der geometrischen Elemente enthalten.

Weil ein Punkt immer Konstruktionsgeometrie ist, ist es nicht möglich, ein Sketch zu erstellen, dass lediglich einen Punkt als normale Geometrie enthält. (Dies wäre wünschenswert bei der Erstellung von Lofts, die in einem Punkt enden.) Dies gilt für die Version 0.18 und kann sich in einer späteren Version ändern.

Der Punkt wird für Sketche verwendet, bei denen an bestimmten Stellen ein Punkt benötigt wird, jedoch keiner als Endpunkt o. ä. zur Verfügung steht. Dies kann z.B. der Mittelpunkt eines Rechtecks sein oder auch ein bestimmter Punkt auf einem Kreis, usw. Ein Beispiel wurde in Übung 13 auf Seite 29 gegeben.



## Teil III

# Beschränkungen (*Constraints*)

Durch die Constraints hebt sich der Sketcher deutlich von übrigen Arbeitsbereichen und auch von anderen 2D-Zeichenprogrammen ab. Insbesondere durch die geometrischen Constraints wie Koinzidenz, Gleichheit, Punkt-auf-Objekt, Tangente usw. kann die Abhängigkeit von festen Maßen stark verringert und damit die Lesbarkeit und Parametrierbarkeit stark verbessert werden. Man stelle sich ein Sketch mit einer Nut vor, bei dem jeder einzelne Punkt durch X- und Y-Koordinate definiert wäre. Das wären 18 Maße. Und nun stelle man sich zwei oder drei solcher Sketche vor, und man hätte die Aufgabe, diese Nuten ein Stück nach rechts oben zu verschieben. Dann müsste man jedes einzelne Maß anpassen – was für ein Aufwand!

In diesem Teil werden die verschiedenen Beschränkungen vorgestellt und wie man mit ihnen umgeht.

Während geometrische Elemente Freiheitsgrade hinzufügen, machen Beschränkungen das Gegenteil: Sie reduzieren die Freiheitsgrade. Im folgenden werde ich dafür auch den Begriff verwenden, dass eine Beschränkung eine gewisse Zahl an Freiheitsgraden *verbraucht*. Diese Zahl verbrauchter Freiheitsgrade sollte man immer im Hinterkopf behalten, dann kann man, wenn man stets die Mitteilungen des Solvers im Blick hat, beim Anwenden sofort sehen, ob sich die Zahl der Freiheitsgrade so verändert wie erwartet. Mir persönlich bereitet das Freude, wenn ich sehe, wie sich die Zahl der Freiheitsgrade der Null nähert; wesentlich wichtiger ist aber, dass ich sofort eingreifen kann, wenn etwas aus dem Ruder läuft.

## 17 Beschränkungen auswählen


Die Auswahl von Beschränkungen scheint zunächst einfach zu sein, aber es gibt Möglichkeiten, die über das Offensichtliche hinausgehen. Wenn man eine Beschränkung mit einer der folgenden Vorgehensweisen auswählt, dann wird sie sowohl in der 3D-Ansicht, als auch in der Liste der Constraints im Panel links ausgewählt.


**Anklicken der Constraints in der 3D-Ansicht** Dies ist wahrscheinlich die am häufigsten verwendete Variante.

**Doppelklick in der 3D-Ansicht auf ein Maß** wie z. B. Abstand oder Radius, um einen bestehenden Wert zu ändern.

**Listenauswahl** Manchmal ist es schwierig, eine bestehende Constraint in der 3D-Ansicht auszuwählen. So ist es z. B. in der Version 0.18.14976 nicht möglich, eine einzelne Beschränkung auszuwählen, wenn dem geometrischen Element noch weitere Beschränkungen zugeordnet sind.

In diesem Fall kann man die Beschränkung in der Liste im Panel links anwählen. Dies ist auch die sicherste Möglichkeit, um die zuletzt angefügte Beschränkung auszuwählen, weil sie auch in der Liste die letzte ist.

**Zu geometrischen Elementen gehörende Constraints auswählen** Wenn man ein geometrisches Element ausgewählt hat, dann kann man mit dem Icon  alle Constraints auswählen, die zu diesem Element gehören, einschließlich der Koinzidenzbeschränkungen an den Endpunkten. Das zuvor ausgewählte Element wird deselektiert, so dass nur noch die Constraints ausgewählt sind.

**Zu einer Constraint gehörende geometrische Elemente auswählen** Analog zum vorigen Punkt gibt es auch die umgekehrte Möglichkeit: Wenn eine Constraint ausgewählt ist, kann man mit Klick auf  alle geometrischen Elemente auswählen, die mit dieser Constraint verbunden sind. Die zuvor ausgewählte Constraint wird deselektiert.

**Rechteckauswahl** Diese Art der Auswahl ist – was Constraints betrifft – nur geeignet, um Koinzidenz-Beschränkungen auszuwählen. Darüber hinaus kann die Rechteckauswahl dazu verwendet werden, um geometrische Elemente auszuwählen, die übereinander liegen, z. B. um eine Tangentialbeschränkung zu erzeugen:

Man kann ein Rechteck mit gehaltener linker Maustaste aufziehen. In Abhängigkeit von der Richtung werden folgende Elemente ausgewählt:

- Wird das Rechteck von links nach rechts aufgezogen, werden alle Elemente ausgewählt, die vollständig im Rechteck drinliegen.
- Von rechts nach links werden alle Elemente ausgewählt, die ganz oder teilweise im Rechteck liegen.

Ein Beispiel für die Rechteckauswahl ist in Übung 21 auf Seite 50 gegeben.

## 18 Anwenden von Constraints

Analog zum Anlegen geometrischer Elemente gibt es auch zwei Arten, um Constraints anzulegen. Das Verhalten kann in Einstellungen→Skizze→Allgemein→Beschränkungs Erstellung „Continue Mode“ (Experimentell) konfiguriert werden.

- Beschränkungen werden so erzeugt wie in den bisherigen Übungen: Abhängig von der Art der Beschränkung wählt man ein oder mehrere geometrische Elemente aus und klickt auf das Icon der Beschränkung.
- Der andere Modus ähnelt dem fortlaufenden Modus bei der Erstellung geometrischer Elemente: Ohne ein geometrisches Element gewählt zu haben, wählt man ein Beschränkungs-Icon wie z. B. eine Vertikalbeschränkung. Nun kann man alle geometrischen Elemente anwählen, die diese Beschränkung haben sollen, in unserem Beispiel also alle Linien, die senkrecht sein sollen.

Bei Beschränkungen wie Punkt-auf-Objekt, die die Auswahl mehrerer geometrischer Elemente erfordern, wird die Beschränkung angewendet, sobald genügend Elemente ausgewählt sind. Bei einigen Beschränkungen wie z. B. der Symmetrie ist dabei auch die Reihenfolge von Bedeutung.

Der fortlaufende Modus wird mit einem Rechtsklick der Maus, der Escape-Taste oder der Auswahl eines Icons zur Erzeugung eines geometrischen Elements beendet.

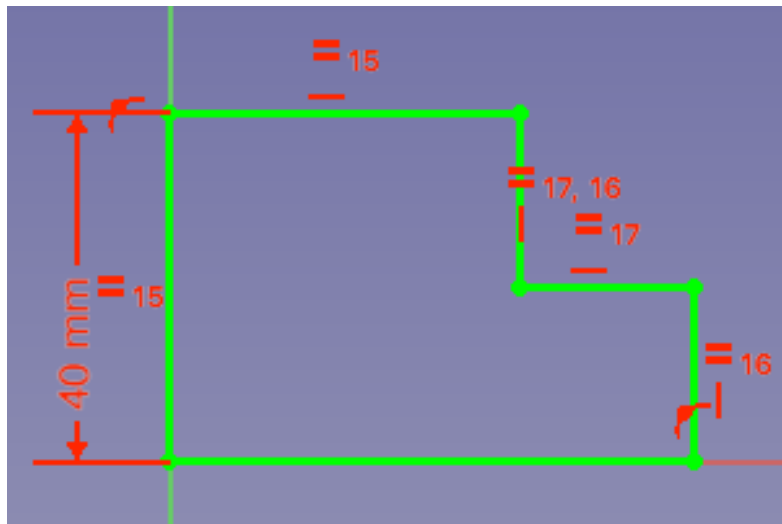
## 19 Der Löser (*Solver*)

### 19.1 Lösen eines Sketchs

Für den Löser ist ein Sketch ein – unter Umständen sehr großes – Gleichungssystem. Der Löser versucht eine Lösung zu finden, die im besten Fall eindeutig ist.

Ein Sketch heißt „gelöst“, wenn alle Beschränkungen erfüllt sind und es keine andere „nah dran liegende“ Lösung gibt. Das bedeutet, dass man keinen Teil des Sketches stetig bewegen kann, so dass alle Beschränkungen immer erfüllt sind. Diese Bedingung hört sich etwas kompliziert an – und sie ist es auch; denn auch ein als gelöst gekennzeichnetes Sketch kann sehr wohl mehrere Lösungen haben. Die folgende Übung zeigt zwei unterschiedliche Sketche, die beide vollständig eingeschränkt sind und beide die gleichen Constraints haben.

**Übung 19** *Erzeuge ein Sketch gemäß der folgenden Abbildung*



Die linke und obere Seite sind gleich. Die drei kurzen Linien sind gleich.

Nun erzeugen wir ein anderes Sketch mit denselben Beschränkungen:

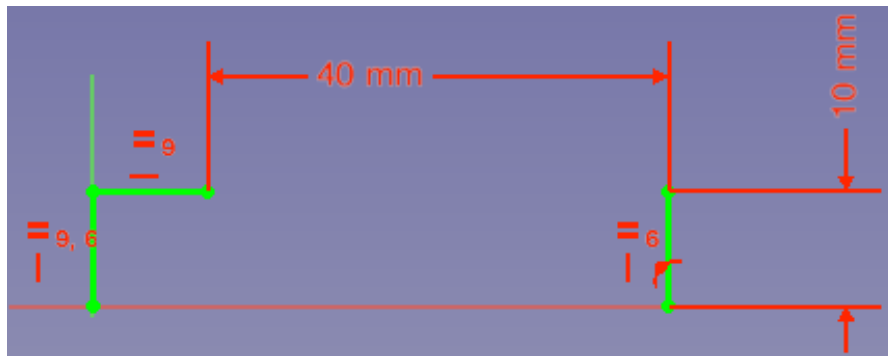
- Entferne die Horizontalbeschränkung von der kurzen horizontalen Linie. Im Bild hat sie die Nummer 17.
- Bewege die rechte Seite des Sketchs nach links. Bewege sie so weit, bis die untere senkrechte Linie *links* von der oberen senkrechten Linie liegt.
- Wende die Gleichheitsbeschränkung wieder an.

Nun haben wir dieselben Beschränkungen wie vorher, aber ein anderes Sketch.



**Übung 20** Erzeuge ein Sketch gemäß der folgenden Abbildung





Das Sketch verhält sich wie erwartet, die Grundstruktur bleibt gleich.

Gehe nun zurück zur 10 mm-Variante und ändere die Länge in *einem* Schritt auf 60 mm:



Die linke horizontale Linie hat ihre Richtung geändert. Wenn das passiert, dann mache ich die letzte Aktion rückgängig und bewege die *Elemente von Hand* so nah wie möglich an ihre *endgültige Position*.<sup>1</sup>

**Verbesserung der Stabilität** Man kann die Stabilität verbessern, indem man Winkelbeschränkungen von 90° an Stelle von Horizontal- und Vertikalbeschränkungen verwendet

<sup>1</sup>Man kann auch unter Einstellungen→Skizze→Allgemein die Option „Zeige die erweiterte Solver-Steuerung“ anwählen. Nach dem erneuten Öffnen des Sketchers gibt es dann im Panel einen Bereich *Erweiterte Einstellungen des Löser*. Wählt man als Standard-Löser *Levenberg-Marquardt*, dann wird das Springen oftmals vermieden.

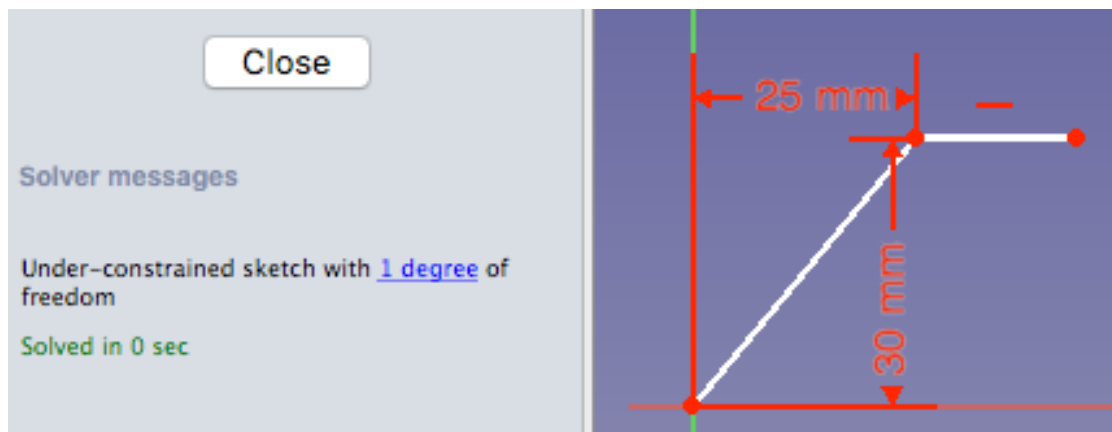
(siehe Abschnitt 35 auf Seite 70). Dies sollte man jedoch auf keinen Fall immer so machen, weil das Sketch unübersichtlicher und dem Solver das Lösen erschwert wird.

## 19.3 Meldungen des Löses

Nach jeder Änderung am Sketch, welche die Freiheitsgrade betrifft, wie z.B. Hinzufügen und Löschen von geometrischen Elementen oder Beschränkungen, berechnet der Löser das gesamte Sketch neu und antwortet mit einer Meldung im Panel. Einige dieser Meldungen sind erwünscht, andere bezeichnen Fehlerzustände.

### 19.3.1 Erwünschte Meldungen

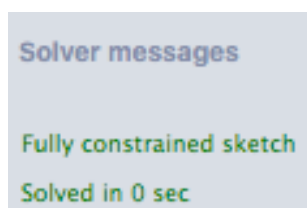
**Underconstrained Sketch** Wir betrachten nochmals das Beispiel mit den beiden Linien aus dem Abschnitt 4.1 auf Seite 10 über Auto-Constraints.



