

Toleranzmanagement im Entwicklungsprozeß

Reduzierung der Auswirkungen von Toleranzen
auf Zusammenbauten der Automobil-Karosserien

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Martin Bohn

aus Würzburg

Tag der mündlichen Prüfung:	23. November 1998
Hauptreferent:	o. Prof. Dr.-Ing. D. Spath
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. H. Birkhofer

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand als externe Promotion in meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung *Prozeßkette Produktentwicklung* der Daimler-Benz Forschung in Ulm. Der größte Teil der Arbeit wurde in Kooperation mit der Entwicklung PKW in Sindelfingen durchgeführt.

Herrn o. Prof. Dr.-Ing. D. Spath, Leiter des Instituts *Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik* der Universität Karlsruhe, betreute diese Arbeit und gab mir stets die erforderlichen Impulse. An dieser Stelle bedanke ich mich herzlich dafür. Gleiches gilt für das kompetente Korreferat von Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Birkhofer, Leiter des Institut *Maschinenelemente und Konstruktionslehre* der TU Darmstadt.

Die Herren A. Katzenbach, R. Eißrich, P. Schneider, R. Winterstein, H. Köble und A. Epple waren wesentliche Treiber im Themengebiet Toleranzen bei der Daimler-Benz AG und haben mich hervorragend bei meiner Arbeit unterstützt. Daher gilt ihnen mein Dank. Bei dem Toleranzarbeitskreis sowie allen Kollegen aus der Daimler-Benz AG bedanke ich mich für die fruchtbare Zusammenarbeit.

Ich danke den Studenten S. Fuchß, H. Jakobs, Th. Möll und Th. Walter, die durch ihre Studien- und Diplomarbeiten wertvolle Beiträge zum Gelingen geleistet haben.

Besonders bedanke ich mich bei meinen Eltern, Herrn Dr.-Ing. K.-H. Beelich und Frau A. Münch, die mir während meiner Promotion jederzeit mit Rat und Tat hilfreich und kompetent zur Seite standen.

Stuttgart, im Dezember 1998

Martin Bohn

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	6
2.1 Toleranzrepräsentation	6
2.1.1 Normen	6
2.1.2 Datenkonzepte	6
2.2 Qualitätsmanagement	7
2.3 Entwicklungsprozesse	9
2.3.1 Anforderungsprofil erstellen	11
2.3.2 Vorgehensweise zur Festlegung der toleranzrelevanten Größen	12
2.3.3 Toleranzanalyse	16
2.3.4 Optimierungsstrategien	16
2.4 Diskussion	20
3 Entwicklungsprozeßintegriertes Toleranzmanagement	22
3.1 Ziel der Arbeit	22
3.2 Ansatz	23
4 Festlegen der toleranzrelevanten Größen	33
4.1 Besonderheiten des Karosseriebaus	33
4.2 Vorgehensweise	33
4.3 Aufbaureihenfolge	36
4.3.1 Reihenfolge der Einzelteile	39
4.3.2 Ausrichten der Teile	41
4.3.3 Ort der Erzeugung der Genauigkeit	41
4.4 Prozeßdurchgängige Bezugsstellen	42
4.4.1 Allgemeine Randbedingungen	43
4.4.2 Anforderungen aus Herstellung und Verwendung	45
5 Streuungen des Fertigungsprozesses	49
5.1 Streuungsentstehung	49
5.2 Statistische Grundlagen und Fehlerbetrachtungen	50
5.2.1 Fehler auf Einzelteil- / Fertigungsverfahrensebene	50
5.2.2 Resultierende Fehler auf Zusammenbau-Ebene	61
5.3 Preßteilstreuungen	62
5.3.1 Streuungsvorhersage	62
5.3.2 Art der Tolerierung	71
5.4 Rohbaustreuungen	73
6 Optimierungsstrategien	76
6.1 Generelle Prinzipien des toleranzgerechten Konstruierens	77
6.2 Checklisten	78
6.3 Konstruktionskataloge	79
6.3.1 Aufbau der Konstruktionskataloge	79
6.3.2 Handhabung der Konstruktionskataloge	84
6.3.3 Kataloge entlang der Prozeßkette	88
7 Toleranzanalyse	86
7.1 Voraussetzungen	86
7.2 Güte der Ergebnisse	87
7.2.1 Numerische Genauigkeit	87
7.2.2 Modellgenauigkeit	89

8 Verifikation und Nutzen	91
8.1 Allgemein	91
8.2 Konkrete Anwendung	93
9 Zusammenfassung und Ausblick	98
10 Literaturverzeichnis	100
Anhang	I
A Begriffsdefinitionen	I
B Integration in bzw. Analogie zum Qualitätsmanagement	II
C Gegenüberstellung von Verteilungen bei verschiedenen Stichprobengrößen	III
D Checkliste zum toleranzgerechten Konstruieren	IV
E Konstruktionskataloge zum toleranzgerechten Konstruieren	V
F Vergleichende Streuung der Meßpunkte der A-Säule (unten)	XXXI
G Vergleich Messung und Toleranzsimulation	XXXVI

Formelzeichen

α	: Wahrscheinlichkeit
χ	: Quantile der Chi-Quadrat Verteilung
d	: Durchmesser
l	: Vertrauensintervall
K_i	: Konstante Faktoren
n	: Stichprobengröße
μ	: Auslenkung, Verschiebung unter Einheitslast
σ	: Theoretische Standardabweichung einer Grundgesamtheit
s	: Bestimmte Standardabweichung einer Stichprobe
V	: Standardabweichung durch Verkippung der Bezugsebenen
X	: X-Richtung im Fahrzeugkoordinatensystem
Y	: Y-Richtung im Fahrzeugkoordinatensystem
Z	: Z-Richtung im Fahrzeugkoordinatensystem

Abkürzungen

MMC	Maximum Material Bedingung [DIN-2692]
PW	: Preßwerk
RB	: Rohbau
ZB	: Zusammenbau bzw. Baugruppe

1 Einleitung

An moderne Fahrzeuge werden immer höhere Anforderungen gestellt, denn der Kunde erwartet eine steigende Qualität. Für ihn leicht erkennbare Qualitätsmerkmale, die sehr stark im Mittelpunkt der Medien stehen, sind beispielsweise die Gleichmäßigkeit und Breite der Spalte am Fahrzeug. Sie betragen zur Zeit etwa 6 mm und sollen in Zukunft, um eine höhere Qualität zu symbolisieren, auf 3 bis 4 mm verringert werden [Sel-97]. Bild 1 zeigt, daß demzufolge die Toleranzen im Karosseriebau mehr als halbiert werden müssen. Treten in einer Klasse zwei Zahlen auf, wie dies bei „Modul-Karosseriebau“ der Fall ist, so steht der kleinere Zahlenwert für die Standardtoleranz, in Ausnahmefällen wird auch der größere Zahlenwert zugelassen.

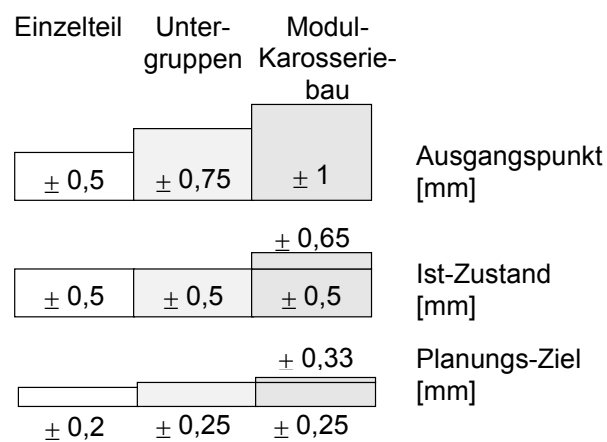


Bild 1: Zulässige Toleranzen im Karosseriebau [Sel-97]

Zusätzlich soll das Preis-Leistungs-Verhältnis von Modell zu Modell verbessert werden. Zur Realisierung müssen die Herstellungskosten sinken, was nur durch höhere Prozeßstabilität und effizientere Fertigungsprozesse erreicht werden kann. Viele dieser im Fertigungsprozeß auftretenden Probleme haben ihre Ursache in dem Zusammenwirken der Toleranzen von Einzelteilen, Ausrichtoperationen und Fügeverfahren.

Ein weiterer Aspekt ist die Laufzeit eines Modells in der Automobilindustrie, welche sich in den letzten Jahrzehnten drastisch verkürzt hat (Bild 2). Dies ist die Folge der Öffnung der Märkte, der allgegenwärtigen Präsenz der Medien sowie nicht zuletzt der gestiegenen Kaufkraft einer breiten Bevölkerungsschicht.

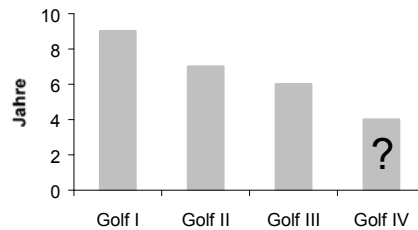


Bild 2: Laufzeit eines Modells

Betrug in den 70er Jahren die Laufzeit eines Modells (Golf I) ungefähr 9 Jahre, werden es für das Jahr 2000 nur noch etwa 4 Jahre sein (Golf IV), so daß damit auch wesentlich weniger Zeit für die Neuentwicklung zur Verfügung steht.

Ebenfalls wichtig ist der Zeitpunkt des Markteintritts. So haben Untersuchungen ergeben [Voe-97], daß ein um sechs Monate verzögerter Markteintritt durch eine längere Entwicklungszeit einen erheblichen Wettbewerbsnachteil darstellt. Dies verdeutlicht das folgende Bild.

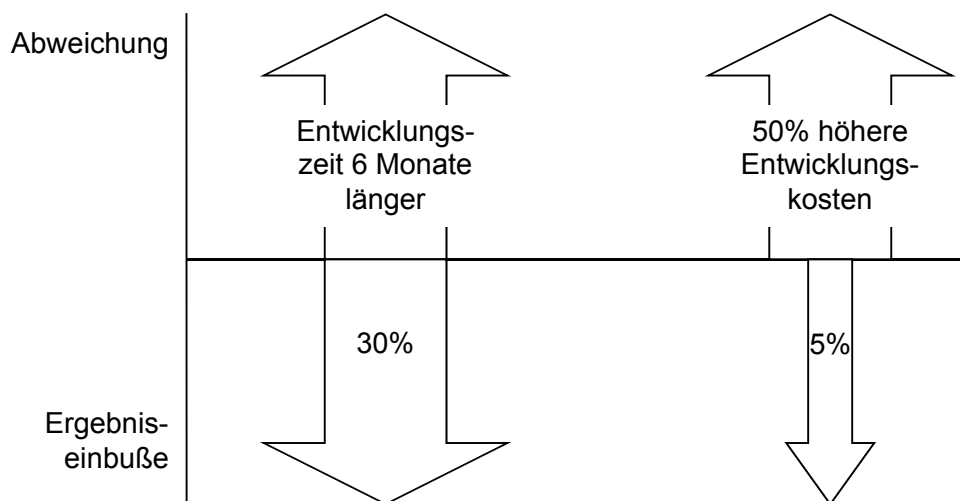


Bild 3: Bedeutung der Entwicklungszeit [Voe-97]

Als Folge des häufigeren Modellwechsels und des möglichst frühen Markteintritts haben sich die Entwicklungszeiten für neue Modelle stark verkürzt. Dieser Trend wird auch in Zukunft die Entwicklung bestimmen.

Zusätzlich zur kurzen Entwicklungszeit ist eine steile Anlaufkurve sehr wichtig, d.h. ein möglichst schnelles Erreichen der erforderlichen Produktionsstückzahlen, um die Nachfrage des Markts gleich zu Beginn befriedigen zu können.

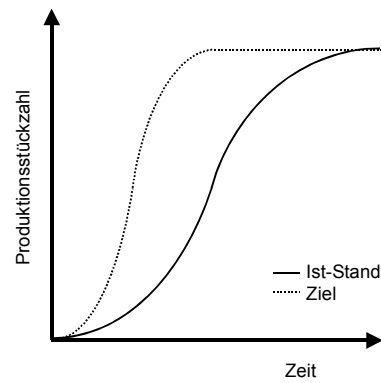


Bild 4: Steigung der Anlaufkurve zu Serienbeginn

Die Steigung der Anlaufkurve hängt im wesentlichen von den Problemen ab, die zu Serienbeginn auftreten. Ursache hierfür sind vor allem Toleranzlagen von Teilen und Anlagen sowie Teile, die außerhalb der maßlichen Spezifikationen liegen.

Das folgende Bild zeigt zusammenführend den zu optimierenden Zustand, den Weg und die Ziele aus Toleranzsicht auf.

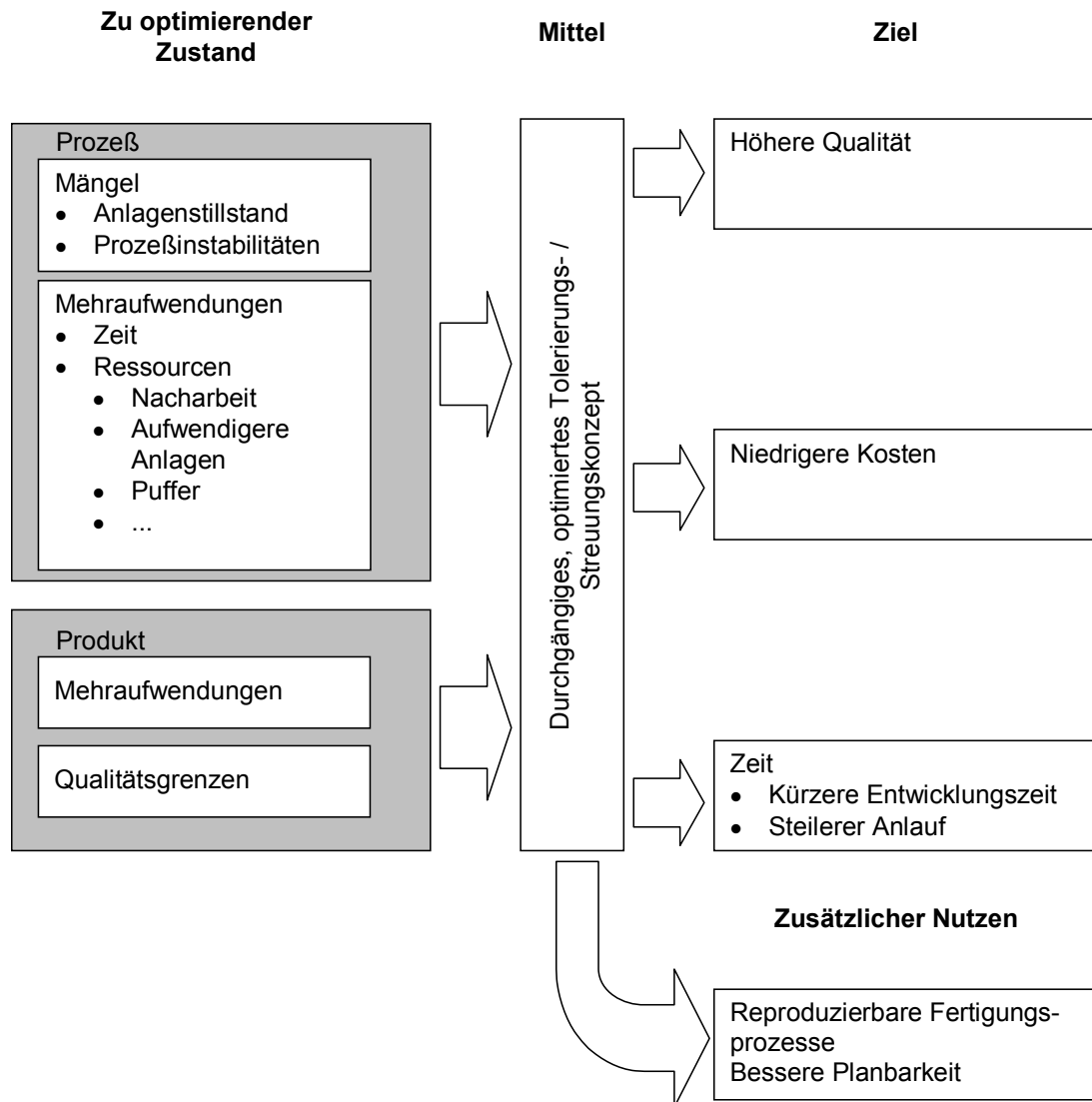


Bild 5: Anforderungen, Probleme und Potentiale

Um diese Ziele zu erreichen, muß die zeitliche und örtliche Entstehung von Fehlern und deren Auswirkungen betrachtet werden. In Bild 6 ist die Fehlerentstehung und -behebung über der Prozeßkette dargestellt.

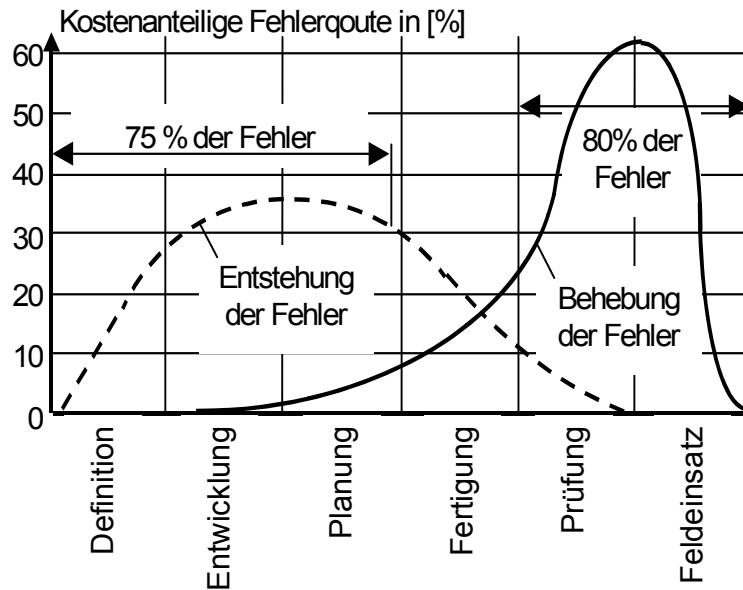


Bild 6: Tendenz der Fehlerentstehung und -behebung [VDI-2247]

Fehler entstehen während des gesamten Produktentstehungsprozesses. Mit Einzelmaßnahmen kann ihre absolute Anzahl lokal abgesenkt werden, während mit einem prozeßdurchgängigen Ansatz die ganze Kurve insgesamt auf ein niedrigeres Niveau abgesenkt werden kann.

Toleranzen, die während des Produktentstehungsprozesses gewährleistet werden müssen, resultieren aus den Anforderungen des gesamten Produktlebenszyklus (Bild 7).

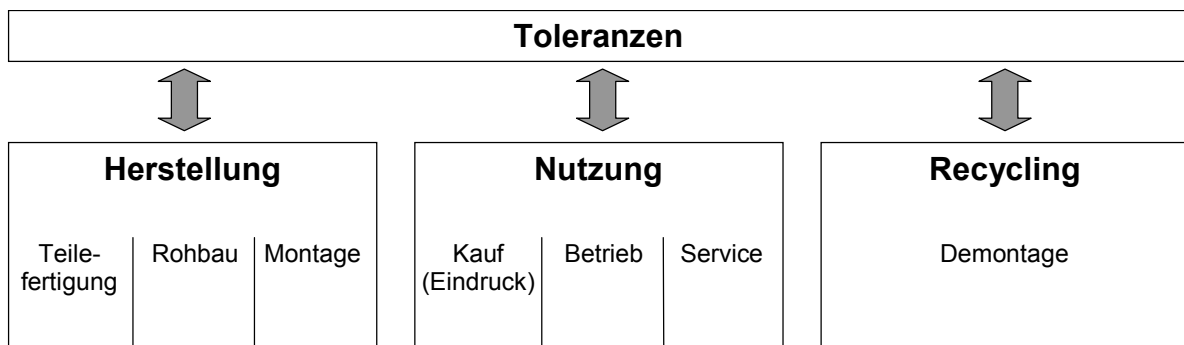


Bild 7: Toleranzen im Produktlebenszyklus

2 Stand der Technik

Der Stand der Technik zum Thema „Toleranzen“ gliedert sich in vier Gebiete. Die Toleranzrepräsentation mit den enthaltenen Normungen und Datenkonzepten bildet die Grundlage. Das Qualitätsmanagement sowie die Entwicklungsprozeßbeschreibungen enthalten Teilaspekte zu diesem Thema. Darüber hinaus existiert ein Themenkomplex, der sich mit dem Umgang mit der Toleranzinformation befaßt. Bild 8 zeigt die Gliederung der verschiedenen Blickwinkel auf Toleranzen.

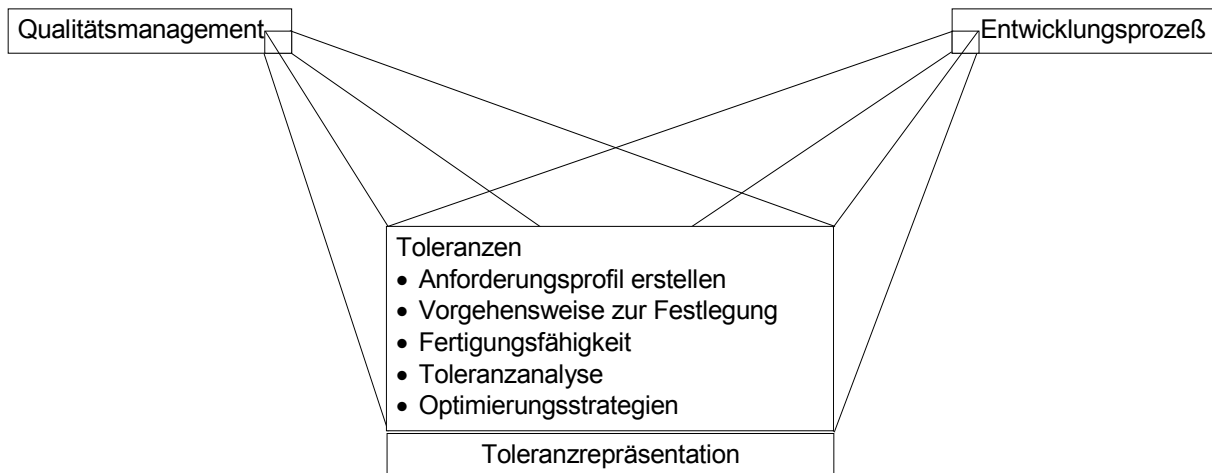


Bild 8: Gliederung des Stands der Technik

2.1 Toleranzrepräsentation

Die verschiedensten Formen der geometrischen und mathematischen Toleranzrepräsentation sind von Weber [Web-94] gegenübergestellt und bewertet worden.

2.1.1 Normen

In der Dissertation von Schütte [Sch-95] ist die Historie der Normung der Form- und Lagetoleranzen aufgezeigt. Die Häufigkeit, mit der sich die Normen ändern bzw. neue hinzukommen, zeigt, daß sich dieses Thema in der Entwicklung befindet.

2.1.2 Datenkonzepte

Das aktuelle Ziel in der Softwareindustrie ist es, die Durchgängigkeit der Daten zumindest ansatzweise zu realisieren. Ein Beispiel dafür ist der Closed Loop Prozeß. Die in der Konstruktion erzeugten CAD-Daten werden dabei in den nachfolgenden Bereichen genutzt. Analog ist dies auch für die CAP-Daten gültig. Aus der Qualitätskontrolle fließen die gewonnenen Informationen in Form von Meßwerten in die Konstruktion zurück (Bild 9).

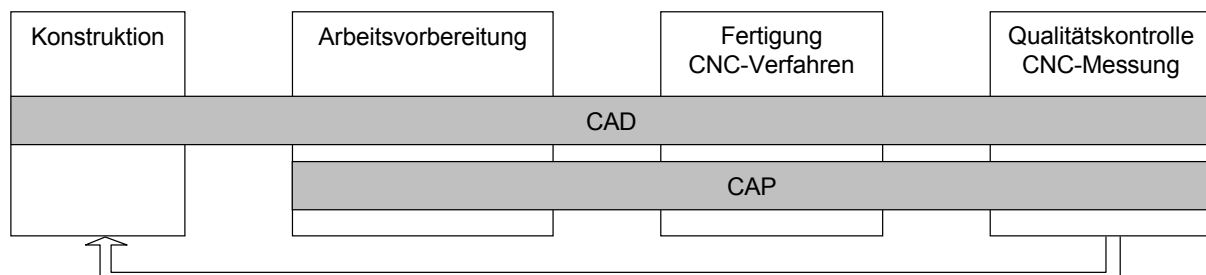


Bild 9: Closed Loop Prozeß

Parallel dazu existieren in der Forschung die verschiedensten Ansätze für ein „Integriertes Produktmodell“, das die Daten der verschiedenen CAX-Technologien zusammenfaßt und somit eine Kopplung der CAX-Teilsysteme erreicht (Bild 10).

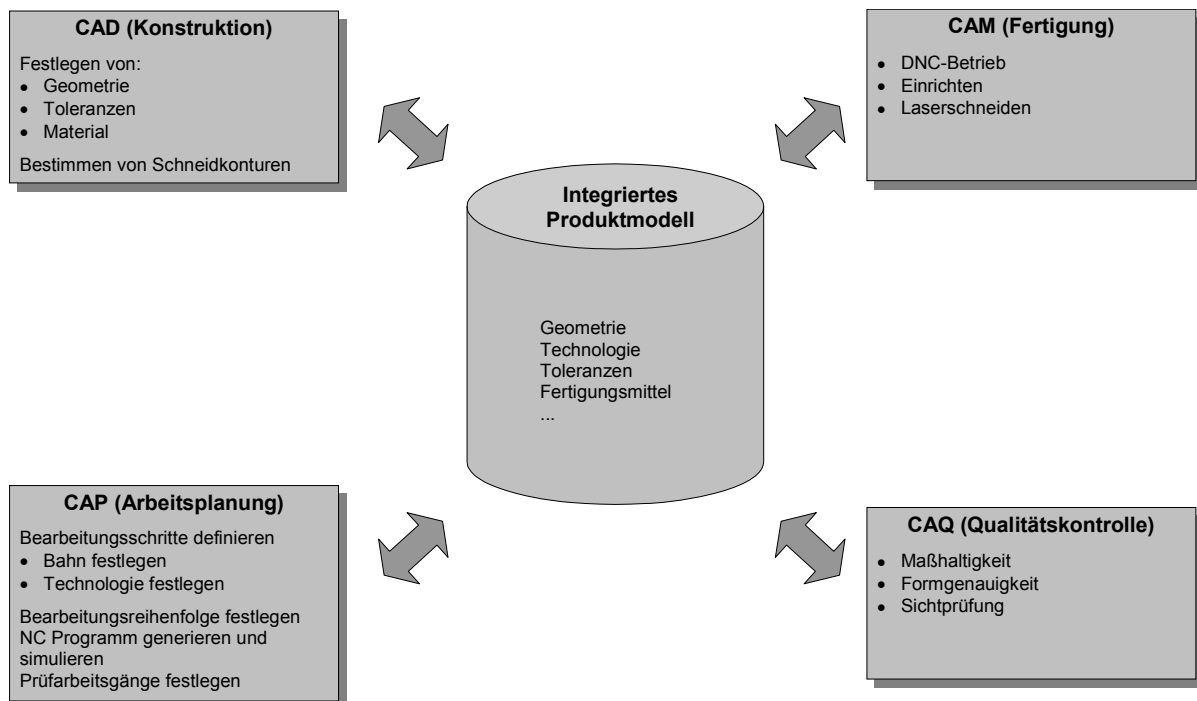


Bild 10: Prinzip der datenbankorientierten Kopplung von bestehenden Teilsystemen auf der Basis eines integrierten Produktdatenmodells [Mil-94]

Über die geometrische Toleranzrepräsentation hinaus ist ein standardisiertes Konzept der Prozeßbeschreibung erforderlich. Hier hat sich noch kein Standard durchgesetzt

2.2 Qualitätsmanagement

Die DIN 55350 Teil 11 [DIN-55350] definiert das Qualitätsmanagement wie folgt, „Qualitätsmanagement ist die Benennung für den Oberbegriff der Gesamtheit der qualitätsbezogenen Tätigkeiten und Zielsetzungen“.

