

Toleranzmanagement in der Fahrzeugentwicklung

Eine präventive Qualitätsmethode

Text: Bernhard Mölzer, Michael Strobel



___ In der Fahrzeugentwicklung wird Toleranzmanagement als präventive Qualitätsmethode angewendet, um optischen und funktionellen Anforderungen gerecht zu werden. Dadurch können potenzielle Fehler vermieden werden, bevor sie entstehen. Übergeordnetes Ziel des Toleranzmanagements ist es, eine hohe Produktqualität ohne Nacharbeit zu realisieren.

Bei Porsche Engineering ist die Methode Toleranzmanagement dem Leistungsbereich Production Engineering zugeordnet. Hier werden Prozessthemen für Fahrzeug- und Industrieprojekte projektübergreifend begleitet.

Warum Toleranzmanagement?

Die stetig steigenden Anforderungen an ein Produkt hinsichtlich Design, Optik und Funktionalität führten zur Entwicklung der präventiven Qualitätsmethode Toleranzmanagement, um frühzeitig die Funktions- und Fertigungsfähigkeit von Konstruktionen abzusichern. Mithilfe des Toleranzmanagements können Fehler vermieden werden, bevor sie entstehen. Geforderte Qualitätsmerkmale (Fugenplan) können eingehalten sowie Engstellen und Funktionen abgesichert werden.

Die drei zentralen Bestandteile

Das Toleranzmanagement setzt sich im Wesentlichen aus den drei zentralen Bestandteilen „Vorgaben – Funktionsmaße und Fugenplan“, „Referenzpunktsystem“ und „Statistische Toleranzanalyse“ zusammen.

Vorgaben – Funktionsmaße und Fugenplan

Bauteile und Module sind hinsichtlich der Erfüllung von übergeordneten Qualitäts- und Funktionsmerkmalen in Abstimmung zu bemaßen. Die dabei abgeleiteten Werte nennt man Funktionsmaße. Für das Produkt werden die relevanten Merkmale in einem Anforderungskatalog – zum Beispiel in einem sogenannten Fugenplan- oder Funktionsmaßkatalog – zusammengefasst. Dieser dient der Fertigung in der Produktion zur statistischen Prozesssteuerung (SPC) und Fehleranalyse.

Funktionsmaße für Einzelteile oder Baugruppen werden in den entsprechenden Zeichnungen dokumentiert. Speziell bei der Festlegung der Funktionsmaße gilt es, den Grundsatz des Toleranzmanagements *So genau wie nötig – so ungenau wie möglich* zu beachten. Die richtige Balance zwischen Restriktion und Freiraum ist nötig, um in der Produktion ein fehlerfreies Produkt im angemessenen Kostenrahmen herzustellen. Zudem ist auch die Prüfbarkeit von Funktionsmaßen zu beachten, da die technisch umsetzbare Praxis oft die wünschenswerte Theorie einschränkt.

Wenn zum Beispiel eine gekrümmte Fläche oder eine schwer erreichbare Kante involviert ist, könnte das Funktionsmaß in der Realität nicht oder nur schwer reproduzierbar messbar sein. Die Folge sind hohe Ausschussquoten. Dies zieht eine

Fehlersuche, Eingriffe in laufende Prozesse und weitere Maßnahmen nach sich, die gerade im Produktionsbereich hohe Kosten verursachen. Durch intelligente Festlegung von Funktionsmaßen kann dies verhindert werden.

Referenzpunktsystem (RPS)

Das durchgängige Referenzpunktsystem (RPS) der Einzelteile und Baugruppen bis zum fertigen Produkt bildet das Fundament des Toleranzmanagements. Es ist Basis für die Erstellung von Toleranzkonzepten und der Messplanung und gleichzeitig Grundlage des Aufbau- und Montagekonzepts.