Man kann auf den blauen Teil der Meldung klicken, im Beispiel [1 degree](#). Dadurch werden Elemente ausgewählt, die noch weiter beschränkt werden sollten. Im Beispiel ist es die obere, horizontale Linie.

Mit welchen Beschränkungen das Sketch genau versehen werden soll, liegt nun beim Anwender, denn es kann mehrere Möglichkeiten geben. Empfehlung: denke gut darüber nach und wende dann eine geeignete Beschränkung an. Im Beispiel könnte eine Gleichheits- oder eine horizontale Längenbeschränkung sinnvoll sein. Sogar eine Punkt-auf-Objekt-Beschränkung zwischen dem rechten Endpunkt und der Y-Achse wäre möglich, wobei die Linie dann ihre Richtung umkehrt.

**Vollständig eingeschränkte Skizze** in freundlichem Grün. Dies ist der Zustand, der immer erreicht werden sollte!



Ein Sketch kann auch wenn es nicht vollständig eingeschränkt ist, für Aufpolsterungen und Taschen verwendet werden. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass in seltenen Fällen nicht vollständig eingeschränkte Sketche zu Problemen führen können.

### 19.3.2 Unerwünschte Meldungen

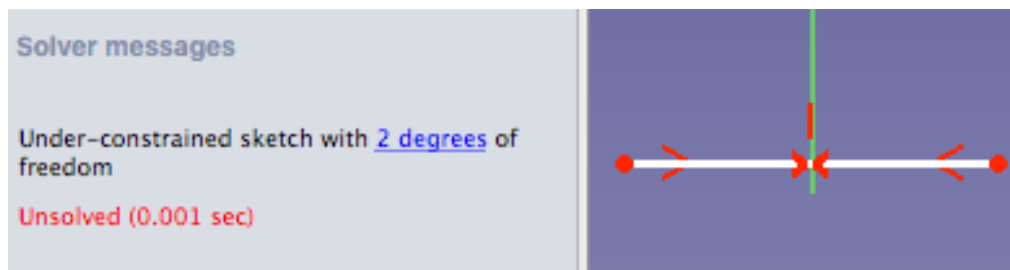
Es gibt verschiedene unerwünschte Zustände von unterschiedlichem Schweregrad. Die meisten werden vom Löser erkannt und mit einer entsprechenden Meldung quittiert.

Zur Beachtung: *Wenn sich ein Sketch in einem Fehlerzustand befindet, dann wird die 3D-Ansicht nicht mehr automatisch erneuert. Man kann weder das Sketch, noch Teile davon bewegen; weitere Constraints werden nicht mehr berücksichtigt, auch wenn sie korrekt sind. Dieser Zustand bleibt so lange erhalten, bis der Fehler behoben ist.*

Die folgende Liste ist nach Schweregrad geordnet, die schlimmsten Fehler kommen zuerst.

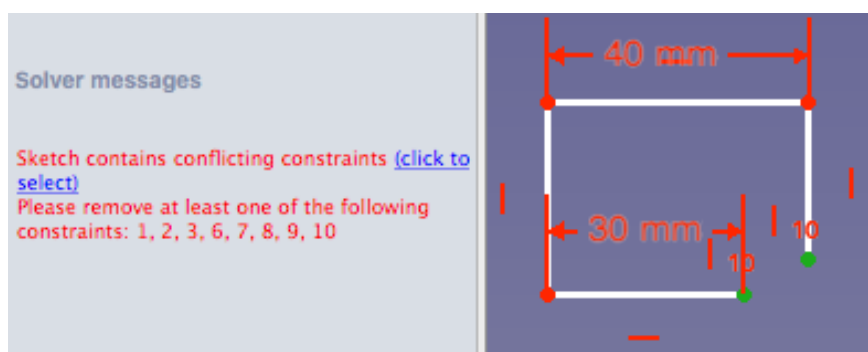
**Keine Lösung** In dem unten angegebenen Sketch habe ich eine Symmetrie-Beschränkung mit den beiden Endpunkten der Linie und der Y-Achse angelegt. Dies ordnet die Linie horizontal an und es verbleiben 2 DOF. Dann habe ich eine (widersprüchliche) Vertikalbeschränkung hinzugefügt. Die eigentliche Meldung des Löses ändert sich nicht, aber es wird „Keine Lösung“ in rot hinzugefügt. Man sollte in diesem Fall die zuletzt hinzugefügte Beschränkung löschen, denn der Solver gibt keine weiteren Hinweise, wo sich der Konflikt befindet.

Das zeigt einmal mehr wie wichtig es ist, stets die Meldungen des Löses im Auge zu behalten.




Diese Situation gibt es in verschiedenen Geschmacksrichtungen, je nachdem welche Meldung der Löser vorher angezeigt hatte. Wenn man das Sketch schließt und erneut öffnet, dann erhält man die Meldung „Unbestimmte Anzahl an Freiheitsgraden“.


**Skizze enthält widersprüchliche Einschränkungen** In diesem Beispiel



habe ich eine Koinzidenz-Beschränkung auf den beiden ausgewählten Punkten angelegt. Dies zu erfüllen ist unmöglich, weil die Punkte nicht gleichzeitig übereinander liegen und 10 mm von einander entfernt sein können. Der Löser erkennt das und gibt eine entsprechende Meldung aus.

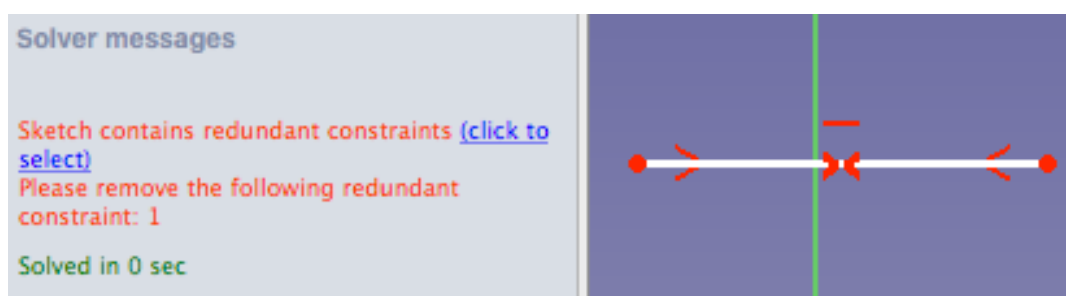
Der Löser zeigt eine Liste aller möglichen Beschränkungen, von denen mindestens eine gelöscht werden sollte. Wenn man den blauen Teil der Meldung anklickt, dann werden *alle* diese Beschränkungen selektiert. Wenn man diese nun löscht, dann hat man viel zu viel entfernt.

Wenn man ständig die Meldungen im Blick hat, dann sollte man zunächst die zuletzt hinzugefügte Beschränkung wieder löschen und die Situation analysieren. Meistens wird man dann die letzte Beschränkung durch eine andere ersetzen, es kann aber auch sein, dass man eine der vorher schon vorhandenen ändert oder löscht, ehe man die letzte wieder hinzufügt. In dem vorliegenden Beispiel könnte eine Horizontalbeschränkung 

oder ein senkrechter Abstand  korrekt sein. Es könnte aber auch z. B. die 30 mm-Beschränkung entfernt werden, dann wäre es möglich die Koinzidenz-Beschränkung anzubringen.

**Skizze enthält redundante Einschränkungen** Diese Meldung wird angezeigt, wenn eine Beschränkung schon aus den anderen Beschränkungen folgt. Im folgenden Beispiel hatte ich bereits die Linie mit der Horizontalbeschränkung. Dann habe ich die beiden Endpunkte und die Y-Achse ausgewählt und eine Symmetrie-Beschränkung hinzugefügt. Diese Symmetrie impliziert jedoch schon, dass die Linie horizontal ist. Der Löser bemerkt das und macht den perfekten Vorschlag, die Horizontalbeschränkung zu entfernen. Dem Vorschlag folgt man, indem man auf „Anklicken zum Auswählen“ klickt und die Beschränkung löscht.

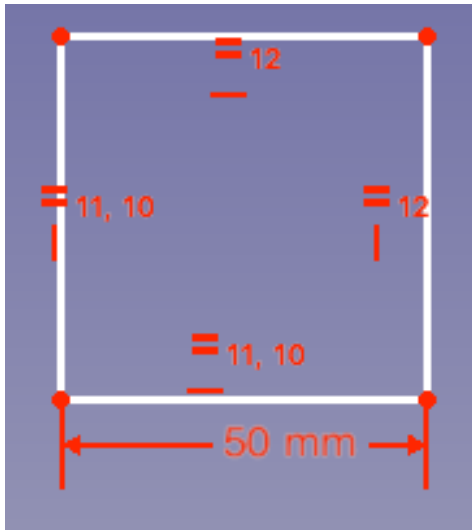
Zur Beachtung: In diesem Fall ist es nicht sinnvoll, die zuletzt hinzugefügte Beschränkung zu löschen.



**(Normale Anzeige)** Es werden DOF oder sogar die „vollständig eingeschränkt“-Meldung angezeigt. Dennoch ist das Sketch überbestimmt; allerdings auf eine Weise, die der Löser nicht erkennen kann, weil die Überbestimmtheit scheinbar unbedeutend ist. Dies ist wiederum einer der Gründe, weshalb die Meldungen des Löser stets beobachtet werden sollten. Nehmen sie nicht im erwarteten Maß ab, dann liegt möglicherweise ein Problem vor.

Als Beispiel erzeuge ein Sketch in der folgenden Weise:





- Erzeuge ein Rechteck. Das Sketch hat 4 DOF.
- Füge eine Horizontalbeschränkung hinzu. Das Sketch hat 3 DOF.
- Erzeuge eine Gleichheitsbeschränkung zwischen der linken und der unteren Seite. Das Sketch hat 2 DOF.
- Diese zwei DOF rühren daher, dass das gesamte Rechteck noch nicht fixiert ist. Probier' es aus: du kannst das Rechteck mit der Maus irgendwo hinschieben.
- Füge eine weitere Gleichheitsbeschränkung hinzu, diesmal zwischen der linken und der oberen Seite. Die Anzahl der DOF ändert sich nicht!
- Füge eine weitere Gleichheitsbeschränkung hinzu, diesmal zwischen der oberen und der rechten Seite. Die Anzahl der DOF ändert sich immer noch nicht!
- *Achtung: Das hier beschriebene Verhalten tritt nicht immer auf, dennoch ist das Sketch überbestimmt.* Versuche das Sketch wie oben zu bewegen. Es geht nicht, obwohl immer noch 2 DOF vorhanden sind.

*Empfehlung: Entferne die unnötigen Constraints, sobald du bemerkst, dass die Zahl der DOF sich nicht wie erwartet vermindert!*

Man sollte diese Überbestimmtheit vermeiden, auch wenn der Löser damit zurechtkommen sollte. Das (manchmal) unbewegliche Rechteck zeigt jedoch, dass unerwartete Konsequenzen auftreten können. Diese vermeidet man, indem man die ganze Situation vermeidet.

Die einzige Möglichkeit, solche Situationen zu vermeiden, ist, laufend die Meldungen des Löser zu beachten.

## 20 Koinzidenz

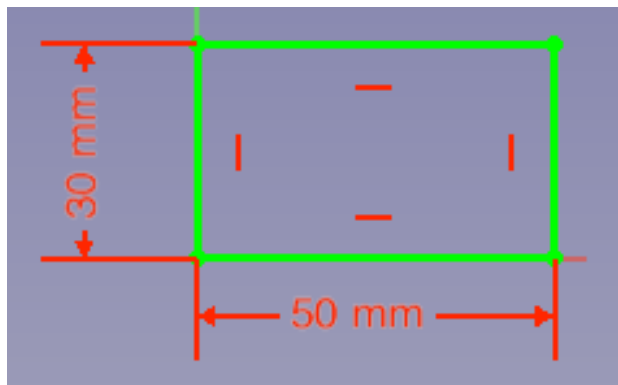
Icon:	
Anzahl verbrauchter DOF:	2

Die Koinzidenz verhindert bei einem Punkt die Bewegung in zwei Richtungen und verbraucht somit 2 DOF.

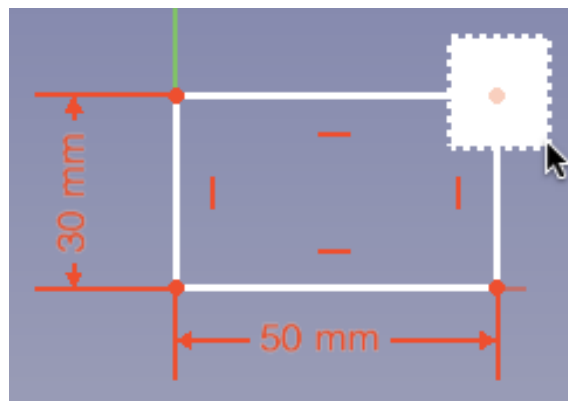
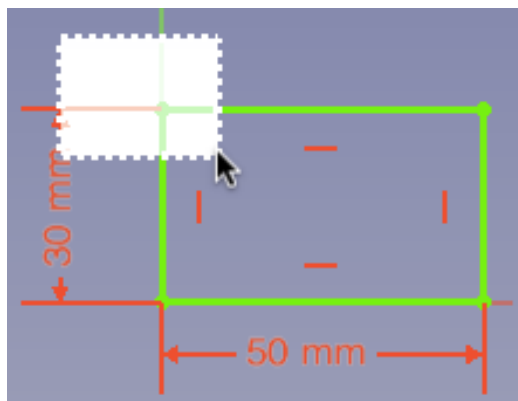
Wie bereits im Abschnitt über die geometrischen Elemente beschrieben, muss man aufpassen, dass man das Icon für die Koinzidenz aus der Liste der Beschränkungen verwendet und nicht mit demjenigen für den Punkt verwechselt. Das Kreissymbol für die Koinzidenz ist das kleinere.

Es gibt einen wichtigen Unterschied zwischen Punkten, die mit einer Koinzidenzbeschränkung verbunden sind und solchen, die einfach nur dieselben Koordinaten haben. Insbesondere wenn man die Funktion „Einrasten am Gitter“ aktiviert hat, kann das zu Verwirrung führen. Das folgende Beispiel zeigt den Unterschied und verwendet dazu die Rechteckauswahl, die besonders nützlich ist, wenn es um Koinzidenzen geht.

