

Dreidimensionale Toleranzanalyse

Grundlagen funktionaler Konstruktion

Für dreidimensionale Toleranzkonzepte in x-y-z-Koordinaten existiert ein gesamtes Normensystem der Geometrischen Produktspezifikation (GPS) nach ISO/EN. Die zentrale Grundlage bildet dabei:

- EN ISO 1101
(„Form-, Richtungs-, Orts- und Lauftoleranzen“)

Diese Norm definiert die geometrische Tolerierung im dreidimensionalen Raum – also Lage-, Form- und Orientierungstoleranzen relativ zu Bezugssystemen in x-, y- und z-Richtung.

Die wichtigsten Normen für 3D-Toleranzkonzepte

Norm	Inhalt	Bedeutung für x-y-z-Toleranzierung
EN ISO 1101	Form-, Richtungs-, Lage- und Lauftoleranzen	Hauptnorm für 3D-Toleranzangaben
EN ISO 8015	Grundprinzipien des GPS-Systems	Fundament aller Toleranzregeln
EN ISO 5459	Datumsysteme / Koordinatenbezüge	Definition von x-y-z-Bezugssystemen
EN ISO 14405	Maße und Maßtoleranzen	Ergänzt geometrische Toleranzen
EN ISO 14638	Gesamtstruktur des GPS-Systems	Systematik aller GPS-Normen
EN ISO 16792	3D-CAD-basierte Tolerierung	wichtig für PMI und Model Based Definition

Was bedeutet „3D-Toleranzkonzept“ praktisch?

Ein aktuelles 3D-Toleranzkonzept beschreibt:

- die zulässige räumliche Abweichung eines Elements,
- relativ zu einem definierten Bezugssystem,
- innerhalb einer dreidimensionalen Toleranzzone.

Typische Beispiele:

- Position einer Bohrung im Raum
- Ebenheit einer Fläche
- Parallelität zur z-Achse
- Rechtwinkligkeit zwischen x- und y-Flächen
- Koaxialität mehrerer Achsen
- Profiltoleranzen komplexer Freiformflächen

Die Norm verwendet dafür **Bezugssysteme**:

- A = Primärbezug
- B = Sekundärbezug
- C = Tertiärbezug

Damit entsteht praktisch ein kartesisches x-y-z-Koordinatensystem.

Bezugssysteme und räumliche Tolerierung im GPS-System

Die geometrische Produktspezifikation nach EN ISO basiert auf eindeutig definierten Bezugssystemen beziehungsweise Referenzflächen. Sie dienen der räumlichen Orientierung eines Bauteils und schaffen die gemeinsame Grundlage für Konstruktion, Fertigung, Messtechnik und Qualitätssicherung. Erst durch diese festgelegten Bezüge wird eine geometrische Tolerierung im dreidimensionalen Raum mathematisch eindeutig und praktisch reproduzierbar.

Aufbau des Bezugssystems

A = Primärbezug

Der Primärbezug bildet die wichtigste Bezugsfläche des Bauteils. Meist handelt es sich um eine Auflagefläche, Maschinenbasis oder Führungsfläche. Sie definiert die grundlegende Orientierung im Raum und legt typischerweise die Hauptebene beziehungsweise die z-Richtung fest.

B = Sekundärbezug

Der Sekundärbezug ergänzt die erste Orientierung um eine weitere Raumrichtung. Häufig handelt es sich um eine Seitenfläche oder Führungsfläche, welche die x-Richtung definiert und eine Verdrehung des Bauteils verhindert.

C = Tertiärbezug

Der Tertiärbezug vervollständigt schließlich die räumliche Festlegung. Er bestimmt die verbleibende Orientierung beziehungsweise Lage im Raum und definiert typischerweise die y-Richtung. Gemeinsam erzeugen diese drei Bezugselemente ein vollständiges räumliches x-y-z-Koordinatensystem.

Bedeutung für die praktische Tolerierung

Geometrische Toleranzen beziehen sich stets auf ein definiertes Bezugssystem, nicht auf beliebige Messpunkte. Dadurch lässt sich eindeutig festlegen:

- wo ein Bauteil im Raum positioniert wird,
- wie seine Orientierung erfolgt,
- welche Abweichungen zulässig bleiben,
- und wie die Prüfung messtechnisch durchgeführt wird.

Dies betrifft insbesondere:

- Positionstoleranzen,
- Parallelität,
- Rechtwinkligkeit,
- Ebenheit,
- Rundlauf,
- Koaxialität,
- sowie komplexe Profil- und Freiformtoleranzen.

Beispiel einer räumlichen Positionstolerierung

Eine Bohrung besitzt eine theoretisch exakte Sollposition innerhalb eines Gehäuses.