Nach der VDI 2247 [VDI-2247] und Pfeifer [Pfe-93] beschränken sich die wesentlichen Methoden des präventiven Qualitätsmanagements auf die in Bild 11 aufgeführten.

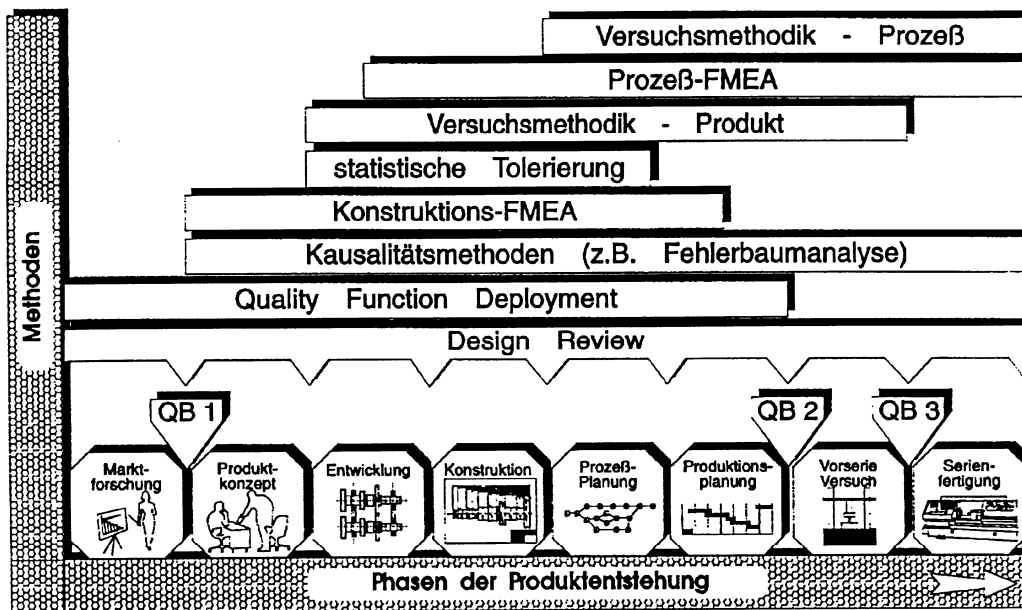


Bild 11: Methoden des präventiven Qualitätsmanagements [VDI-2247]

Diese Methoden des präventiven Qualitätsmanagements sind dort ausführlich beschrieben. Toleranzen sind dabei ein Teilaspekt des Themenkomplexes Qualität. Sie sind hier auf die statistische Tolerierung (im Gegensatz zur „worst-case“ Tolerierung) reduziert. Laut [Pfe-93] gehört zweifellos die systematische Toleranzauslegung zu den wichtigen Methoden für ein erfolgreiches Qualitätsmanagement. Schrems, Hirschmann und Lechner gehen sogar noch etwas weiter und postulieren „ein Qualitätswissens-System besteht aus den 3 Komponenten Toleranzanalyse-System, Toleranzsynthese-System, Toleranzinformations-System“ [Sch-94c].

2.3 Entwicklungsprozesse

Die Betrachtung des Entwicklungsprozesses erfolgt in zwei Stufen. Zunächst wird er global vorgestellt und dann werden die einzelnen toleranzrelevanten Schritte näher betrachtet.

Der Begriff der Produktentwicklung wird in der Literatur unterschiedlich definiert. Spur [Spu-94] stellt die verschiedenen Definitionen von Kesselring [Kes-51], Opitz [Opi-71], Koller [Kol-85], VDI 2222 [VDI-2222], Pahl / Beitz [Pah-93], VDI 2221 [VDI-2221] und Heyde [Hey-87] gegenüber, die sich hauptsächlich in ihrem Fokus unterscheiden.

Bild 12 nach Spur zeigt den seiner Ansicht nach prinzipiellen Ablauf der Produktentwicklung in einem sehr breiten Spektrum.

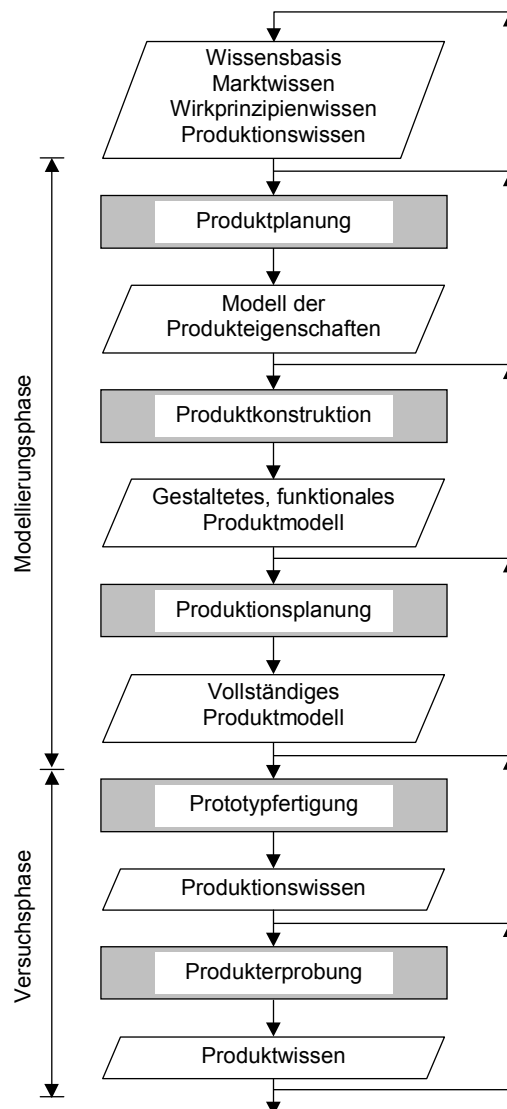


Bild 12: Prozeß aus Sicht der Produktentstehung [Spu-94]

Dieser Ablauf beinhaltet sowohl das Produkt als auch den Fertigungsprozeß. Konkretisierungen für den Produktplanungs- und Produktkonstruktionsprozeß finden sich u.a. bei Birkhofer [Bir-93].

In Anlehnung daran wird in Bild 13 die Vorgehensweise sowohl für Neu- als auch Anpassungskonstruktionen dargestellt.

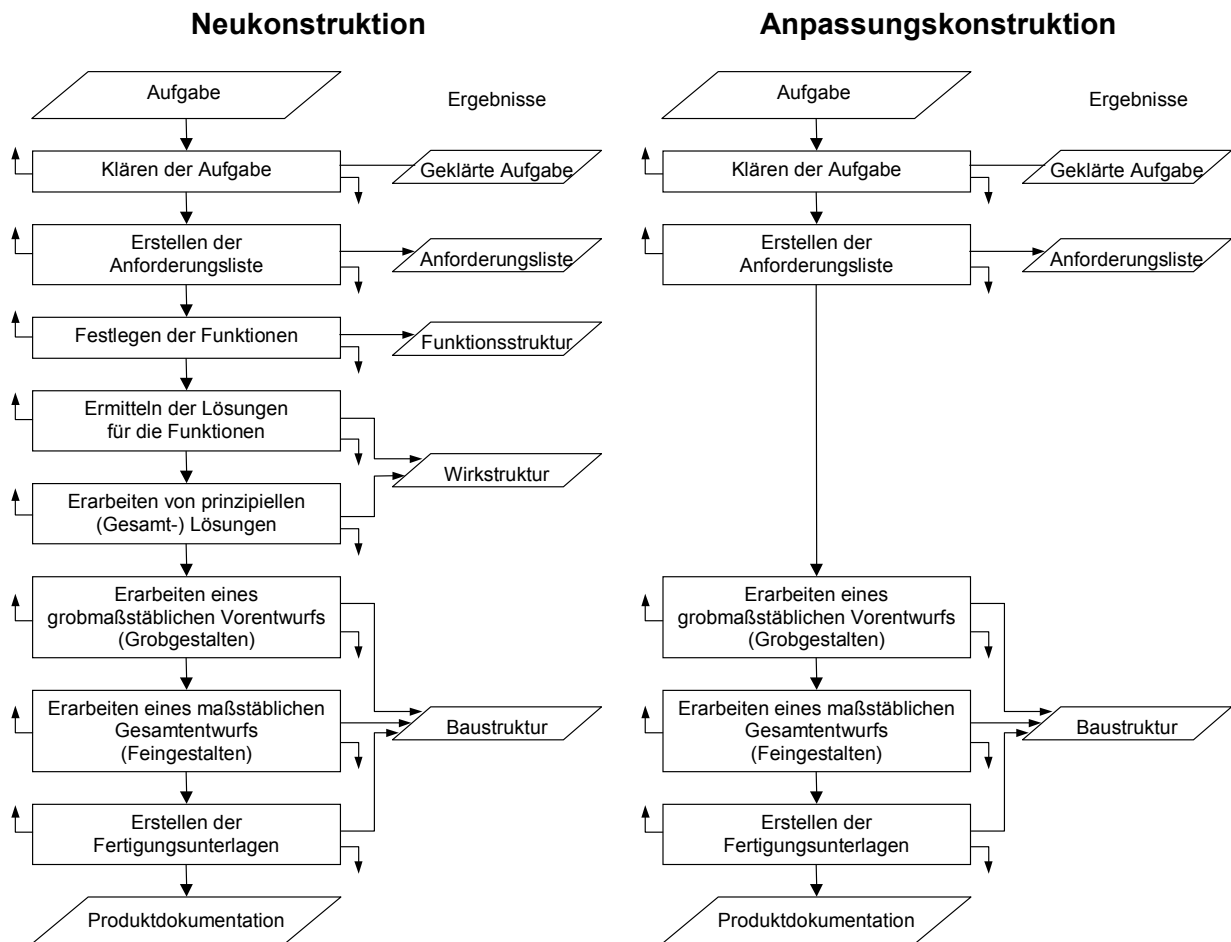


Bild 13: Vorgehensweise für Neu- und Anpassungskonstruktionen

Der vollständige Ablauf einer Neukonstruktion wird i.a. in der Automobilindustrie nicht verwendet, da in der Regel jedes Fahrzeug auf einem Vorgänger basiert. Daher kommt in der Praxis der Ablauf zur Anpassungskonstruktion zur Anwendung.

Die Zehnerregel der Fehlerkosten [Pfe-93] zeigt sehr deutlich, daß die Qualitätssicherung bereits zu Beginn des Entwicklungsprozesses einsetzen muß.

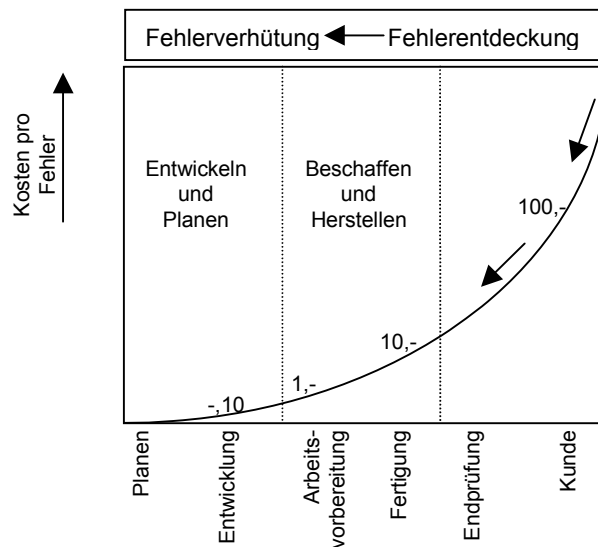


Bild 14: Zehnerregel der Fehlerkosten

Zur Zeit fließen die Toleranzinformationen vielfach nur in eine Richtung, es fehlt der Informationsrückfluß in vorgelagerte Bereiche der Prozeßkette (Bild 15), und somit wird der Schritt von der Fehlerentdeckung zur -verhütung unnötig erschwert.

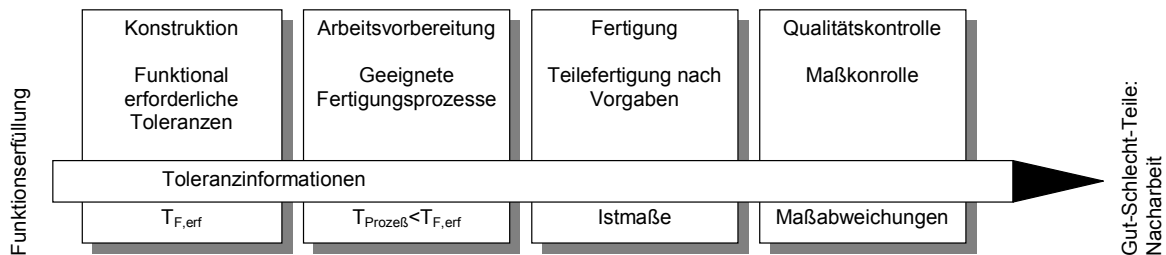


Bild 15: Einbahnstraße der Toleranzinformation [Hol-94]

Die Punkte innerhalb des Entwicklungsprozesses, die detailliert aus Toleranzsicht betrachtet werden müssen, sind die folgenden:

- Anforderungsprofil erstellen
- Vorgehensweise zur Festlegung der toleranzrelevanten Größen definieren
- Fertigungsfähigkeit ermitteln
- Toleranzanalyse überprüfen
- Optimierungsstrategien entwickeln

2.3.1 Anforderungsprofil erstellen

Bei den Anforderungen an die Güte einer Gesamttoleranz ist zwischen technisch-funktionalen und visuell erforderlichen Toleranzen zu unterscheiden. Die Wahl der Toleranzen erfolgt in der Regel erfahrungsbezogen, seltener auf der Basis rechnerischer Analysen [Fra-94], bei visuell erforderlichen Toleranzen wird die Rechnung in der Regel durch ein Experiment ersetzt.

Eine konstruktionsmethodische Unterstützung bei der Quantifizierung der Anforderungen gegeneinander bietet das Verfahren der Quality Function Deployment (QFD) [Van-89].

2.3.2 Vorgehensweise zur Festlegung der toleranzrelevanten Größen

Für den Konstrukteur sind konkurrierende Anforderungen nach einer funktional optimalen sowie einer fertigungstechnisch durchführbaren und kostengünstigen Lösung ein häufig schwierig zu lösender Konflikt [Jor-91]. Daher wird eine Vorgehensweise benötigt, die den Konstrukteur in diesem Konflikt unterstützt.

Die methodische Tolerierung nach Jorden und Schütte läuft folgendermaßen ab:



Bild 16: Phasen der Methodik [Sch-94b]

Ein- und zweigliedrige Toleranzen (Toleranzketten) werden in den Normen behandelt. Hier sei zum Beispiel auf das Einheitswellesystem verwiesen [DIN-7155], [DIN-58700]. Für die mehrgliedrigen Toleranzketten gibt es die beiden folgenden Vorgehensweisen. Die Festlegung nach Pfeifer [Pfe-93] beschreibt den Weg zur tolerierten Konstruktion sowohl für den Fall der konventionellen Tolerierung („worst-case“) als auch für den Fall der statistischen Tolerierung (Bild 17).

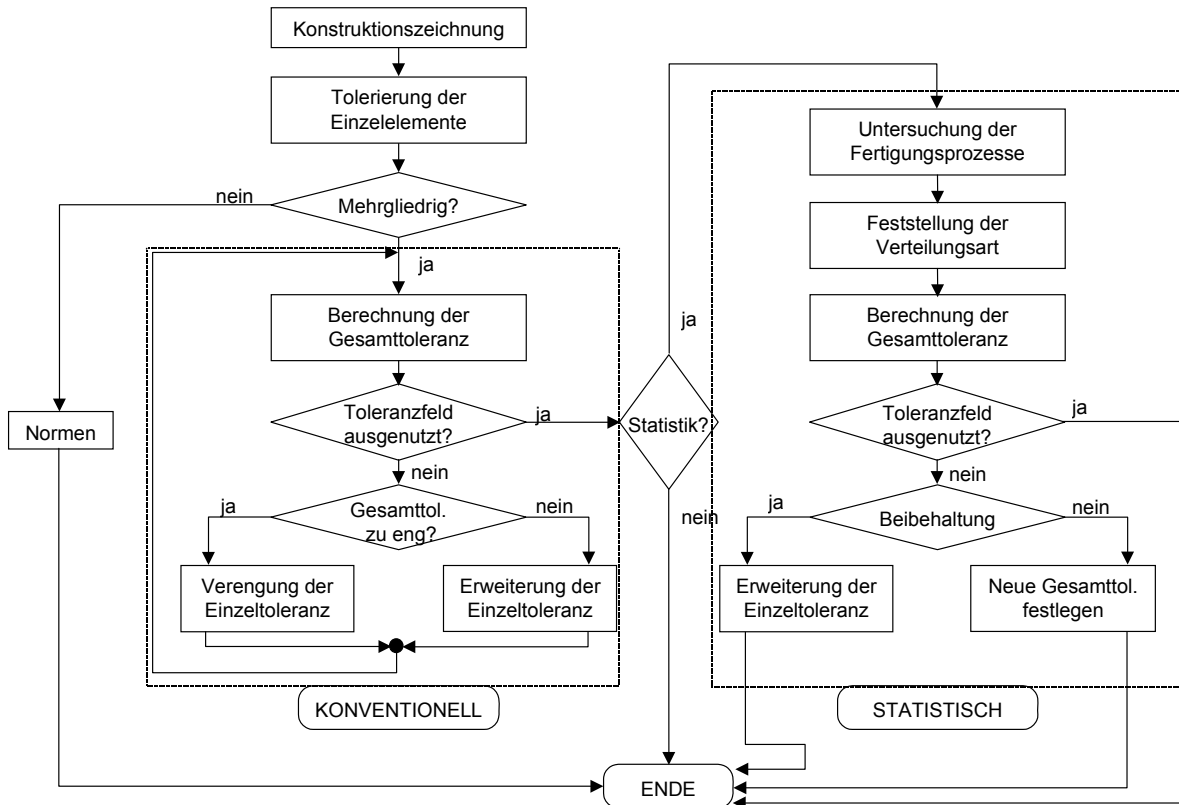


Bild 17: Vorgehensweise bei der Toleranzermittlung [Pfe-93]

Das Ablaufdiagramm nach Franke [Fra-94b] bezieht sich zwar auf die rechnerunterstützte Toleranzsynthese, stellt aber dennoch eine allgemeine Vorgehensweise dar, denn die Synthese kann mit dem Festlegen der relevanten Größen gleichgesetzt werden.

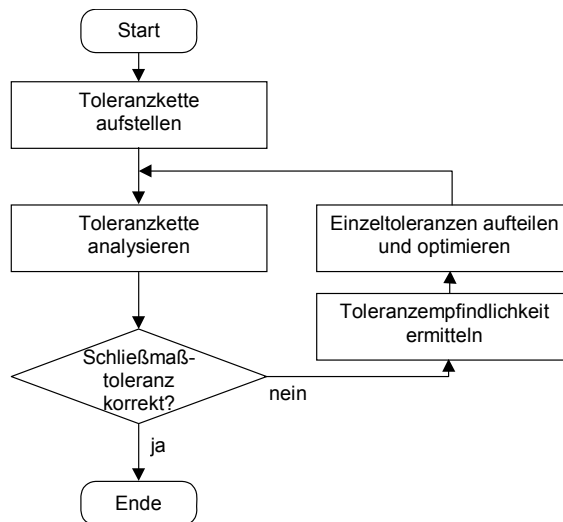


Bild 18: Ablaufdiagramm der rechnerunterstützten Toleranzsynthese [Fra-94b]

Auf einer höheren Abstraktionsebene beschreibt die Toleranzstrategie nach [Dcs-96] die Vorgehensweisen zur Festlegung der toleranzrelevanten Information und die Nutzung dieser.

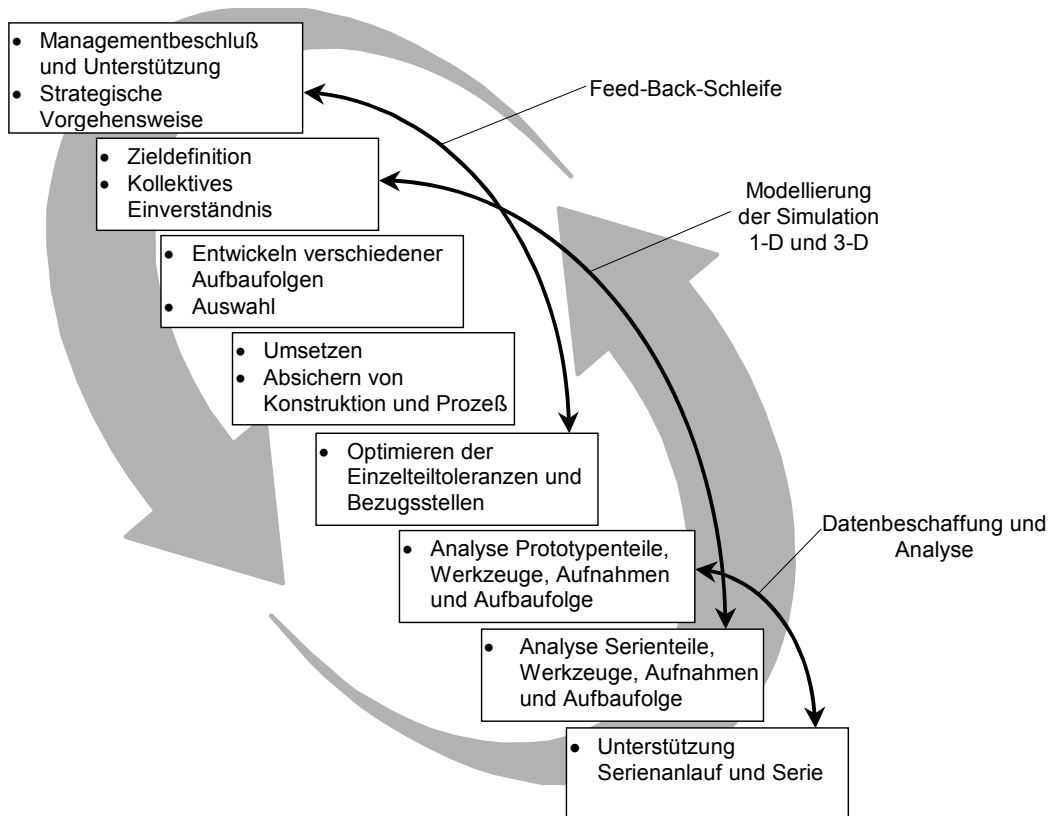


Bild 19: Toleranzstrategie [Dcs-96]

Dieser Ablauf deckt die Vorgehensweise vom Managementbeschuß bis zur Serienfertigung ab. Die Kernpunkte sind Definition und Absicherung der Aufbaureihenfolge sowie Optimierung der Einzelteiltoleranzen und Bezugsstellen.

Die konkrete Vergabe der Einzeltoleranzen (Toleranzsynthese) kann auf verschiedene Arten erfolgen:

1. Gleichmäßige Aufteilung der zur Verfügung stehenden Summentoleranz
2. Geometrische Aufteilung der zur Verfügung stehenden Summentoleranz
3. Anwendung von Toleranz-Kosten-Modellen

Bei der Verwendung von Toleranz-Kosten-Modellen werden allen Toleranzen die Kosten in Abhängigkeit von der Genauigkeit zugewiesen und das Kostenoptimum aller Toleranzen für die gewünschte Zusammenbautoleranz gesucht.

In einem Toleranz-Kosten-Modell für die Fertigung sind die folgenden Aspekte berücksichtigt [Zha-93a]:

- Genauigkeit der Maschine
- Genauigkeit der Aufnahme
- Genauigkeit des Werkzeugs
- Einstellfehler
- Verformung des Maschinensystems unter äußerer Last
- Thermische Verformung
- Meßfehler
- Materialunreinheiten

Das Diagramm in Bild 20 zeigt einen typischen Zusammenhang zwischen dem Fertigungsverfahren, der Toleranz und den Kosten. Die Kosten einer Toleranz sind defi-

niert als Ausgaben, die notwendig sind, um eine bestimmte Genauigkeit zu erreichen [Abd-94].

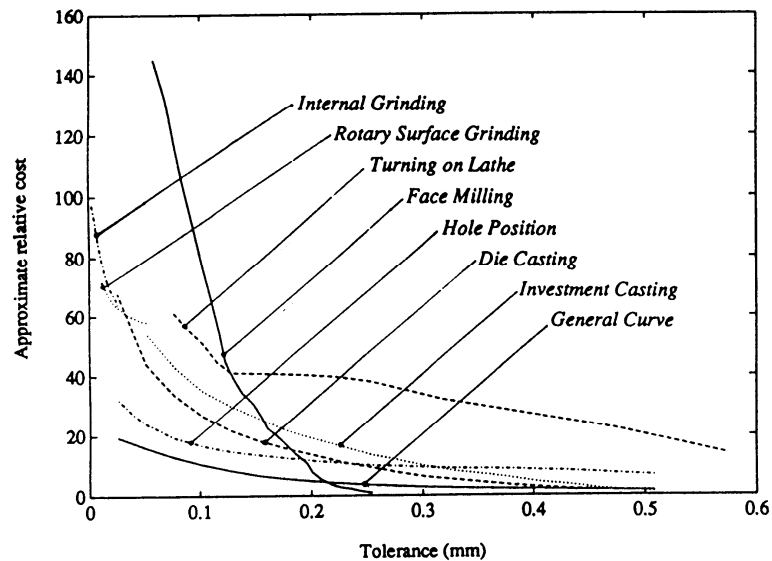


Bild 20: Toleranz – Kosten Zusammenhang [Xue-93]

Ähnliche Ansätze gibt es auch von Dong [Don-91], Zhang [Zha-93a] und Yeo [Yeo-96]. Sie unterscheiden sich in den betrachteten Verfahren und der Darstellung. Dong, Xue und Yeo stellen Diagramme, Zhang hingegen mathematisch beschriebene Kurven zur Verfügung. Von Anderson [And-90] und Abdel-Malek [Abd-94] werden jeweils diskrete Kostenansätze mit einem Wert je Verfahren vorgestellt. Die Berechnungsverfahren bei der Suche nach dem Optimum werden von Dong [Don-91], Zhang [Zha-92] und Nagarwalla [Nag-94] beschrieben.

Prinzipiell sind Toleranz-Kosten-Modelle der sinnvollste Ansatz, da die Berechnung und Bewertung der allen Qualitätselementen und Qualitätszielen zugeordneten Kosten stets eine wichtige Überlegung sein muß, mit dem Ziel der Minimierung von Qualitätseinbußen [DIN-9004].

Bild 21 zeigt die „optimale Toleranzsynthese durch einen generischen Algorithmus (GA)“ nach Kanai [Kan-95], die Toleranz-Kosten-Modelle beinhaltet.