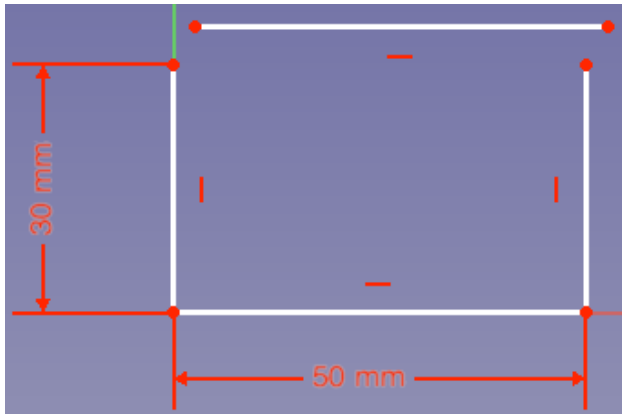
**Übung 21** Erzeuge ein vollständig beschränktes Rechteck, d. h. du hast 0 DOF.



Wähle nun nacheinander die beiden oberen Ecken und entferne das Gewählte.



Dies hinterlässt das Sketch mit 4 DOF, obwohl alle Linien und Punkte noch an denselben Positionen sind wie vorher. Es ist nun z. B. möglich die obere Linie zu bewegen, was vorher nicht der Fall war.




Sobald du etwas mehr Erfahrung hast und weißt, ob Punkte koinzident *sind* oder *nur so aussehen*, wirst du die Rechteckauswahl eher andersrum verwenden: Wähle die nicht verbundenen Endpunkte mit der Rechteckauswahl aus und erzeuge dann eine Koinzidenzbeschränkung.

Für Anfänger empfehle ich eine andere Vorgehensweise: Bewege bewusst einen der Punkte, die koinzident sein sollen von seiner Position weg. Wenn nun eine Koinzidenzbeschränkung angewendet wird, dann schnappt der Punkt sichtbar mit dem anderen zusammen.

Siehe Abschnitt 41 auf Seite 77 für ein Werkzeug zum Finden vergessener Koinzidenzen.

## 21 Punkt-auf-Objekt

Icon:	
Anzahl verbrauchter DOF:	1

Auf einer horizontalen Linie fixiert eine Punkt-auf-Objekt-Beschränkung einen Punkt in vertikaler Richtung, während er sich auf der Linie noch bewegen kann. Dies verbraucht 1 DOF.

Oft wird diese Beschränkung verwendet, um einen Punkt auf der X- oder Y-Achse zu fixieren. Genauso können aber auch beliebige Linien, Kreise oder Kegelschnitt-Kurven verwendet werden. Derzeit ist es noch nicht möglich, die Punkt-auf-Objekt-Beschränkung auf B-Splines zu verwenden. Sofern es keine weiteren Beschränkungen gibt, kann der Punkt frei auf der Linie oder der Kurve bewegt werden. In Übung 6 auf Seite 15 haben wir bereits gesehen, dass der Punkt nicht auf dem Linien- bzw. Kurvensegment liegen muss.

**Übung 22** Erzeuge ein Sketch gemäß der folgenden Abbildung. Verwende Punkt-auf-Objekt-Beschränkungen auf der X-Achse (zweimal) und der Y-Achse.

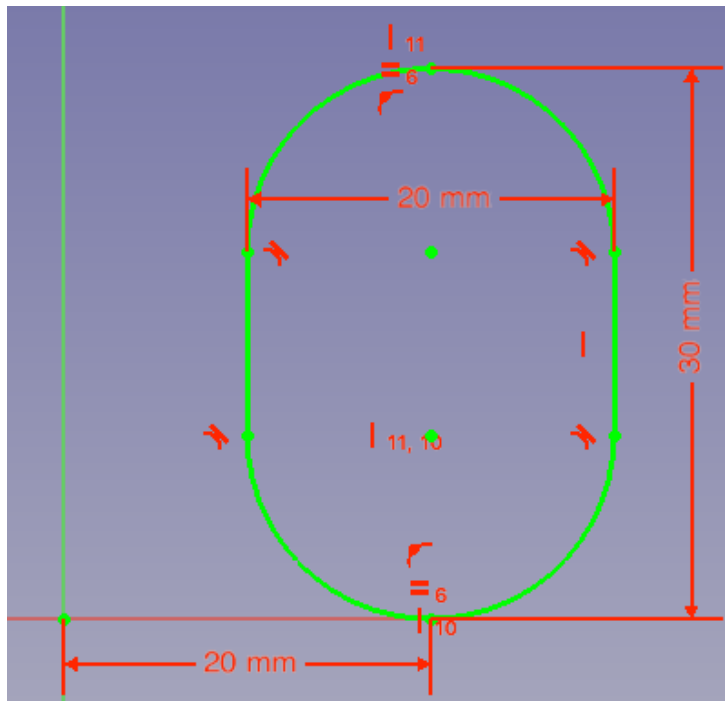


### Anmerkungen zur Verwendung:

- Wenn man einen groben vorläufigen Entwurf des Sketches angefertigt hat, kann es sinnvoll sein, den fortlaufenden Modus einzuschalten, um schnell alle Vertikalbeschränkungen zu setzen. Siehe Abschnitt 18 auf Seite 42 für weitere Informationen.
- Man kann mehrere Linien auswählen und die Vertikalbeschränkungen für alle auf einmal setzen. Dies scheint ähnlich schnell zu gehen wie beim fortlaufenden Modus, allerdings gibt es einen wesentlichen Unterschied: Wenn man hier einmal neben eine Linie in den freien Bereich klickt, dann werden alle vorher gewählten Linien deselektiert. Man sollte also vorsichtig sein und bei einer großen Zahl von Linien zwischendurch schon mal die Vertikalbeschränkungen setzen.
- Vertikalbeschränkungen können auch auf Punkte angewendet werden. Man wählt dazu zwei oder mehr Punkte und wendet die Vertikalbeschränkung an. Dies richtet die Punkte senkrecht übereinander aus. Häufig wird dies genutzt, um den obersten oder untersten Punkt eines Kreises oder Kreisbogens zu bestimmen.


Ein Abstandsmaß von 0 mm, um denselben Effekt zu erreichen, sollte man vermeiden.

### Übung 23 *Erzeuge eine Nut gemäß der folgenden Abbildung:*




Für den obersten und untersten Punkt der Nut wurden zusätzliche Punkte eingefügt (siehe Abschnitt 16 auf Seite 39). Diese Punkte haben jeweils eine Vertikalbeschränkung mit dem Kreismittelpunkt des unteren Kreises.

## 23 Horizontalbeschränkung


Icon:	
Anzahl verbrauchter DOF:	1

Alles, was zur Vertikalbeschränkung gesagt wurde, gilt sinngemäß auch für die Horizontalbeschränkung mit dem nicht überraschenden Unterschied, dass Linien und Punkte horizontal angeordnet werden.

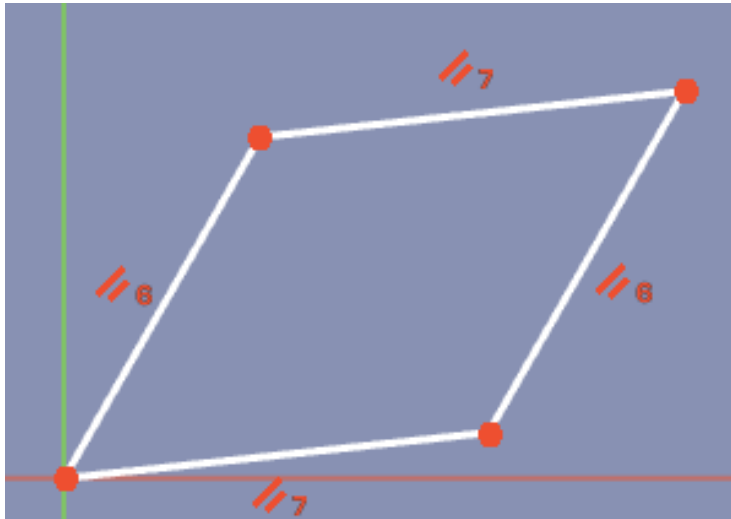
## 24 Parallel

Icon:	
Anzahl verbrauchter DOF:	1

Die Parallelbeschränkung bewirkt analog zur Vertikal- oder Horizontalbeschränkung die Ausrichtung einer Linie und verbraucht damit 1 DOF.

Man wählt zwei oder mehr Linien aus und klickt das -Icon. Dies richtet alle gewählten Linien parallel aus. Im fortlaufenden Modus werden Linien jeweils paarweise angewählt und parallel ausgerichtet.


**Übung 24** Erzeuge ein Sketch gemäß der folgenden Abbildung. Verwende den fortlaufenden Modus



Es gibt zwei Situationen, in denen man die Parallelbeschränkung nicht anwenden soll oder kann:

- Man sollte die Parallelbeschränkung nicht auf senk- oder waagerechten Linien anwenden. Stattdessen verwendet man die dafür vorgesehenen Vertikal- und Horizontalbeschränkungen.
- Man kann die Parallelbeschränkung nicht auf Kreisen und Bögen anwenden. Wenn man konzentrische Kreise benötigt, dann legt man die Mittelpunkte mit einer Koinzidenzbeschränkung aufeinander.

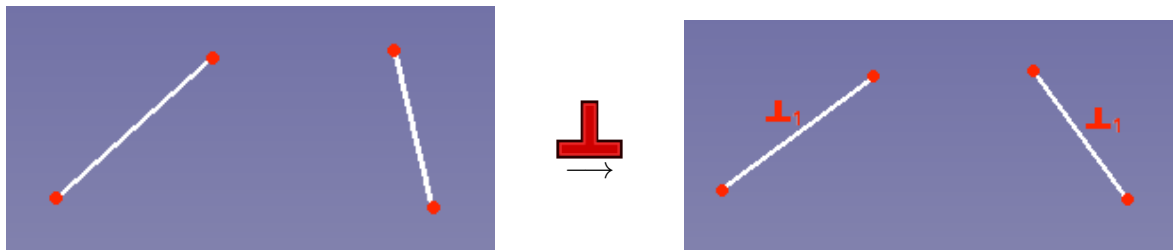
## 25 Orthogonal (rechtwinklig)

Icon:	
Anzahl verbrauchter DOF:	1 für Linie/Linie; siehe Absatz (a) unten 2 für Punkt/Linie; siehe Absatz (b) unten 3 für Punkt/Punkt; siehe Absatz (c) unten

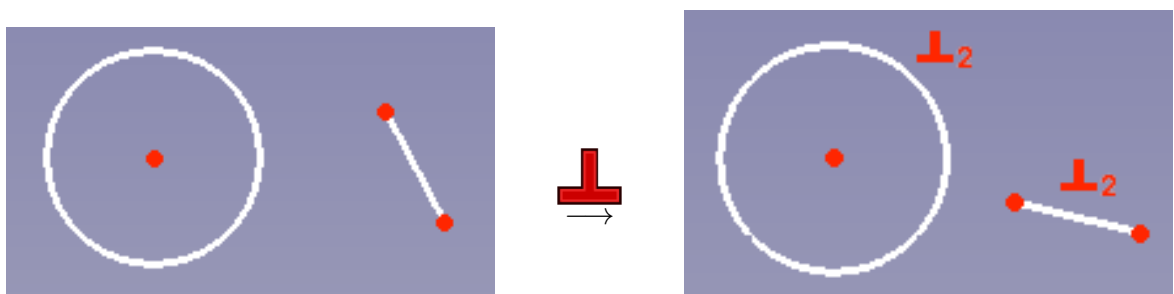
Die Orthogonalbeschränkung gibt es – ähnlich der Tangentialbeschränkung in Abschnitt 26 auf Seite 57 – in drei verschiedenen Geschmacksrichtungen, die unterschiedliches Verhalten bezüglich der Endpunkte aufweisen.

- (a) Für diese elementare Variante wählt man zwei Linien und wendet die Orthogonalbeschränkung an. Das folgende Beispiel zeigt, dass sich die Linien dabei nicht notwendigerweise schneiden müssen:

**Übung 25** Erzeuge zwei Linien in einigem Abstand und wende die Orthogonalbeschränkung an:

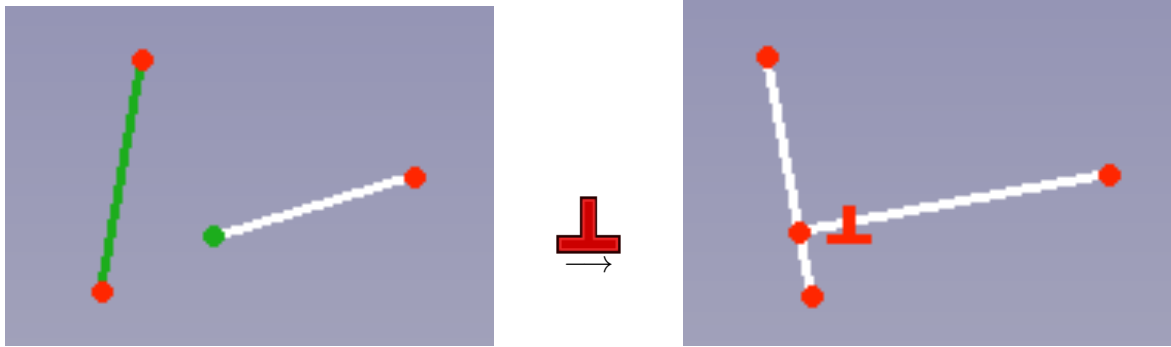


Die Orthogonalbeschränkung kann auch zwischen einer Linie und einem Kreis(-bogen) angewendet werden:

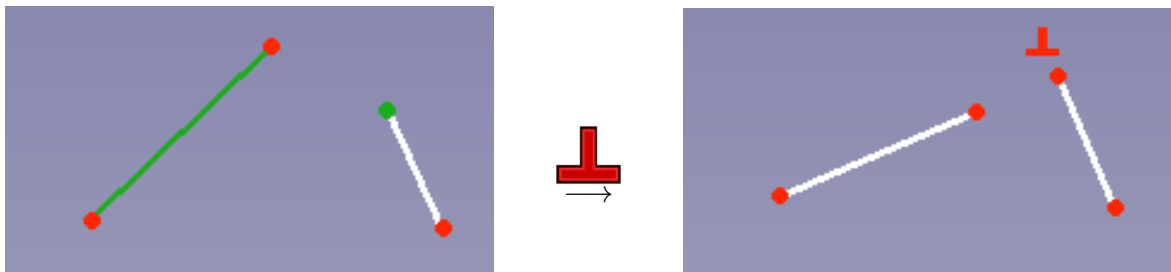


Anmerkung: Eine Punkt-auf-Objekt-Beschränkung zwischen Linie und Kreismittelpunkt hätte denselben Effekt.