Die zulässige Abweichung wird nicht mehr getrennt in:

- x-Richtung,
- y-Richtung,
- z-Richtung

angegeben, sondern als gemeinsame räumliche Toleranzzone definiert. Die Achse der Bohrung darf sich dabei lediglich innerhalb eines festgelegten Toleranzzyinders bewegen. Der räumliche Fehler ergibt sich mathematisch aus:

$$\Delta r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$$

Damit beschreibt die GPS-Tolerierung nicht bloß einzelne Maßabweichungen, sondern die funktional zulässige räumliche Gesamtabweichung eines Bauteils.

Funktionale Bedeutung in der Ingenieurpraxis

Das moderne GPS-System verfolgt einen funktionsorientierten Ansatz. Entscheidend bleibt nicht allein die Maßhaltigkeit einzelner Elemente, sondern das sichere Zusammenwirken aller Komponenten innerhalb einer technischen Baugruppe.

Dadurch entstehen wesentliche Vorteile:

Bereich	Nutzen
Konstruktion	eindeutige Funktionsdefinition
Fertigung	realistische Herstellbarkeit
Messtechnik	reproduzierbare Prüfung
Qualitätssicherung	internationale Vergleichbarkeit
Montage	sichere Austauschbarkeit
Industrieanlagen	reduzierte Fehlerketten

Bedeutung für gegenwärtige 3D-CAD-Systeme

In aktuellen CAD- und PLM-Systemen erfolgt die geometrische Tolerierung zunehmend direkt am digitalen 3D-Modell. Dabei entstehen sogenannte:

- PMI-Daten (Product Manufacturing Information),
- MBD-Modelle (Model Based Definition),
- semantische 3D-Tolerierungsmodelle.

Die geometrischen Anforderungen werden dadurch unmittelbar:

- mit CAD,
- CAM,
- CNC-Fertigung,
- Simulation,
- Koordinatenmesstechnik,
- und digitaler Qualitätssicherung

verbunden.

Zentrale Normen des Systems

Norm	Inhalt
EN ISO 1101	geometrische Tolerierung
EN ISO 5459	Bezugssysteme
EN ISO 8015	GPS-Grundlagen
EN ISO 14405	Maßtoleranzen
EN ISO 16792	digitale 3D-Definition
EN ISO 10360	Koordinatenmesstechnik

Technische Gesamtaussage

Die moderne funktionale 3D-Tolerierung beschreibt die zulässigen räumlichen Abweichungen technischer Elemente innerhalb eines eindeutig definierten Bezugssystems. Dadurch entsteht eine gemeinsame technische Sprache zwischen Konstruktion, Fertigung, Simulation, Messtechnik und Qualitätssicherung — als Grundlage präziser und austauschbarer industrieller Systeme.

Für echte 3D-CAD-Modelle wichtig

Bei modernen CAD-Systemen (CATIA, NX, Creo, SolidWorks usw.) wird heute zunehmend:

- **MBD (Model Based Definition)**,
- PMI (Product Manufacturing Information),
- semantische GPS-Tolerierung

verwendet.

Dafür relevant:

- ISO 16792
- STEP/PMI-Standards nach ISO 10303

Diese Normen erlauben eine vollständig digitale 3D-Tolerierung ohne klassische 2D-Zeichnung.

Wichtig für Maschinenbau und Anlagenbau

Im klassischen Maschinenbau wird häufig noch kombiniert:

- Maßtoleranzen
- geometrische Toleranzen
- Toleranzketten
- statistische Toleranzanalyse
- Monte-Carlo-Simulation
- Koordinatenmesstechnik (CMM)

Die GPS-Normen bilden dabei die gemeinsame Sprache zwischen:

- Konstruktion
- Fertigung
- Qualitätssicherung
- Messtechnik

Vereinfacht gesagt

Für „dreidimensionale Toleranzkonzepte in x-y-z“ gilt heute international:

Fundament

EN ISO 8015

Hauptnorm

EN ISO 1101

Bezugssysteme

EN ISO 5459

Digitale 3D-Modelle

EN ISO 16792

Technisch besonders relevant

Die eigentliche 3D-Raumtolerierung erfolgt meist über:

- Positionstoleranzen
- Profiltoleranzen
- Bezugssysteme
- theoretisch exakte Maße (TED)
- Maximum-Material-Bedingung (MMC)
- Least-Squares-Auswertung
- Koordinatenmessung

Das entspricht funktional einem mathematischen 3D-Koordinatensystem im Raum.

Anhang 1 – Praktisches Beispiel eines 3D-Toleranzkonzeptes

Beispiel: Lagergehäuse mit Präzisionsbohrungen

Ein Maschinengehäuse enthält:

- eine Hauptlagerbohrung,
- vier Befestigungsbohrungen,
- eine Dichtfläche,
- eine Führungsfläche.

Ziel des Toleranzkonzeptes:

- Austauschbarkeit,
- Montagefähigkeit,
- Funktionssicherheit,
- wirtschaftliche Fertigung.