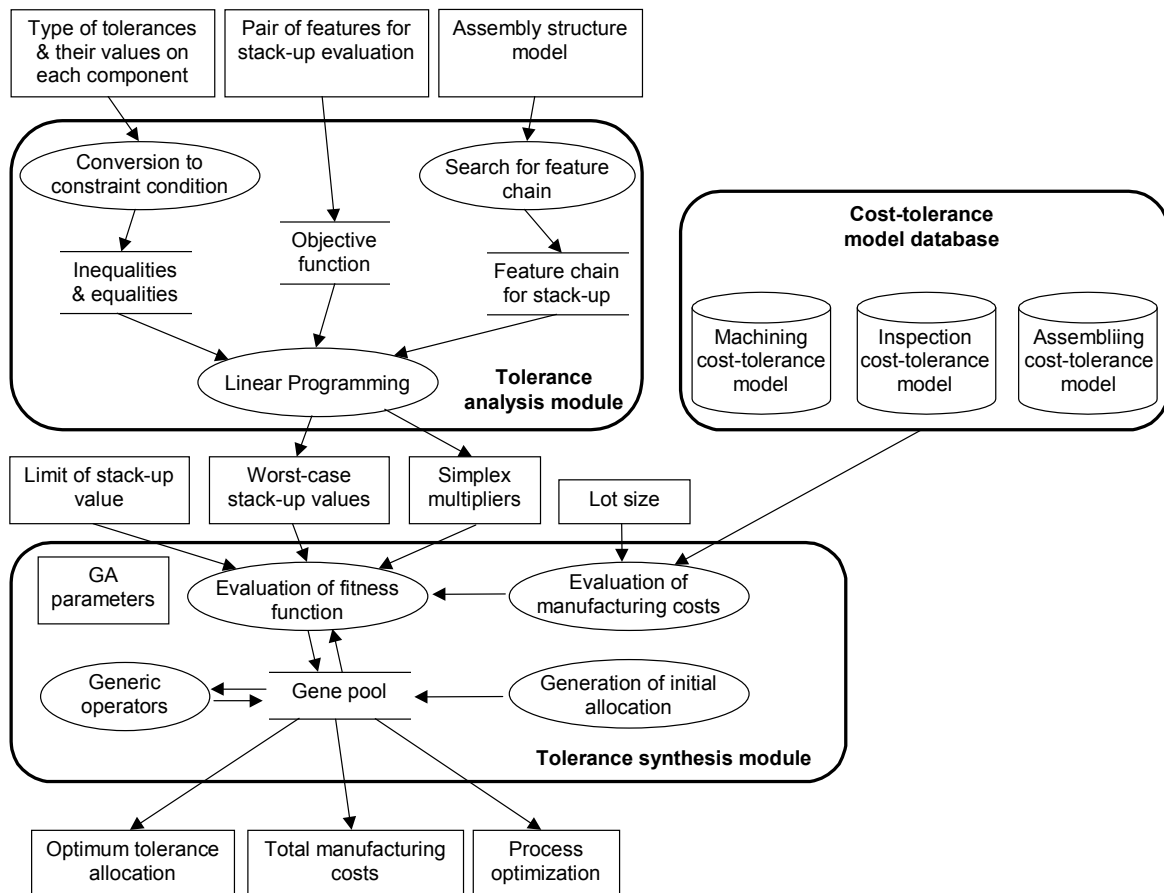


Bild 21: Optimale Toleranzsynthese durch einen generischen Algorithmus (GA)

Hier wird das Zusammenspiel von Toleranzanalyse, -synthese und Kostenmodellen aufgezeigt.

2.3.3 Toleranzanalyse

Es existieren in der Literatur zu Dutzenden Algorithmen, um Toleranzanalysen¹ (Schließmaßrechnungen) durchzuführen. Ein Vergleich der gängigsten Verfahren findet sich in [Ngo-94]. In der kommerziellen Software hat sich die Monte Carlo Simulation wegen ihrer Einfachheit und der Freiheit der Verteilungsarten durchgesetzt. Post, Beiter und Busick [Pos-91], [Bus-95] belegen am Beispiel eines Spritzgußteils, daß die Toleranzsimulation nicht den exakten Wert der Streuung vorhersagen kann, aber dennoch in einem sinnvollen Bereich liegt.

2.3.4 Optimierungsstrategien

Nach Ngoi [Ngo-97] beinhaltet die Toleranzoptimierung die folgenden Schritte:

1. Identifikation und Formulierung der Toleranzketten
2. Definition der kritischen Einzelteiltoleranzen
3. Definition des mathematischen Modells, das Anforderungen und Randbedingungen enthält
4. Lösung des mathematischen Modells mittels eines linearen Programmierungsansatzes

¹ Toleranzanalyse und Toleranzsimulation werden in der Literatur gleichbedeutend verwendet.

Bei bekannten Zusammenhängen der Wirkgrößen (mit abzählbaren, diskreten Werten) auf die Toleranz kann nach Kapur [Kap-88] eine Optimierung der Produktkonstruktion und des Prozeßanlaufs mittels des Design of Experiments [Tag-86a] und der Taguchi Methode [Tag-86b] durchgeführt werden. Dieses Verfahren wird auch von Kusiak und Feng [Kus-95] zur Toleranzsynthese vorgeschlagen.

Darüber hinaus existieren noch allgemeine Prinzipien und Konstruktionskataloge zur toleranzgerechten Gestaltung, die im Folgenden dargestellt werden.

2.3.4.1 Allgemeine Prinzipien

Die toleranzgerechte Gestaltung von Bauteilen ist ein Teilaspekt der fertigungs- und montagegerechten Gestaltung. Die Einengung der Toleranzen von Baugruppen um den Faktor zehn verursacht üblicherweise Kostensteigerungen um denselben Faktor oder mehr [Kol-95]. Deshalb gilt bei der Vergabe von Toleranzen der Grundsatz: „So eng wie nötig und so grob wie möglich“ [Abd-94].

Neben den ganz allgemeinen Gestaltungsregeln wie z.B. „Doppelpassung vermeiden“ gibt es einige generelle Prinzipien des toleranzgerechten Konstruierens, die eine besondere Bedeutung für den Karosseriebau haben. Diese werden hier eingehender erläutert.

3-2-1-Verfahren

Um die sechs Freiheitsgrade eines starren Körper im Raum statisch bestimmt einzuschränken, werden sechs Punkte (Bezugsstellen) benötigt. Die ersten drei spannen die Primärebene auf. Die nächsten zwei Punkte bilden die Sekundärebene, die normal auf der Primärebene steht. Durch den letzten Punkt ist die Tertiärebene, die normal zu den beiden anderen Ebenen liegt, definiert. Dies visualisiert Bild 22.

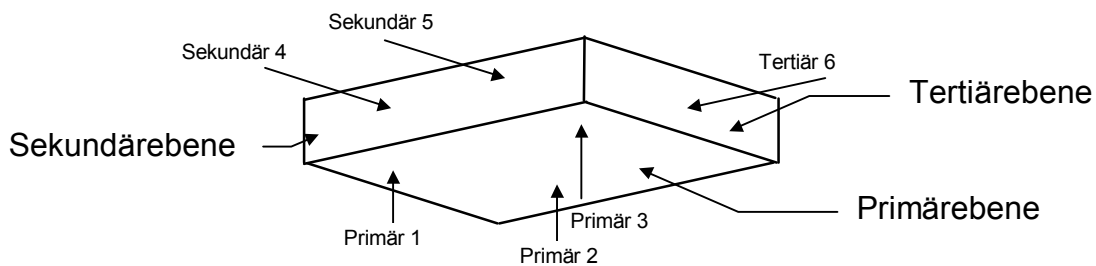


Bild 22: Das 3-2-1-Verfahren

Die Bezugsstellen sollten so weit wie möglich voneinander entfernt angeordnet werden, um eine stabile Auflage des Bauteils zu gewährleisten [Dcs-96].

Bei labilen Bauteilen, wie zum Beispiel großflächigen Karosserieteilen, kann es notwendig sein mehr als sechs Bezugsstellen zur Freiheitsgradeinschränkung zu wählen, um eine Verformung durch die Schwerkraft zu verhindern.

Durchgängige Aufnahme

Um die Streuungen der verschiedenen Bezugsstellen zueinander zu minimieren, ist es sinnvoll, ein Bauteil innerhalb der verschiedenen Fertigungszellen immer an denselben Stellen aufzunehmen. Verschiedene Hersteller haben dazu Verfahren entwickelt, z.B. hat die Volkswagen AG hierzu ein Referenzpunktsystem im Einsatz [VW-97]. Nach jeder Fügeoperation müssen zur statischen Bestimmtheit Bezugsstellen wegfallen. Die verbleibenden Bezugsstellen werden nach dem 3-2-1-Verfahren an bisher schon genutzten Bezugsstellen angeordnet. Um die Streuungen des Bauteils bestimmen zu können, müssen die selben Bezugsstellen auch für die Vermessung des Bauteils genutzt werden.

Einstellbarkeit mit Schiebeflanschen

Durch eine geeignete Konstruktion der Karosseriebauteile können Möglichkeiten zum Ausgleich von Preßteilstreuungen vorgesehen werden. Bei Verbindungen von zwei Blechteilen kann der Ausgleich über Schiebeflansche ermöglicht werden. Sie müssen allerdings in der Kontaktfläche eben sein, damit sie sowohl exakt einstellbar sind, als auch die Streuung nicht in andere Raumrichtungen übertragen.

Zwei Beispiele für die Anwendung von Schiebeflanschen sind nachfolgend dargestellt.

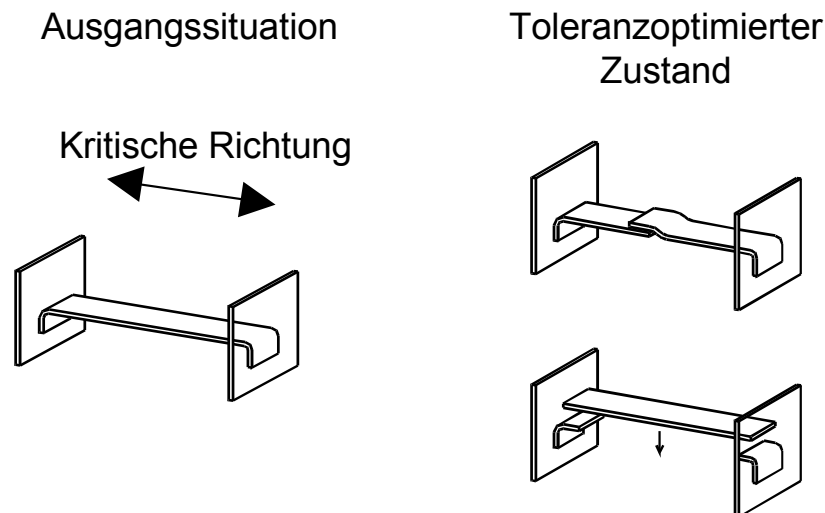


Bild 23: Anwendungsbeispiele für den Einsatz von Schiebeflanschen

Spannungsfreies Fügen

In der Rohbauanlage wird der Zusammenbau unter Vermeidung von Spannungen und Verformungen gefügt. Dies setzt voraus, daß keine Verblockungen vorhanden sind.

2.3.4.2 Konstruktionskataloge

Mit Konstruktionskatalogen lassen sich mehrere Aufgaben lösen [Rot94]:

- Das Spektrum möglicher Lösungen wesentlich vergrößern
- Die Auswahl besonders geeigneter Lösungen erleichtern
- Das systematische und gezielte Vorgehen unterstützen

Nach Franke [Fra-94] erscheint die Verarbeitung von empirischer Toleranzinformation in Konstruktionskatalogen nach VDI 2222 Blatt 2 sehr sinnvoll.

Gestaltungsregeln zur toleranzgerechten Gestaltung werden von Koller [Kol-94] in Form einer tabellarischen Lösungssammlung veröffentlicht (Auszug in Bild 24).

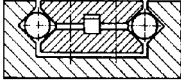
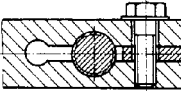
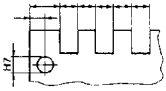
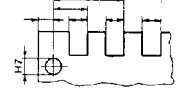
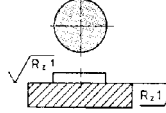
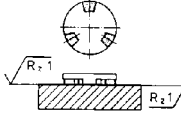
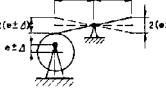
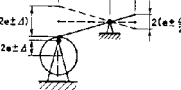
Toleranzgerechtes Gestalten:		5
Richtlinien	Beispiel	
	ungünstig	günstig
h) Spielfreie Gelenke, Führungen, Gewinde etc. lassen sich mit wirtschaftlich noch vertretbarem Aufwand verwirklichen, wenn sich die präzise Herstellung auf ein geometrisch einfaches Gestaltungselement (Paßstück) mit parallelen Flächen beschränkt.		
i) Funktionsgerechte Bemaßung vorsehen. Maßketten führen zu Toleranzsummierung.		
k) Die Größe präziser Flächen nach Möglichkeit klein halten.		
l) Bei Getrieben für präzise Weg- oder Winkelübertragungen Vergrößerungen der Eingangsgrößen vermeiden, da sonst Fehler mit vergrößert werden - Verkleinerungen anstreben.		

Bild 24: Tabellarische Lösungssammlung zur toleranzgerechten Gestaltung [Kol-94]

Die Sammlung enthält Gestaltungsregeln zur Toleranzoptimierung im Maschinenbau, die nur in bestimmten Fällen auf den Karosseriebau übertragen werden können. Auch ist es nicht möglich die passende Gestaltungsregel schnell zu finden, da die Sammlung nicht über einen Gliederungs- bzw. Zugriffsteil verfügt.

2.4 Diskussion

Die Diskussion des Stands der Technik wird zweistufig durchgeführt. Zunächst wird das globale Bild beschrieben und danach auf die einzelnen Teilgebiete eingegangen.

Zu Toleranzen im Karosseriebau ergibt sich kein globales Bild, zu dem sich die einzelnen Teilbereiche schlüssig zusammenfügen. Statt dessen wirken die Ansätze zu Toleranzen wie ein Puzzle, in dem einzelne Steine fehlen oder nicht zusammenpassen.

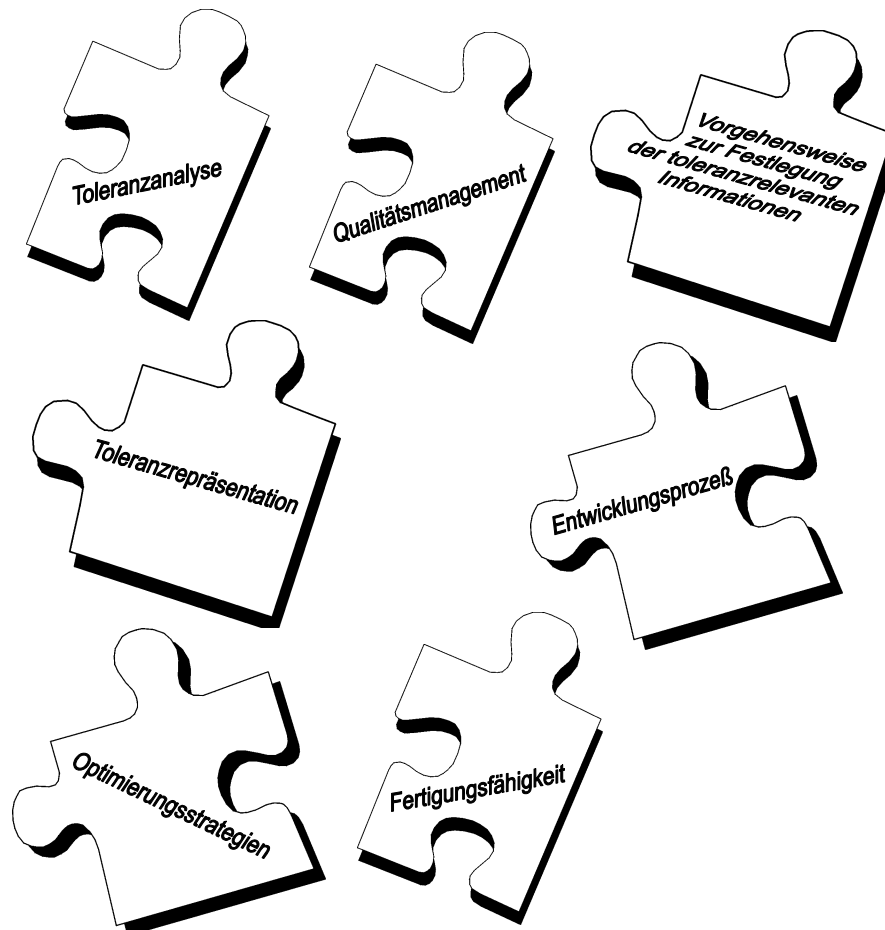


Bild 25: Stand der Technik

In den vielen Teilbereichen finden rege Forschungsaktivitäten statt oder es haben sich bereits gängige Standards, Methoden etc. herausgebildet.

Die Toleranzrepräsentation bildet die Basis, auf der alle Aktivitäten zum Thema Toleranzen aufbauen. Das Ziel eines maßhaltigen Produkts beeinflussen die verschiedenen Repräsentationsarten nur wenig, da die Vorgehensweisen, die zu einem maßhaltigen Produkt führen, von der Repräsentationsart weitgehend unabhängig sind.

Im Qualitätsmanagement wird bereits auf die statistische Vergabe (Repräsentation) von Toleranzen eingegangen. Eine Vorgehensweise, wie die Vergabe möglichst optimal erfolgen kann, fehlt.

Die globale Betrachtung der Entwicklungsprozesse führt zu der Erkenntnis, daß je früher Toleranzen behandelt werden, desto kostengünstiger das Produkt wird und

desto früher der Markteintritt stattfinden kann. Wie sich die Effekte des Simultaneous Engineering auf die Toleranzvergabe auswirken, wird nicht beschrieben.

Bei technischen Aspekten können Toleranzrechnungen durchgeführt werden, um das Anforderungsprofil zu erstellen. Für visuelle und ästhetische Aspekte bleibt momentan nur der physikalische Versuchsaufbau mittels Prototypen.

Die Vorgehensweise zur Festlegung der toleranzrelevanten Größen erstreckt sich auf die Bereiche des Toleranzeintrags und der Optimierung der Zahlenwerte für die einzelnen Toleranzen. Besonders diese Optimierung ist für den Karosseriebau schwierig, weil keine Toleranz-Kosten-Modelle für Umformverfahren existieren. Dabei muß berücksichtigt werden, daß nicht die Preßteiltoleranz relevant ist, sondern ein maßhaltiges Endprodukt gefordert ist. Daher muß der Schwerpunkt auf den Auswirkungen der Fügeoperationen liegen.

Zur Toleranzanalyse gibt es die verschiedensten Rechenverfahren. Die Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse auf die Realität im Bereich des Karosseriebaus ist noch zu zeigen. Dies ist besonders unter Berücksichtigung der Elastizitäten und des nicht vollständig umgesetzten spannungsfreien Fügens zu verifizieren.

Optimierungsstrategien im Hinblick auf toleranzgerechte Gestaltung existieren nur für den spanenden Maschinenbau, insbesondere für Welle-Nabe-Verbindungen. Methodische Hilfsmittel, die auf die Besonderheiten des Karosseriebaus Rücksicht nehmen, fehlen.

3. Entwicklungsprozeßintegriertes Toleranzmanagement

3.1 Ziel der Arbeit

Dem generellen Ziel der Optimierung der Produktentwicklung im Spannungsfeld von Zeit, Kosten und Qualität wird in der vorliegenden Arbeit durch die Entwicklung eines durchgängigen Toleranzmanagements Rechnung getragen. Die Begriffsdefinition „Toleranzmanagement“ ist in Analogie zu der Definition „Qualitätsmanagement“ in VDI 2247 [VDI-2247] bzw. DIN 55350 T11 [DIN-55350] und DIN ISO 8402 [DIN-8402] zu sehen. Die Zusammenhänge sind in Anhang B dargestellt.

Das konkrete Ziel der Arbeit hat zwei Aspekte, die Verbesserung des Prozesses sowie des Produkts durch die Berücksichtigung von Toleranzen. Der Prozeß besteht dabei vereinfacht aus den Teilen Entwicklung, Serienanlauf und Serienproduktion. Bild 26 zeigt die zugeordneten Ziele im einzelnen.

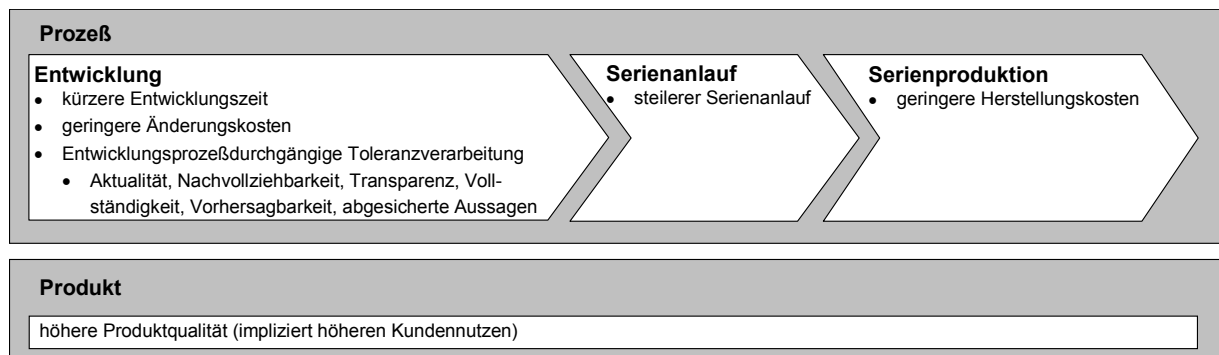


Bild 26: Ziele der Arbeit

Das zu erarbeitende Toleranzmanagement beinhaltet alle Aktivitäten entlang des Entwicklungsprozesses, die zu einem toleranzoptimierten Produkt und Prozeß beitragen. Dazu werden bestehende Entwicklungsprozesse untersucht, der Themenkomplex „Toleranzen“ analysiert und das sich daraus ergebende Toleranzmanagement in den Entwicklungsprozeß integriert. Darüber hinaus werden die zusätzlich erforderlichen Hilfsmittel und Optimierungsstrategien entwickelt.

3.2 Ansatz

Die Anforderungen an das Toleranzmanagement können erst nach der Untersuchung eines realen Fahrzeugentwicklungsprozesses aufgestellt werden. Damit ergibt sich die folgende Vorgehensweise zur Integration von Toleranzen in den Entwicklungsprozeß:

- Untersuchen der Vorgänge entlang der Entwicklungsprozeßkette im Hinblick auf Toleranzen
- Analyse der Defizite und Ableiten der Potentiale
- Erstellen von Anforderungen
- Erarbeiten eines entwicklungsprozeßintegrierten Toleranzmanagements
- Einführung des Toleranzmanagements

Im Rahmen eines Prozeßaudits wurde der Fahrzeugentwicklungsprozeß eines deutschen Automobilherstellers untersucht.

Während des Entwicklungsprozesses laufen viele Aktivitäten parallel zueinander ab, d.h. er ist stark von Simultaneous Engineering geprägt. Die einzelnen Aktivitäten sind durch einen mit der Zeit zunehmenden Detaillierungsgrad gekennzeichnet. Dies ist vereinfacht in Bild 27 dargestellt.

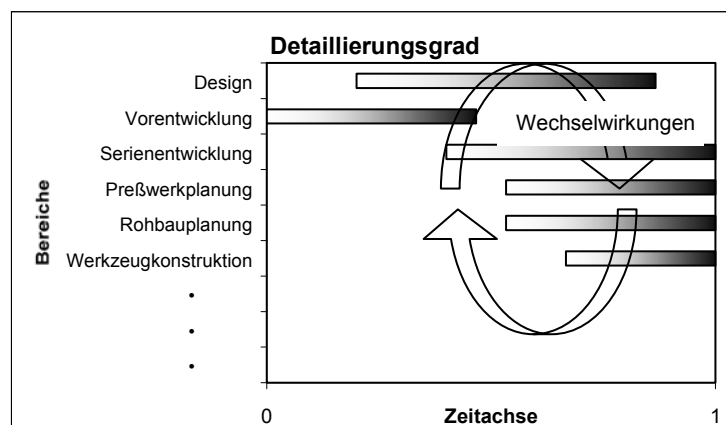


Bild 27: Effekte des Simultaneous Engineering (Schwärzungsgrad = Detaillierungsgrad)

Die starke Parallelisierung der Abläufe erzeugt hohe Wechselwirkungen. So bewirken z.B. Änderungen der Konstruktion Planungsänderungen und umgekehrt.

Im Mittelpunkt des Entwicklungsprozesses steht die Konstruktion des Fahrzeugmodell (siehe Bild 28). Parallel zu ihr laufen die Untersuchungen, in denen die Konstruktion auf ein entwicklungsstandtypisches Merkmal wie z.B. Baubarkeit² zur Erreichung bestimmter Meilensteine geprüft wird. Diese Ergebnisse fließen zurück in die Fahrzeugkonstruktion und können dort Änderungen hervorrufen.

Toleranzen werden zu verschiedenen Zeitpunkten in verschiedenen Bereichen behandelt. Sie sind aber nicht in der Prozeßkette verankert, das bedeutet, daß diese Bereiche nicht automatisch über Konstruktionsänderungen informiert werden und diese daher nicht beurteilen können. Ein Beispiel hierfür sind die Toleranzspezifikationen der Rohbauplanung für das Spann- und Fixierkonzept. Die Rohbauplanung wird nicht automatisch über die Änderungen des Fahrzeugs informiert. Daher fehlt hier die Möglichkeit, die geänderten Anforderungen auf Machbarkeit zu überprüfen.

² In der Baubarkeitsuntersuchung wird überprüft, ob die Teile eines Fahrzeugs statisch zusammenpassen (Packaging), bzw. sich ein- und ausbauen lassen.

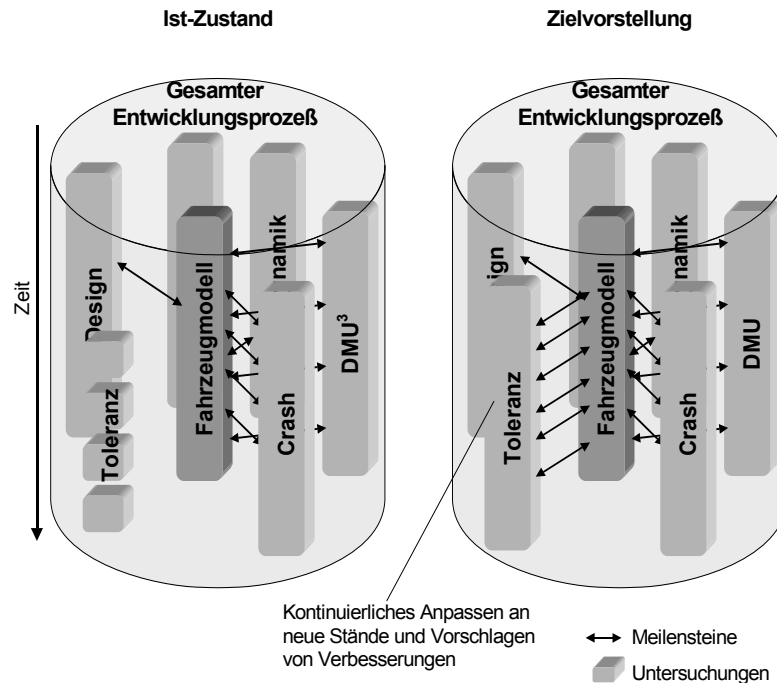


Bild 28: Ist-Zustand und Zielvorstellung des Entwicklungsprozesses aus Untersuchungssicht

Aus Bild 28 kann eine Zielvorstellung abgeleitet werden. Toleranzen müssen durchgängig betrachtet werden und der Arbeitskreis, der das Toleranzmanagement durchführt, muß ständig die Änderungen der Konstruktion berücksichtigen sowie Verbesserungen vorschlagen können.

Die Anforderungen an das Toleranzmanagement im einzelnen sind:

- Durchgängige Integration in den Fahrzeugentwicklungsprozeß
- Quality Gates analog der Meilensteine der übrigen Untersuchungen
- Kontinuierliches Berücksichtigen der Effekte parallel laufender anderer Prozesse
- Transparenz, Übersichtlichkeit
- Unterschiedliche CAD-Reifegrade / Detaillierungsgrade berücksichtigen

Aus den Anforderungen und den Zielen (Kap. 3.1) wurde im Rahmen dieser Arbeit der folgende Ablauf für das entwicklungsprozessintegrierte Toleranzmanagement erarbeitet, angewendet und verfeinert.

³ Digital Mock Up (DMU) ist ein digitaler Prototyp, an dem vor allem Untersuchungen zur statischen und dynamischen Baubarkeit durchgeführt werden.