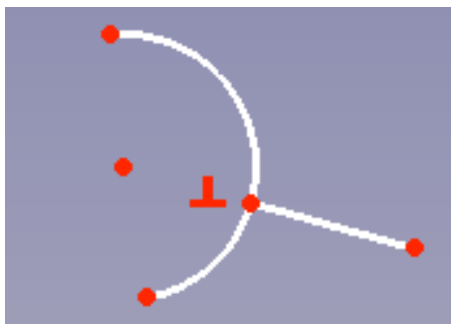
- (b) Wenn man eine Linie und den Endpunkt einer anderen Linie wählt, bevor man die Orthogonalbeschränkung anwendet, dann bekommt man dieselbe Situation wie vorher, allerdings liegt jetzt der Endpunkt *auf* der Linie:



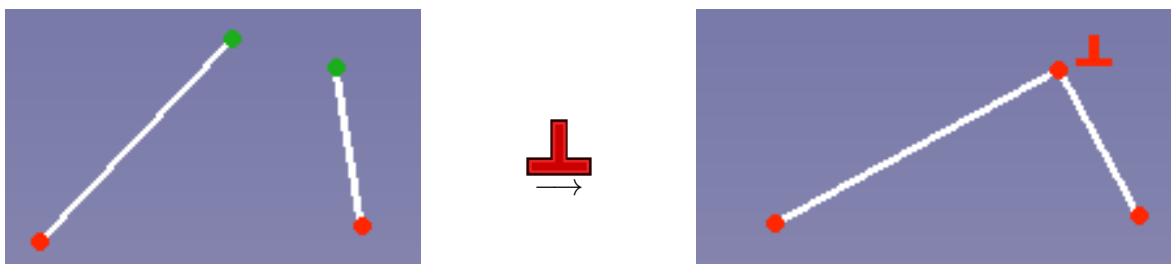
Um genau zu sein: Der Punkt liegt nicht auf dem tatsächlich vorhandenen Segment, sondern auf der (unendlichen) Geraden:



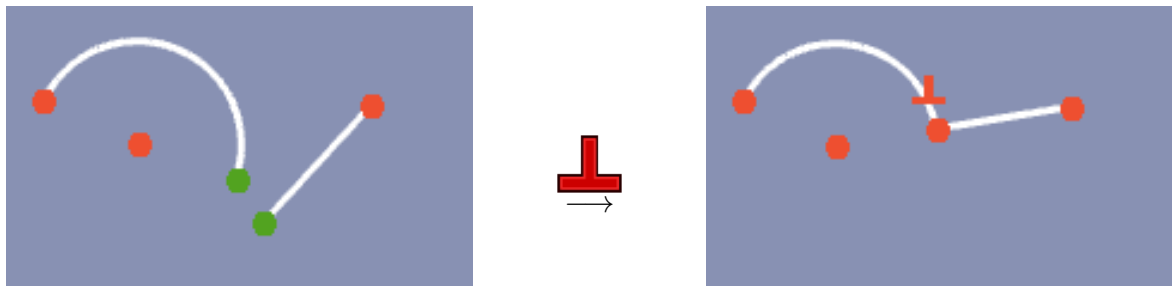
Auch diese Beschränkung kann man auf eine Linie und einen Kreis(-Bogen) anwenden:



- (c) Wählt man die Endpunkte zweier Linien oder einer Linie und eines Bogens und wendet dann die Orthogonalbeschränkung an, dann werden die beiden Linien rechtwinklig angeordnet *und* die beiden Punkte werden koinzident gemacht. Dies ist auch die Art der Orthogonalbeschränkung, die von dem Polyline-Werkzeug erzeugt wird, wenn man mit der M-Taste den Modus entsprechend umgeschaltet hat, siehe Abschnitt 9 auf Seite 24.








## Wofür Winkel nicht eingesetzt werden sollen oder können

- Man sollte die Orthogonalbeschränkung *nicht* nutzen, um Linien horizontal oder vertikal anzuordnen. Man sollte möglichst einfache Beschränkung nutzen und das ist im Fall horizontaler Linien die Horizontalbeschränkung (siehe Abschnitt 23 auf Seite 54) und für senkrechte Linien die Vertikalbeschränkung (siehe Abschnitt 22 auf Seite 52).
- Man kann die Orthogonalbeschränkung nicht direkt auf zwei Kreise oder Kreisbögen anwenden. Man muss dann eine Konstruktionslinie hinzufügen, um ein entsprechendes Ergebnis zu erzielen.

Dieses Thema wird am Ende des Abschnitts über die Tangentialbeschränkung nochmals aufgegriffen (siehe Abschnitt 27 auf Seite 60).

## 26 Tangenten

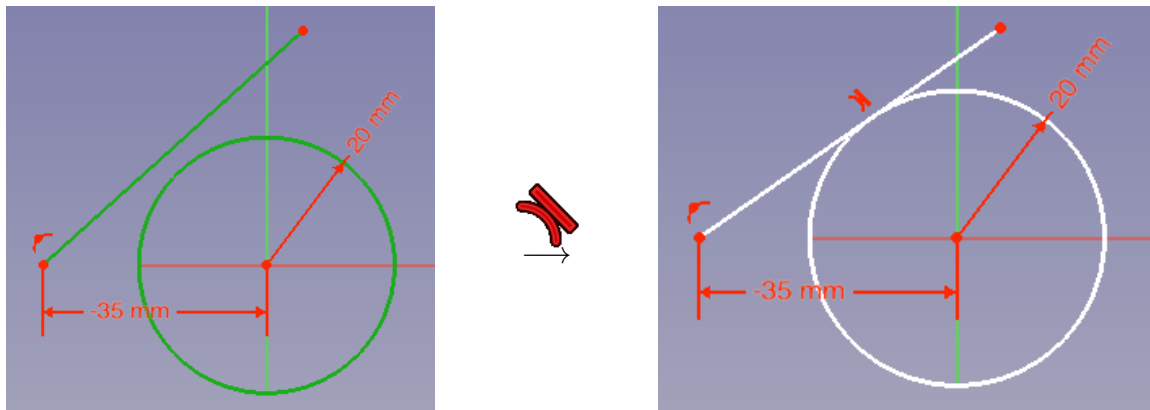
Auch die Tangentialbeschränkung gibt es ähnlich der Orthogonalbeschränkung in verschiedenen Varianten, die das Verhalten in den Endpunkten bestimmen.

Icon:	
Anzahl verbrauchter DOF:	1 (Kurve-Kurve) 2 (Punkt-Kurve) 3 (Punkt-Punkt)

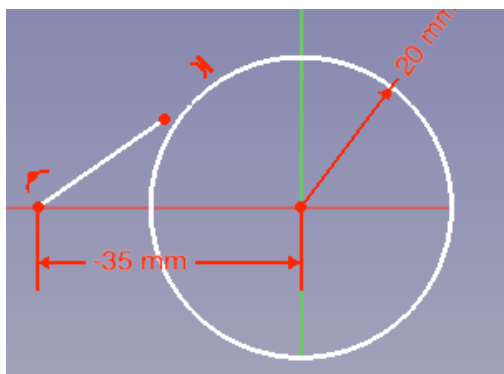
**Kurve-Kurve** (Mit „Kurven“ sind hier auch Geraden gemeint.) Man betrachte eine Linie, bei der ein Endpunkt fest ist. Dann bleiben zunächst zwei DOF für den anderen Endpunkt. Wenn die Linie nun einen gegebenen Kreis berührt, dann bleibt nur noch ein DOF übrig, weil der andere Endpunkt nur noch in einer Richtung bewegt werden kann.

Diese Kurve-Kurve-Variante der Tangente verbraucht also 1 DOF.

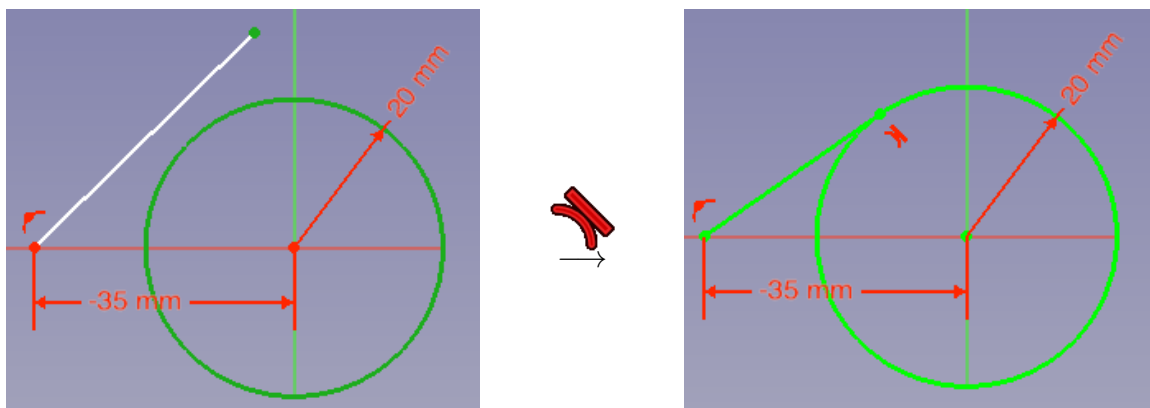
Man beachte, dass die grüne Farbe im linken Bild *nicht* die vollständige Einschränkung anzeigt, sondern die Auswahl vor Anwendung der Tangentialbeschränkung.



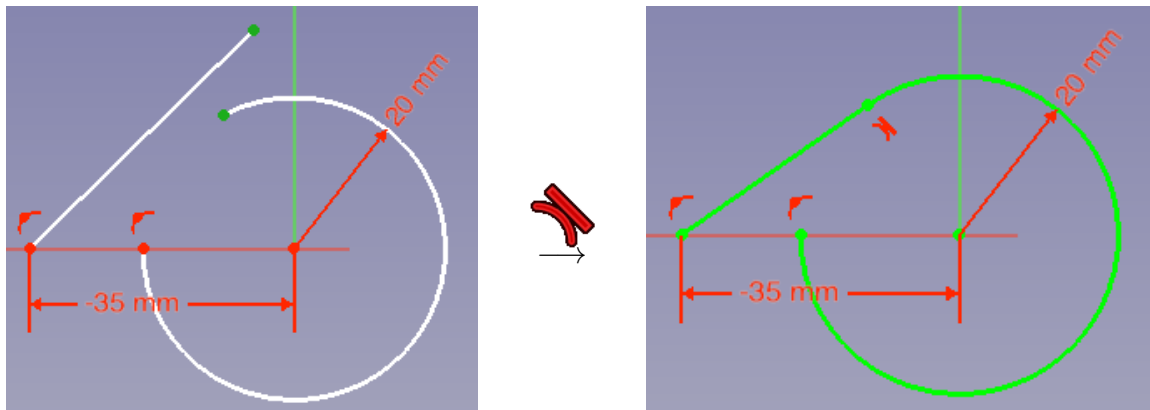
Analog zur Punkt-auf-Objekt-Beschränkung müssen die Elemente sich auch bei der Tangentialbeschränkung nicht unbedingt berühren:



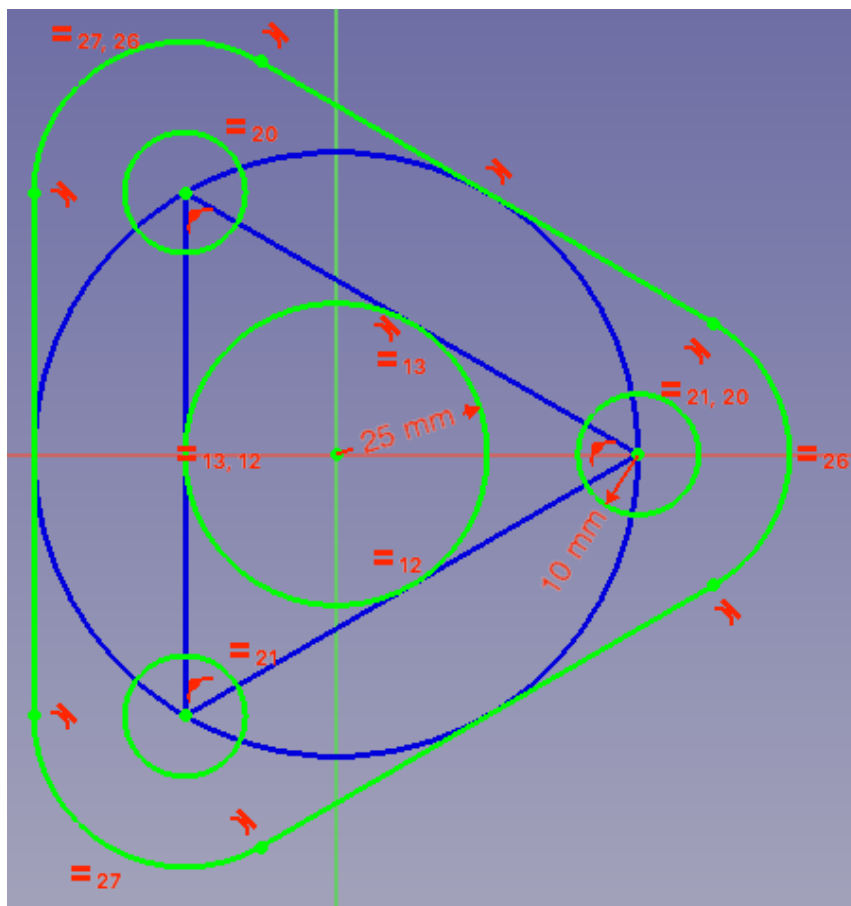
**Punkt-Kurve** Wenn in derselben Situation wie oben der Endpunkt auf dem Kreis liegt, dann bewegt sich nichts mehr, die Tangentialbeschränkung hat also 2 DOF verbraucht.



**Punkt-Punkt** Wenn man einen festen Kreisbogen hat und man verbindet den Endpunkt einer Tangente mit einem Endpunkt des Kreisbogens, dann wird der frei bewegliche Punkt (2 DOF) und die Richtung (1 DOF) verbraucht. Diese Beschränkung verbraucht also 3 DOF.



