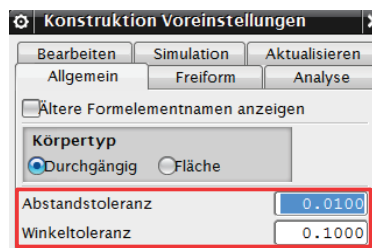


Sieht man im Wörterbuch nach, so findet man *Spine* = Wirbelsäule. Gemeint ist mit dem *Konstruktionszug (Spine)* diejenige Kurve, auf der eine Ebene oder ein ebenes Profil stets senkrecht steht, etwa wie die Wirbelkörper entlang des Rückenmarks. **Mein Bild** dafür ist der „**Spachtel**“ des **Modellbauers**. Stellen Sie sich vor, Sie arbeiten mit dem Spachtel der vorigen Seite. Sie modellieren in einer weichen Masse (z.B. mit einem Messer in der Margarine). Sie knicken und bewegen Ihr Handgelenk und versuchen, einen „schönen Schwung“ in die Masse zu „zaubern“. Ihr Spachtel steht dabei immer senkrecht zum *Konstruktionszug (Spine)*. Der *Spine* kann von großer Bedeutung sein oder auch kaum Auswirkungen auf die Fläche haben. Es wird manchmal angeboten einen *Spine* optional anzugeben und einige Funktionen „bestehen“ auf der Angabe dieser Kurve. Dazu aber mehr bei den einzelnen Funktionen.



### 2.3 Modelltoleranz (Modeling Tolerance)

Im *Konstruktionsmodus* gibt es unter den *Voreinstellungen > Konstruktion* die **Abstandstoleranz** und die **Winkeltoleranz** (*Modeling: Preferences > Modeling > Distance Tolerance/Angle Tolerance*).

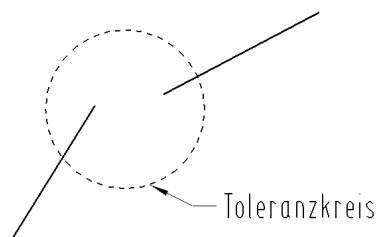


Mittlerweile wird auch in fast allen Menüs die Einstellungen dieser beiden Toleranzen mit angeboten. Üblicherweise unter dem Menüabschnitt *Einstellungen (Settings)*.



Abstandstoleranz

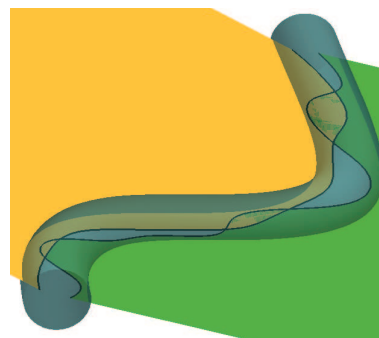
Distance Tolerance



Die **Abstandstoleranz** ist so definiert, dass zwei oder mehr Punkte (z.B. die Endpunkte von Kurven) innerhalb dieses

**Toleranzkreises** (in 2D) bzw. eines „Toleranzschlauches“ (in 3D) vom System nicht mehr unterschieden werden, also als identisch angesehen werden.

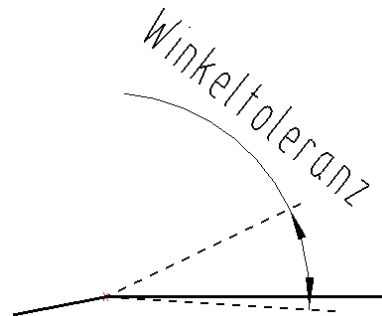
Die beiden Flächenränder (orange und oliv) in dem überzogenen Beispiel werden also innerhalb des



Winkeltoleranz  
Angle Tolerance

„**Toleranzschlauches**“ (blau) als identisch angesehen, die beiden Flächen „berühren“ sich entlang der Kante, obwohl sie es doch nicht tun, wenn man nahe heranzoomt.

Als *Winkeltoleranz* versteht man einen Winkelbereich in der Einheit Grad, in dem die Winkel als gleich angesehen werden. In der nebenstehenden Abbildung hätten etwa die beiden durchgezogenen Linien dieselbe Richtung, da sie innerhalb der Winkeltoleranz liegen. Auch diese Darstellung ist stark überzogen und soll lediglich das Prinzip erklären, Winkeltoleranzwerte von über 0,5 Grad sind eher die Ausnahme.