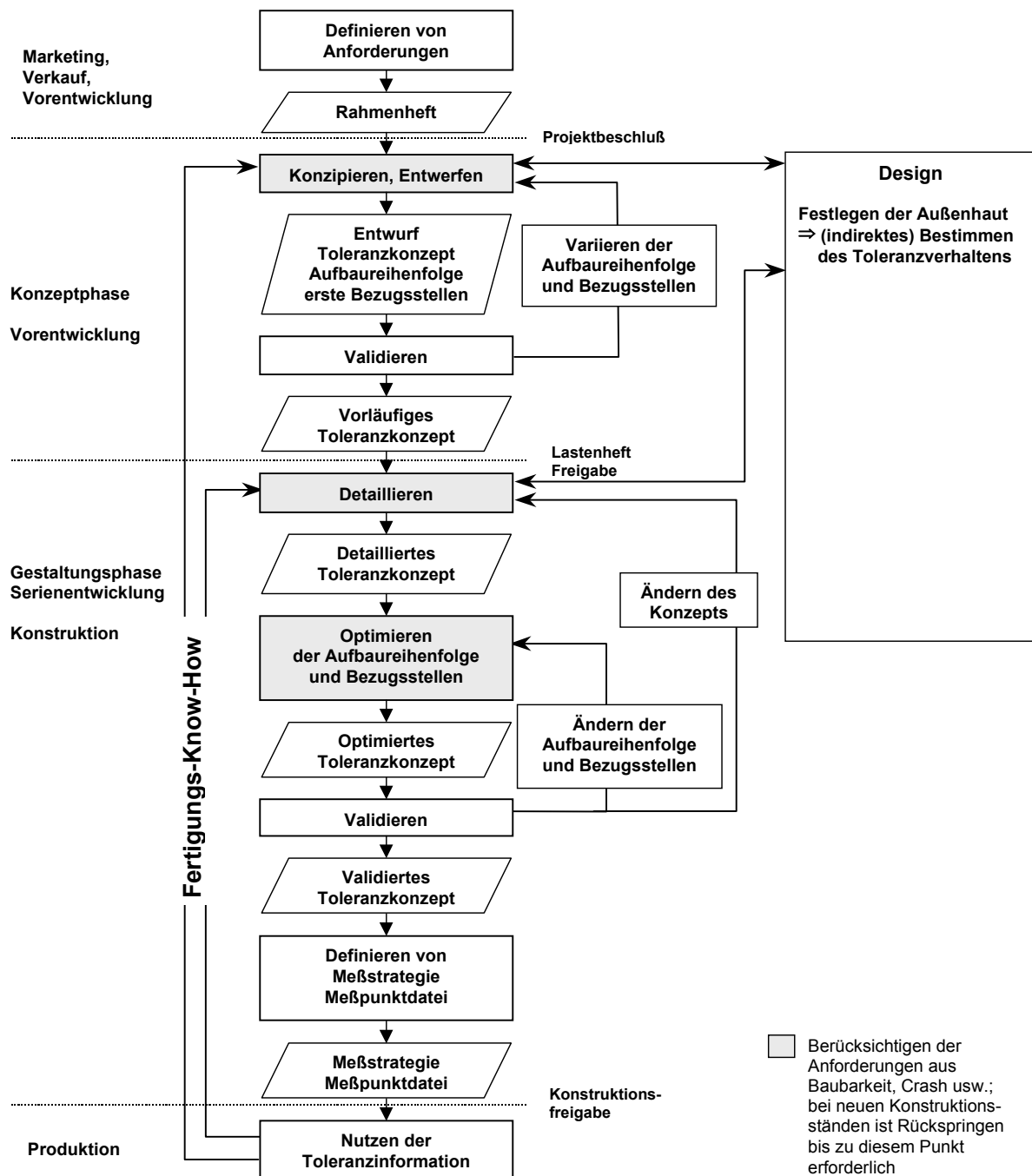


Bild 29: Entwicklungsprozeßintegriertes Toleranzmanagement (Übersicht)

Im Rahmenheft⁴ sind die festgelegten Anforderungen an ein neues Fahrzeug dokumentiert. Aus den Anforderungen und den gewonnenen Erfahrungen aus Vorgängerfahrzeugen wird in der Konzeptphase der Entwurf eines Toleranzkonzepts mit der Aufbaureihenfolge und den ersten Bezugsstellen (-bereichen) erarbeitet. Dieses Konzept wird unter Berücksichtigung anderer Einflüsse wie Baubarkeit, Crash usw. validiert und optimiert, denn parallel zu dem dargestellten Toleranzmanagementprozeß verlaufen die Prozesse für die anderen Untersuchungen der fahrzeugrelevanten

⁴ Rahmenheft entspricht Pflichtenheft.

Aspekte (DMU, Crash, Design, ...). So muß eine Vielzahl von Wechselwirkungen berücksichtigt werden (vgl. Bild 28). Das nach der Validierung abgesicherte vorläufige Toleranzkonzept ist eine Eingangsgröße für die Gestaltungsphase. Das Konzept der Vorentwicklung wird mit fortschreitendem Detaillierungsgrad der Konstruktion verfeinert, optimiert und überprüft. Auf der Basis des dann abgesicherten endgültigen Toleranzkonzepts werden die für die Qualitätssicherung und Produktion notwendigen Toleranzen und die Aufbaureihenfolge definiert. Das gewonnene Fertigungswissen fließt in die nächsten Entwürfe ein. Dieses durchgängige Konzept ist an den Fahrzeugentwicklungsprozeß angepaßt. Die Effekte von Simultaneous Engineering werden in Bild 29 in den grau hinterlegten Prozeßschritten berücksichtigt. Mittels eines dann einsetzenden Änderungsmanagements kann das Toleranzkonzept stets auf dem aktuellen Stand gehalten werden.

Für ein besseres Verständnis ist es notwendig, diesen Prozeßablauf in den Bereichen der Konzeptphase und der Gestaltungsphase näher zu erläutern.

Konzeptphase

Da die Aufbaureihenfolge und die Lage der Bezugsstellen⁵ den größten Einfluß auf die Toleranz haben (siehe Kap. 4), bilden sie den Schwerpunkt der Betrachtungen. Es werden verschiedene prinzipielle Aufbaureihenfolgen (mit möglichst kurzen Toleranzketten) und unterschiedliche prinzipielle Bereiche der Bezugsstellen (den Stellen, an denen das Teil maßbestimmend aufgenommen wird) erarbeitet, analysiert und die günstigste Kombination in Einklang mit den anderen Untersuchungsergebnissen (Baubarkeit, Crash, ...) ausgewählt (Bild 30). Es sind nur grobe Eingrenzungen der Bereiche möglich, da diese von vielen Randbedingungen abhängig sind, die erst später festgelegt werden können. Die Bestimmung der prinzipiellen Bereiche der Bezugsstellen muß in enger Zusammenarbeit mit der Fertigung erfolgen, um bereits im Vorfeld deren Belange berücksichtigen zu können. Die Toleranzwerte werden für die Toleranzanalyse standardmäßig angenommen, da zu diesem Zeitpunkt nur eine relative Konzeptbeurteilung (besser / schlechter) durchgeführt wird. Die an die Serienentwicklung weitergegebenen Ergebnisse sind die vorläufige Aufbaureihenfolge und die prinzipiellen Bereiche der Bezugsstellen.

⁵ Bezugsstellen sind die Stellen, an denen das Teil während der Fertigung und Messung maßbestimmend aufgenommen wird.

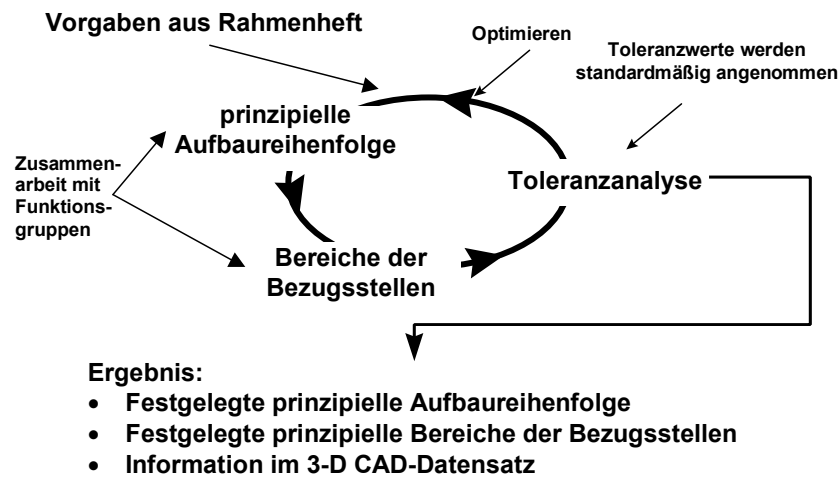


Bild 30: Detailprozeß Konzeptphase

Ein Unternehmensbereich kann diesen Prozeß wegen des benötigten Fachwissens nicht alleine durchführen, sondern es wird stets ein interdisziplinäres Team (Funktionsgruppe) aus den Bereichen Vorentwicklung, Serienentwicklung, Planung, Rohbau, Preßwerk, Qualitätssicherung usw. benötigt. Dies gilt um so mehr für die anschließende Gestaltungsphase, da hier die Untersuchungen viel stärker in die Tiefe gehen.

Gestaltungsphase

Die Serienentwicklung erhält als Eingangsgrößen von der Vorentwicklung das vorläufige Toleranzkonzept.

In der Gestaltungsphase wird der Fahrzeugentwurf aus der Konzeptphase weiter detailliert. Daher ist der nachfolgende Ablauf streng genommen keine Schleife, sondern eine Spirale, in der immer mehr Details und Informationen hinzugefügt werden.

Die Aufbaureihenfolge wird weiter detailliert und die Bereiche der Bezugsstellen werden stärker eingegrenzt, da mehr Bauteile hinzukommen und deren Gestalt konkreter wird. Dies muß in enger Zusammenarbeit mit den interdisziplinär zusammengesetzten Funktionsgruppen erfolgen. Hierbei werden jedes Mal die modifizierten Aufbaukonzepte und Bezugsstellen analysiert. Da die Toleranzbetrachtung wesentlich feiner als in der Vorentwicklung ist, müssen jetzt die Toleranzwerte von der Fertigung bestätigt werden. Am Ende dieser Spirale liegen eine festgelegte Aufbaureihenfolge, festgelegte Bezugsstellen und bestätigte Toleranzwerte vor. Um den Toleranzvergabeprozess abzuschließen, müssen zusätzlich noch die Meßstrategie sowie die Meßstellen festgelegt werden.

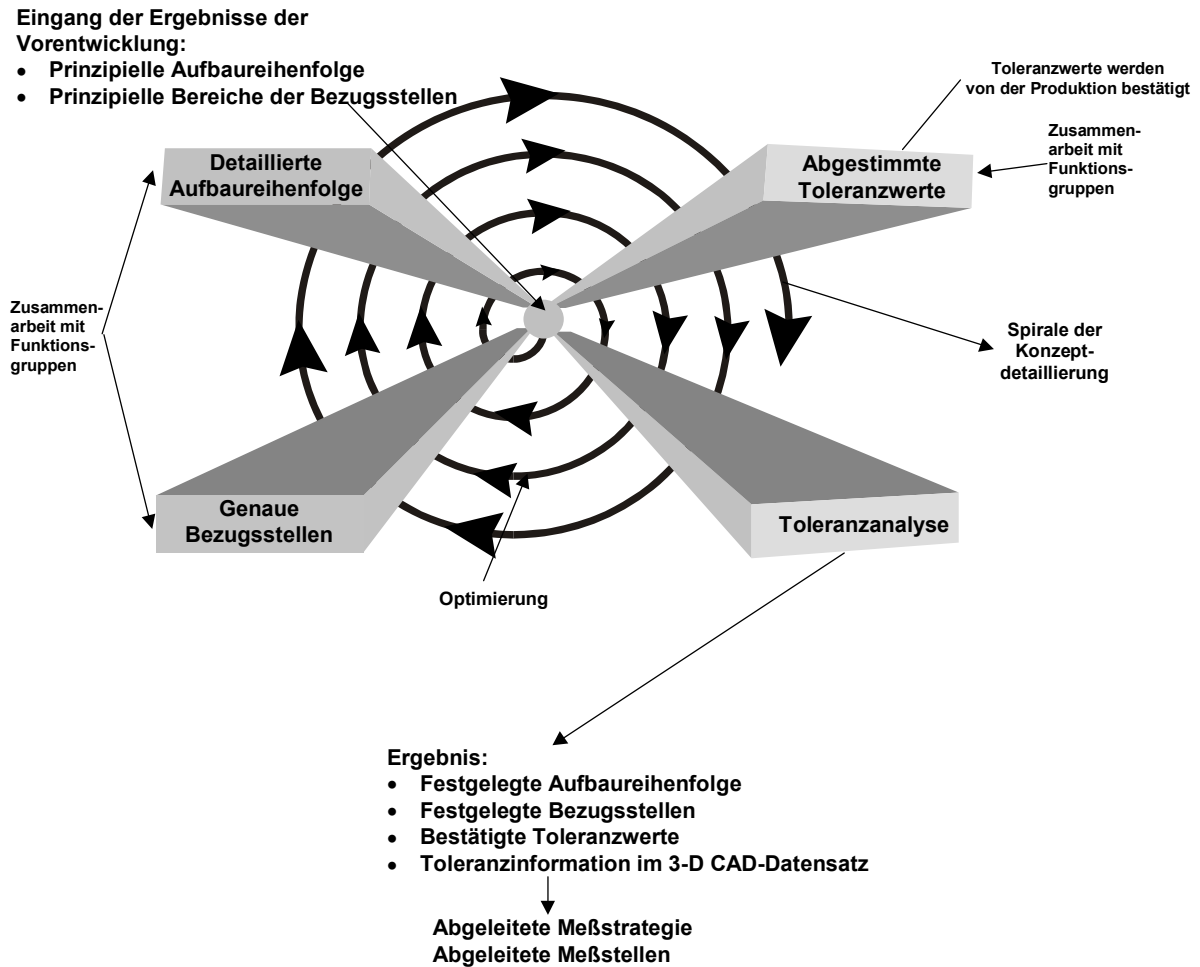


Bild 31: Detailprozeß Gestaltungsphase

Beide Abläufe, Konzept- und Gestaltungsphase, können auf folgende wesentliche Operationen reduziert werden:

- Definieren der toleranzrelevanten Eingangsgrößen
- Durchführen der Toleranzanalyse
- Optimieren aller toleranzrelevanten Größen

In der Theorie ergibt sich damit nachstehender Ablauf.

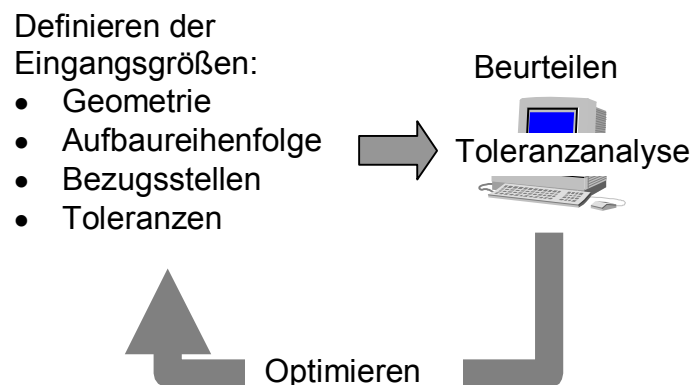


Bild 32: Toleranzvergabeprozeß, theoretischer Ansatz

In der Praxis ist dieser Ablauf nicht durchführbar, die Gründe dafür sind:

- Jede Simulation setzt ständig aktuelle und konsistente CAD-Daten voraus.
- Zur CAD-gestützten Simulation jeder Änderung ist ein unverhältnismäßig hoher Aufwand (Zeit und Kapazität) erforderlich.

Daher ergibt sich die folgende Konstellation.

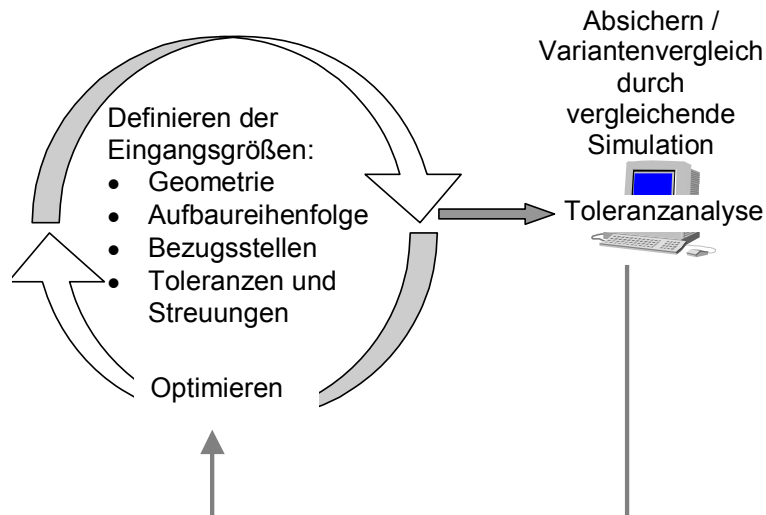


Bild 33: Praxisgerechter Ansatz zum Toleranzvergabeprozess

Diese Vorgehensweise bewährt sich bereits in der Praxis, denn die Optimierung der toleranzrelevanten Größen beginnt schon bei deren Definition auf der Basis einfacher Abschätzungen und nicht erst nach einer Simulation. Besonders in sehr frühen Projektphasen, in denen kaum konsistente CAD-Daten zur Verfügung stehen, gibt es keine sinnvolle Alternative.

Für die Ableitung des Forschungsbedarfs, der sich aus dem Entwicklungsprozeß ergibt, muß dieser noch weiter detailliert werden. Dazu eignet sich sehr gut die Darstellung nach Koch [Koc-83]. Bild 34 zeigt das Grundprinzip.

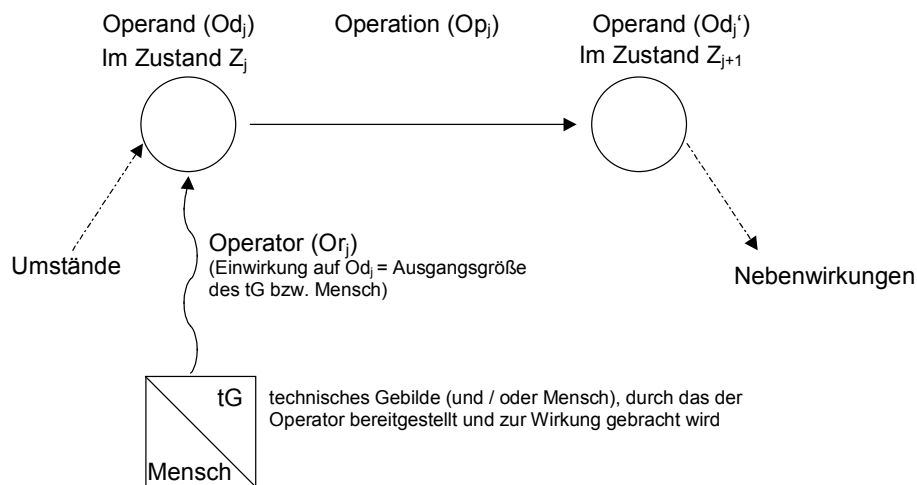


Bild 34: Generische Prozeßdarstellung [Koc-83]

Um den Operanden Od_j (Arbeitsgegenstand, hier das Toleranzkonzept) vom Zustand Z_j in den Zustand Z_{j+1} zu überführen, wird eine Operation durchgeführt, dabei wirkt ein Operator auf den Operanden ein. Außer diesem können Umstände (Randbedingungen) den Operanden beeinflussen, und es können Nebenwirkungen nach der Operation entstehen.

Auf das Toleranzmanagement angewendet ergibt sich die in Bild 35 dargestellte Form.

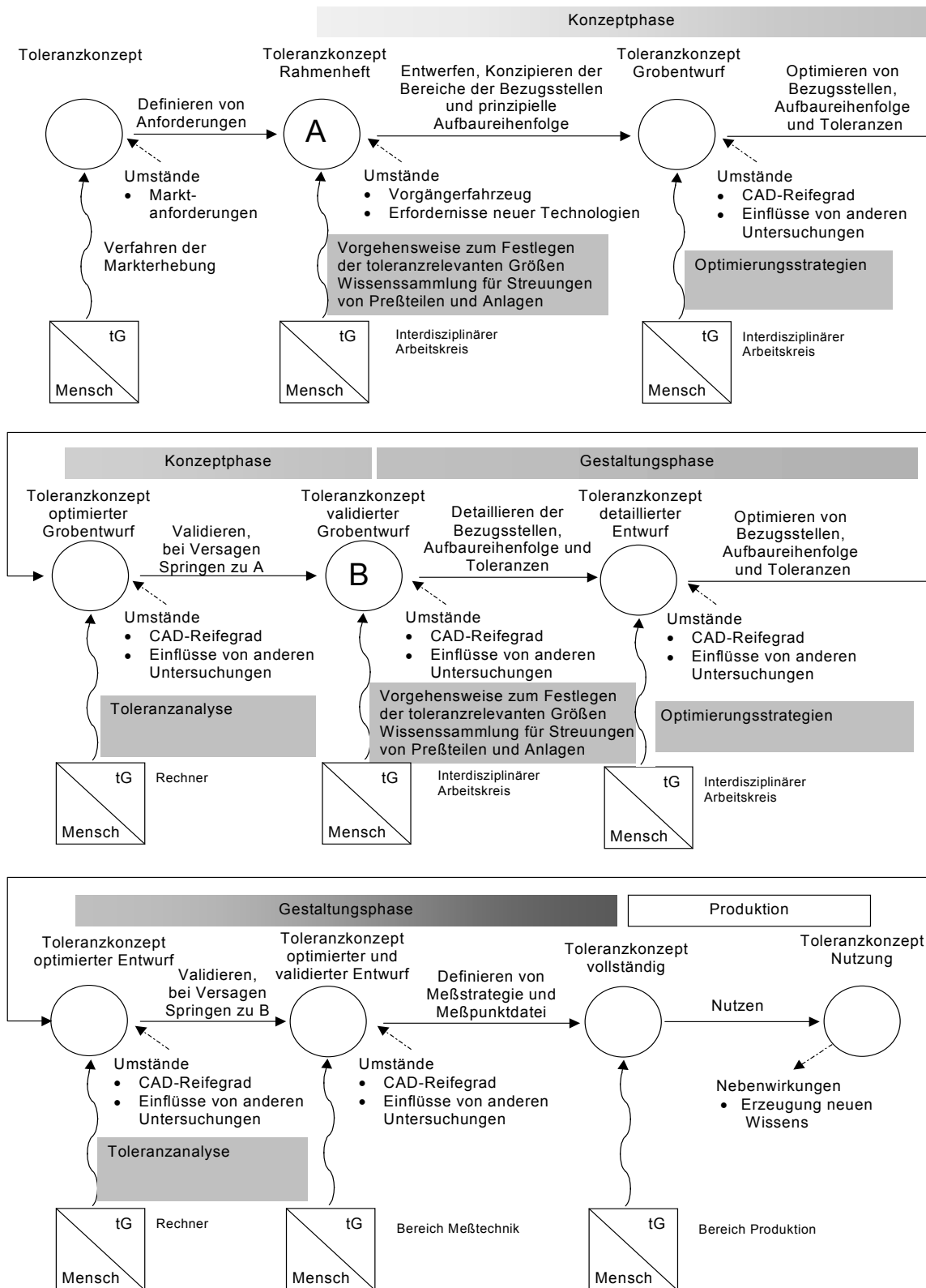


Bild 35: Forschungsbedarf am entwicklungsprozeßintegrierten Toleranzmanagement

Die Hauptdefizite liegen in den grau hinterlegten Operatoren, da sie entweder nicht vorhanden oder nicht abgesichert sind. Dies sind im Einzelnen:

- Vorgehensweise zum Festlegen der toleranzrelevanten Informationen (Tolerieren)
Es ist ein Verfahren zu entwickeln, das auf die Besonderheiten im Karosseriebau (z.B. Elastizitäten) Rücksicht nimmt.
- Fertigungswissen
Zur Festlegung der toleranzrelevanten Informationen wird detailliertes Fertigungswissen benötigt. Dieses muß ermittelt und in eine handhabbare Form gebracht werden.
- Optimierungsstrategien
Um das Toleranzkonzept zu optimieren, werden die erforderlichen Strategien entwickelt.
- Toleranzanalyse
Zur Absicherung des Konzepts wird eine Toleranzanalyse durchgeführt. Dafür ist nachzuweisen, daß die Toleranzsimulationssoftware der Theorie entspricht und daß die Simulationsergebnisse mit den realen Meßwerten korrelieren.

Diese Punkte werden in den folgenden Kapiteln untersucht.

Das globale Ziel der Reduzierung der Auswirkung von Streuungen, das die Entwicklung eines Toleranzmanagements erfordert, wird vor allem durch die Optimierungsstrategien und die methodische Vorgehensweise erreicht. Alle anderen Forschungsgebiete, z.B. die Toleranzanalyse, haben eine unterstützende und absichernde Aufgabe.

4 Festlegen der toleranzrelevanten Größen

Das Festlegen der toleranzrelevanten Größen bildet den Ausgangspunkt der weiteren Betrachtungen, da Optimierungsstrategien und die Toleranzanalyse auf diesen Größen basieren.

4.1 Besonderheiten des Karosseriebaus

Der Karosseriebau erfolgt in zwei aufeinanderfolgenden Bereichen. Zunächst werden die Preßteile durch Umform- und Trennoperationen im Preßwerk hergestellt. Danach werden die Preßteile meist mittels Punktschweißen im Rohbau in verschiedenen Aufbaustufen zur Karosserie gefügt.

Das Preßteil selbst hat eine geringe geometrische Steifigkeit. Durch Verändern der Lage der Bezugsstellen und die Änderung der Orientierung im Schwerfeld verformt sich jedes Preßteil. In der Folge kann ein beliebiges Maß gemessen werden. Dies weist auf die hohe Bedeutung der Bezugsstellen hin.

Die Fertigungsgenauigkeit von Preßteilen ist gut, d.h. die Streuung ist relativ gering. Das Problem besteht darin den Sollwert als Mittelwert zu treffen. Hier können Parameter wie Hubzahl und Schmierfilmdicke variiert werden. Sollte dies nicht ausreichen, wird versucht, diese maßlichen Abweichungen im Rohbau zu kompensieren, da Änderungen an Preßwerkzeugen teuer und zeitaufwendig sind.

Während des Fügens nimmt die Steifigkeit der Zusammenbauten durch die Bildung von geschlossenen Profilen zu. Da auf Grund bestimmter Anforderungen wie z.B. Crash nicht überall spannungsfreies Fügen realisiert werden kann, kommt es in den Rohbauanlagen zu Verformungen der Zusammenbauten.

4.2 Vorgehensweise

Die Aufbaureihenfolge ist die Basis des Toleranzverhaltens, denn durch die in ihr enthaltene Reihenfolge der Teile und Art der Ausrichtung zueinander bestimmt sie, welche Toleranzen mit welchem Einfluß in die Toleranzketten eingehen.

Die Streuungen an einem Zusammenbau ergeben sich aus den Streuungen der Einzelteile und denen des Fügeverfahrens. Bei den Streuungen des Fügeverfahrens wird vor allem die Genauigkeit der Positionierung der Teile zueinander betrachtet. Sonstige Effekte wie Schweißverzug, etc. werden in dieser Arbeit vernachlässigt, da bewußt Punkt- oder Laserschweißen verwendet wird, um den Verzug zu möglichst gering zu halten. Die Streuungen des Einzelteils sind abhängig von den Bezugsstellen, auf die sie bezogen sind.

Das Bild 36 zeigt zusammenfassend die toleranzrelevanten Größen, welche eng miteinander verzahnt sind.

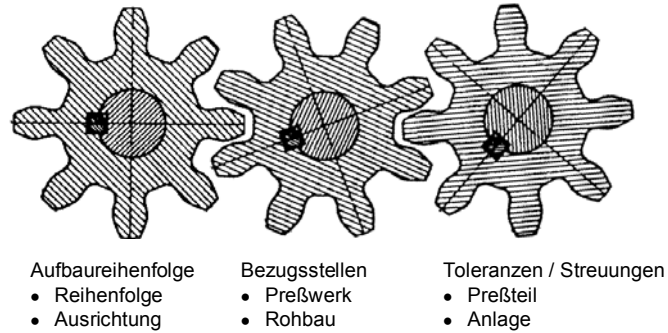


Bild 36: Toleranzrelevante Größen

Bezugsstellen werden nur auf der Einzelteil- bzw. der Unterzusammenbauebene benötigt. Wenn der Gesamtzusammenbau (z.B. ein Fahrzeug) nur Toleranzen zu sich selbst einhalten muß, dann werden die globalen Bezugsstellen nicht mehr benötigt. Dies gilt für die Nutzung durch den Endverbraucher. Zu Reparaturzwecken z.B. beim Richten des Rahmens werden die Bezugsstellen des Gesamtzusammenbaus wiederum benötigt.

An dem folgenden Ausschnitt des Fertigungsprozesses kann der Zusammenhang zwischen der Festlegung und Auswirkung der toleranzrelevanten Größen dargestellt werden.