**Übung 26** Erzeuge ein Sketch für eine Dichtung gemäß der folgenden Abbildung. Verwendende das Polyline-Werkzeug für den äußeren Teil; benutze die M-Taste, um in den geeigneten Modus umzuschalten. Die kleinen Löcher haben alle denselben Durchmesser (10 mm). Die äußeren Bögen haben denselben Mittelpunkt wie die kleinen Löcher.



Es gibt eine Kurve-Kurve-Tangentialbeschränkung zwischen dem inneren Kreis und einer der Dreiecksseiten und dieselbe Art der Beschränkung gibt es noch mal zwischen dem blauen Konstruktionskreis und der äußeren oberen Linie.

Wenn die Polyline schon beim Anlegen geschlossen wurde, dann gibt es zwischen dem ersten und letzten Punkt eine Koinzidenzbeschränkung. An deren Stelle soll jedoch eine Punkt-Punkt-Tangentialbeschränkung treten. Um das zu erreichen, gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Man kann die Koinzidenz per Rechteckauswahl selektieren und entfernen, ehe man die Tangentialbeschränkung anlegt.
- Man kann die Koinzidenz in der Liste der Constraints im Panel links auswählen und entfernen, ehe man die Tangentialbeschränkung anlegt.
- Wenn man das automatische Entfernen redundanter Beschränkungen eingeschaltet hat, dann wird die Koinzidenz beim Erzeugen der Punkt-Punkt-Tangente automatisch entfernt.
- Wenn das automatische Entfernen nicht eingeschaltet ist, kann man per Rechteckauswahl die Endpunkte auswählen und eine Tangentialbeschränkung erzeugen. Der Löser bemerkt die Redundanz und quittiert sie mit einer Meldung. Durch Klicken auf den aktiven Teil der Meldung kann man die Koinzidenz auswählen und entfernen.
- Man wählt die Kanten an Stelle der Punkte und erzeugt damit eine Kurve-Kurve-Tangentialbeschränkung. Der Löser bemerkt das und ersetzt die Beschränkungen durch *eine* Punkt-Punkt-Tangentialbeschränkung.

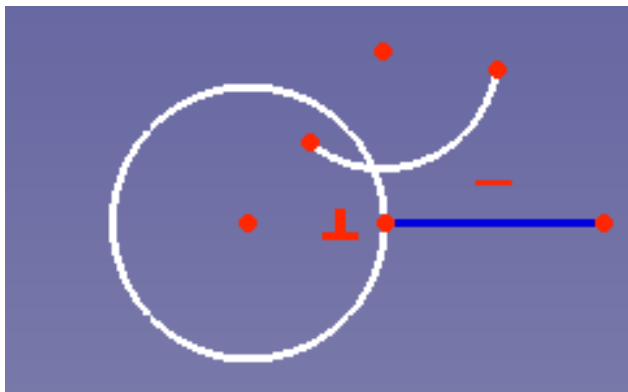
Da dies nun bekannt ist, kann man die Situation auch von vornherein vermeiden, indem man Anfangs- und Endpunkt gar nicht erst verbindet.

Wie im Abschnitt über Orthogonalität bereits versprochen, können wir nun die folgende Übung durcharbeiten.

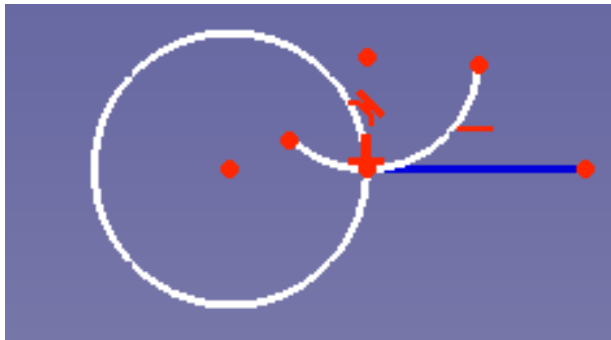
**Übung 27** *Erzeuge zwei Kreisbögen, die sich in einem rechten Winkel schneiden.*

Dafür geht man folgendermaßen vor:

- Erzeuge die Bögen
- Erzeuge eine blaue Konstruktionslinie mit einer Punkt-Linie-Orthogonalbeschränkung zwischen einem der Bögen und dem Endpunkt der Konstruktionslinie:



- Erzeuge eine Punkt-Linie-Tangentialbeschränkung zwischen dem anderen Bogen und demselben Punkt der Linie:

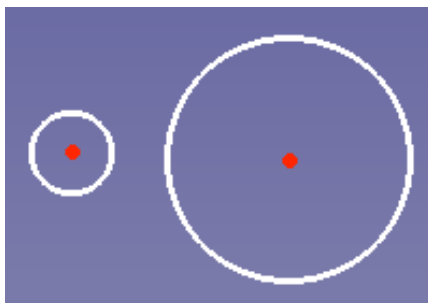
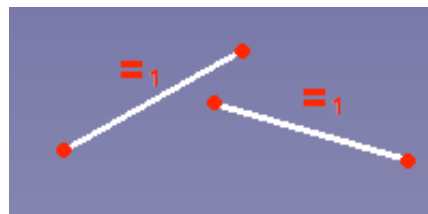
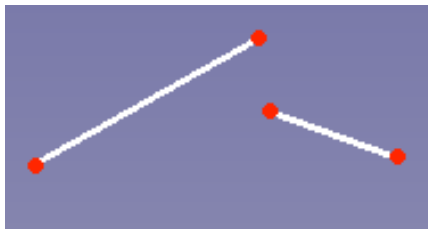


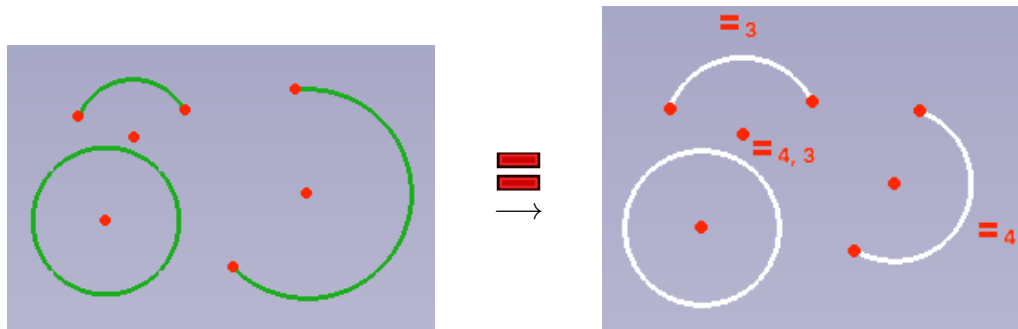
## 27 Gleichheit

Icon:	
Anzahl verbrauchter DOF:	1

Bei einer Linie mit einem fixierten Endpunkt kann man den anderen Punkt frei bewegen, man hat also 2 DOF. Wenn die Länge mit einer Gleichheitsbeschränkung festgelegt wird, bleibt noch ein DOF übrig. Die Gleichheit verbraucht also 1 DOF.

Man kann die Gleichheit auf zwei Linien oder auf zwei Kreise/Kreisbögen anwenden. Eine Mischung von Kreis(-bogen) und Linie ist nicht möglich. Auf Kreise und Kreisbögen angewendet legt die Gleichheit gleiche Radien fest – und nicht etwa die gleiche Bogenlänge.





## 28 Symmetrie

Icon:	
Anzahl verbrauchter DOF:	2

Wenn man einen Punkt (2 DOF) zu einem festliegenden Punkt symmetrisch anordnet, dann verliert er seine beiden Freiheitsgrade. Also verbraucht die Symmetrie 2 DOF.

**Warnung:** Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Symmetrie eine Beschränkung ist, die öfter als andere zu Fragen oder gar Problemen führt. Daher sollte diesem Abschnitt besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

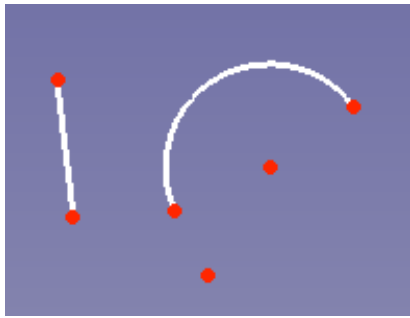
Die Symmetrie gibt es in zwei Varianten, als Punkt-Punkt-Punkt- und als Punkt-Linie-Punkt-Variante.

**Punkt-Punkt-Punkt-Symmetrie** Diese Variante richtet drei Punkte so aus, dass sie auf einer imaginären Linie liegen und die äußeren Punkte gleichen Abstand zum mittleren Punkt haben.

Man wählt zunächst die äußeren und als letztes den mittleren Punkt. Es ist empfehlenswert alle Punkte schon *vor* Anwendung der Beschränkung möglichst nah an ihrer endgültigen Position zu platzieren!

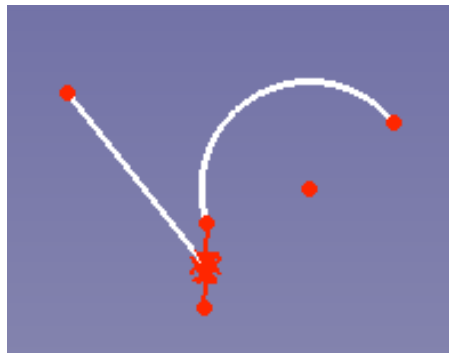
Im folgenden Beispiel dienen die verschiedenen geometrischen Objekte Line, Kreisbogen und Punkt nur der Verdeutlichung, welche Punkte jeweils durch die Symmetrie betroffen sind. Im allgemeinen kann sie auf beliebige Punkte angewendet werden.

**Übung 28** *Erzeuge ein Sketch gemäß der folgenden Abbildung und wende die Symmetrie jeweils an, nachdem die Punkte unteres Ende der Linie, unteres Ende des Kreisbogens und der einzelne Punkt in verschiedenen Reihenfolgen ausgewählt werden, so dass jeder der Punkte einmal als letztes ausgewählt wird.*

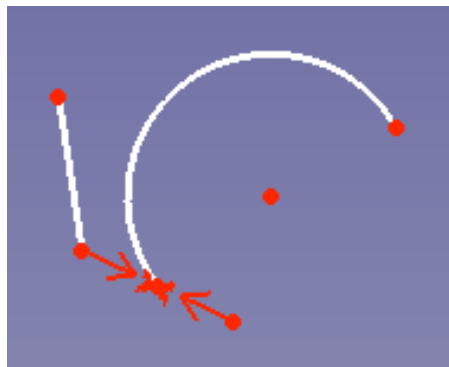


Hier sind die drei unterschiedlichen Lösungen:

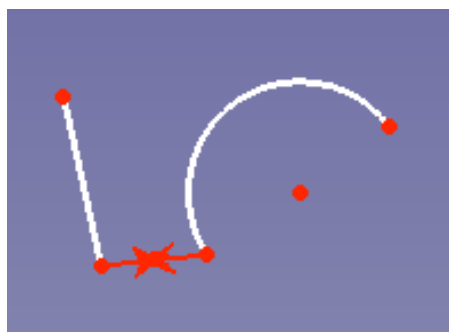
**Ende der Linie zuletzt:**



**End des Bogens zuletzt:**

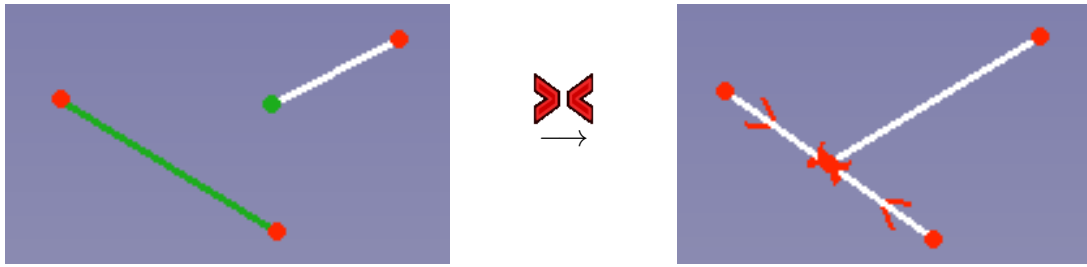


**Einzelner Punkt zuletzt:**

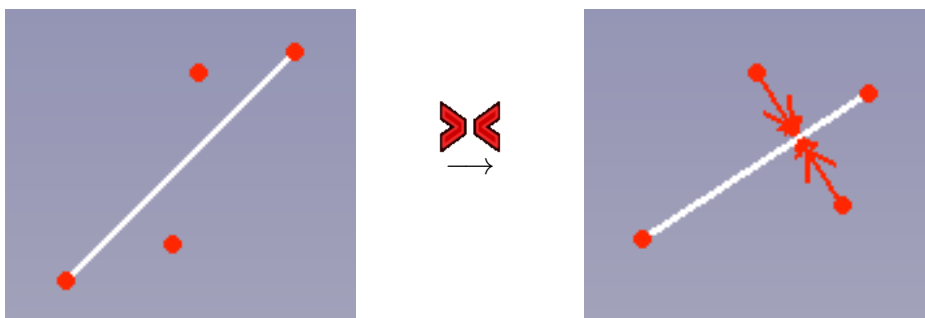


Im letzten Fall ist der Mittelpunkt schwer zu sehen, weil er unter dem Symmetriesymbol verschwindet.