Bezugssystem

Primärbezug A

Grundfläche des Gehäuses

→ definiert die z-Ebene

Sekundärbezug B

seitliche Führungsfläche

→ definiert x-Richtung

Tertiärbezug C

vordere Stirnfläche

→ definiert y-Richtung

Damit entsteht ein vollständiges räumliches x-y-z-Koordinatensystem.

Beispielhafte Tolerierung

Merkmal	Nennmaß	Tolerierung
Hauptlagerbohrung Ø80	±0,01 mm	Rundheit + Position
Befestigungsbohrungen Ø12	±0,05 mm	Positionstoleranz Ø0,10
Dichtfläche	—	Ebenheit 0,03
Führungsfläche	—	Parallelität 0,02 zu A

Funktionales Ziel

Die Lagerachse muss:

- exakt ausgerichtet,
 - rechtwinklig,
 - reproduzierbar montierbar
- sein.

Die GPS-Tolerierung beschreibt daher nicht nur Maße, sondern den zulässigen dreidimensionalen Raumfehler.

Anhang 2 – Typische ISO-1101-Darstellung

Beispiel einer Positionstoleranz

Zeichnungseintrag:

$\varnothing 12 \text{ H7}$
 $\oplus \varnothing 0,10 \text{ A B C}$

Bedeutung:

- Bohrung $\varnothing 12 \text{ H7}$
- Mittelpunkt darf innerhalb eines Zylinders $\varnothing 0,10$ liegen
- bezogen auf Datumssystem A-B-C

Interpretation im Raum

Die Achse der Bohrung darf:

- in x,
- y,
- und z

innerhalb der definierten Toleranzzone schwanken.

Die Toleranzzone bildet geometrisch:

- einen Zylinder,
- ein Prisma,
- oder eine Freiformzone.

Anhang 3 – Beispiel einer Bohrungs-Positionstolerierung in x-y-z

Gegeben

Bohrung:

- Sollposition:
- $x = 100 \text{ mm}$
- $y = 50 \text{ mm}$
- $z = 0 \text{ mm}$

Positionstoleranz:

$\oplus \varnothing 0,20 \text{ A B C}$

Bedeutung

Die reale Bohrungsachse darf maximal:

- radial $0,10 \text{ mm}$
- um die theoretische Achse abweichen.

Praktische Auswirkung

Nicht jede Koordinate wird einzeln toleriert.

Stattdessen gilt:

räumliche Gesamtabweichung

Dadurch:

- bessere Funktionssicherheit,
- realistischere Fertigung,
- weniger Prüfaufwand.

Mathematische Interpretation

Räumlicher Fehler:

$$\Delta r = \sqrt{((\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2)}$$

Die Bohrungsachse muss innerhalb des zulässigen Toleranzzylinders bleiben.

$$\Delta r = \sqrt{((\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2)}$$

Anhang 4 – Vergleich ASME Y14.5 vs. ISO GPS

Thema	ISO GPS	ASME Y14.5
Grundsystem	GPS-Matrixsystem	GD&T
Philosophie	funktional-wissenschaftlich	fertigungstechnisch
Normbasis	ISO 1101	ASME Y14.5
Bezugssysteme	sehr formalisiert	pragmatischer
Hüllprinzip	ISO 8015 getrennt geregelt	impliziter
Symbolik	ähnlich	ähnlich
Weltweite Verbreitung	Europa, international	USA
CAD-Integration	stark standardisiert	ebenfalls stark
Profiltoleranzen	sehr umfassend	etwas einfacher
mathematische Definition	sehr exakt	praxisorientierter

Wesentlicher Unterschied

ISO GPS

arbeitet stärker:

- mathematisch,
- metrologisch,
- systemtheoretisch.

ASME Y14.5

arbeitet stärker:

- fertigungsgerecht,
- montageorientiert,
- pragmatisch.

Anhang 5 – Beispiel eines industriellen Gesamt-Toleranzkonzeptes

Projekt:

Präzisionsmodul einer automatisierten Produktionsanlage

Zielsetzungen

Ziel	Bedeutung
Funktionssicherheit	Baugruppen passen zusammen
Austauschbarkeit	Serienfertigung
Wartbarkeit	Ersatzteile kompatibel
Wirtschaftlichkeit	keine Übertolerierung
Messbarkeit	CMM-Prüfbarkeit

Struktur des Toleranzkonzeptes

1. Funktionale Analyse

Welche Flächen sind:

- lagerrelevant,
- dichtungsrelevant,
- führungsrelevant,
- kraftübertragend?

2. Bezugssystemdefinition

A

Maschinenbett

B

Führungsseite

C

Montageanschlag

3. Maßkonzept

Festlegung von:

- Grundmaßen,
- Passungen,
- Funktionsmaßen,
- theoretisch exakten Maßen.