**So weit zur Theorie, die Praxis stellt sich erheblich schwieriger dar!**

Anhand von drei Beispielen soll versucht werden, diese Toleranz „sichtbar“ zu machen.

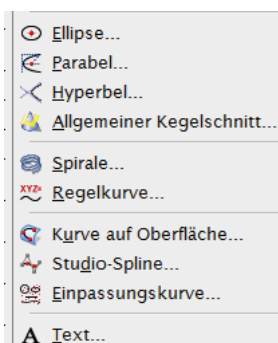
Vorausgeschickt werden muss, dass die Toleranzen erst bei „komplexen“ Kurven zum Tragen kommen. **Bei Geraden und Kreisen treten keine Abweichungen, keine Toleranzfehler auf**, da diese Kurven mathematisch exakt mit Formeln beschrieben werden können (Geraden- und Kreisgleichungen).

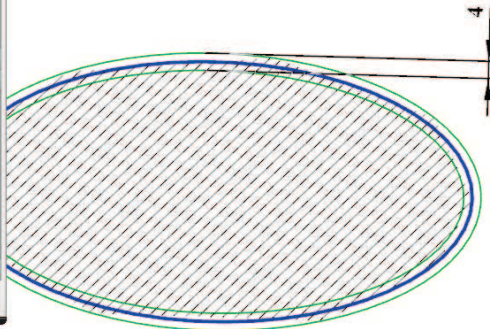
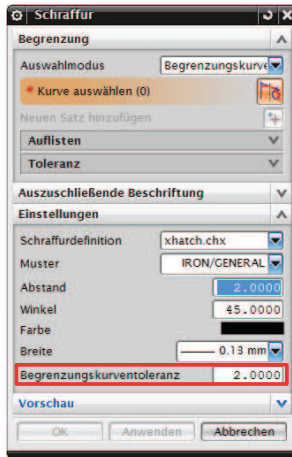
Bei den „komplexen Kurven“ oder auch *Flächenkanten (Surface Edges)*, für die dieses Toleranzband von Bedeutung ist, handelt es sich meist um *Splines*. Aber auch *Ellipsen, Parabeln, Hyperbeln, Kegelschnitte, Spiralen* und *Regelkurven* fallen darunter (siehe Randspalte).

Im ersten Beispiel (Abb. nächste Seite) wird eine Ellipse (blau, dicker) schraffiert. Beim *Stil* der Schraffur wird der etwas praxisfremde Toleranzwert 2.0 mm eingestellt (*Begrenzungskurventoleranz (Boundary Curve Tolerance)*).

Die Schraffur ragt dann über die *Ellipse* hinaus bzw. geht nicht exakt bis an die *Ellipse* heran. Das Toleranzband kann damit „sichtbar“ gemacht werden. Es wurde hier mit den grünen, dünnen *Abstandskurven (Offset-Kurve, Offset Curve)* dargestellt. **Vorsicht!** Der Toleranzwert geht in beiden Richtungen von der Ellipse weg, d.h., das Toleranzband ist damit doppelt so breit wie der Toleranzwert.

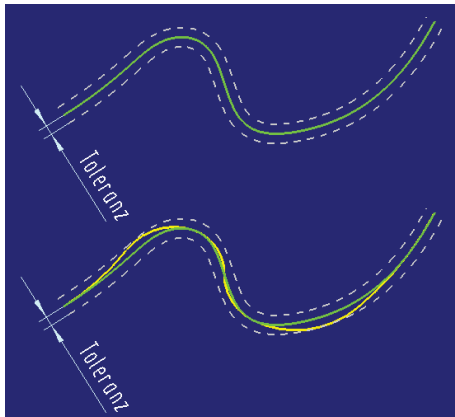
Toleranzen nur bei komplexen Kurven, nicht bei Geraden und Kreisen/Kreisbögen





Toleranzwert in beide Richtungen!

Denkt man an den dreidimensionalen „Toleranzschlauch“, so stellt der **Toleranzwert den Radius des Schlauches** dar, nicht den Durchmesser!