**Sonderfall der Punkt-Punkt-Punkt-Symmetrie:** Wenn man einen Punkt auf der Mitte einer Linie festlegen will, dann kann man einfach die Line und den Punkt wählen und anschließend die Symmetrie anwenden. Die Reihenfolge der Auswahl spielt hier keine Rolle:

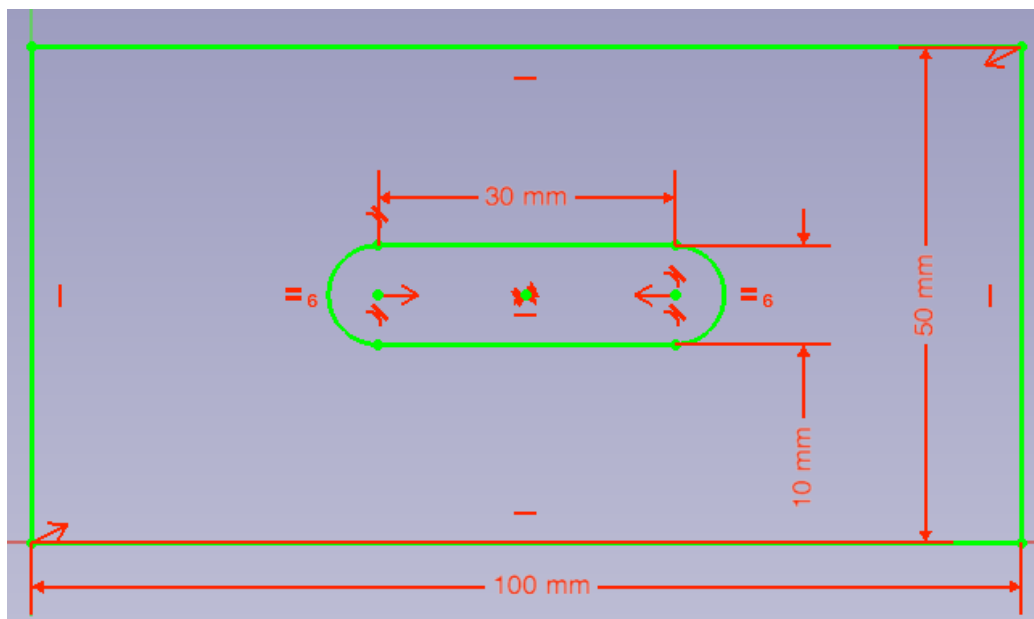


**Punkt-Linie-Punkt-Symmetrie** Diese Variante der Symmetrie ordnet zwei Punkte symmetrisch zu einer Linie an, d. h. die Punkte werden an der Linie gespiegelt. Die Reihenfolge der Auswahl spielt in diesem Fall keine Rolle:



**Übung 29** Erzeuge nochmals das Sketch aus Übung 12 auf Seite 28. Die Nut soll nun in der Mitte des Rechtecks zentriert werden.

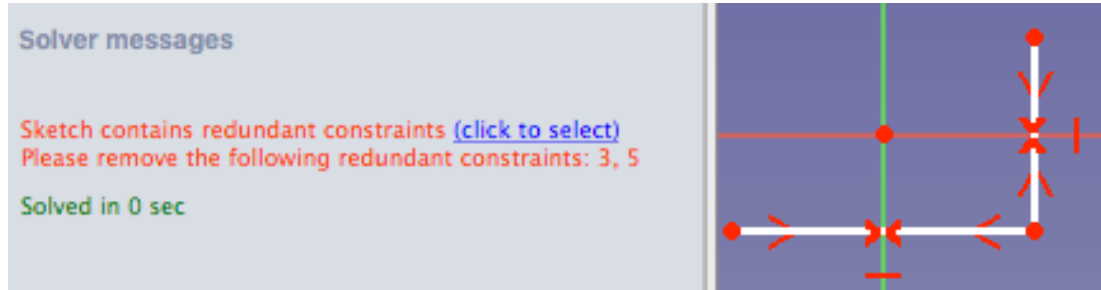
**Hinweis:** Verwende einen zusätzlichen Punkt (siehe Abschnitt 16 auf Seite 39) im Zentrum von Rechteck und Nut.





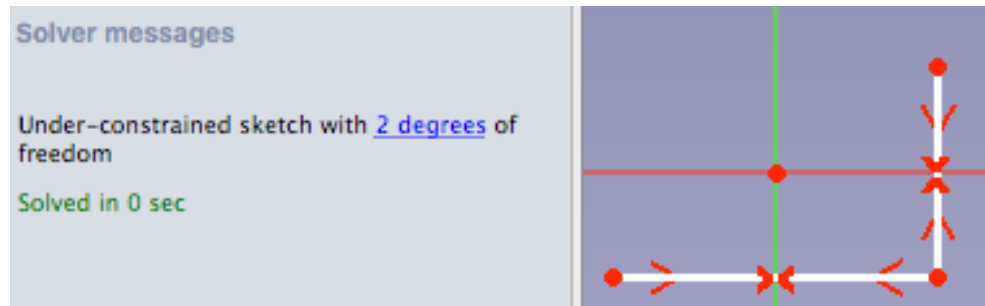
**Warnung:** Bei der Verwendung eines Rechtecks oder wenn Auto-Constraints eingeschaltet sind, die automatisch Horizontal- oder Vertikalbeschränkungen erzeugen, dann werden oft nachträglich Symmetriebeschränkungen hinzugefügt. In diesen Fällen impliziert die Symmetrie die Horizontal- bzw. Vertikalbeschränkung.

**Nein:**



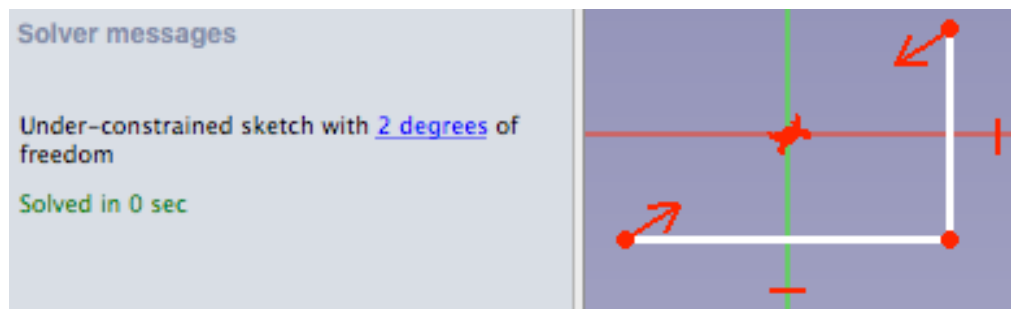
Siehst du die Horizontal- und die Vertikalbeschränkung unten und rechts? Lösche sie! Wenn man das automatische Entfernen redundanter Beschränkungen eingeschaltet hat, dann werden diese Beschränkungen automatisch entfernt.

geht so:



Deutlich besser: Verwende eine Horizontal- und eine Vertikalbeschränkung und wende eine Punkt-Punkt-Punkt-Symmetrie zwischen diagonal gegenüberliegenden Punkten und dem Ursprung an:

**Ja:**



Die verbleibenden 2 DOF entfallen auf Breite und Höhe.

## 29 Block

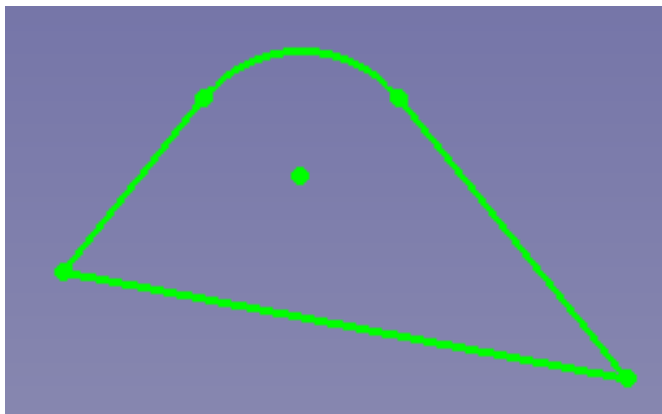
Icon:	
Anzahl verbrauchter DOF:	1 - beliebig

Die Blockbeschränkung verbraucht alle verbleibenden Beschränkungen eines geometrischen Elements. Das kann eine sein z. B. bei einer schon teilweise eingeschränkten Line, bis zu 5 bei einem Kreisbogen. Bei B-Splines kann diese Zahl noch beliebig steigen.

Die Blockbeschränkung beschränkt alles: z.B. beide Enden einer Linie, Mittelpunkt und Radius eines Kreises und zusätzlich beide Endpunkte bei einem Bogen. Bei einem B-Spline werden alle Kontrollpunkte und -kreise fixiert.

Man wendet die Blockbeschränkung auf Linien, Kreise und sonstige Kurven an, nicht jedoch auf Punkte. D.h. man kann nicht unbedingt ein ganzes Sketch auswählen und dann in einem Zug alles fixieren, man muss Linien und Kurven auswählen.

**Übung 30** *Erzeuge das folgende Sketch mit höchstens 9 Klicks vom Beginn bis es vollständig eingeschränkt ist. Im Bild sind die Beschränkungen verborgen.*



**Lösung:**

Klicks	Aktion
1	Polyline-Werkzeug auswählen
5	geschlossenen Kurvenzug erzeugen
1	Blockbeschränkung auswählen
2	zwei gegenüberliegende Seiten auswählen

**Warnung:** Die Blockbeschränkung scheint verlockend zu sein, wenn man ein Sketch vollständig einschränken möchte, aber bei den meisten technischen Konstruktionen ist davon abzuraten. Man sollte sie nicht aus Trägheit nutzen, sondern nur dann, wenn es sinnvoll ist. Hier sind einige sinnvolle Anwendungen:

- Beim Nachzeichnen eines Bildes sind vielleicht hunderte von Punkten entstanden. Es kommt dabei auf den Gesamteindruck an und nicht auf die exakte Position einzelner Punkte.
- B-Splines mit vielen Kontrollpunkten, die keine direkt ersichtliche Verbindung haben.
- Man möchte gezielt einige Elemente eines noch nicht vollständig eingeschränkten Sketches bewegen, ohne dass sich andere Elemente bewegen. Dann fügt man einige Blockbeschränkungen ein, die man später *unbedingt wieder entfernen* sollte.

## 30 Sperre (Schloss)

Icon:	
Anzahl verbrauchter DOF:	2 je Punkt

Die Sperrbeschränkung erzeugt eine horizontale und eine vertikale Abstandsbeschränkung und hat daher 2 DOF.

Sie ist eine Abkürzung, um horizontale und vertikale Abstandsbeschränkungen zu erzeugen, bei denen der Benutzer keine Maße eingeben muss. Es werden einfach die im Sketch vorhandenen genommen. Wie die Blockbeschränkung ist es verlockend, diese Beschränkung zu verwenden, um damit schnell zu einem vollständig eingeschränkten Sketch zu kommen, aber auch hier sollte man geometrische Beschränkungen bevorzugen.

Es kann sinnvoll sein, Sperrbeschränkungen zu verwenden, wenn man ein Sketch mit eingeschalteter Option „Am Raster fangen“ erstellt hat (siehe Abschnitt 2 auf Seite 4), und anschließend die Punkte an genau diesen Positionen fixieren möchte.

Die Sperrbeschränkung wird auf eine Menge ausgewählter Punkte angewendet. Je nachdem, wie viele Punkte ausgewählt sind, ist das Verhalten etwas unterschiedlich:


**Ein Punkt ist gewählt** Die Sperrbeschränkung erzeugt eine horizontale und eine vertikale Abstandsbeschränkung zum Ursprung.

**Zwei Punkte gewählt** Es wird eine horizontale und eine vertikale Abstandsbeschränkung zwischen diesen Punkten erzeugt. (Genau genommen ist dies ein Spezialfall des folgenden Falls).

**Drei oder mehr Punkte gewählt** Es wird jeweils eine horizontale und eine vertikale Abstandsbeschränkung zwischen jedem Punkt und dem letzten Punkt erzeugt.

Das Verhalten ist so, als ob all diese Beschränkungen einzeln erzeugt würden, was man z.B. an der Undo-Funktion sehen kann.

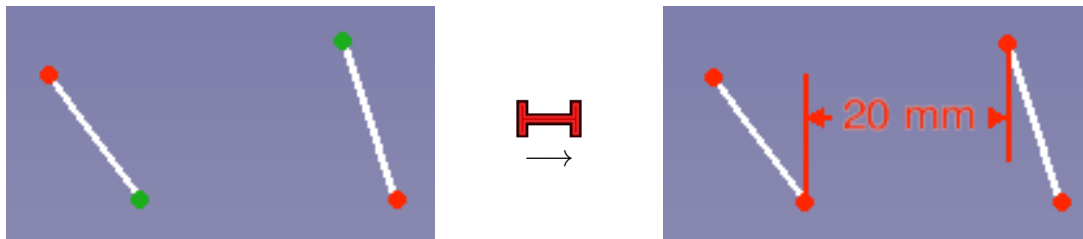
## 31 Horizontaler Abstand

Icon:	
Anzahl verbrauchter DOF:	1

Diese Beschränkung fixiert einen Punkt in einer Richtung und verbraucht somit 1 DOF.

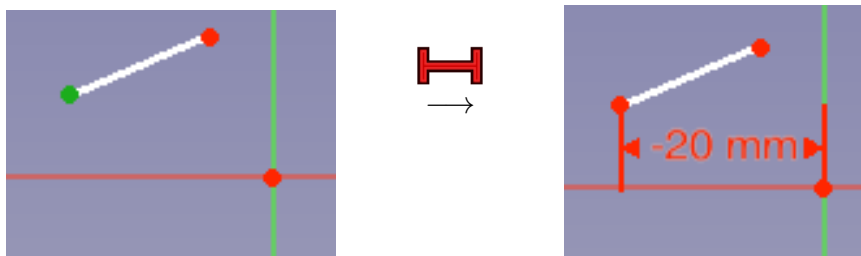
Der Horizontale Abstand kann entweder den Abstand zweier Punkte oder den Abstand eines Punktes zum Ursprung des Koordinatensystems festlegen

- Angewendet auf *zwei* Punkte wird der horizontale Abstand zwischen diesen Punkten festgelegt, und zwar unabhängig von deren Position in der Ebene:




Es ist zwar nicht sinnvoll, aber doch möglich, den Abstand auf einen negativen Wert zu setzen.

- Auf eine Linie angewendet ergibt sich derselbe Effekt wie bei einer Anwendung auf die beiden Endpunkte.
- Angewendet auf einen *einzelnen* Punkt wird der Abstand zum Ursprung festgelegt. Ist der Wert negativ, dann liegt der Punkt links vom Ursprung.



## Vermeidung horizontaler Abstände der Länge 0

Es ist möglich, mit einem horizontalen Abstand von 0, Punkte vertikal auszurichten. Auch wenn es keine Meldung des Löser gibt, sollte man das vermeiden und stattdessen eine Vertikalbeschränkung  zwischen den Punkten anbringen. Zum einen sollte man geometrische Beschränkungen den Maßen vorziehen, zum anderen macht es das Sketch übersichtlicher ohne die Maßangabe.

## 32 Vertikaler Abstand


Icon:	
Anzahl verbrauchter DOF:	1

Diese Beschränkung fixiert einen Punkt in einer Richtung und verbraucht somit 1 DOF.