4. Geometrische Tolerierung

Merkmal	Toleranz
Ebenheit	0,02
Parallelität	0,03
Rechtwinkligkeit	0,02
Position	Ø0,05
Rundlauf	0,01

5. Toleranzkettenanalyse

Berechnung:

- Worst-Case,
- RSS,
- Monte-Carlo.

6. Fertigungsfähigkeit

Abgleich mit:

- Fräsen,
- Schleifen,
- Bohren,
- Additive Manufacturing.

7. Messstrategie

Festlegung:

- Koordinatenmessgerät,
- Messpunkte,
- Bezugseinspannung,
- statistische Prozessfähigkeit.

8. Digitale Integration

Einbindung in:

- CAD,
- CAM,
- CAQ,
- PLM.

Moderne Entwicklung

Heute entstehen zunehmend:

semantische 3D-Modelle

mit:

- PMI,
- MBD,
- digitalem Zwilling,
- automatisierter Toleranzprüfung.

Zentrale Normen des Gesamtprozesses

Norm	Inhalt
EN ISO 1101	geometrische Tolerierung
EN ISO 5459	Datumsysteme
EN ISO 8015	GPS-Grundlagen
EN ISO 14253	Entscheidungsregeln
EN ISO 10360	CMM-Prüfung
EN ISO 16792	digitale 3D-Definition

Zusammenfassende technische Aussage

Ein modernes 3D-Toleranzkonzept beschreibt:

- nicht bloß Maße,
- sondern zulässige räumliche Funktionsabweichungen

innerhalb eines definierten Bezugssystems. Dadurch entsteht die gemeinsame technische Sprache zwischen:

- Konstruktion,
- Fertigung,
- Simulation,
- Messtechnik,
- Qualitätssicherung,
- digitalem Produktmodell.

FUNKTIONALE 3D-TOLERIERUNG

Präzision im Raum – Funktion in Perfektion

Eindeutige Bezugssysteme. Klare Toleranzen. Sichere Funktion.

BEZUGSSYSTEME – DIE BASIS ALLER TOLERIERUNG

Ein Bauteil wird durch definierte Bezugssysteme im Raum eindeutig orientiert und festgelegt.

- A PRIMÄRBEZUG**
Hauptbezugsfläche zur grundlegenden Ausrichtung (legt meist die z-Richtung fest)
- B SEKUNDÄRBEZUG**
Zusätzliche Referenz zur Festlegung einer weiteren Raumrichtung (x-Richtung)
- C TERTIÄRBEZUG**
Ergänzende Bezugsebene zur vollständigen räumlichen Positionierung (y-Richtung)

MATHEMATISCHE INTERPRETATION

Räumlicher Fehler:

$$\Delta r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$$

Die Bohrungsachse muss innerhalb des zulässigen Toleranzzyllinders bleiben.

$$\Delta r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$$

VON DER KONSTRUKTION ...

... BIS ZUR PRAXIS – DIGITAL VERBUNDEN, REAL UMGESETZT.

FUNKTION STATT NUR MASS

- ✓ Nicht einzelne Maße sind entscheidend, sondern das sichere Zusammenwirken aller Komponenten.
- ✓ Die 3D-Tolerierung beschreibt die funktional zulässige räumliche Gesamtabweichung.

- ⊗ Sichere Montage
- ⊗ Austauschbarkeit
- ⊗ Zuverlässige Funktion
- ⊗ Hohe Qualität
- ⊗ Weniger Fehlerketten

WESENTLICHE VORTEILE

- 📄 Eindeutige Definition – klare Funktionsvorgaben
- 🔧 Reproduzierbare Fertigung – realistische Herstellbarkeit
- 🔍 Präzise Prüfung – messtechnische Sicherheit
- 🌐 Internationale Standards – EN ISO GPS-System
- ⚡ Effiziente Prozesse – digitale Durchgängigkeit

PRÄZISION IST KEIN ZUFALL – SIE IST DAS ERGEBNIS VON SYSTEM, WISSEN UND PERSPEKTIVE.

SIE GESTALTEN QUALITÄT.

FUNKTIONSORIENTIERT. SYSTEMATISCH. ZUKUNFTSSICHER.
3D-TOLERIERUNG VERBINDET MENSCH, TECHNIK UND VERANTWORTUNG.
 Ihre Kompetenz. Ihr Mehrwert. Ihr Beitrag zur perfekten Technik.

NORMEN – DAS FUNDAMENT

EN ISO 1101	Geometrische Tolerierung
EN ISO 5459	Bezugssysteme
EN ISO 8015	GPS-Grundlagen
EN ISO 14405	Maßtoleranzen
EN ISO 16792	Digitale 3D-Definition (MBD)
EN ISO 10360	Koordinatenmesstechnik

Ein System. Eine Sprache. Weltweit.