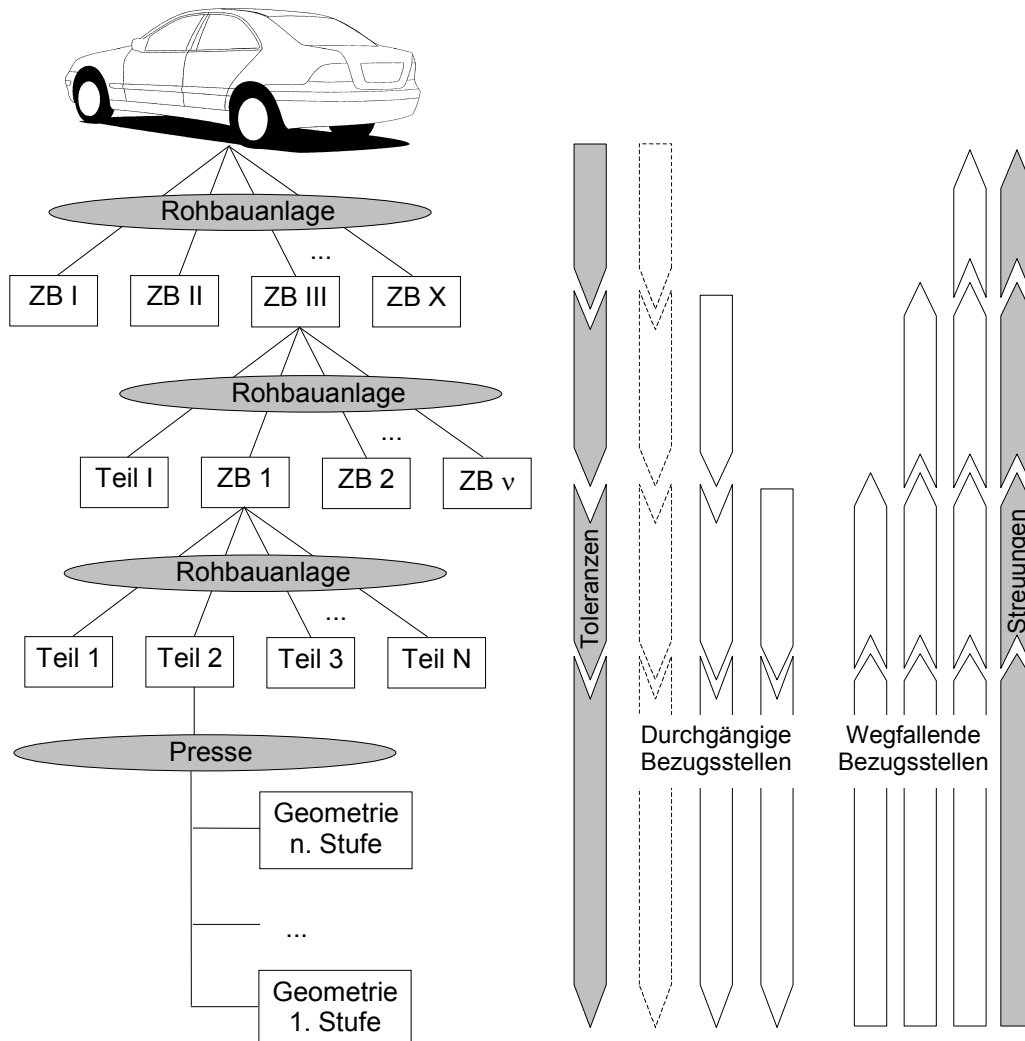


Bild 37: Richtung von Toleranzen, Streuungen und Bezugsstellen

Die Toleranzen können unter Umständen für eine feste Aufbaureihenfolge und feste Bezugsstellen vom Gesamten auf die Teile abgeleitet werden. Die „durchgängigen Bezugsstellen“ können aus der Ausrichtstrategie in den Rohbauanlagen abgeleitet werden. Die „wegfallenden Bezugsstellen“ werden bis zu der Zusammenbaustufe benötigt, in der sie wegfallen, um die weiteren Freiheitsgrade zu definieren, die nicht von den „durchgängigen Bezugsstellen“ eingeschränkt werden.

Für die feststehende Aufbaureihenfolge und die feststehenden Bezugsstellen kann von den Streuungen der Preßteile ausgehend die Streuung des Fahrzeugs ermittelt werden.

Die Aufbaureihenfolge und die Bezugsstellen sind die Stellhebel, um die Streuung eines Zusammenbaus auf die Größe der geforderten Toleranz oder darunter zu reduzieren.

Um dies zu erreichen sind Iterationsschritte erforderlich. Die Vorgehensweise für einen Zusammenbau zeigt Bild 38.

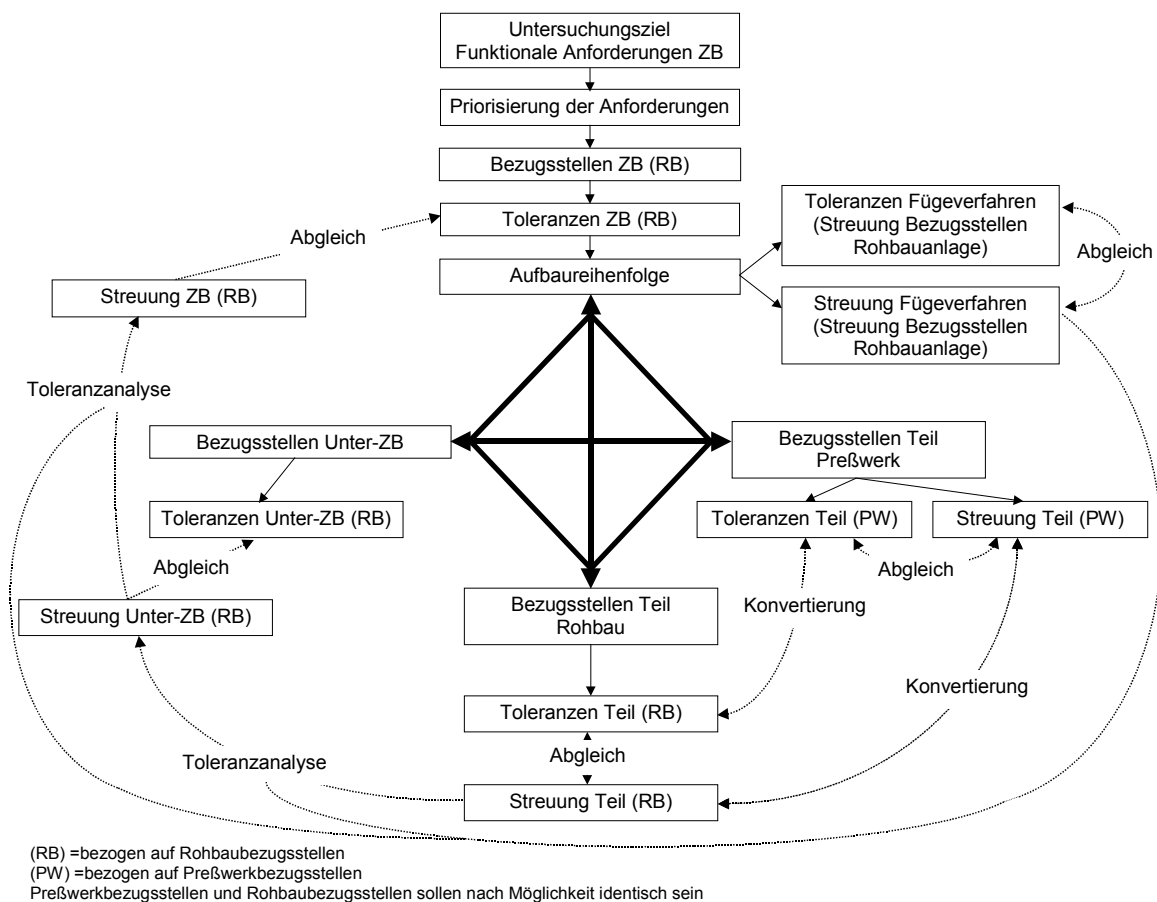


Bild 38: Vorgehensweise zur Festlegung aller toleranzrelevanten Informationen

Zu Beginn ist es erforderlich, die funktionalen Anforderungen an den Zusammenbau zu stellen. Da diese widersprüchlich sein können und in der Regel auch sind, müssen sie priorisiert werden. Ein Beispiel ist der untere und obere Türspalt. Sobald der eine optimiert wird, streut der andere stärker. Da das Augenmerk des Endkunden auf dem oberen Spalt liegt, wird dieser priorisiert. Aus den Anforderungen können die Bezugsstellen des Zusammenbaus, die möglichst an den Funktionsstellen sitzen sollten, und dessen Zusammenbautoleranzen abgeleitet werden.

Aufbaureihenfolge, Bezugsstellen und Toleranzen sind ganzheitlich zu betrachten. Die Aufbaureihenfolge legt die Fügetoleranzen fest und beeinflusst die Wahl der Bezugsstellen, welche wiederum die Größe der Toleranzen der Teile bestimmen. Aus den Streuungen der Teile sowie der Bezugsstellen der Rohbauanlagen werden mit Hilfe der Toleranzanalyse die Streuungen des Unteresammenbaus ermittelt. Dies wird mit den Toleranzen des Unteresammenbaus abgeglichen. Das Spannungsfeld Aufbaureihenfolge, Bezugsstellen und Toleranzen wird so lange optimiert, bis die Anforderungen an das Gesamtergebnis erfüllt werden. Diese Zusammenhänge wiederholen sich bis hin zum Gesamtzusammenbau.

Das Besondere ist, daß hier der Wechsel der Bezugsstellen von Rohbau und Preßwerk berücksichtigt wird, denn es kommt vor, daß die Rohbaubezugsstellen auf Geometrien liegen, die erst in einer späten Operation im Preßwerk erzeugt werden können.

Falls die Rohbaubezugsstellen von denen des Preßwerks abweichen, ist es erforderlich, die Toleranzen und Streuungen aus dem Preßwerkbezugssystem in das Bezugssystem des Rohbaus umzurechnen.

4.3 Aufbaureihenfolge

Die Aufbaureihenfolge ist stark geprägt von den Belangen der Fertigung. Die Gründe für die Wahl einer bestimmten Reihenfolge sind unter anderem:

- Zugänglichkeiten
- Modulbauweise (Vorbau, Boden, Seitenwände, etc.)
- Taktzeit in einer Fertigungszelle
- transportierbare, steife Zusammenbauten
- Kosten

Das folgende Bild zeigt einen mehrstufigen (hierarchischen) Zusammenbau. An diesem Beispiel werden alle Strategien für die Aufbaureihenfolge verdeutlicht.

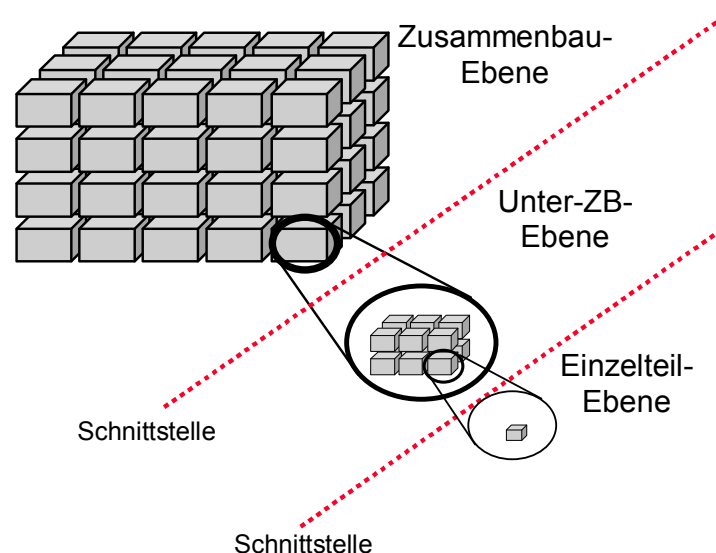


Bild 39: Hierarchischer Zusammenbau

Ein Zusammenbau besteht aus mehreren Unterzusammenbauten, die wiederum aus mehreren Einzelteilen bestehen. Wenn Einzelteile oder Unterzusammenbauten gefügt werden, besitzen sie Schnittstellen zu den angrenzenden Bauteilen.

Damit der Zusammenbau maßhaltig wird, existieren verschiedene Varianten für die Aufbaureihenfolge:

1. die Untereinbauten müssen im Inneren toleranzkompensierend aufgebaut sein und können im Zusammenbau auf Block⁶ gefügt werden
oder
2. die Untereinbauten sind im Inneren auf Block gefügt und müssen toleranzkompensierende Übergänge zu ihren Nachbarn im Zusammenbau besitzen
oder
3. die Untereinbauten sind im Inneren toleranzkompensierend aufgebaut und haben zusätzlich toleranzkompensierende Übergänge zu ihren Nachbarn

In einem Zusammenbau können alle drei Varianten kombiniert werden. Dann muß die Schnittstelle zwischen den einzelnen Untereinbauten genau betrachtet werden.

Die Merkmale und Merkmalsausprägungen der drei Varianten sind in der folgenden Tabelle gegenübergestellt:

Tabelle 1: Gegenüberstellung verschiedener Konzepte der Aufbaureihenfolge

Merkmal	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Einsatzgebiet	Billige Variante für sehr stabile Unter-ZB's; geeignet, wenn Funktionsmaße nur innerhalb der Unter-ZB auftreten	Geringe Anzahl von Bezügen zwischen Unter-ZB's, keine Bezüge innerhalb der Unter-ZB's	Sehr hohe Gesamtanforderungen
Beispiel	Montage des Scheinwerfers ins Frontmodul	Fügen des Heckmittelstück an den Boden	Fügen der Türe (Bild 43)
Genauigkeit			
• Unter-ZB	Hohe Anforderungen, 6 Pkt. pro Teil innerhalb Rohbauanlagentoleranz	Muß nur geringe Anforderungen erfüllen	Erfüllt hohe Anforderungen, 6 Pkt. pro Teil innerhalb Rohbauanlagentoleranz
• ZB	Genügt mittleren Anforderungen	Mittlere Anforderungen 6 Pkt. pro Unter-ZB innerhalb Rohbauanlagentoleranz	Erfüllt hohe Anforderungen, 6 Pkt. pro Unter-ZB innerhalb Rohbauanlagentoleranz
Aufwand	mittel	gering	hoch

Der dazugehörige Ablauf ist im Flußdiagramm in Bild 40 dargestellt und zeigt die dritte Variante. Für die ersten beiden entfällt je eine Einstellmöglichkeit für die Fügeflächen.

⁶ Wenn auf Block gefügt wird, gibt es keine Einstellmöglichkeit. Daher entfallen die Einstelltoleranzen und der Prozeß wird bei ausreichender Genauigkeit stabiler und kostengünstiger.

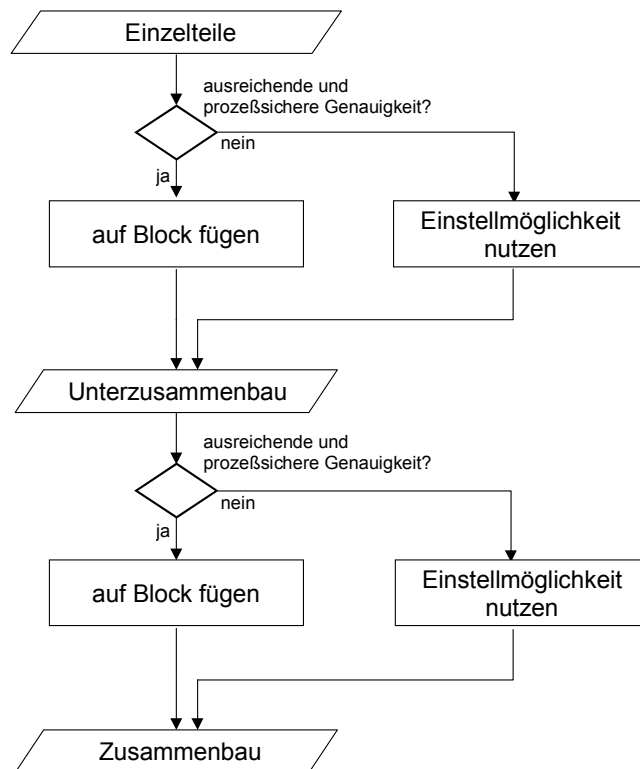


Bild 40: Aufbaureihenfolge für maßhaltigen Zusammenbau

Da in einem Zusammenbau nicht alle Untertzusammenbauten nach der gleichen Methode hergestellt werden müssen, kann die Notwendigkeit bestehen, mit benachbarten Untertzusammenbauten auf die Abweichungen aus auf Block gefügten Untertzusammenbauten zu reagieren. Dies kann mittels eines kleinen Regelkreises geschehen. Die Einschränkungen hierfür sind:

- Keine großen Puffer / Lager des zu regelnden Untertzusammenbaus vorhanden
- Nur Mittelwertverschiebungen sind ausregelbar

Das Bild 41 zeigt den dazugehörigen kleinen Regelkreis.

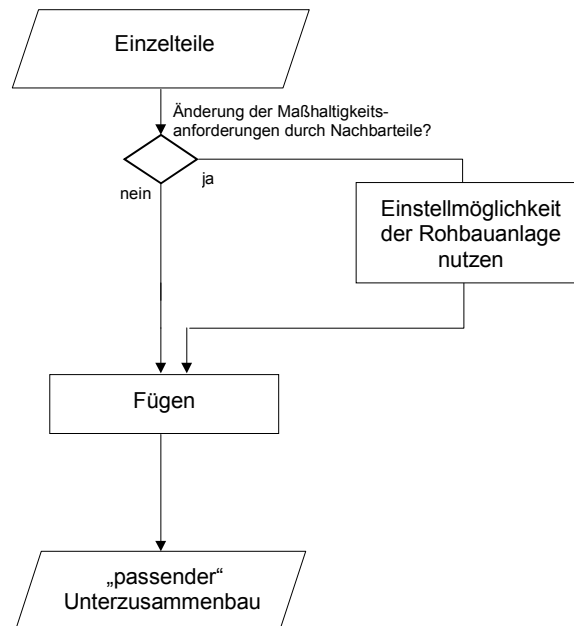


Bild 41: Kleiner Regelkreis zur Regulierung der Anforderungen an einen Unterzusammenbau

Die Aufbaureihenfolge beinhaltet mehr als lediglich die Information, welches Teil nach welchem verbaut wird. Sondern z.B. auch die Angabe über die Art der Ausrichtung der Teile zueinander, welche von wesentlicher Bedeutung ist.

4.3.1 Reihenfolge der Einzelteile

Für die Reihenfolge ist die Priorisierung der Anforderungen an einen Zusammenbau ausschlaggebend. Je wichtiger eine Anforderung ist, desto später im Zusammenbau muß sie gefügt (eingestellt) werden, damit möglichst wenige Glieder mit ihren Toleranzen auf sie einwirken können. Unwichtigere Toleranzen werden in Unterzusammenbauten verlagert.

Daher existieren 2 Möglichkeiten:

1. Binäre Priorisierung (nur „wichtig“ bzw. „unwichtig“)
2. Gestufte Priorisierung (Hierarchie der Anforderungen)

Binäre Priorisierung

Ein Beispiel für diesen Fall zeigt Bild 42. In Y-Richtung sind die Abstände der beiden Rahmenteile des Frontmoduls zueinander sowie zum Kombihalter gleich relevant. Alle weiteren Maße sind von geringer Bedeutung.

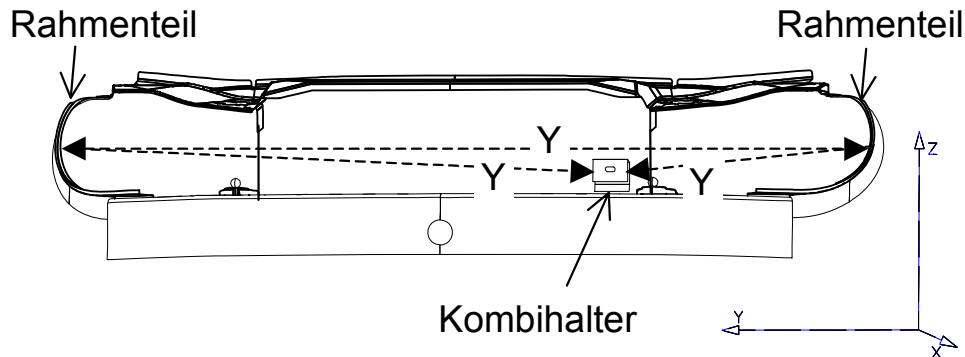


Bild 42: Beispiel 1: Anforderungen an einen Zusammenbau

Die beiden Rahmenteile (links und rechts) müssen zur Gewährleistung einer geringen Streuung zusammen mit dem Kombihalter in einer Anlage gefügt werden. Dies muß so spät wie möglich erfolgen, da dann der Zusammenbau die höchste Steifigkeit besitzt, und so die Positionierung erhalten bleibt. Die Voraussetzung dafür ist eine Y-Verschiebbarkeit aller drei Teile. Die restliche Aufbaureihenfolge ist unerheblich.

Gestufte Priorisierung

Bei dem Zusammenbau einer Tür hat die Lage der Scharnierverstärkung zur Sicherheitstüfuge die höchste Priorität. Die Lage des Türinnenteils zur Beplankung ist von niedriger Priorität.

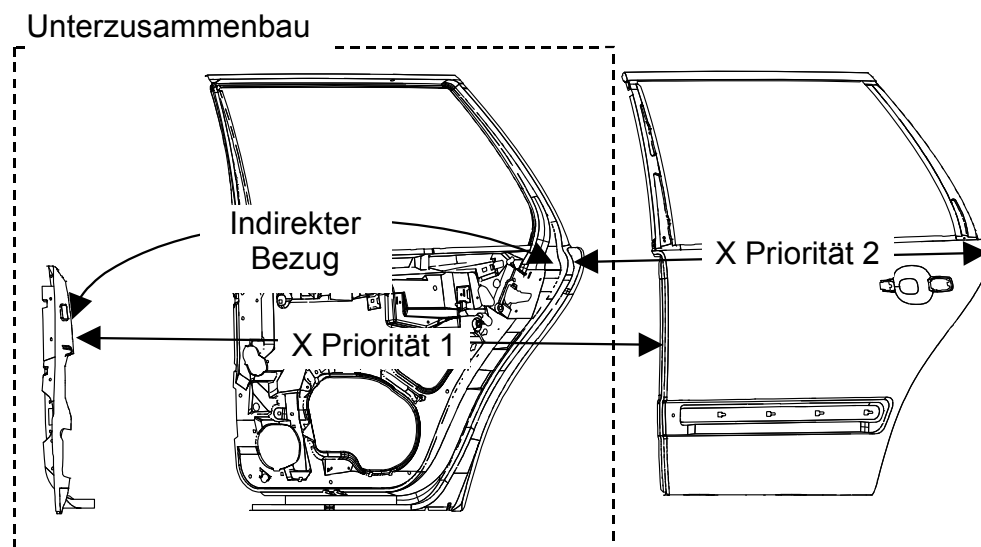


Bild 43: Beispiel 2: Anforderungen an einen Zusammenbau

Daraus folgt die Aufbaureihenfolge unter der Voraussetzung einer X-Verschiebbarkeit der drei Bauteile:

- Innenteil an Scharnierverstärkung (indirekter Bezug)
- Dieser Untereinbau an die Beplankung

4.3.2 Ausrichten der Teile

Die Teile werden an den Bezugsstellen ausgerichtet. Diese liegen – soweit es möglich ist – an den Funktionsstellen, da dann die Toleranz von der Bezugsstelle zu der Funktionsstelle entfällt.

Zur Erreichung des optimalen Ergebnisses der Priorität 1-Anforderung aus dem vorhergehenden Beispiel muß der Unterzusammenbau in X-Richtung an der Scharnierverstärkung ausgerichtet werden sowie die Beplankung an der Sicherheitstüfuge in X-Richtung.

Die Priorität 2-Anforderung muß indirekt behandelt werden. Bei der Erstellung des Unterzusammenbaus werden beide Teile an den jeweils kritischen Stellen in X-Richtung ausgerichtet.

4.3.3 Ort der Erzeugung der Genauigkeit

Der Ort, an dem die Genauigkeit eines Funktionsmaßes erzeugt wird, ist von großer Relevanz. Dies ist dann besonders wichtig, wenn die Zusammenbau-Bezugsstellen wechseln oder Teile großer Masse hinzugefügt werden. Bild 44 zeigt die Veränderung der Maßhaltigkeit in Abhängigkeit von den Bezugsstellen und von der Änderung der Biegelinie durch den Massezuwachs (Fahrwerksmontage).

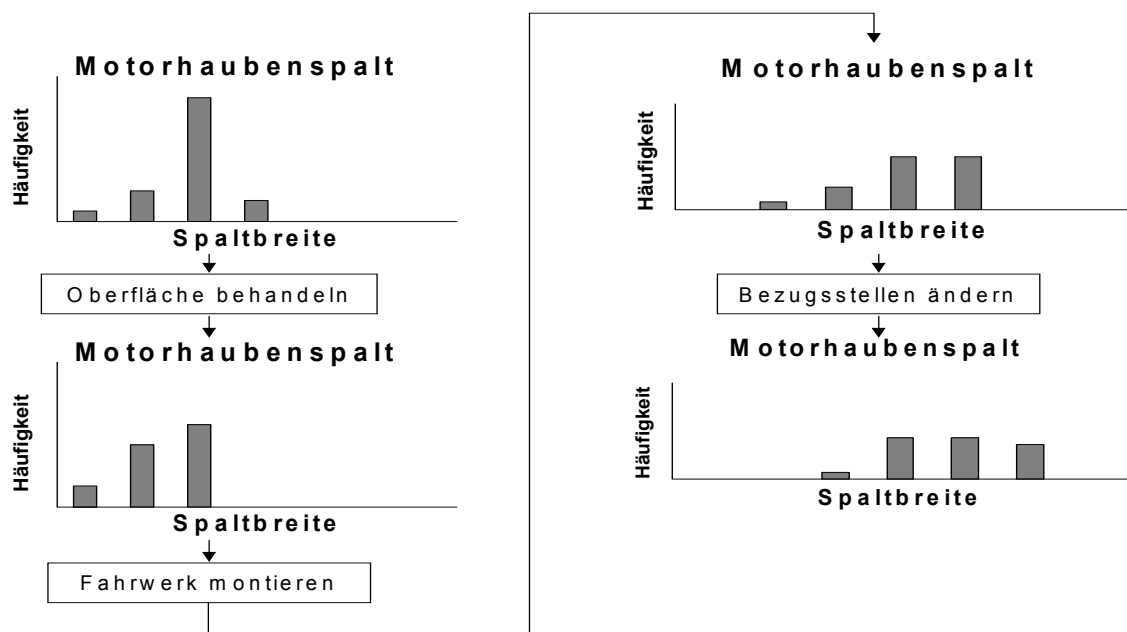


Bild 44: Ort der Erzeugung der Genauigkeit

Es ist deutlich zu erkennen, daß die im Rohbau erzeugte Genauigkeit verloren geht. Zum einen verschiebt sich der Mittelwert der Verteilung, dies ist weniger kritisch, denn dann kann entsprechend vorgehalten werden. Zum anderen vergrößert sich die Streuung. Dies bedeutet, daß die Genauigkeit so spät wie möglich erzeugt werden sollte, bzw. falls der Zusammenhang zwischen der ursprünglichen Mittelwertlage und dem Endergebnis bekannt ist, muß entsprechend vorgehalten werden.

4.4 Prozeßdurchgängige Bezugsstellen

Die Bezugsstellen bilden die Basis der Tolerierung, denn auf das durch sie aufge-spannte Bezugssystem werden die Toleranzen (z.B. Profil einer Fläche) bezogen.