Für das zweite Beispiel soll ein *Spline* (grün) benutzt werden. Es wird wiederum ein „Toleranzband“ in Form von *Abstandskurven* (*Offset-Kurve*, *Offset Curve*) (weiß, gestrichelt) eingezeichnet. Nun wird unter den *Voreinstellungen* die *Abstandstoleranz* auf einen übertriebenen Wert (z.B. 2.0 mm) gestellt. Um die Toleranz „sichtbar“ zu machen, wird die Funktion *Kurve vereinfachen*



*Einfügen > Abgeleitete Kurve > Vereinfachen*

*Insert > Derived Curve > Simplify*

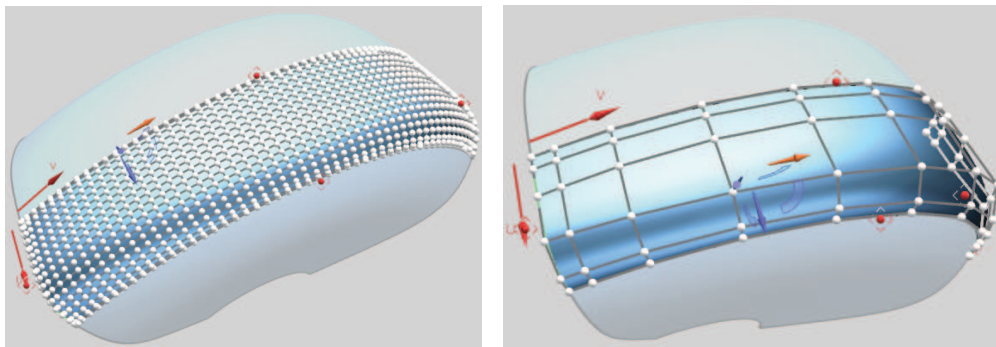
(*Simplify Curve*) benutzt. Die Funktion nähert einen *Spline* durch mehrere Kreisbögen bzw. Linien an (gelb). Der Winkel zwischen zwei benachbarten Kreisbögen ist stets 180 Grad, d.h., alle Kreisbögen/Linien gehen tangential in die Nachbarkurven über. Je nach Größe des voreingestellten Toleranzwertes ergeben sich mehr oder weniger Kreisbögen. Die Anzahl der Kreisbögen kann nicht vorhergesagt werden, sie wird größer, wenn eine kleine, „enge“ Toleranz gefordert wird, und es werden weniger Kreisbögen bei größeren Toleranzvorgaben erzeugt.

Anmerkung: Die Funktion *Kurve vereinfachen* (*Simplify Curve*) wird im Übrigen gerne im CAM-Umfeld benutzt. Die CNC-Maschinen können



in den Hauptebenen selbstständig Kreise abfahren. Sie haben dazu interne Funktionen in ihren Steuerungen und brauchen lediglich den Mittelpunkt, Radius und Öffnungswinkel, um den Kreisbogen sauber und schnell abzufahren. Im Gegensatz dazu würde ein *Spline* aus lauter kurzen Liniestückchen angenähert und „stückchenweise“ abgefahren werden, was zu einer erheblich größeren Zahl von Datensätzen führt, die Werkzeugmaschine stärker belastet, eine schlechtere Oberflächenqualität bedingt und meist auch zeitliche Nachteile bei der Fertigung mit sich bringt.

Das dritte Beispiel, das die Auswirkung der Toleranz sichtbar machen soll bezieht sich auf die beiden folgenden Abbildungen.



Im linken Bild wurde die Fläche mit den zahlreichen weißen Kugeln (Pole der Fläche) mit einer kleinen Toleranz erzeugt und im rechten Bild war ein größerer Toleranzwert voreingestellt. Flächen mit vielen Polen sind speicherintensiver, können schnell wellig werden und haben noch weitere Nachteile. Sind weniger Pole vorhanden, kann man die Fläche meist besser, schöner, eleganter verändern, andererseits muss bei weniger Polen der Abstand zu den Nachbarflächen zwangsläufig gröber werden. Man kann es sich so vorstellen als wären die Flächen zusammen genäht. Bei der kleinen Toleranz (links) werden mehr Stiche gesetzt als bei der gröberen Toleranz (rechts). Das ist ein Zwiespalt der sich nicht lösen lässt.