Angewendet auf *zwei* Punkte wird der vertikale Abstand zwischen diesen Punkten festgelegt; angewendet auf einen Punkt wird der Abstand vom Ursprung festgelegt.

Alles, was zum Horizontalen Abstand gesagt wurde, gilt sinngemäß auch für den vertikalen Abstand. Man muss in den Aussagen nur „horizontal“ durch „vertikal“ ersetzen.

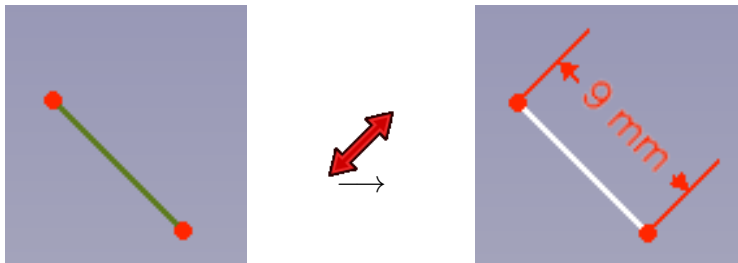
### 33 Länge

Icon:	
Anzahl verbrauchter DOF:	1

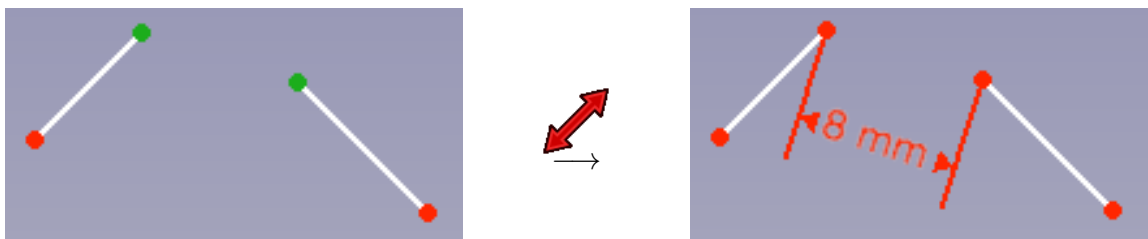
Betrachtet man eine Linie, deren eines Ende fixiert ist, dann verbleiben 2 DOF. Wenn man die Länge der Linie festlegt, dann bleibt noch 1 DOF übrig (der mit einem Horizontalen *oder* Vertikalen Abstand verbraucht werden kann). Damit verbraucht die Länge 1 DOF.

Die Längenbeschränkung oder einfach Länge gibt es in drei Varianten, von denen zwei einander ähneln.

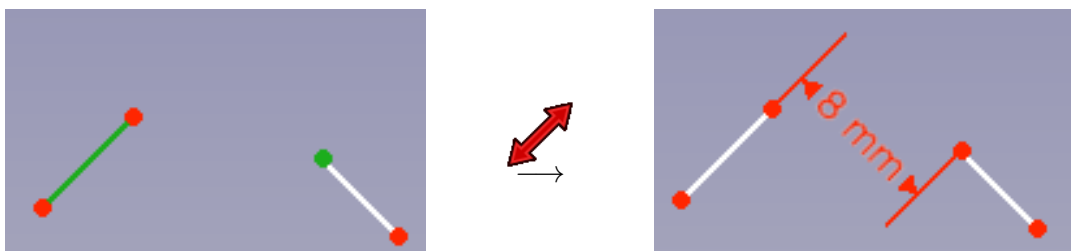
**Linienlänge** Sie kann die Länge einer Linie festlegen, wie wir schon in Abschnitt 6 auf Seite 14 gesehen haben.



**Abstand zwischen zwei Punkten** Man wählt zwei beliebige Punkte aus und legt den Abstand zwischen ihnen fest:



**Abstand Punkt-Linie** Man wählt einen Punkt und eine Linie. Die Länge fixiert den Abstand zwischen dem Punkt und seiner Projektion auf die Linie; sie legt also den kürzesten Abstand zwischen den beiden Elementen fest. Wie wir schon bei anderen Beschränkungen gesehen haben, kann der projizierte Fußpunkt auch auf einer unendlichen Verlängerung der Linie liegen.



**Achtung:** Wie bereits in Abschnitt 6 auf Seite 14 über Linien angemerkt, sollte man diese Beschränkung *nicht* für senkrechte oder waagerechte Linien verwenden – es sei denn man beabsichtigt den Winkel des Elements später noch zu ändern (als Beispiel sei an die geneigte Nut in Abschnitt 12 auf Seite 30 erinnert).

Stattdessen verwendet man die spezielleren Beschränkungen für horizontalen und vertikalen Abstand. Sie machen es dem Löser einfacher, eine Lösung zu finden; Genauerer findet man in Abschnitt 36 auf Seite 72.


## 34 Radius and Durchmesser

Icons:	
Anzahl verbrauchter DOF:	1

Radius- oder Durchmesserbeschränkung fixieren eine der drei DOF eines Kreises. Zwei bleiben für die Position des Mittelpunktes.

Die Anwendung ist unkompliziert: Man wählt einen Kreis aus und wendet die Radiusbeschränkung an, gibt einen Wert ein und bestätigt. Wenn man statt des Radius' den Durchmesser angeben mochte, dann wählt man mit dem kleinen Dreieck neben dem Radius-Icon Menü den Durchmesser aus. Diese Auswahl bleibt bestehen bis man sie zurückstellt oder FreeCAD beendet.

## 35 Winkel

Icon:	
Anzahl verbrauchter DOF:	1

Die Winkelbeschränkung legt ebenso wie Vertikal- und Horizontalbeschränkung die Richtung einer Linie fest und verbraucht damit 1 DOF.

Bei den anderen Constraints spielt es keine Rolle, welcher der beiden Endpunkte einer Linie zuerst erzeugt wurde. Bei einer Winkelbeschränkung ist das anders. Daher ist es möglich, dass gleich aussehende Sketche trotz gleichartiger Behandlung zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, je nachdem, welcher Endpunkt einer bestimmten Linie zuerst angelegt wurde. Wenn Winkel festgelegt werden, dann werden Linien wie Strahlen behandelt.

Je nach Selektionsart gibt es verschiedene Varianten:

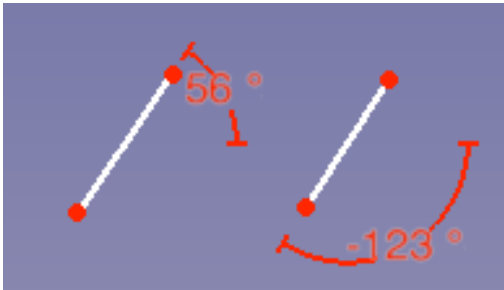
**Auswahl einer einzelnen Linie** Man wählt eine einzelne Linie und wendet die Winkelbeschränkung an. Dies legt den Winkel zwischen der Linie und der X-Achse fest.

Je nachdem, welcher Punkt der Linie zuerst angelegt wurde, erhält man unterschiedliche Ergebnisse.

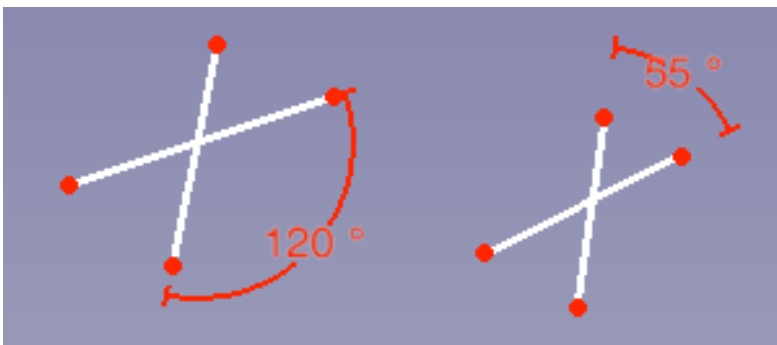
**Übung 31** Erzeuge zwei ungefähr parallele Linien, eine von links unten nach rechts oben, die andere umgekehrt von rechts oben nach links unten.

Wähle die erste Linie aus und erzeuge eine Winkelbeschränkung.

Wähle die zweite Linie aus und erzeuge eine Winkelbeschränkung.



**Auswahl zweier Linien** Bei dieser am häufigsten angewendeten Variante werden zwei Linien ausgewählt und es wird eine Winkelbeschränkung zwischen ihnen erzeugt. Auch hier hängt der Winkel wieder von der Richtung, in der die Linien erzeugt wurden:

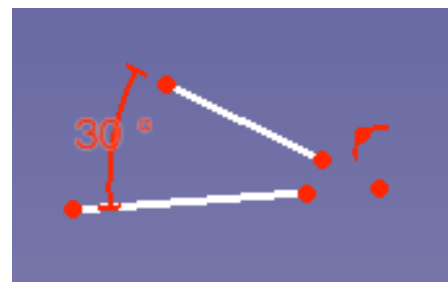
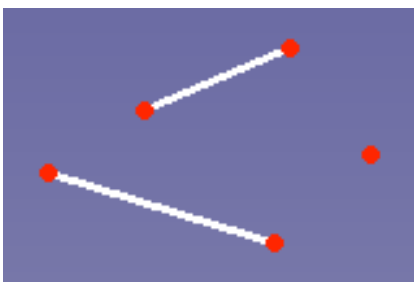


**Auswahl Linie-Punkt-Linie** Wenn man zwei Linien und einen zusätzlichen Punkt auswählt, dann wird dieser Punkt zum Scheitel einer Winkelbeschränkung und die Linien werden die Schenkel.

Um dies zu erreichen werden zusätzlich zur Winkelbeschränkung ein oder zwei zusätzliche Punkt-auf-Objekt-Beschränkungen angelegt, die sicherstellen, dass der zusätzliche Punkt auf beiden Linien liegt.

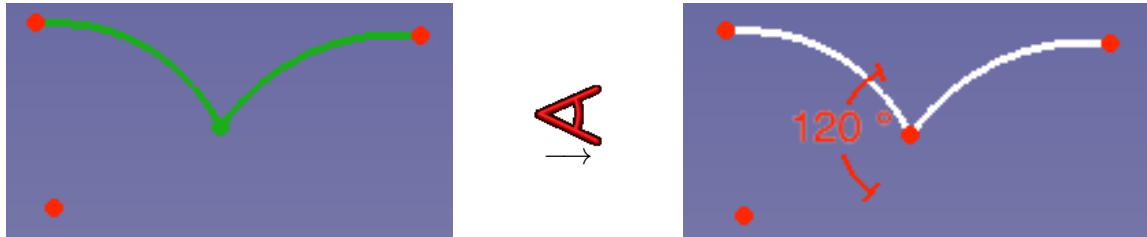
**Übung 32** Erzeuge ein Sketch mit zwei Linien und einem Punkt gemäß der folgenden Abbildung.

Wähle beide Linien und den Punkt aus und erzeuge eine Winkelbeschränkung von  $30^\circ$



**Auswahl mit Bögen** Auf entsprechende Weise kann man zwei Kreisabschnitte und einen Punkt oder einen Kreisabschnitt eine Linie und einen Punkt mit einer Winkelbeschränkung versehen. Damit kann die Linie-Punkt-Linie-Auswahl als Sonderfall dieser allgemeineren Auswahl angesehen werden.

**Übung 33** Erzeuge ein Sketch mit zwei Kreisbögen, die mit einer Koinzidenzbeschränkung verbunden sind. Die Bögen sollen sich in einem Winkel von  $60^\circ$  schneiden. Im folgenden Bild ist der Scheitelpunkt der Endpunkt eines Bogens.



### Weiterführende Empfehlungen zu Winkeln – (*Dos and Don'ts*)

- Verwende keine Winkel für Vielfache von  $90^\circ$ ; Verwende stattdessen geometrische Beschränkungen.
  - Verwende die Orthogonalbeschränkung für Winkel von  $90^\circ$  oder  $270^\circ$ .
  - Verwende die Tangentialbeschränkung für  $180^\circ$ -Winkel.
- Wenn es jedoch wichtig ist, das Springen eines Sketchs wie in Abschnitt 19.2 auf Seite 44 zu vermeiden, dann kann man die Robustheit mit einer Winkelbeschränkung verbessern, weil dabei die Richtung der Linien berücksichtigt wird und die Linien wie Strahlen behandelt werden.

## 36 Allgemeine Empfehlungen zu Beschränkungen – (*Dos and Don'ts*)

Da nun die verschiedenen Beschränkungen bekannt sind, solltest du nicht nur darauf abzielen, Deine Sketche vollständig einzuschränken, du solltest gute, voll eingeschränkte Sketche erzeugen.

Die folgenden Empfehlungen basieren auf Hinweisen des ersten Entwicklers der Sketcher-Workbench (logari81 aus dem FreeCAD forum) und anderer FreeCAD-Nutzer.

Es gibt verschiedene Betrachtungsweisen und damit auch verschiedene Zielvorgaben. Einerseits gibt es die Benutzersicht, die ich auch als externe Sicht bezeichnen möchte: Ein gutes Sketch ist ein verständliches, gut wartbares Sketch. Um das zu erreichen, ist es empfehlenswert, geometrische Beschränkungen an Stelle von festen Maßen zu verwenden. Letztere machen ein Sketch unübersichtlicher und unflexibler.



Andererseits gibt es die interne Sicht: Welche Beschränkungen sind gut für den Löser, d. h. welche führen schnell zu einer verlässlichen Lösung? Der Löser löst das interne Gleichungssystem nicht algebraisch, sondern numerisch. Das bedeutet, dass man von einer Lösung ausgeht, wenn die Abweichungen nur noch sehr sehr klein sind. Nichtsdestotrotz gibt es Rundungsfehler, weil intern nur mit einer begrenzten Genauigkeit gerechnet wird und in seltenen Fällen kann dies in späteren Modellierungsschritten zu Problemen führen.

### Bevorzugt zu verwendende Beschränkungen

- Horizontal- und Vertikalbeschränkung.
- Punkt-Punkt-Tangentialbeschränkung.
- Horizontaler und vertikaler Abstand.

### Nachrangig zu verwendende Beschränkungen

Es ist keineswegs schlechter Stil, diese Beschränkungen zu verwenden! Aber man sollte sie vermeiden, wenn man stattdessen genauso gut eine der bevorzugten Beschränkungen verwenden kann.