Laut DIN ISO 5459 [DIN-5459] sind die Bezüge theoretisch exakt. Dies bedeutet, daß die Lage der Bezugselemente, die die Bezugsebenen aufspannen, unerheblich ist. Es kann somit zu keinem Verkippen der Ebenen kommen. Die Realität zeigt aber, daß die Lage der Bezugsstellen sehr wohl einen Einfluß hat. Je weiter diese auseinander liegen, desto geringer sind die Effekte der Verkippung der Ebenen. Aus diesem Grund ist im Beiblatt 1 zum Entwurf der Neufassung der DIN ISO 1101 [DIN-1101] folgender Passus eingefügt:

„Ein Bezugselement sollte für seinen Zweck genügend formgenau sein. Es kann deshalb notwendig sein, für die Bezugselemente Formtoleranzen festzulegen.“

Dies ist eine sehr hohe Anforderung an Preßteile. Des weiteren muß der Satz aus der ISO auch auf Lagetoleranzen ausgedehnt werden, da auch Bezugsstellen Form- und Lagetoleranzen zur CAD-Null-Geometrie (lagerichtig und toleranzfrei) besitzen können. Die Auswirkungen der Verkippung, welche nicht vernachlässigbar sind, können mit dem im Kapitel 4.4.2 vorgestellten Programm zur Berechnung der Auswirkungen eines Bezugsstellenwechsels berechnet werden.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Lage der Bezugsstellen durch deren Streuung und damit der Verkippungen der Bezugsebenen entgegen DIN 5459 einen großen Einfluß auf die Streuungen des gesamten Teils hat.

Darüber hinaus wird die Ausrichtung der Teile für das Fügen mittels der Ausrichtung der Bezugsstellen durchgeführt. Dies ist ein weiterer Grund für die große Bedeutung der Wahl der geeigneten Bezugsstellen. Sie befindet sich im folgenden Spannungsfeld zwischen den allgemeinen Randbedingungen und den Anforderungen.

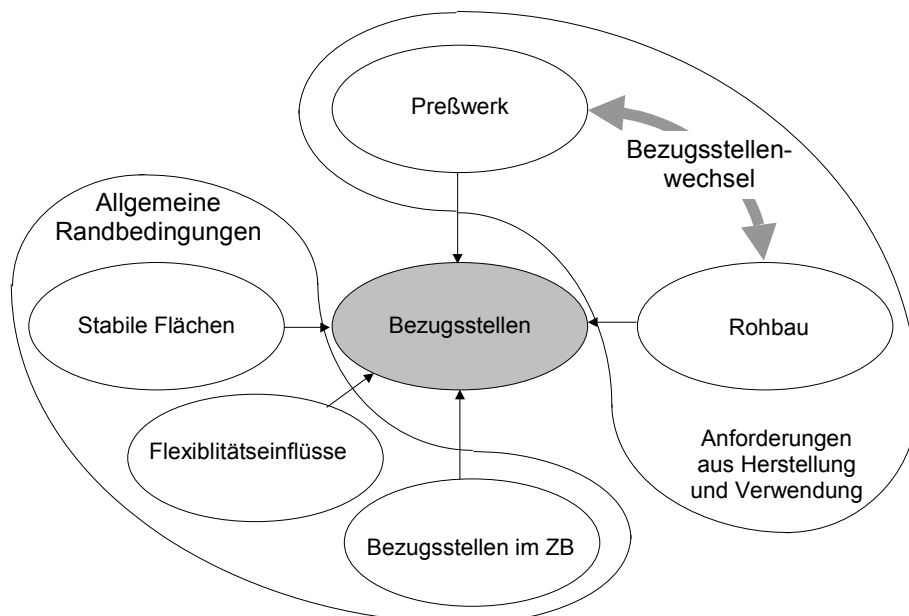


Bild 45: Spannungsfeld Bezugsstellen am Einzelteil

4.4.1 Allgemeine Randbedingungen

Generell ist bei flächigen Bezugsstellen, die nicht denen des Preßwerks entsprechen, zu beachten, daß sie auf stabilen Flächen liegen, um die Streuungen und damit die Verkippungen der Bezugsebenen gering zu halten.

Stabile Flächen zeichnen sich durch eine hohe Prozeßsicherheit aus. Dazu müssen die folgenden Regeln eingehalten werden:

- Mindestabstand von Umformkanten
- Mindestdurchmesser von Löchern
- Mindestumformgrad
- Lage auf gezogener (nicht abgekanteter) Geometrie

Bei Blechteilen dürfen die Flexibilitätseinflüsse nicht unterschätzt werden. Um sie zu beherrschen gibt es zwei Ansätze:

- Gleiche Lage
Wird das Preßteil in der gleichen Lage gefügt und gemessen, in der es später verwendet wird, kann der Flexibilitätseinfluß vernachlässigt werden.
- Kraftbegrenzter Ansatz
Um jegliche Elastizität des Bauteils zu verhindern, wird es statisch überbestimmt aufgenommen. Wenn diese Spanner starr sind, wird das Bauteil in eine beliebige Form gezwungen. Dann ist keine realistische Aussage über die Maßhaltigkeit des Bauteils mehr möglich. Daher müssen die Spanner kraftbegrenzt werden und die Bezugsstellen meßbar sein. Die eingebrachte Kraft soll die Schwerkraft gerade aufheben.

Die Bezugsstellen müssen im Hinblick auf ihre Verwendung im Zusammenbau ausgewählt werden, dabei sind zwei wesentliche Punkte zu beachten:

- Verspannungen und Verwindungen der Zusammenbauten durch Streuungen
- Wegfallende Bezugsstellen

Verspannungen und Verwindungen durch Streuungen können dann auftreten, wenn die Bezugsstellen einen Freiheitsgrad einschränken, der auch durch Blockbildung eingeschränkt ist. Daher müssen die Bezugsstellen so gewählt sein, daß sie tatsächlich die Lage im Raum definiert bestimmen. Dies wird in Bild 46 veranschaulicht.

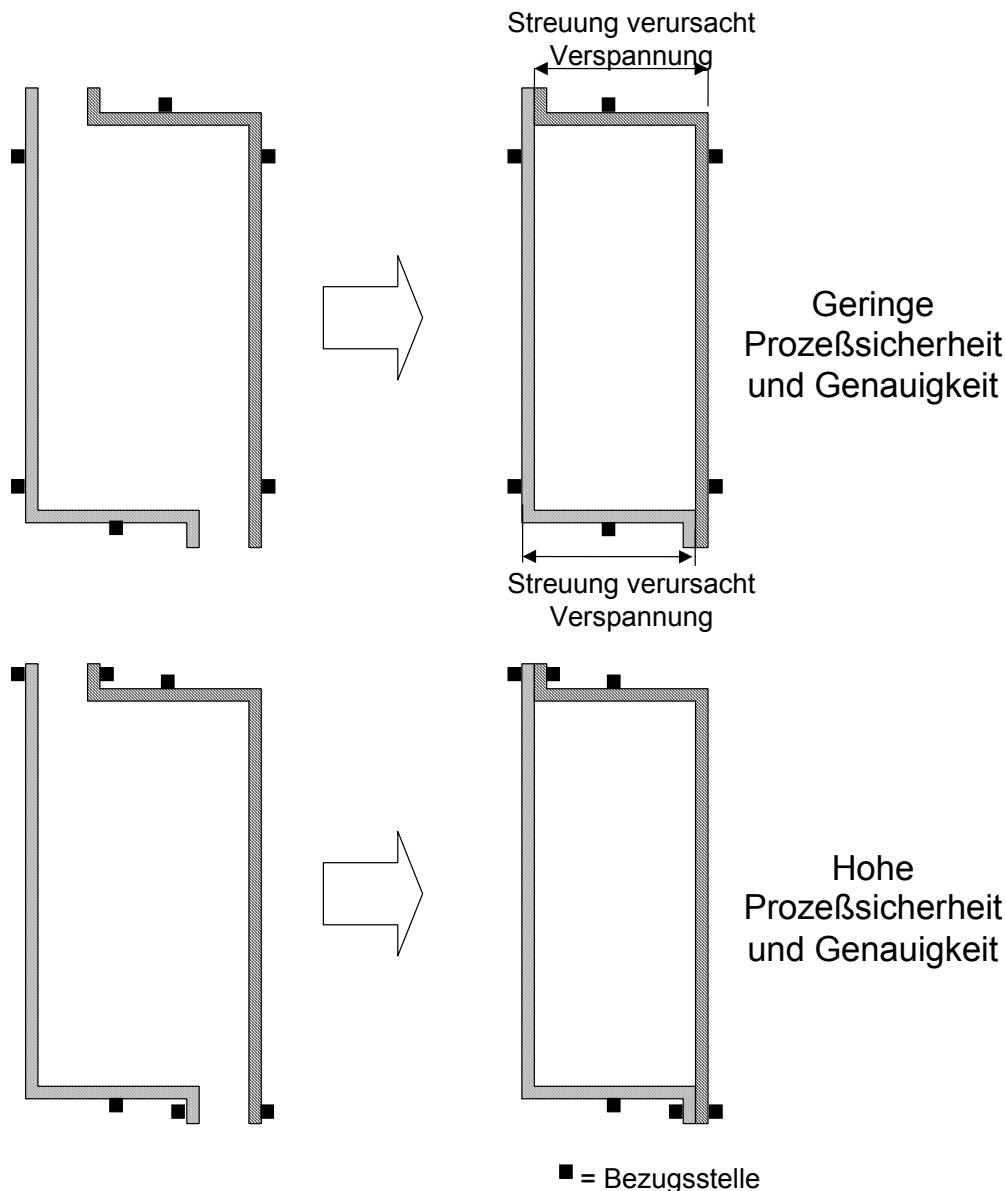


Bild 46: Verspannungen durch die Wahl der Bezugsstellen

In der Richtung, in der im Zusammenbau eine Blockbildung vorliegt, müssen die Bezugsstellen auf dem Flansch liegen, um Verspannungen zu vermeiden. Sie dürfen dabei aber keinesfalls auf einem Schweißpunkt liegen. In den anderen Richtungen ist die Wahl der Lage der Bezugsstellen nicht eingeschränkt. Falls diese Anordnung der Bezugsstellen funktional ungünstig ist, muß die Fügegeometrie konstruktiv geändert werden.

Ein Einzelteil wird in seiner Lage durch sechs Punkte eindeutig (statisch) bestimmt. Aus diesem Grund hat jedes Preßteil sechs Bezugsstellen. Beim Fügen mehrerer Preßteile hätte der Zusammenbau insgesamt sechs mal Preßteilanzahl Bezugsstellen. Daher müssen nach dem Fügen alle Bezugsstellen bis auf sechs wegfallen, damit der Zusammenbau wieder statisch bestimmt ist.

Die Wahl der verbleibenden Bezugsstellen muß unter drei Aspekten getroffen werden und es ist dabei der günstigste Kompromiß zu wählen.

- Bezugsstellen an Funktionsstellen (ggf. ist hier eine Priorisierung notwendig)
- Stabile Lage der Bezugsstellen gegen Verkippungen
- Verschleiß der Bezugsstellen

Untersuchungen an Blechteilen haben gezeigt, daß Löcher, die mehrfach (10-15 mal) als Aufnahme dienen, sich vor allem bei dünnen Blechen um bis zu 0,5mm aufweiten. Daher kann es sinnvoll sein, diese Löcher als wegfallende Bezugsstellen zu wählen, oder hier kann sogar ein Bezugsstellenwechsel zu einem Genauigkeitsgewinn führen. Alternativ können die Löcher konstruktiv steifer ausgeführt werden (vgl. Kap. 6, Optimierungsstrategien).

4.4.2 Anforderungen aus Herstellung und Verwendung

Wenn ein Bauteil in einem Zusammenbau eine Funktionsstelle besitzt, sollte hier eine Bezugsstelle vorgesehen werden. Dies wird am folgenden Beispiel an den X-Bezugsstellen für den bereits vorgestellten Zusammenbau deutlich.

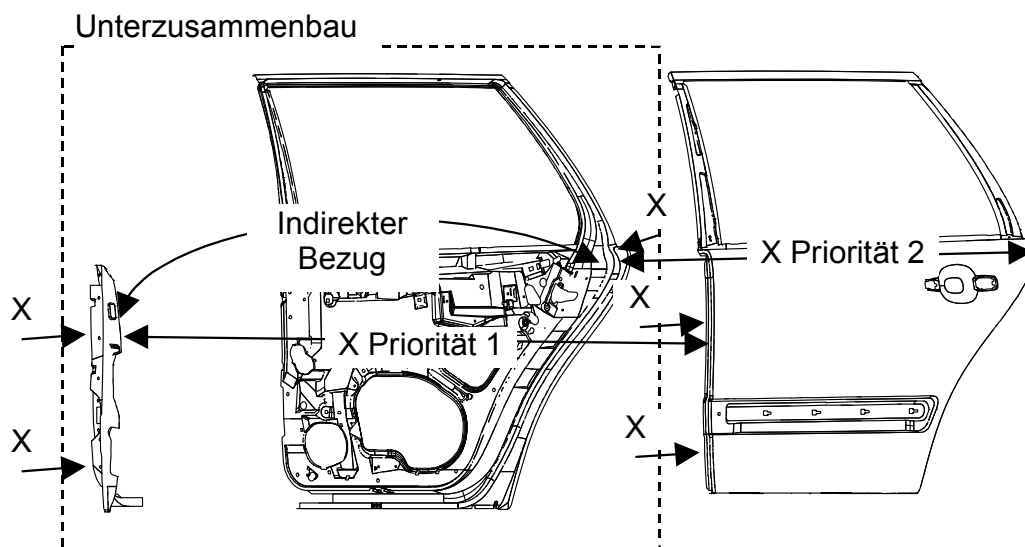


Bild 47: Funktional gewählte Bezugsstellen

Die Bezugsstellen aller Einzelteile in diesem Beispiel liegen an den jeweiligen Funktionsstellen. Damit wird der Effekt der Streuung der Preßteile von den Bezugsstellen zu den Funktionsstellen eliminiert. Die Toleranzketten bestehen somit ausschließlich aus den Toleranzen der Rohbauanlagen.

Während der Fertigung kann ein Wechsel der Bezugsstellen erforderlich sein. Dies sollte, soweit es möglich ist vermieden werden, da jeder Wechsel einen zusätzlichen Toleranzterm bewirkt, denn eine neue Bezugsstelle streut in bezug auf eine alte.

Am häufigsten tritt ein Bezugsstellenwechsel von Preßwerk und Rohbau auf. Es ist aus Fertigungsgründen sehr wichtig, Bezugsstellen beim Fügen an die funktionsrelevanten Flächen bzw. Löcher zu legen. Wenn diese erst in einer späten Pressenstufe erzeugt werden, kann im Preßwerk an diesen Stellen nicht aufgenommen werden. Daher werden preßwerkspezifische Bezugsstellen erforderlich.

Das Preßteil ist bezüglich der Preßwerkbezugsstellen toleriert, zu diesen streut die gesamte Geometrie. Um die Toleranzwerte zu ermitteln, die für dieses Teil in bezug auf die Rohbaubezugsstellen gültig sind, ist eine statistische 3-D Toleranzrechnung erforderlich.

Diese Umrechnung der Toleranzen zwischen verschiedenen Bezugssystemen an einem Preßteil wird momentan von keiner Software unterstützt, und in der gängigen Literatur wird dieses Problem ebenfalls nicht behandelt.

Der Ablauf zur Berechnung diese Effekte ist wie folgt.

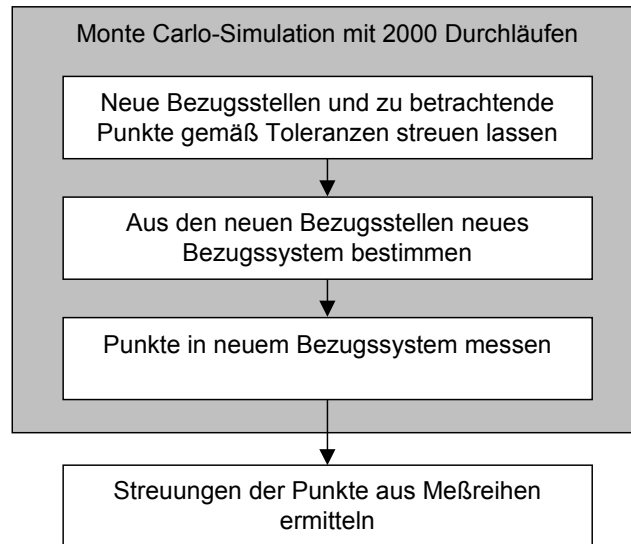


Bild 48: Ablauf Berechnung des Bezugssystemwechsels

Den neuen Bezugsstellen und den zu betrachtenden Punkten werden per Zufalls-generator Streuungswerte aus ihrer Toleranz zu den alten Bezugsstellen zugewiesen. Die streuenden Bezugsstellen bilden ein neues Bezugssystem. In diesem wird der Abstand der Punkte gemessen. Dieser Vorgang wird 2000 mal wiederholt. Aus den 2000 Meßwerten in allen drei Raumrichtungen wird für jeden Punkt die neue Streuung errechnet.

Um diesen Ablauf zu automatisieren, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Programm zur Berechnung der Auswirkungen des Bezugsstellenwechsels entwickelt.

Die benötigten Eingangsgrößen sind:

- Neue Bezugsstellen (Koordinaten, Wirkrichtung und Toleranz zu den alten Bezugsstellen)
- Zu untersuchende Punkte (Koordinaten, Wirkrichtung und Toleranz zu den alten Bezugsstellen)
- Normalenrichtung (X, Y, Z) der neuen Bezugsebenen (primär, sekundär, tertiär)

Es fällt auf, daß die ursprünglichen Bezugsstellen nicht benötigt werden, da Bezugssysteme (Koordinatensysteme) ineinander umgewandelt werden. Es ist ausreichend allein die Toleranzen zu ihnen zu kennen.

Die Berechnung nach Bild 48 läuft wie folgt ab (Beispiel Bild 49):

- Die Bezugspunkte 1-3 werden in die neue Primärebene gelegt
- Die Bezugspunkte 4 und 5 werden in die neue Sekundärebene gelegt
- Schleife über 2000 Simulationsdurchläufe
 - Alle Punkte (neue Bezugsstellen und zu untersuchende Punkte) streuen entlang ihren Wirkrichtungen

- Durch die streuenden Bezugsstellen werden die Bezugsebenen gelegt, die in der Folge kippen
- Die Abstände der Punkte werden normal zu den streuenden Ebenen gemessen
- Aus den streuenden Abständen werden die Streuungen der Punkte zu den neuen Bezugsstellen bestimmt

Das Ergebnis sind die Streuungen der Punkte zu den neuen Aufnahmestellen in Koordinaten- und in Wirkrichtung.

Am Beispiel eines Quaders wird das Programm vorgestellt. Die Lage der neuen Bezugsstellen, der zu untersuchenden Punkte sowie die Toleranzen sind in der Skizze dargestellt.

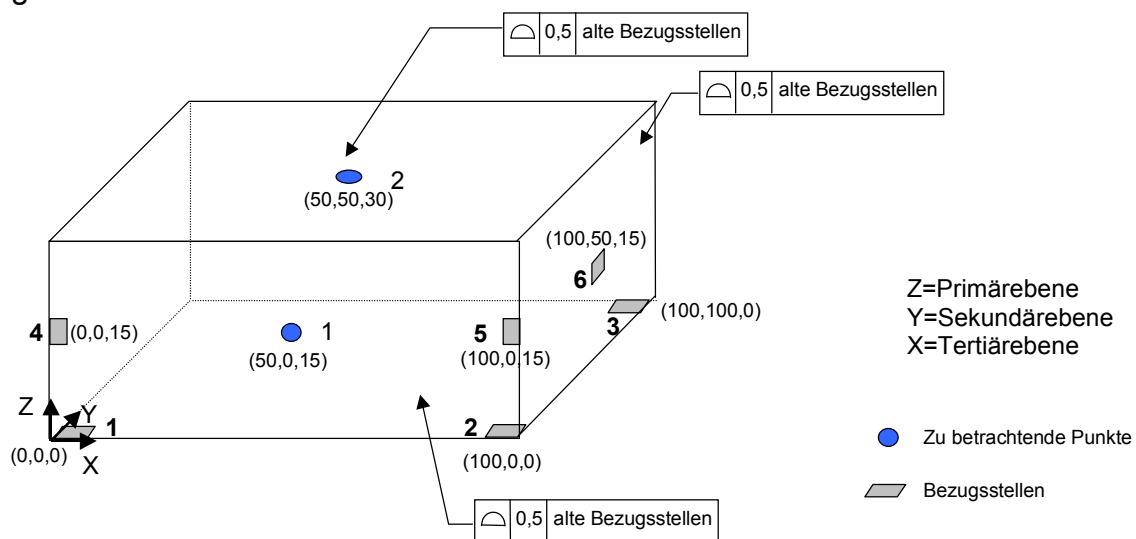


Bild 49: Testbeispiel für Effekte des Bezugsstellenwechsels

Die Bezugsstellen 1, 2, 3 spannen die neue Primärebene (Z) mit einer Toleranz von 0mm auf. Dies bedeutet, daß sie identisch mit den ursprünglichen Bezugsstellen sind. Die Stellen 4 und 5 schränken die Y-Ebene ein. Diese Fläche, auf der auch der Meßpunkt 1 liegt, hat eine Toleranz von 0,5mm. Die Tertiärebene (X) wird durch die Bezugsstelle 6 mit einer Toleranz von 0,5mm aufgespannt. Der Meßpunkt 2 liegt auf der gegenüberliegenden Seite der Primärebene des Quaders mit einer Toleranz von 0,5mm.

Die Berechnungsergebnisse der Streuung der Meßpunkte zu den neuen Bezugsstellen zeigt der folgende Bildschirmausdruck.

Konvertierung

Neue Bezugsstellen:

	Koordinaten			Wirkrichtung			Toleranz zu ursprünglichen Bezugsstellen
	X	Y	Z	X	Y	Z	
Stelle 1	0	0	0	0	0	1	0
Stelle 2	100	0	0	0	0	1	0
Stelle 3	100	100	0	0	0	1	0
Stelle 4	0	0	15	0	1	0	0.5
Stelle 5	100	0	15	0	1	0	0.5
Stelle 6	100	50	15	1	0	0	0.5
Ebenen	primär	z	sekundär	y	tertiär	x	{X,Y,Z}

Bezugsstellenwechsel berechnen

Meßpunkte:

	Koordinaten			Wirkrichtung			Toleranz ursprünglich
	X	Y	Z	X	Y	Z	
Punkt 1	50	0	15	0	1	0	0.5
Punkt 2	50	50	30	0	0	-1	0.5
Punkt 3	0	0	0	0	0	1	0
Punkt 4	0	0	0	0	0	1	0
Punkt 5	0	0	0	0	0	1	0
Punkt 6	0	0	0	0	0	1	0

Toleranz zu den neuen Bezugsstellen:

	X	Y	Z	Wirkrichtung
	0.62389	0.61004	0	0.61004
	0.50681	0.35252	0.49504	0.49504
	0.62390	0.50344	0	0
	0.62390	0.50344	0	0
	0.62390	0.50344	0	0
	0.62390	0.50344	0	0

Ende
Abbrechen
Öffnen
Speichern
Drucken

Bild 50: Programm zur Umrechnung der Bezugssysteme

Auffällig sind die starken Zunahmen der Streuung in die Richtungen, in die der Punkt vorher keine Toleranz besaß. In diesem speziellen Beispiel mit ebenen, achsparellen Flächen haben sie jedoch keine Wirkung, da die Toleranz „Profil einer Fläche“ nur normal zu dieser definiert ist. Am Punkt 1 wird deutlich, daß die Streuung in Wirkrichtung auch in einfachen Fällen schnell um mehr als 20% zunehmen kann.

5 Streuungen des Fertigungsprozesses

Die Kenntnis der Streuungen des Fertigungsprozesses ist erforderlich, um zu einem realistischen Toleranzkonzept zu gelangen, denn die geforderten Toleranzen sollen mit einer definierten Prozeßsicherheit eingehalten werden. Diese wird in der Regel unter Berücksichtigung der Mittelwertverschiebung als Quotient zwischen Toleranz und Streuung ausgedrückt.

5.1 Streuungsentstehung

Die Entstehung von Streuungen hat zwei Aspekte. Die Streuung entsteht einerseits durch den Fertigungsprozeß, andererseits erhält sie ihren Wert von der Gestalt des Produkts.

Im physikalischen Produktentstehungsprozeß vom Rohstoff zum fertigen Produkt werden verschiedene Fertigungsschritte und Transportvorgänge durchlaufen. Diese haben alle Einflüsse auf die Streuung des fertigen Produkts. Das Flußdiagramm (Bild 51) zeigt die prinzipielle Reihenfolge der Operationen. In dieser Betrachtungsweise werden Mehrfachoperationen vernachlässigt. Die Transport- und Ausrichtoperation, die vor jeder geometrieerzeugenden Operation durchgeführt wird, ist hier der Einfachheit halber nur als Umstand dargestellt, in Realität sind dies zusätzliche Operationen.

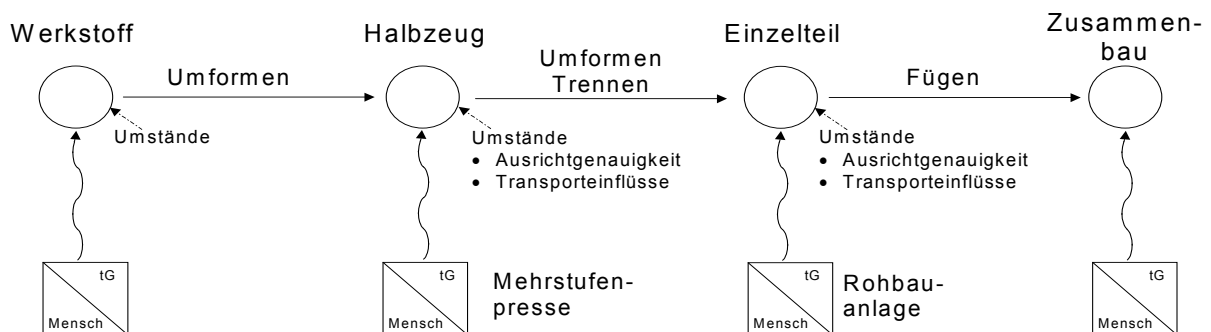


Bild 51: Physikalischer Produktentstehungsprozeß

Bevor auf die Streuungen der Preßteile sowie der Rohbauanlagen eingegangen wird, müssen die statistischen Grundlagen betrachtet werden, um abschätzen zu können, welche Parameter relevant sind bzw. vernachlässigt werden können.

5.2 Statistische Grundlagen und Fehlerbetrachtungen

Die Sammlung des Fertigungswissens ist die Grundlage, auf der die Toleranzrechnung bzw. die Abschätzung der Varianten durchgeführt werden soll. Die Genauigkeit des Rechenergebnisses hängt stark von der Güte der Eingangsgrößen ab.

Um das Ergebnis zu beurteilen, ist es notwendig, die in einer Toleranzrechnung liegenden Fehler und deren Auswirkungen zu kennen.

Am Ende des Abschnitts wird auf deren Auswirkungen hinsichtlich des Zusammenbaus eingegangen.