Die Aufgabe des RPS ist die eindeutige Positionierung eines Bauteils/Zusammenbaus im freien Raum und die Einschränkung der sechs Freiheitsgrade (je drei translatorische und rotatorische Bewegungsrichtungen) durch die Anwendung der 3-2-1-Regel. Dies gilt für alle ortsfesten Systeme. Bei kinematischen Systemen muss an dem Bauteil, das eine Bewegung verursacht, der entsprechende Freiheitsgrad uneingeschränkt bleiben. Die RPS-Punkte sollten in stabilen Bereichen und in ihrer Ausrichtung möglichst parallel zum Bauteilkoordinatensystem liegen. Durch ein geschickt positioniertes RPS können sich Toleranzeffekte an Stellen auswirken, die weder von funktions- noch von kundenspezifischem Charakter sind.

Statistische Toleranzanalyse

Die statistische Toleranzanalyse ermöglicht eine Aussage über den Einfluss einzelner Merkmale wie Form- und Lagetoleranzen oder Montageeinflüsse im Gesamtzusammenhang. Aus der Gegenüberstellung dieser Berechnungsdaten in Kombination mit den geforderten Qualitätsmerkmalen lassen sich die Direktläufer- beziehungsweise Ausschussquoten aufzeigen. Dazu wird die 1D-Toleranzberechnung beziehungsweise 3D-Toleranzsimulation verwendet.

Die statistische Berechnung von Qualitäts- und Funktionsmerkmalen zeigt in erster Linie auf, ob die Zielparameter mit den vorliegenden Montage- beziehungsweise Aufbaukonzepten sowie den verfügbaren Bauteilqualitäten erfüllt werden oder ob Optimierungen zur Zielerreichung notwendig sind. Dann gilt es, mit den beteiligten Fachbereichen Lösungen zu erarbeiten.

Die Vorteile

Durch die analytische Vorgehensweise ist es mit dem Toleranzmanagement möglich, die geforderten Qualitätsmerkmale (zum Beispiel Fugen und Übergänge) einzuhalten und >

Es gibt verschiedene Ansatzpunkte, um auf ein Ergebnis Einfluss zu nehmen:

- > Optimierung des Montage- beziehungsweise Aufbaukonzepts, dadurch Reduzierung der Beitragsleister
 - > Optimierung der Aufnahmekonzepte von Einzelteilen
 - > konstruktive Änderungen
 - > Anpassung/Einschränkung der Einzeltoleranzen – Vorsicht: steigende Herstellungskosten
 - > Optimierung des Herstellprozesses und dadurch Erhöhung der Qualitätsfähigkeitskennzahlen einzelner Beitragsleister (Prozessfähigkeit cp bzw. Prozessfähigkeitskennwert cpk) – Vorsicht: steigende Herstellungskosten
 - > Aufweitung der Qualitätsvorgabe (Toleranzvorgabe)
 - > Stylinganpassung (kritische Fugenverläufe entschärfen etc.)
-

funktionelle Anforderungen von Bauteilen (zum Beispiel Engstellen und Montierbarkeit) sicherzustellen. Es werden auch Schwachstellen im Styling, Konzeptfehler sowie Prozessrisiken sichtbar und bei Bedarf entschärft. Dadurch können Entwicklungs-, Fertigungs- und Nacharbeitszeiten und deren Kosten signifikant gesenkt werden.

Schnittstelle im Produktentstehungsprozess

Erfolgreiches Toleranzmanagement erstreckt sich über den gesamten Entwicklungsprozess und setzt eine kontinuierliche und enge Abstimmung mit allen beteiligten Fachbereichen (Entwicklung, Produktion, Qualität und Lieferanten) voraus. >

1D-Toleranzberechnung

- > mathematische Berechnung von Toleranzen mithilfe der Statistik
- > von einfacher Berechnung (Root-Sum-Square-Methode) bis zur komplexen Berechnung mittels Faltung verschiedener Verteilungsformen
- > Letztere in speziellen Toleranzberechnungsprogrammen
- > geeignet für erste Konzeptberechnungen und einfache Zusammenhänge
- > Anwendung auch in größeren oder komplexeren Umfängen