### Welche Toleranzwerte sollen wir nun einstellen?

Diese Frage hören wir sehr oft, leider gibt es keine eindeutige Antwort darauf. Trotzdem gibt es ein paar Tipps und Überlegungen aus der Praxis, die an dieser Stelle zu erwähnen sind.

Der **Toleranzwert** ist **abhängig davon, wie groß das CAD-Modell wird**. Haben Sie die Aufgabe, einen Schaltknopf für ein Autoradio zu entwickeln, dann wäre ein Toleranzband von 0,1 mm schon als „groß“ zu bezeichnen. „Basteln“ Sie hingegen am Rumpf einer Hochseefähre,

dann wäre „das Zehntel“ vermutlich durchaus akzeptabel oder schon „übertrieben genau“.

Die Online-Hilfe von NX nennt einen typischen Toleranzwert für die **Automobilindustrie von 0,01 mm**. Diesen Wert können wir aus der Praxis bestätigen. Die Ausnahme bildet derzeit die **Daimler AG**. Sie schreibt in Ihren Startmodellen (Seedparts) die Anfangstoleranz **0,001 mm** vor. Dazu muss man wissen, dass Daimler derzeit mitten in der Umstiegsphase von Catia V5 nach NX ist und vermutlich noch nicht alle (nachteiligen) Konsequenzen von solch engen Toleranzen kennt. Die Zeit wird zeigen, ob es dabei bleibt. Firmen wie GM und Opel haben auch mit dem Tausendstel begonnen und wechselten nach einigen Jahren auf das Hundertstel, was unterm Strich deutlich weniger Probleme bereitet.

Als generell üblich wird der **Bereich von 0,001 mm bis 0,1 mm** genannt, auch dem stimmen wir zu.

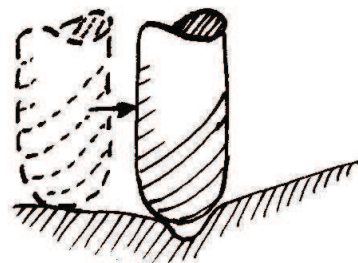
Sollte Ihre Voreinstellung den Wert **0,0254 mm** anzeigen, so ist dies meist ein Zeichen dafür, dass noch **keine Systemanpassung** stattgefunden hat. Nach der Standardinstallation von NX ist dieser Wert anzutreffen. NX kommt aus den USA und die Softwareentwickler sind immer noch dort, obwohl sie nun Visitenkarten von der deutschen Firma Siemens besitzen, und dort hat man ein Tausendstel Inch = 0,0254 mm als Standardvorgabewert gewählt. Diese Tatsache darf aber **nicht als „beste Empfehlung“** missverstanden werden!



**Im Laufe einer Konstruktion wird die Toleranz im Allgemeinen gröber!** Ein *Spline* ist bei der Erzeugung einer Fläche beteiligt (das Toleranzband wird ausgenutzt), durch die Fläche wird ein Schnitt gelegt, ein weiterer *Spline* entsteht (wieder greift das Toleranzband), mit diesem Schnittergebnis wird eine neue Fläche erstellt ... mit anderen Worten, die Toleranzen addieren sich und werden damit immer gröber. Durch eine geschickte Vorgehensweise kann man dieses Verhalten zwar etwas eindämmen, verhindern kann man es aber nicht; dazu später mehr. Für den Toleranzwert leitet sich damit die allgemeine Empfehlung ab: **mit kleineren Toleranzwerten anfangen und später auch größere Werte akzeptieren.**

Vergessen Sie auch nicht, das Thema des Buches: Freiformflächen. Freiformflächen lassen sich nicht gern „einzwängen“, sie brauchen „Raum“ für ihre „Schwünge“.