- Länge
- Kurve-Kurve-Tangentialbeschränkung
- Punkt auf Objekt
- Symmetrie

### Mach' Dein Sketch nicht zu kompliziert!

Anstatt alles, was möglich wäre, in einem Sketch zu modellieren, sollte man die Möglichkeit bedenken, es in mehrere Teile aufzuspalten. Betrachten wir z. B. ein Sketch mit komplizierter Kontour und einigen Bohrungen und Ausschnitten, welches aufgepolstert werden soll. Anstatt alles in einem Sketch zu modellieren, könnte man zunächst nur die äußere Kontur in einem Sketch abbilden, dieses aufpolstern und dann die Bohrungen und Ausnehmungen modellieren und mit einer Tasche wieder entfernen.

Als eine Daumenregel wird empfohlen (vielen Dank an Normand) eine Zahl von 100 Beschränkungen nicht zu überschreiten. Das hält die Komplexität und Laufzeiten des Löser in einem vernünftigen Rahmen.

## 37 Externe Geometrie

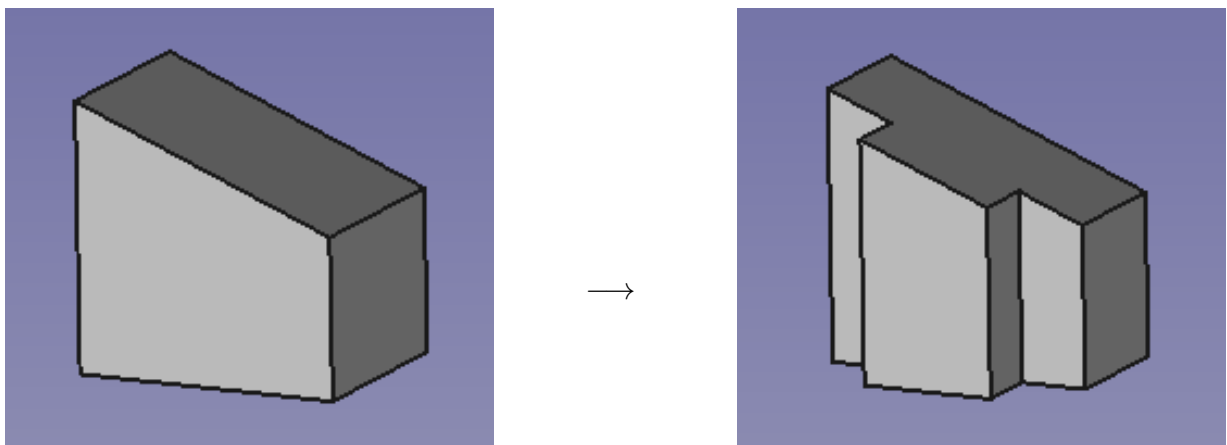
Icon:	
Anzahl hinzugefügter DOF:	0

Externe Geometrie verwendet nur Bezüge zu außerhalb des Sketchs bereits bestehenden Objekten und hat daher selbst nur 0 DOF.

Einerseits kann man mit Externer Geometrie Elemente bestehender Objekte, wie z. B. Ecken und Kanten, wiederverwenden. Ich empfehle insbesondere Neulingen das zu vermeiden, weil die Modelle nicht sehr robust gegenüber späteren Änderungen sind (Stichwort: „Topological Naming“).

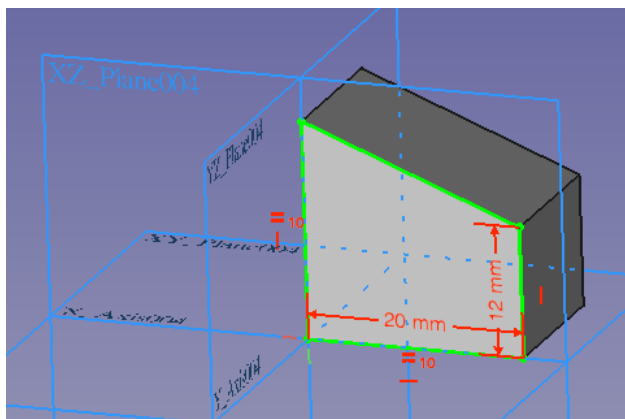
Andererseits kann man Bezüge zu anderweitig definierten Sketchen herstellen. Diesen Weg werden wir hier gehen.

**Übung 34** Gegeben sei ein Block wie unten abgebildet, aus dem zwei Streifen an den Enden einer Seite herausgeschnitten werden sollen.



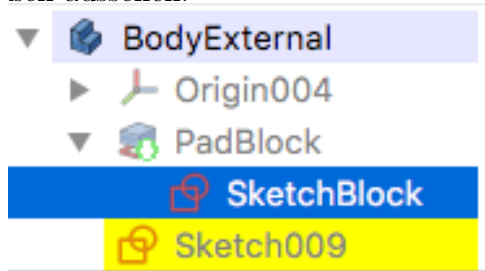
- Vorbereitungen: Erzeuge einen Block wie in der Abbildung links. Platziere ihn so, dass die Vorderseite auf einer der Hauptebenen liegt.

Ich habe das Sketch auf die XZ-Ebene gelegt und habe beim Pad die „Umgekehrt“-Option gewählt.




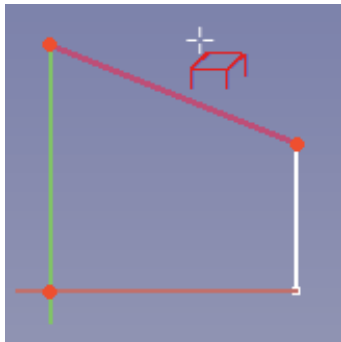
- Erzeuge ein neues Sketch in derselben Ebene wie die Vorderseite des Blocks.
- Ohne den Sketcher des noch leeren Sketchs zu schließen, wechsle in der Combo-Ansicht vom Aufgaben-Tab zum Modell-Tab, um zur Baumannsicht des Modells zu gelangen.

- mache das Pad unsichtbar und das Sketch sichtbar. Der Baum sollte nun folgendermaßen aussehen:



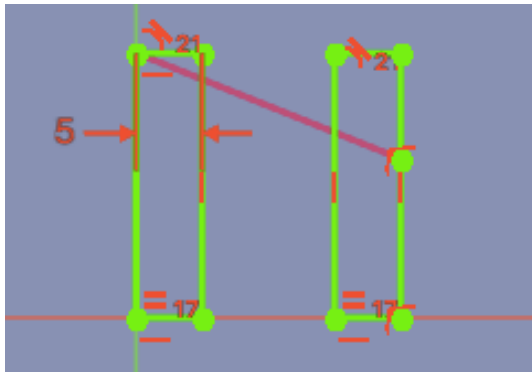
Das Sketch mit dem Namen „SketchBlock“ in der obigen Abbildung wurde verwendet, um das Pad „PadBlock“ zu erzeugen. Das Sketch, das gerade erzeugt wird, ist Sketch009. Bei Dir ist es wahrscheinlich Sketch001.

- Wechsle wieder zurück vom Modell-Tab zum Aufgaben-Tab; wir sind nun wieder im wohlbekannten Sketcher-Panel.
- In der 3D-Ansicht kann man nun das Sketch namens SketchBlock sehen. Die Linien sind etwas dünner dargestellt als die des aktuellen Sketchs; man kann die Geometrie von SketchBlock nicht ändern.
- Wähle das Externe Geometrie-Werkzeug .
- Wähle die obere Linie, sie wechselt die Farbe zu Magenta.



Du könntest nun noch weitere Elemente wählen, das ist hier aber nicht nötig. An Stelle der Linie hätte es auch genügt, die beiden Endpunkte auszuwählen.

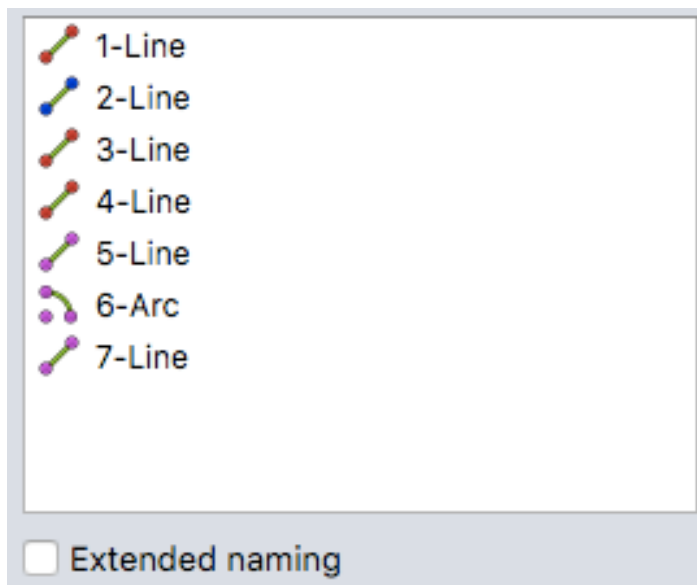
- Modelliere die beiden Streifen. Beachte, dass die Streifen eigentlich zu groß sind, sie überdecken mehr als nötig.



- Beide Streifen haben dieselbe Breite von 5 mm.
  - Die rechte Seite des rechten Streifens wird mit einer Punkt-auf-Objekt-Beschränkung fixiert.
  - Die untere Linie des rechten Streifens wird auf der X-Achse mit einer Punkt-auf-Objekt-Beschränkung fixiert.
  - Mit einer Punkt-auf-Objekt-Beschränkung wird ein Endpunkt der rechten oberen Linie auf der (imaginären Verlängerung der) linken oberen Linie fixiert, damit sind beide auf einer Höhe.
- Schließe den Sketcher und erzeuge eine Tasche mit einer Tiefe von 5 mm.

### Identifizieren externer Geometrie

Die Liste der geometrischen Elemente wurde bereits in Abschnitt 3 auf den Seiten 6–7 vorgestellt. Sie enthält alle im Sketch vorhandenen Elemente einschließlich der externen Geometrie. Diese externen Elemente stehen immer am Ende der Liste und es gibt dazwischen eine Lücke in der Nummerierung. Das ist praktisch, wenn man alle externen Geometrieelemente entfernen möchte, wie es z. B. beim Reparieren eines Modells vorkommt, wenn ein Sketch einer anderen Fläche zugeordnet werden muss. Im Beispiel oben sind die Elemente 1-8 fortlaufend nummeriert, dann folgt eine Lücke und das externe Element hat die Nummer 11.



## Teil IV

# Creating Objects Based on Sketches

To be written

38 Sketches for Pads and Pockets

















39 Use Symmetry!

40 Placement and AttachmentOffset


















41 Sketche Prüfen

# Übersicht über die Freiheitsgrade

## Elemente

Element	Icon	DOF hinzugefügt
Linie		4
Kreis		3
Kreisbogen		5
Polyline		-
Rechteck		4
Dreieck		4
Quadrat		4
Fünfeck		4
Sechseck		4
Siebeneck		4
Achteck		4
Reguläres Vieleck		4
Nut		4
Punkt		2
B-Spline offen		$3 \cdot N$
B-Spline geschlossen		$3 \cdot N$

## Beschränkungen

Beschränkung	Icon	verbrauchte DOF
Koinzidenz		2
Punkt-auf-Objekt		1
Vertikal		1
Horizontal		1
Parallel		1
Orthogonal Linie-Linie		1
Orthogonal Punkt-Linie		2
Orthogonal Punkt-Punkt		3
Tangente (Kurve-Kurve)		1
Tangente (Punkt-Linie)		2
Tangente (Punkt-Punkt)		3
Gleichheit		1
Symmetrie		2
Block		1-5
Sperre		2 je Punkt
Horizontaler Abstand		1
Vertikaler Abstand		1
Länge		1
Radius		1
Durchmesser		1
Winkel		1

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Sketch-Erstellung</b>	<b>1</b>
1.1	Sketch erzeugen in der Sketcher-Workbench . . . . .	1
1.2	Sketch erzeugen in der PartDesign-Workbench . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Das Sketcher-Fenster</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Freiheitsgrade DoF (Degrees of Freedom)</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Auto Constraints</b>	<b>8</b>
4.1	Auto Constraints Ein . . . . .	8
4.2	Auto Constraints Aus . . . . .	11
<b>II</b>	<b>Geometrische Elemente</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Allgemeine Bedienung</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>Linie</b>	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>Kreis</b>	<b>16</b>
<b>8</b>	<b>Kreisabschnitt</b>	<b>21</b>
<b>9</b>	<b>Linienzug (<i>Polyline</i>)</b>	<b>23</b>
<b>10</b>	<b>Rechteck</b>	<b>26</b>
<b>11</b>	<b>Polygon</b>	<b>27</b>
<b>12</b>	<b>Nut</b>	<b>28</b>
<b>13</b>	<b>B-Splines</b>	<b>31</b>
<b>14</b>	<b>Kegelschnitte</b>	<b>36</b>
14.1	Anlage und Verwendung von Kegelschnitten . . . . .	36
14.2	Orthogonal- und Tangentialbeschränkung auf Kegelschnitten . . . . .	37
<b>15</b>	<b>Konstruktionsgeometrie</b>	<b>37</b>

16 Punkt	39
<b>III Beschränkungen (<i>Constraints</i>)</b>	<b>41</b>
17 Beschränkungen auswählen	41
18 Anwenden von Constraints	42
19 Der Löser ( <i>Solver</i> )	43
19.1 Lösen eines Sketchs . . . . .	43
19.2 Springende Sketche . . . . .	44
19.3 Meldungen des Lösert . . . . .	46
19.3.1 Erwünschte Meldungen . . . . .	46
19.3.2 Unerwünschte Meldungen . . . . .	47
20 Koinzidenz	49
21 Punkt-auf-Objekt	51
22 Vertikalbeschränkung	52
23 Horizontalbeschränkung	54
24 Parallel	54
25 Orthogonal (rechtwinklig)	55
26 Tangenten	57
27 Gleichheit	61
28 Symmetrie	62
29 Block	65
30 Sperre (Schloss)	67
31 Horizontaler Abstand	67
32 Vertikaler Abstand	68
33 Länge	69



34 Radius and Durchmesser	70
35 Winkel	70
36 Allgemeine Empfehlungen zu Beschränkungen – ( <i>Dos and Don'ts</i> )	72
37 Externe Geometrie	73
 IV Creating Objects Based on Sketches	 77
38 Sketches for Pads and Pockets	77
39 Use Symmetry!	77
40 Placement and AttachmentOffset	77
41 Sketche Prüfen	77