3D-Toleranzsimulation

- > Ergebnisse aus dreidimensional simuliertem Zusammenbau mit zufällig variierenden Toleranzen
- > Ergebnis über Tausende simulierte Produktionsabläufe, mit statistischer Bewertung
- > geeignet für große, komplexe Zusammenhänge mit starkem dreidimensionalen Einfluss
- > Vorteile:
 - Zusammenfassung mehrerer Messungen in einer Simulation
 - Berücksichtigung dreidimensionaler Geometrie und deren Effekte
 - einfachere Variantenbewertung
 - Bewertung kinematischer Systeme
 - Bewertung flexibler, überbestimmter Bauteile
- > Nachteile:
 - teilweise komplexer Aufbau
 - höhere Softwarekosten

Toleranzmanagement – Ablauf in der Fahrzeugentwicklung

- 1 Definition der zu betrachtenden Umfänge/Qualitätsmerkmale (Fugenplan, Funktionsmaßkatalog)
- 2 Aufzeigen der Zusammenhänge und Identifizieren der einzelnen Beitragsleister (Fügefolge, RPS-Konzept, Toleranzkonzept)
- 3 Identifizieren der Einflussgrößen und Fertigungsprozessparameter (Bauteil, Vorrichtung, Montagetoleranzen und ihre Verteilungsformen)
- 4 Durchführung der Toleranzanalyse (Toleranzberechnung 1D / Toleranzsimulation 3D)
- 5 Auswertung der Ergebnisse (Monte-Carlo-Simulation) und Einschätzung der Beitragsleister (Pareto-Analyse), Ermittlung der Direktläuferquoten (Nacharbeit) hinsichtlich geforderter Qualitäts- und Fugenvorgaben (von Fugenplan/Funktionsmaßkatalog)
- 6 Dokumentation der Toleranzanalyse (inkl. grafischer Darstellung)
- 7 Rückführung der Analyseergebnisse in die Entwicklungsteams
- 8 Maßnahmendefinition und Erarbeitung von Konzeptalternativen in den Entwicklungsteams bei Ergebnissen, die „nicht in Ordnung“ sind
- 9 Messwertrückführung in die Toleranzanalyse und Aktualisierung