In der Praxis ergeben sich nach dem Fräsen der CAD-Modelle zum Teil Oberflächen, die „überraschend sauber“ geworden sind! Dies könnte jedoch auch auf einen **fertigungstechnischen Effekt** zurückzuführen sein. Sehr häufig werden Freiformflächen mit einem Kugelfräser gefertigt. Sind dabei im CAD-Modell Vertiefungen vorhanden, in die der Fräser aufgrund seines Kugeldurchmessers nicht mehr eintauchen



kann, so „glättet“ **der Fräser die Oberfläche**. Das gefräste Modell entspricht dann nicht dem CAD-Modell, was aber in einigen Fällen auch positiv ausgenutzt werden kann. In Bezug auf das Thema „Modelltoleranz“ heißt das oft, dass man gelegentlich mit größeren Toleranzen arbeiten kann, wenn man die Fertigung mitberücksichtigt bzw. mitberücksichtigen darf. Dies soll nicht als Aufforderung verstanden werden, schlampig zu arbeiten, aber wenn man den Kugelfräser „im Hinterkopf“ hat, dann macht oft „der Kampf mit dem Tausendstel“ (0,001 mm) in NX keinen rechten Sinn. Hinzu kommt der Werkzeugverschleiß, der häufig um ein Vielfaches größer ist als die Modelltoleranz.

Dann sollte man sich auch stets fragen: „**Wer soll das messen?**“ Bei Messungen im Mikrometerbereich wirken sich – je nach Material – bereits kleine Temperaturschwankungen auf das Messergebnis aus. Freigeformte Teile in einem klimatisierten Raum zu vermessen, dürfte eher die Ausnahme sein. Hinzu kommt, dass übliche Messgeräte (Schieblehren, Mikrometer, Lehren) schlecht an Freiformflächen angesetzt werden können. Es können also – wenn überhaupt – nur einzelne Stichmaße abgegriffen werden, nicht die Gesamtkontur.



### Vorsicht!

Aber **Vorsicht!** Es gibt durchaus Messverfahren, die eine Soll-Ist-Abweichung zwischen CAD-Modell und fertigem Produkt im Bereich von 0,001 mm und darunter erfassen können – und das an beliebigen Stellen der Fläche! Und es gibt Produkte, bei denen die Freiformkonturen sehr genau eingehalten werden müssen, denken Sie an Turbinenschaufeln von hochgezüchteten Flugzeugturbinen.

NX hat im Vergleich zu anderen CAD-Systemen den Ruf, „**sehr genau**“ oder auch „**zu genau**“ zu sein. Was kann man sich darunter vorstellen?



Ein Flächenmodell wird konvertiert (z.B. mit IGES, VDA-FS oder STEP). Aus dem Flächenmodell lässt sich dann in NX **kein** Volumen generieren (*Zusammenfügen, Sew*), obwohl das im Ausgangssystem möglich war. Erst wenn gröbere (größere) Modelltoleranzen voreingestellt werden, klappt es auch in NX. Gerne werden solche Probleme auf das Schnittstellenprogramm, den Konverter, geschoben. Nähere Untersuchungen von derartigen Fällen haben jedoch die Schnittstelle meist „entlastet“ und die unterschiedlichen Toleranzen der CAD-Systeme als Verursacher des Problems ermittelt, oder es wurde schlichtweg schlampig gearbeitet. Auch diese Erkenntnis könnte dafür sprechen, die Modelltoleranz etwas gröber einzustellen.

Abschließend kann man zum Thema Modelltoleranz sagen, dass:

- diese Einstellung wichtig ist
- es keine „beste Empfehlung“ gibt
- gelegentlich mit größeren oder auch kleineren Werten experimentiert werden sollte, um ein Gefühl für die jeweilige Situation zu bekommen
- ein Toleranzmix von größeren und kleineren Toleranzen innerhalb eines Parts jedoch möglichst vermieden werden soll
- in Problemfällen ein Abgleich mit dem Auftraggeber stattfinden sollte
- die Fertigung und deren Toleranzen stets mitberücksichtigt werden sollten
- sehr kleine Toleranzwerte genauso Probleme bereiten können wie grobe Toleranzen
- „Freiformeinsteiger“ meist mit zu kleinen Toleranzwerten beginnen und dadurch viel Zeit für Fehlversuche vergeuden
- die Toleranz im Laufe der Konstruktion gröber werden kann
- die Auftraggeber teilweise zu feine Toleranzen vorschreiben und sich über die negativen Auswirkungen dieser Forderung nicht im Klaren sind