5.2.1 Fehler auf Einzelteil- / Fertigungsverfahrensebene

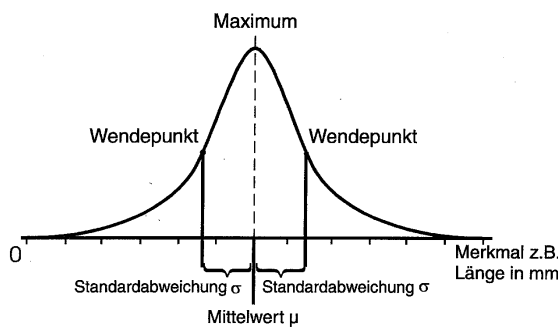
Unter Voraussetzung eines mathematisch exakten Verfahrens sind die Fehler aus dem Fertigungswissen die folgenden:

- Fehler durch „falsche Verteilungsannahme“ der Streuung
- Statistische Fehler durch beschränkte Stichprobengröße
- Meßfehler
- Fehler durch elastische Verformung

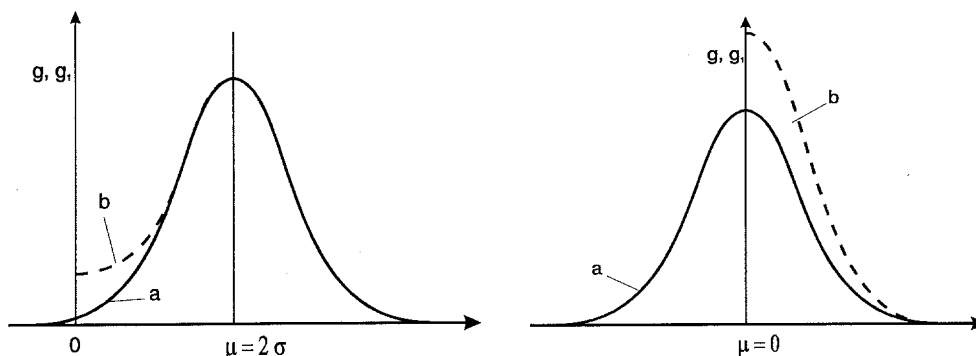
5.2.1.1 Fehler durch „falsche Verteilungsannahme“

Für unimodale Verteilungen, wie sie in der industriellen Massenfertigung auftreten, gibt es drei Varianten [Die-96]:

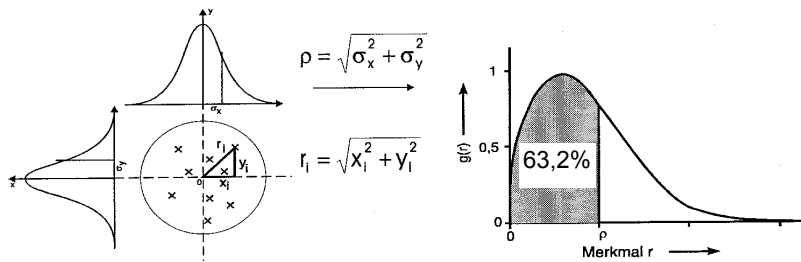
1. Normalverteilung



2. Betragsverteilung 1. Art



3. Betragsverteilung 2. Art (Rayleigh-Verteilung)



Des Weiteren besteht nach Dietrich [Die-96] die in Bild 52 gezeigte allgemeine Abhängigkeit zwischen der Toleranzart und der Art der Verteilung.

Merkmal		Auswerteverfahren	Merkmal		Auswerteverfahren
Formtoleranzen			Lagetoleranzen		
Symbol	Tolerierte Eigenschaft		Symbol	Tolerierte Eigenschaft	
—	Geradheit	B1	/	Parallelität	B1
▭	Ebenheit	B1	⊥	Rechtwinkligkeit	B1
○	Rundheit	B1	∠	Neigung	B1
⊘	Zylinderform	B1	⊕	Position	B1
⌒	Linienform	B1	⊙	Koaxialität	B1
⌒	Flächenform	B1	≡	Symmetrie	B1
N = Normalverteilung B1 = Betragsverteilung 1. Art B2 = Betragsverteilung 2. Art			↗↗	Rundlauf	B1/B2
			↗↗	Planlauf	B1
			Sonstige		
			Rauheit		B1
			Unwucht		B2
			Drehmoment		N
			Längenmaß		N

Bild 52: Zusammenhang Toleranzart und Verteilung

Diese Aussage ist noch zu überprüfen, da sie ohne ein zu Grunde liegendes Fertigungsverfahren aufgestellt wurde. Die Annahme aus Bild 52, daß die zu Grunde liegende Verteilung eine Betragsverteilung ist, läßt sich durch die Auswertungen von Meßreihen heuristisch bestätigen. Als Beispiel sind hier die Verteilungen von zwei Meßwerten an einem umgeformten Teil dargestellt.

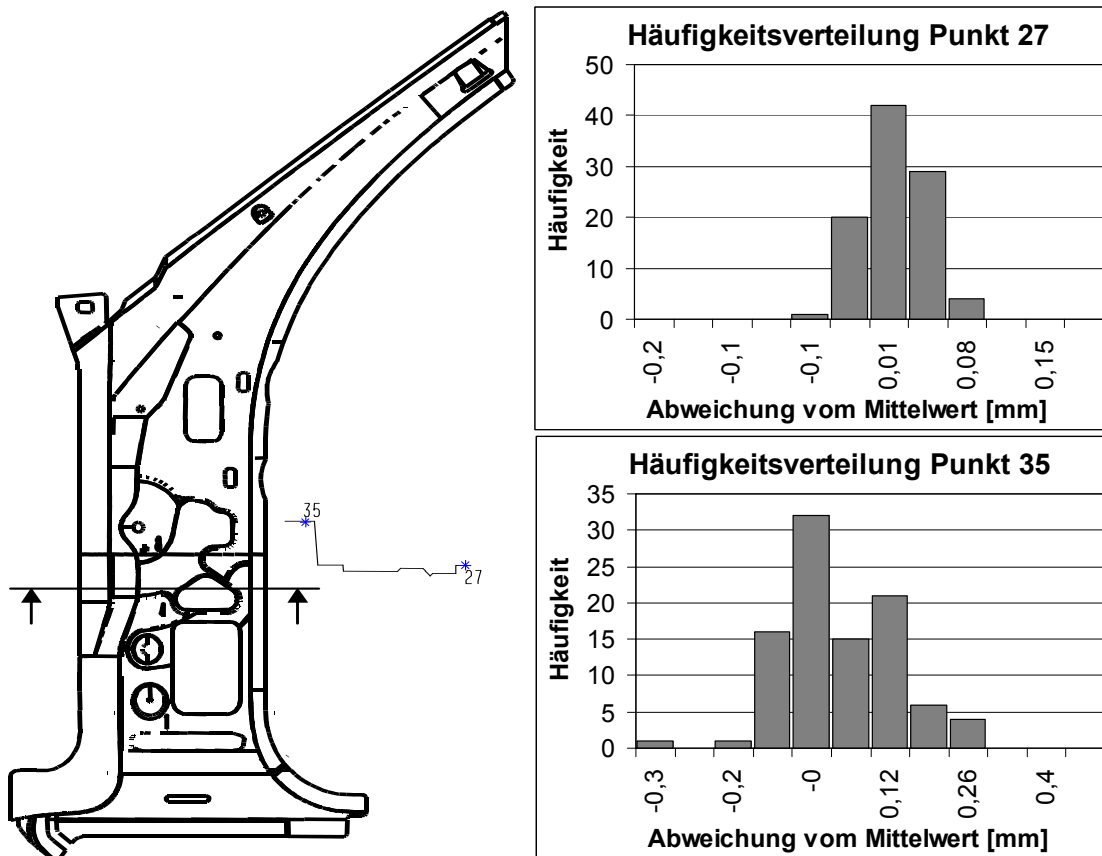


Bild 53: Verteilungen am realen Bauteil

Bei beiden Beispielen fällt eine leichte Einseitigkeit und die Beschränktheit an mindestens einer Seite auf. Es handelt sich somit um Betragsverteilungen.

Eine Betragsverteilung repräsentiert i.A. einen Fertigungsprozeß besser als eine Normalverteilung, die bis $\pm\infty$ streut.

So muß untersucht werden, welcher Fehler auftritt, wenn statt der Betragsverteilung eine Normalverteilung zur Summation zu Grunde gelegt wird. Dazu wurden Simulationen mit der Stichprobengröße $n \approx 6600 \dots 7660$ durchgeführt.

Vorgehensweise:

- Erzeugen dreier normalverteilter Datensätze mit $\sigma=0,1$
- Aussortieren der Werte, die kleiner bzw. größer als ein bestimmter Grenzwert sind
- Ermitteln der Streuung und des Mittelwerts
- Addition der Verteilungen
- Erzeugen dreier normalverteilter Datensätze mit entsprechender Streuung und Mittelwert
- Addition der Verteilungen
- Vergleich

Die Grenzwerte wurden folgendermaßen gewählt:

- Symmetrisch $\pm 0,2 \Rightarrow \sigma_{\text{norm}}=0,088; x_{\text{mittel,norm}}=0,001$
- Asymmetrisch $-0,1 + 0,25 \Rightarrow \sigma_{\text{norm}}=0,077; x_{\text{mittel,norm}}=0,028$

Die folgende Tabelle zeigt die bei der Summation auftretenden Unterschiede.

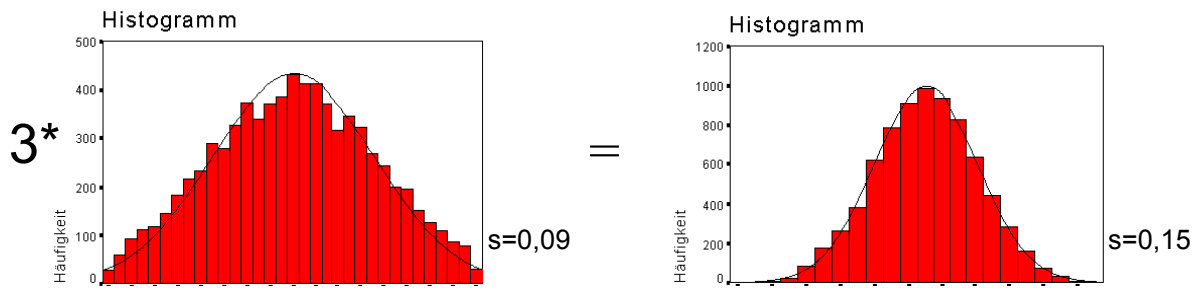
Tabelle 2: Vergleich der Summationen von Normal- und Betragsverteilungen

Verteilung	Datensatz	Mittelwert	Streuung	6·s
Betragsverteilung symmetrisch	bv0,2a	0,001	0,088	0,528
	bv0,2b	0,001	0,089	0,534
	bv0,2c	0,001	0,088	0,528
Summe dreier Betragsverteilungen	SABC_BV	0,003	0,153	0,918
Normalverteilung	NVA	0,002	0,087	0,522
	NVB	0,001	0,090	0,540
	NVC	0,002	0,088	0,528
Summe dreier Normalverteilungen	SABC_NV	0,006	0,152	0,912
Betragsverteilung asymmetrisch	a-.1/.25	0,028	0,077	0,462
	b-.1/.25	0,028	0,078	0,468
	c-.1/.25	0,028	0,076	0,456
Summe dreier Betragsverteilungen	S_ABC_BV	0,083	0,134	0,804
Normalverteilung	A_NV	0,028	0,076	0,456
	B_NV	0,027	0,077	0,462
	C_NV	0,028	0,078	0,468
Summe dreier Normalverteilungen	S_ABC_NV	0,082	0,133	0,798

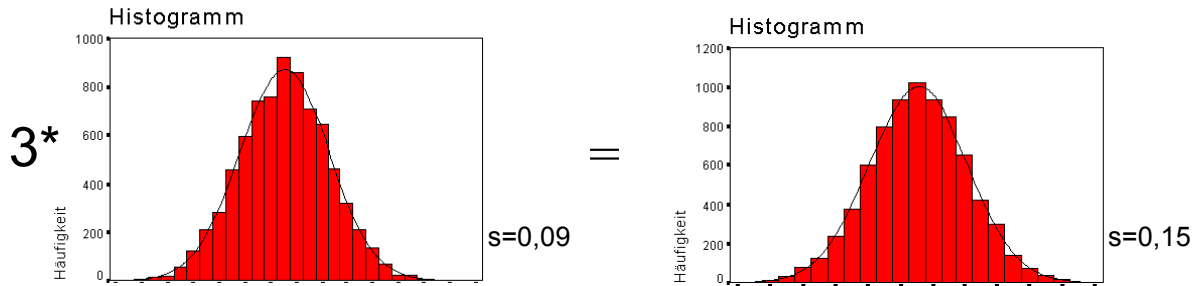
Der Unterschied im Bereich der auftretenden Maßabweichung ($6 \cdot s$) ist deutlich kleiner als ein Prozent und somit gegenüber dem Fehler durch kleine Stichproben vernachlässigbar.

Die Diagramme in Bild 54 auf der folgenden Seite zeigen dies anschaulich. Ebenso ergibt sich durch die Addition von Betragsverteilungen fast eine Normalverteilung. Dies resultiert aus dem großen Einfluß des mittleren Bereichs der Verteilungen.

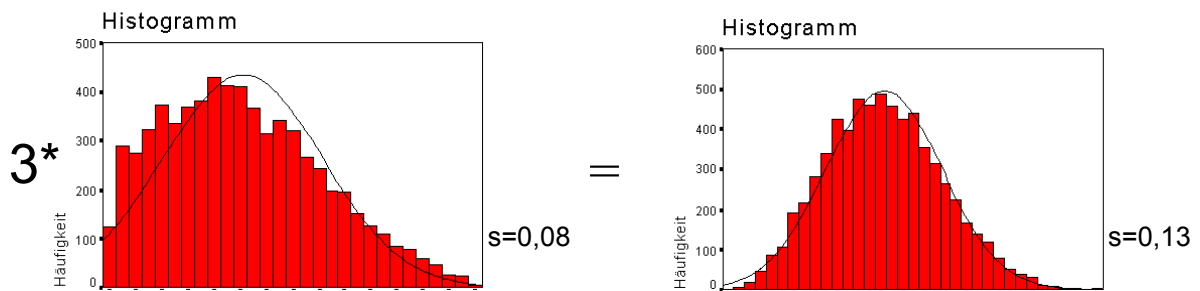
Betragsverteilung mit symmetrischen Grenzwerten von $s=\pm 0,2$



Normalverteilung mit $\sigma_{\text{norm}}=0,088$ und $x_{\text{mittel,norm}}=0,001$



Betragsverteilung mit asymmetrischen Grenzwerten von $-0,1 + 0,25$



Normalverteilung mit $\sigma_{\text{norm}}=0,077$ und $x_{\text{mittel,norm}}=0,028$

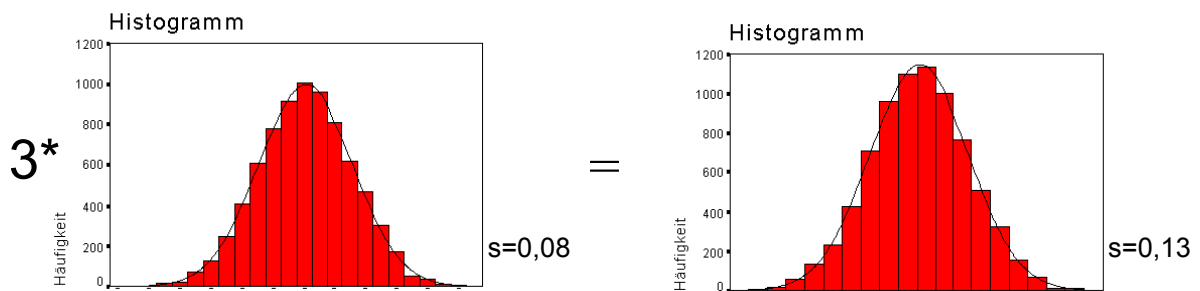


Bild 54: Verteilungsaddition

5.2.1.2 Bestimmung des notwendigen Stichprobenumfangs

Zu einer Aussage über die Streuung einer Grundgesamtheit ist es notwendig, eine Stichprobe zu messen und daraus die Streuung zu errechnen. Durch die Beschränktheit der Stichprobe wird ein statistischer Fehler verursacht.

Die Mindestanzahl von Messungen zur Bestimmung der Streuung kann durch die Berechnung des Vertrauensintervalls (zulässiger statistischer Fehler) für die unbekannte Streuung einer Normalverteilung in Abhängigkeit von der Stichprobengröße ermittelt werden [Die-96].

$$I(x_1 \dots x_n) = \left[\sqrt{\frac{(n-1) \cdot s_n^2}{\chi_{n, \frac{1-\alpha}{2}}^2}}, \sqrt{\frac{(n-1) \cdot s_n^2}{\chi_{n, \frac{\alpha}{2}}^2}} \right]$$

I = Vertrauensintervall

n = Stichprobengröße

α = Wahrscheinlichkeit

χ = Quantile der Chi -

Quadrat - Verteilung

s = Standardabweichung

Für das Beispiel $n=100$ und $\alpha=5\%$ sowie $s=0,1$ gilt

$$I(x_1 \dots x_{100}) = \left[\sqrt{\frac{(100-1) \cdot s_{100}^2}{129,5}}, \sqrt{\frac{(100-1) \cdot s_{100}^2}{74,2}} \right] = [0,087; 0,115]$$

Bild 55 zeigt den Verlauf der unteren und oberen Vertrauensgrenzen, um einen visuellen Eindruck des Fehlers zu vermitteln.

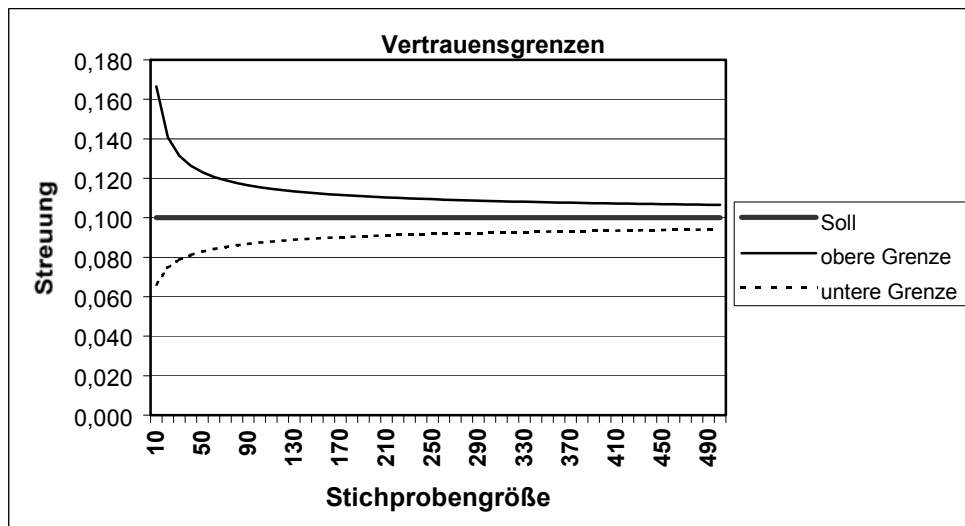


Bild 55: Vertrauensgrenzen der Streuung

Zur Abschätzung des Verhältnisses Nutzen / Aufwand ist im nachstehenden Bild die Ableitung des Verlaufs der Vertrauensintervallkurven dargestellt.

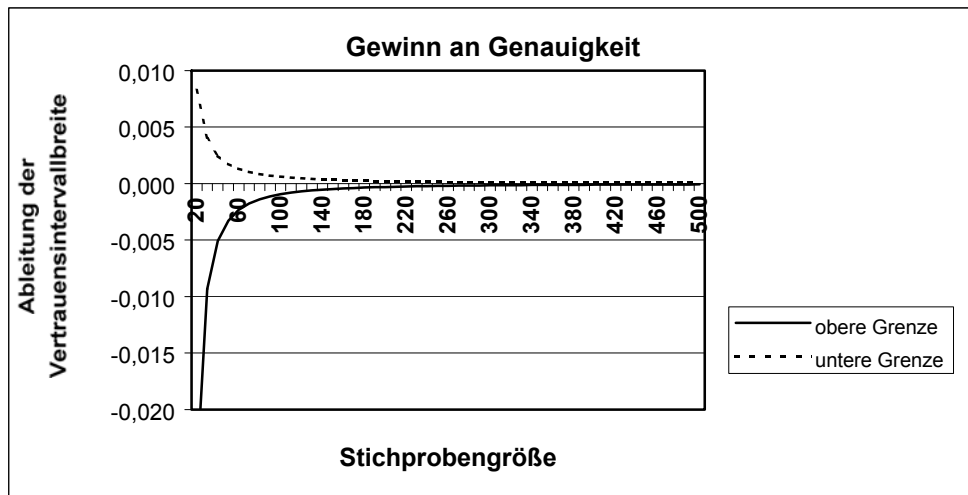


Bild 56: Gewinn an Genauigkeit

Dies wird zusätzlich mit einer Simulation untersucht. Es werden mit dem Statistikprogramm SPSS jeweils 20 normalverteilte Datensätze zu den Stichprobenumfängen $n=50, 100, 200$ mit dem Mittelwert Null und der Standardabweichung $\sigma=0,1$ erzeugt. Aus diesen Simulationsdaten ergeben sich die statistischen Größen für die Normalverteilung und die Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov Goodness of Fit Test⁷. Diese sind in Tabelle 3 zusammengefaßt.

Tabelle 3: Kolmogorov-Smirnov Goodness of Fit Test zur Erkennung der zu Grunde liegenden Verteilung

n	Streuung			Absoluter Abstand (K-S Distance)			Anzahl K-S Distance >0,1 d.h. keine Normalverteilungs- annahme zulässig
	Mittlere	Min	Max	Mittlerer	Min	Max	
50	0,09545	0,078	0,116	0,085331	0,06323	0,11035	5
100	0,09870	0,088	0,118	0,058377	0,04474	0,08876	0
200	0,10065	0,092	0,108	0,042989	0,02556	0,06738	0

Der Test des ersten Versuchs ($n=50$) ergibt, daß die zu Grunde liegende Verteilung in 5 von 20 Fällen nicht als Normalverteilung erkannt wird. Dies ist auf die zu kleine Stichprobe zurückzuführen. Ab einem Umfang von ca. 100 wird die zu Grunde liegende Normalverteilung erkannt.

Im Anhang C sind die Histogramme der jeweils ersten drei Testreihen zu sehen und im Vergleich dargestellt. An ihnen wird die Schwierigkeit deutlich, aufgrund eines Histogramms auf eine Verteilung zu schließen.

Zur weiteren Fehlerbetrachtung ist es notwendig, die Verteilung der Streuung innerhalb des Vertrauensintervalls zu bestimmen, da die einzelnen Fehler addiert werden müssen.

⁷ Der Kolmogorov-Smirnov Goodness of Fit Test ist ein mathematisches Standardverfahren, um zu überprüfen, wie gut eine Verteilung einer Normalverteilung entspricht.

Dazu wurden 100 Meßreihen mit jeweils 50 bzw. 100 Stichproben erzeugt und die Streuung bestimmt. Die folgenden Diagramme in Bild 57 zeigen die Häufigkeitsverteilung der errechneten Streuungen.

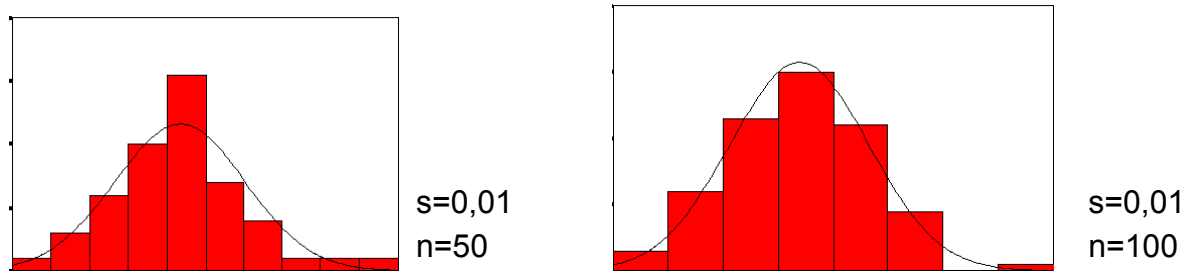


Bild 57: Verteilung des Vorhersagefehlers

Es fällt auf, daß der Fehler wiederum normalverteilt ist.

5.2.1.3 Meßfehler

In der Regel wird das Preßteil in einer Aufnahme mit Spannern fixiert.

Zur Ausrichtung des Preßteils gibt es drei Konzepte:

- Es werden ca. 10- 20 Punkte angetastet, dann wird eine Transformation des Meßmaschinenkoordinatensystems in das des Einzelteils mit einer Genauigkeit von 0,1mm durchgeführt, so daß es zur bestmöglichen Übereinstimmung der Meßpunkte mit dem Datensatz kommt.
- Um die sechs Freiheitsgrade einzuschränken, werden sechs Punkte angetastet. Dies ist nur zulässig unter den Voraussetzungen, daß einerseits diese Punkte als Aufnahmestellen über den gesamten Fertigungsprozeß erhalten bleiben sowie auf sie alle Toleranzen bezogen sind, und daß andererseits das Teil eigensteif ist. Der theoretische Ausrichtungsfehler ist dann gleich dem Maschinenfehler.
- Das Werkstück wird an sechs Punkten physikalisch aufgenommen. Diese Bezugsstellen haben per Definition keinen Fehler. Zusätzliche Bezugsstellen können zur Vermeidung der Schwerkrafteinflüsse erforderlich werden. Der Aufnahmefehler ergibt sich aus der Nichtreproduzierbarkeit des Einlegevorgangs. Zur Untersuchung wurde das selbe Bauteil 50 mal in die Meßaufnahme eingelegt und an zehn Punkten gemessen. Bild 58 zeigt die Häufigkeitsverteilung des Aufnahmefehlers, der den Meßmaschinenfehler mit enthält.

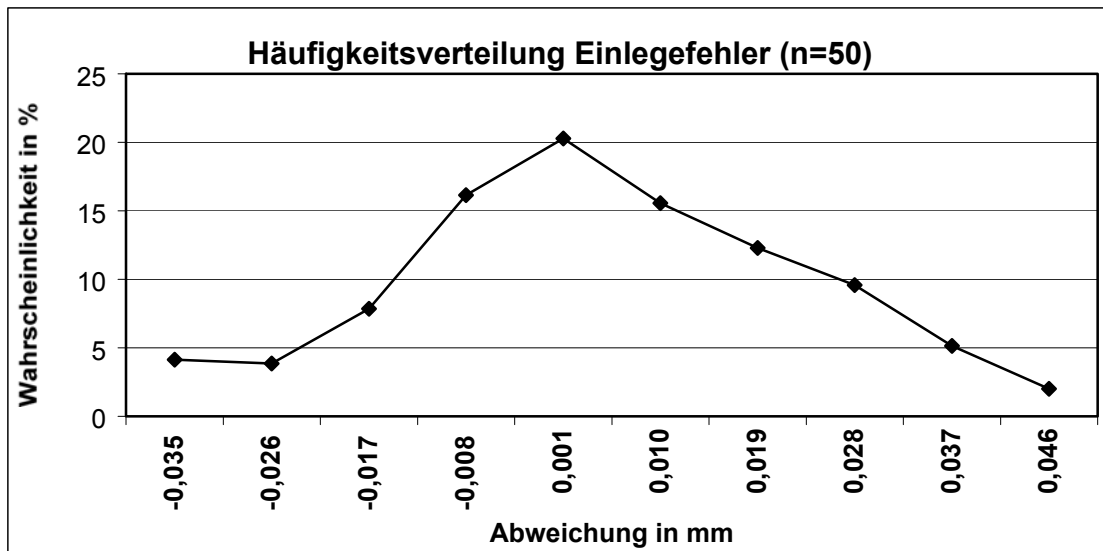


Bild 58: Häufigkeitsverteilung des Einlegefehlers

Die dargestellte Streuung gilt nur an einem Meßpunkt, da hier die Verkippung des Bauteils eine große Rolle spielt. Die weiter verwendete Streuung von $s=0,03\text{mm}$ ist als Abschätzung nach oben zu verstehen.

Der darin enthaltene Fehler aus der Genauigkeit der Maschine läßt sich ermitteln, indem ein Preßteil in einer Aufspannung mehrmals gemessen wird, ohne daß es neu eingelegt wird. Zur Überprüfung der Genauigkeit der Koordinatenmeßmaschine wurde ein Preßteil 100 mal in einer Aufspannung vermessen. Das folgende Bild zeigt die mittlere Häufigkeitsverteilung des Meßmaschinenfehlers.