Die Toleranzmanagement-Systematik

Qualitätsmerkmale

Toleranzvorgabe

Konstruktion

RPS, Toleranzwerte

Montage

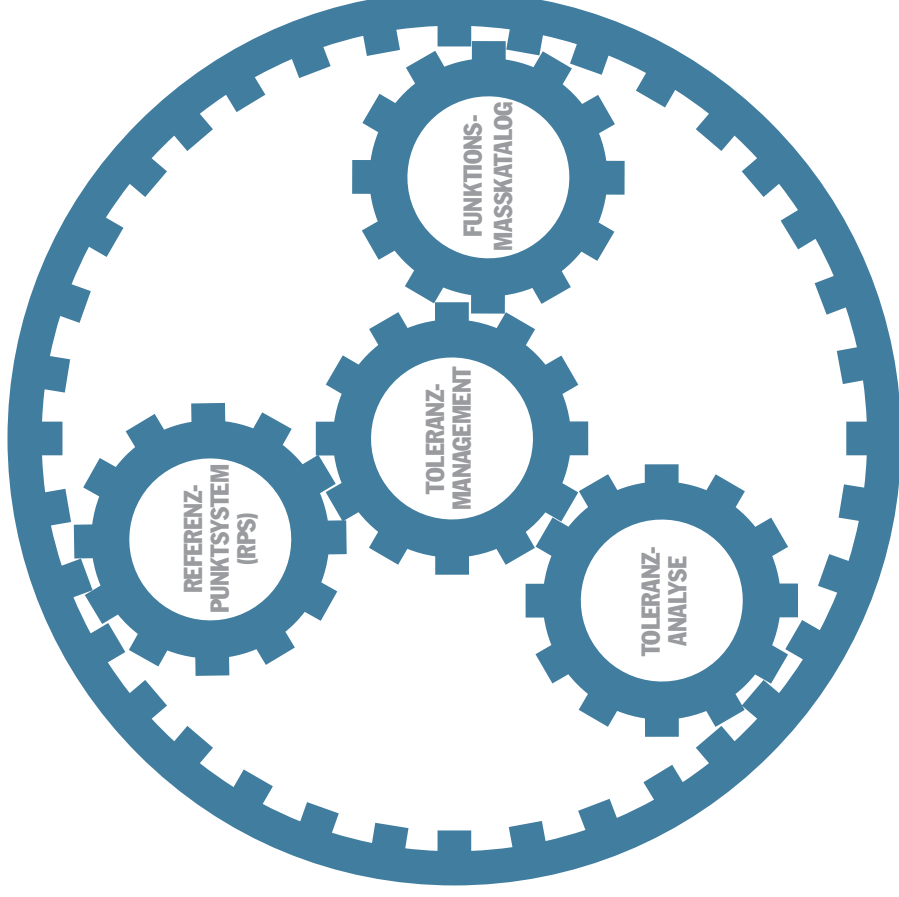
Toleranzwerte, Montagekonzepte

Qualität / Messtechnik

Messdaten bzw. Praxiswerte

Lieferant

Toleranzwerte



statische und arithmetische
Berechnungsergebnisse

Ermittlung der
Direktläuferquote

Identifizierung der
Hauptbeitragsleister

Konzeptentscheidung, Variantenberechnung



Jede Fuge sitzt an Ort und Stelle, Design und Funktionalität geben zu hundert Prozent miteinander einher.

Es gilt, die benötigten Informationen zu sammeln, im Toleranzmanagement umzusetzen und die daraus resultierenden Ergebnisse wieder an die Schnittstellen zurückzugeben.

Schnittstellen des Toleranzmanagements

- > Design
 - > Entwicklung
 - > Montageplanung
 - > Kaufteilqualität
 - > Lieferanten
 - > Produktion
 - > Messtechnik
-

Um eine größtmögliche Wirkung durch das Toleranzmanagement zu erzielen, muss dieses frühzeitig in den Entwicklungsprozess eingebunden werden. Entsprechend erfahrene Mitarbeiter sollten idealerweise bereits ab der Konzeptphase mitwirken und hinsichtlich RPS und Montagekonzepten beratend unterstützen. Auch in Richtung Serienanlauf, wenn also bereits erste Messdaten existieren, ist eine Messdatenrückführung in die Toleranzanalyse und somit eine Validierung der Annahmen möglich.

Zudem ist der Einsatz nicht auf die Umfänge der OEM- beziehungsweise erstausrüsterinternen Produktion beschränkt.

Auch für Lieferanten von Einzelteilen und Unterbaugruppen lohnt sich der Einsatz des gesamten Spektrums des Toleranzmanagements.

Wissen ausbauen und weitergeben

Um den Nachwuchs für das Toleranzmanagement zu fördern, werden an der Universität Stuttgart und am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Gastvorlesungen und Fachvorträge angeboten. Zudem ist im Rahmen von Industrie-Diplomarbeiten zum Thema Toleranzmanagement bei Porsche Engineering eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Produktentwicklung (IPEK) und dem Institut für Produktionstechnik (wbk) des KIT entstanden. Neben dem Ziel der Nachwuchsförderung wird damit bei Porsche Engineering der existierende hohe Standard in Bezug auf das Toleranzmanagement gehalten und konsequent weiterentwickelt.

Fazit

Das Einhalten von geforderten optischen und funktionellen Qualitätsmerkmalen unter der Prämisse der Reduktion von Nacharbeit und Prozesskosten ist der Motor für die frühzeitige Anwendung von Toleranzmanagement als präventive Qualitätsmethode im Produktentstehungsprozess. Seit der Einführung der 3D-Toleranzsimulation können komplexe Fragestellungen noch effizienter bearbeitet und detailreicher beurteilt werden. ■

911 (TYP 991): Kraftstoffverbrauch kombiniert 12,4–8,2 l/100 km; CO₂-Emission 289–194 g/km