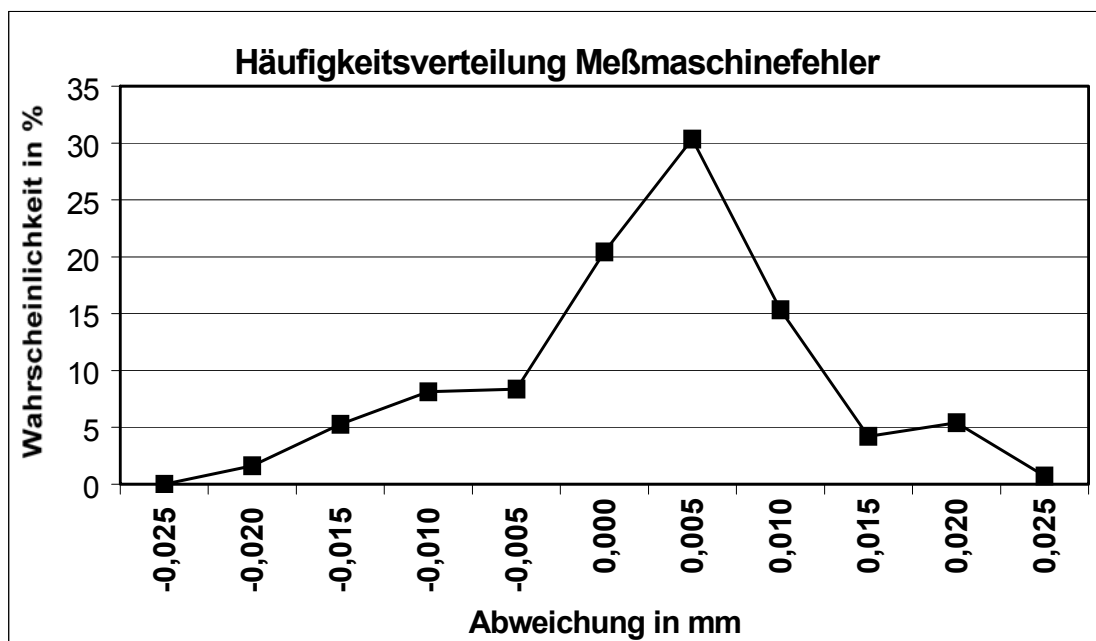


Bild 59: Meßmaschinenfehler

Die mittlere Streuung durch den Meßmaschinenfehler beträgt $s=0,008\text{mm}$.

Da der Meßmaschinenfehler wesentlich kleiner als der Einlegefehler ist, wird auf eine Unterteilung des Meßfehlers in den der Werkstückaufnahme und den der Meßmaschine verzichtet.

In den weiteren Betrachtungen wird für den Meßfehler der Einlegefehler mit einer mittleren Streuung (s) von 0,03mm angenommen.

5.2.1.4 Fehler durch die elastische Verformung

Durch die Schwerkraft unterliegen Blechteile einer elastischen Verformung, daher müssen die Teile entsprechend der späteren Einbaulage gemessen werden. Wenn alle Messungen in der gleichen Einbaulage durchgeführt werden, spielt die elastische Verformung durch das Eigengewicht für die Streuung keine Rolle. Dies ist für den Fall kraftfreier bzw. kraftbegrenzter Aufnahmen gültig.

5.2.1.5 Gesamtfehler

Der gesamte Fehler für die Annahme der Streuung eines Preßteils setzt sich wie folgt zusammen:

Fehler = Vertrauensintervall + Meßfehler

Da den Fehlern Verteilungen zu Grunde liegen, werden diese statistisch addiert und der Fehler mit einer definierten Wahrscheinlichkeit angegeben.

Für die Stichprobengröße $n=100$ und einer Standardabweichung $s_{\text{Messung}}=0,1$ ergibt sich der folgende Fehler.

$$s_{\text{Summe}} = \sqrt{s_{\text{Vertrauensintervall}}^2 + s_{\text{Meßfehler}}^2}$$

Annahme: Normalverteilung

$$s_{\text{Summe}} = \sqrt{0,007^2 + 0,003^2} = 0,0076$$

Um feste Grenzen für den Fehler anzugeben, muß eine Wahrscheinlichkeit für die richtige Bestimmung des Fehlers festgelegt werden. Dafür sind nach Erfahrungswerten 95% ($=\pm 2 \cdot s$) ausreichend genau. Der Fehler ergibt sich für $s_{\text{Messung}}=0,1$ zu

$$\text{Fehler} = \pm 2 \cdot s_{\text{Summe}} = \pm 15\% \text{ mit } 95\% \text{ Vorhersagewahrscheinlichkeit } (\alpha=5\%, n=100)$$

Dies ist im Bild 60 für den Bereich der Stichprobengröße zwischen $n=10$ und $n=500$ aufgetragen.

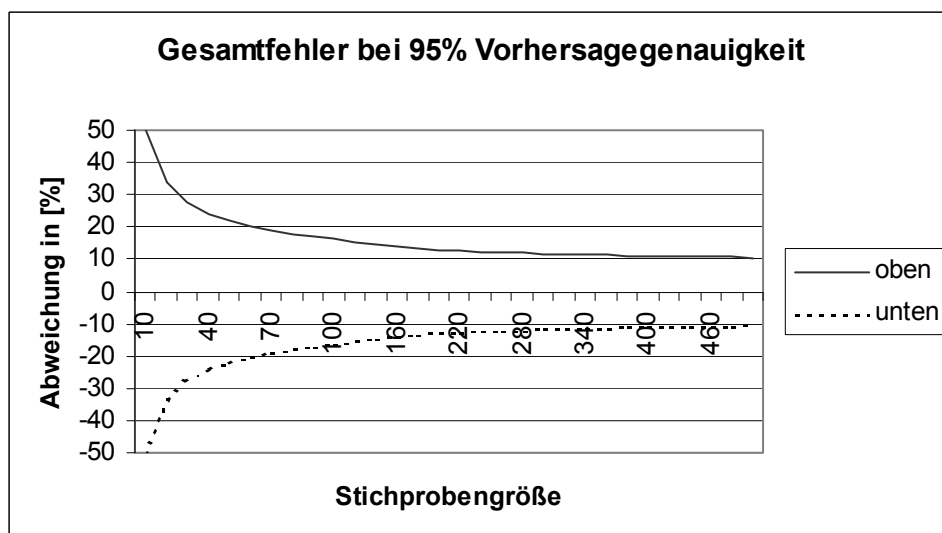


Bild 60: Gesamtfehler

5.2.2 Resultierende Fehler auf Zusammenbau-Ebene

Entscheidend für die Zielsetzung eines maßhaltigen Fahrzeugs ist die Streuung des Zusammenbaus. Daher wird die Auswirkung der Fehler der Einzelteil- / Verfahrens- streuung auf die Streuung des Zusammenbaus (Summe) untersucht.

Vereinfachend werden die Toleranzen linear addiert und keine geometrischen Einflüsse berücksichtigt, da mit diesen jedes beliebige Ergebnis erzeugt werden könnte. Dies wird für die Fälle der Summation von fünf bzw. drei Einzelstreuungen durchgeführt, da die Anzahl der relevanten Beitragsleister meist in diesem Bereich liegt. Die Referenz ist jeweils die Summation von fünf / drei Streuungen mit $\sigma=0,1$. In den Tests 1-5 in Tabelle 4 wird jeweils um 20% nach unten und / oder oben davon abgewichen.

Tabelle 4: Zusammenbaustreuung in Abhängigkeit verschiedener Eingangsfehler

	Referenz	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
Streuung 1	0,1	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Streuung 2	0,1	0,1	0,08	0,08	0,12	0,12
Streuung 3	0,1	0,1	0,1	0,08	0,1	0,08
Streuung 4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,12
Streuung 5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Summe	0,224	0,215	0,207	0,198	0,225	0,227
Abweichung in %		4	7	11	1	2

	Referenz	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
Streuung 1	0,1	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Streuung 2	0,1	0,1	0,08	0,08	0,12	0,12
Streuung 3	0,1	0,1	0,1	0,08	0,1	0,08
Summe	0,173	0,162	0,151	0,139	0,175	0,165
Abweichung in %		6	13	20	1	5

Nur wenn alle Einzelstreuungen in eine Richtung abweichen, ergibt sich der maximale Fehler von 20%. Bei gemischten bzw. nur teilweise abweichenden Einzelstreuungen ist der Fehler wesentlich geringer. Der Effekt ist um so ausgeprägter, je länger die Toleranzkette ist. Dies liegt in der „Gutmütigkeit“ der Addition von Verteilungen.

Alle Einflußfaktoren, die einen Effekt kleiner als 0,1mm haben, können für die Modellbildung zur Ermittlung der Streuung vernachlässigt werden.

5.3 Preßteilstreuungen

Der Themenkomplex Preßteilstreuungen gliedert sich in zwei Bereiche. Zum einen in ein Streuungsvorhersagekonzept und zum anderen in die Art der Tolerierung von Preßteilen.

5.3.1 Streuungsvorhersage

Für Konzeptvergleiche ist die exakte Streuung unerheblich, denn für relative Aussagen können Standardwerte angenommen werden. Für möglichst genaue Streuungsvorhersagen an Zusammenbauten wird eine höhere Genauigkeit der einzelnen Streuungswerte benötigt. Da es zum einen nicht möglich ist, an allen relevanten Stellen aller Bauteile die Streuung durch Meßreihen zu bestimmen und zum anderen diese Bauteile eventuell erst Jahre später gefertigt werden, besteht die Notwendigkeit ein Konzept zu entwickeln, wie die Streuung auf ihre Einflußfaktoren zurückgeführt werden kann.

Mittels des Konzepts zur Streuungsvorhersage sollen Aussagen über die Streuung zweier Geometrieelemente zueinander getroffen werden. Diese Aussagen sollen eine ausreichende Genauigkeit für die Berechnung der Zusammenbaustreuungen besitzen, wenn Geometrie, Material, Bezugsstellen und Fertigungsprozeß bekannt sind.

Die Notwendigkeit der Beziehung zwischen verschiedenen Geometrieelementen entsteht durch einen eventuellen Wechsel der Bezugsstellen von Preßwerk und Rohbau. Um diese Komplexität aufzulösen, werden alle Geometrieelemente auf die Preßwerkbezugsstellen der Erstzugfläche bezogen. Die relative Beziehung ergibt sich aus der Addition der Streuungen beider Geometrieelemente zur Preßwerkbezugsstelle. Im Bild 61 ist als Beispiel die Beziehung zwischen einem Loch und einer Zweitzugfläche hervorgehoben. Diese läßt sich auf die Beziehungen beider zu den Bezugsstellen der Erstzugfläche reduzieren.

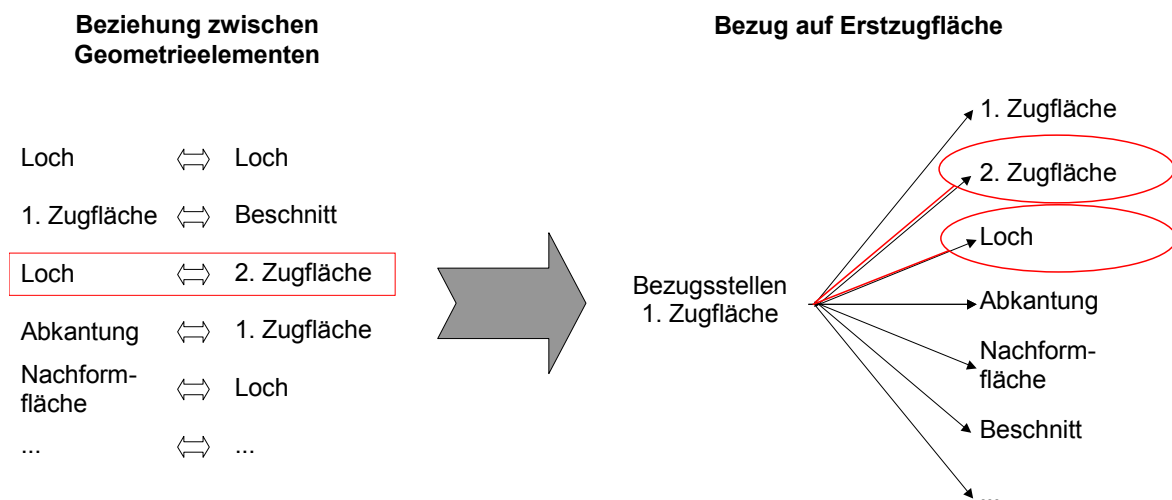


Bild 61: Relative Beziehungen

Dies ist zulässig für den Fall, daß beide Geometrieelemente unabhängig voneinander erzeugt wurden. Werden sie abhängig voneinander erzeugt, z.B. zwei mit dem gleichen Werkzeug erzeugte Löcher, muß eine gesonderte Betrachtung durchgeführt werden.

Ein Preßteil wird heute in automatisierten Pressenstraßen gefertigt, in denen bis zu fünf Stufen, d.h. fünf Pressen, aufeinander folgen. Das folgende Bild zeigt den Ablauf der Operationen bei der Preßteilerfertigung.

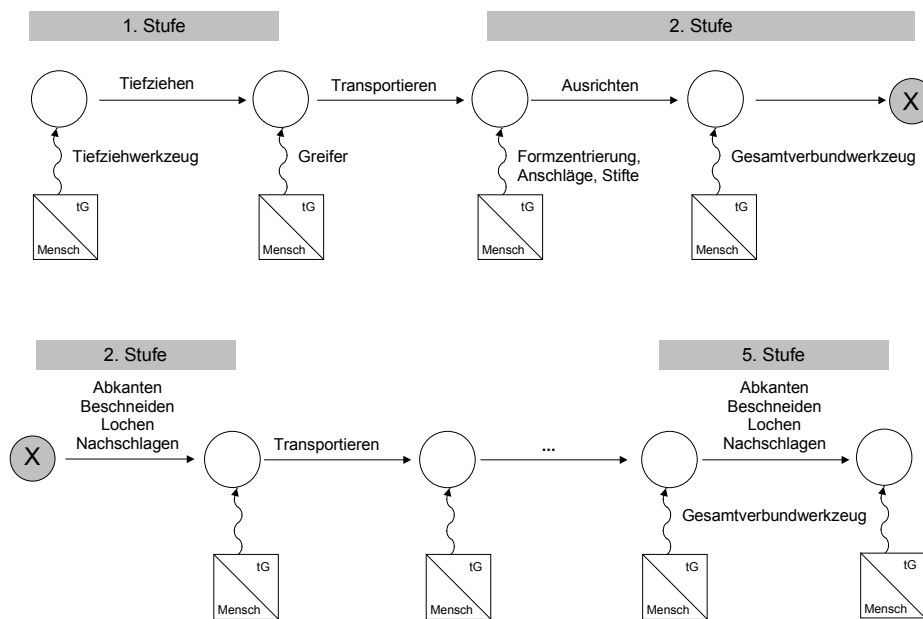


Bild 62: Operationen der Preßteilerfertigung

Drei dieser Operationen haben einen maßgeblichen Einfluß auf die Streuung des Preßteils. Diese sind:

- Tiefziehen
- Kombinierte Operationen (Abkanten, Beschneiden, Lochen und Nachschlagen) im Gesamtverbundwerkzeug
- Ausrichten in jeder Stufe

Dazu sind die für die Streuung relevanten Parameter der geometrieeerzeugenden Verfahren zu bestimmen. Aus diesen Parametern können die Streuungen einer Stufe abgeleitet werden. Hinzu kommen noch die Streuungen, die durch Positionierungsfehler (Ausrichten) von einer Stufe zur nachfolgenden entstehen. Schon hier ist ersichtlich, daß es das Ziel sein sollte, ein Werkstück in möglichst wenig Stufen zu fertigen.

Die Einflußfaktoren auf die Streuung eines Preßteils sind :

Material

- Materialeigenschaften ($R_{p0,2}$, R_m , E-Modul, Querkontraktionszahl, Anisotropiewerte)

Fertigungsprozeß

- Ausrichtgenauigkeit
- Schmierung
- Pressentemperatur
- Art des Umformprozesses bzw. Umformverfahrens
- Niederhalterkräfte
- Maschinengenauigkeit
- Umformgeschwindigkeit (Hubzahl)
- Umformgrad
- Anzahl der Umformstufen

Geometrie

- Geometrie mit Lage zur Umformrichtung
- Geometrische Steifigkeit
- Bezugselemente

Aus diesen Einflußfaktoren müssen die wesentlichen isoliert werden, deren Effekte im sinnvoll meßbaren Bereich liegen. Dazu wird eine Meßreihe an einem Bauteil mit einem Stichprobenumfang $n=100$ untersucht. Die Streuung an den einzelnen Meßpunkten mit ihrem Fehler ist im Diagramm in Bild 63 dargestellt.

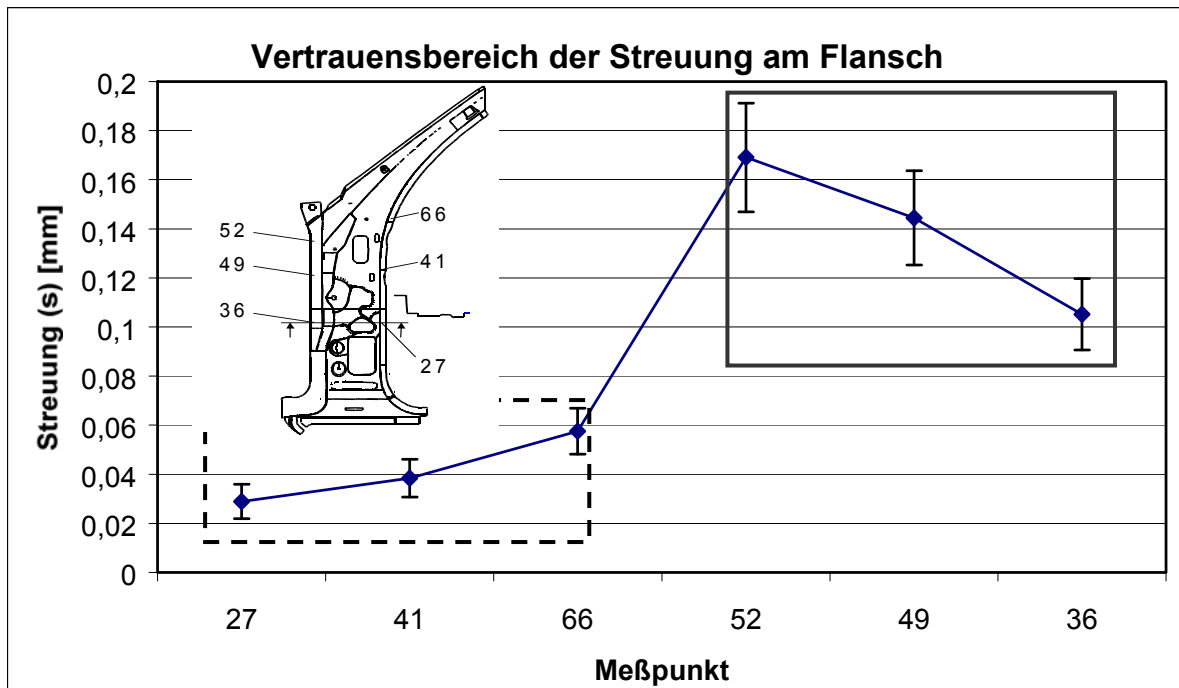


Bild 63: Vertrauensbereiche der Streuung

Bei dem direkten Vergleich der Streuung der Meßpunkte 27, 41, 66 mit 52, 49, 36 wird der starke Einfluß der Geometrie, d.h. der Steifigkeit deutlich, denn die Punkte 36, 49 und 52 streuen auf Grund der größeren Steghöhe wesentlich stärker. Den größten Einfluß haben somit:

- Geometrische Steifigkeit
- Werkstoffparameter: R_m , $R_{p0,2}$, E-Modul, Querkontraktionszahl (vgl. S-Rail aus ST14, ZE340 und AC120, Seite 66)
- Ausrichtgenauigkeit

Unter der Annahme, daß dies die wesentlichen Parameter sind und sich die Verteilungen für die Ausrichtgenauigkeit und Steifigkeit linear superponieren lassen, ergibt sich der folgende Ansatz.

Die Gesamtstreuung ergibt sich aus der geometrischen Summe⁸ der Streuungen aus der Ausrichtgenauigkeit (Verkippung) und der Steifigkeit.

⁸ Root Sum Square; dies entspricht der Verteilungsaddition von Normalverteilungen. Zulässigkeit siehe Kap. 5.2

$$S_{\text{gesamt}} = \sqrt{S_{\text{Verkipfung}}^2 + S_{\text{Steifigkeit}}^2}$$

Da die Funktion für die Streuung in Abhängigkeit von der Steifigkeit nicht bekannt ist, wird sie durch eine Potenzreihe angenähert.

$$S_{\text{Steifigkeit}} = \sum_{i=0}^{\infty} (K_i \cdot \mu^i)$$

Damit ergibt sich die Streuung zu:

$$S = \sqrt{S_{\text{Verkipfung}}^2 + \left[\sum_{i=0}^{\infty} (K_i \cdot \mu^i) \right]^2}$$

Hierin soll S die zu erwartende Streuung sein, $S_{\text{Verkipfung}}$ ist die Streuung des Meßpunkts durch das Verkippen der Bezugsstellen. K_0, \dots, K_{∞} sind Faktoren, die aus dem Zusammenhang zwischen der Streuung und der Auslenkung μ der FEM-Simulation und den Meßreihen gewonnen werden. Die Reihenentwicklung kann bei eins beendet werden, da μ wesentlich kleiner als eins ist und die höheren Potenzen somit gegen Null streben.

Vorgehensweise

1. Überprüfen des Ansatzes an einem S-förmigen Hutprofil (S-Rail) mit verschiedenen Materialien (ST 14, ZE 340, AC120)
2. Anwenden auf ein reales Bauteil
3. Anwenden auf ein weiteres reales, komplexeres Bauteil über mehrere Materialchargen und Werkzeugwechsel hinweg

S-Rail

Das S-Rail wird in einer Pressenstufe hergestellt. Dabei fährt der Stempel nicht ganz in die Matrize ein, sondern stoppt 2mm früher. Die Lage der Bezugsstellen (P1-P6) und Meßpunkte (P7-P16) sind in Bild 64 dargestellt.

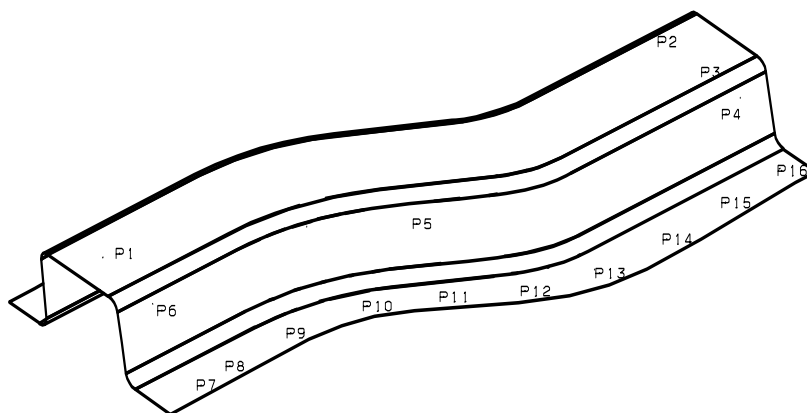


Bild 64: Meßpunkte und Bezugsstellen des S-Rails

Von diesem Bauteil werden pro Werkstoff 34 Teile gemessen. Parallel dazu wird die Verformung an Meßpunkten bei vorgegebener Kraft mittels einer FEM-Rechnung bestimmt. Die Kraft wurde so bestimmt, daß sie bei Stahl eine Verformung im

Bereich der Streuung erzeugt. Sie bleibt für alle weiteren Bauteile und Materialien konstant. Die Größe der zu Beginn gewählten Kraft ist von sekundärer Bedeutung, da bei der FEM-Berechnung ein linearer Ansatz zu Grunde liegt, d.h. es wird angenommen, daß nur elastische Verformungen vorliegen und im gesamten Bereich das Hookesche Gesetz gilt. Das folgende Bild zeigt diese Parameter für das Material ZE 340.

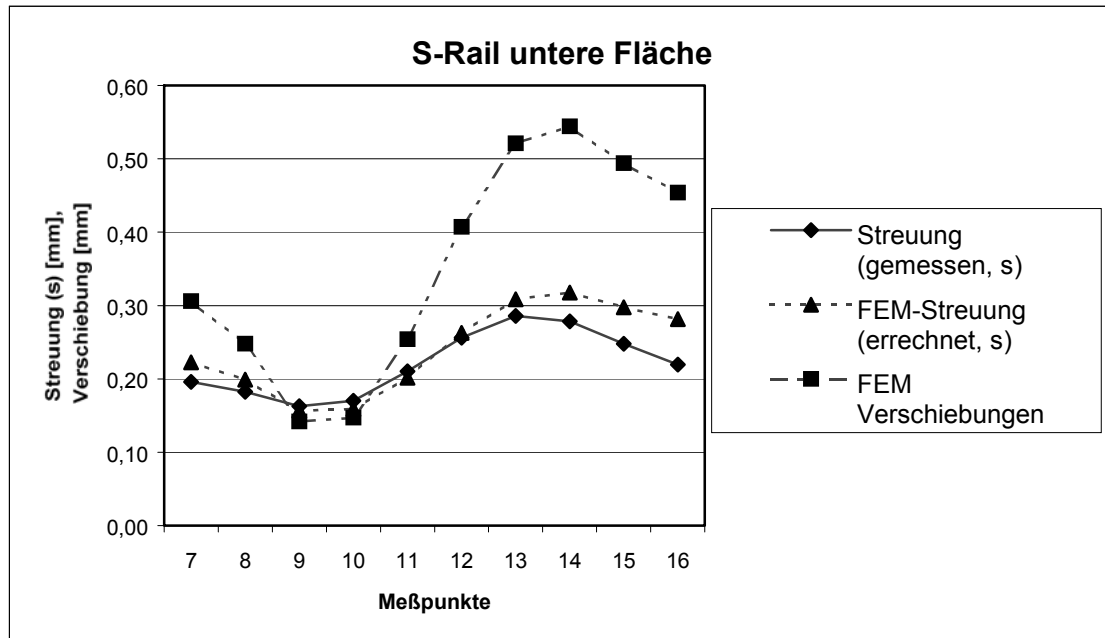


Bild 65: Gegenüberstellung Verschiebung berechneter und gemessener Streuung

Aus diesem Bild ist deutlich der Zusammenhang von Streuung und Steifigkeit zu erkennen. Analoge Gesetzmäßigkeiten gelten ebenso für die anderen Materialien, da ihre gemessenen Streuungsverläufe ähnlich sind. Dabei ist zu beachten, daß für verschiedene Materialien andere Parameter K_i gelten.

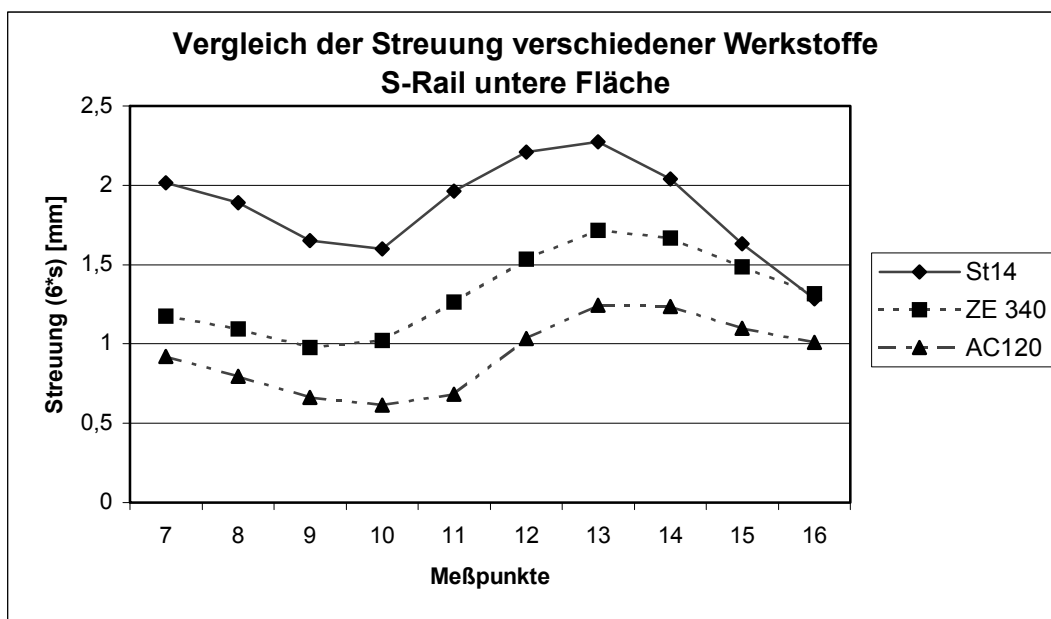


Bild 66: Gemessene Streuungen verschiedener Materialien

Damit ist die prinzipielle Anwendbarkeit des Konzepts belegt. Zur Verifizierung wird die A-Säule (innen oben) eines Fahrzeugs als komplexes, mehrstufig hergestelltes Bauteil betrachtet.

A-Säule (innen oben)

Die A-Säule wird in drei Stufen aus ZE 340 hergestellt. Die Lage der Bezugsstellen (NR1-6) und Meßpunkte (L1-L32) veranschaulicht Bild 67.

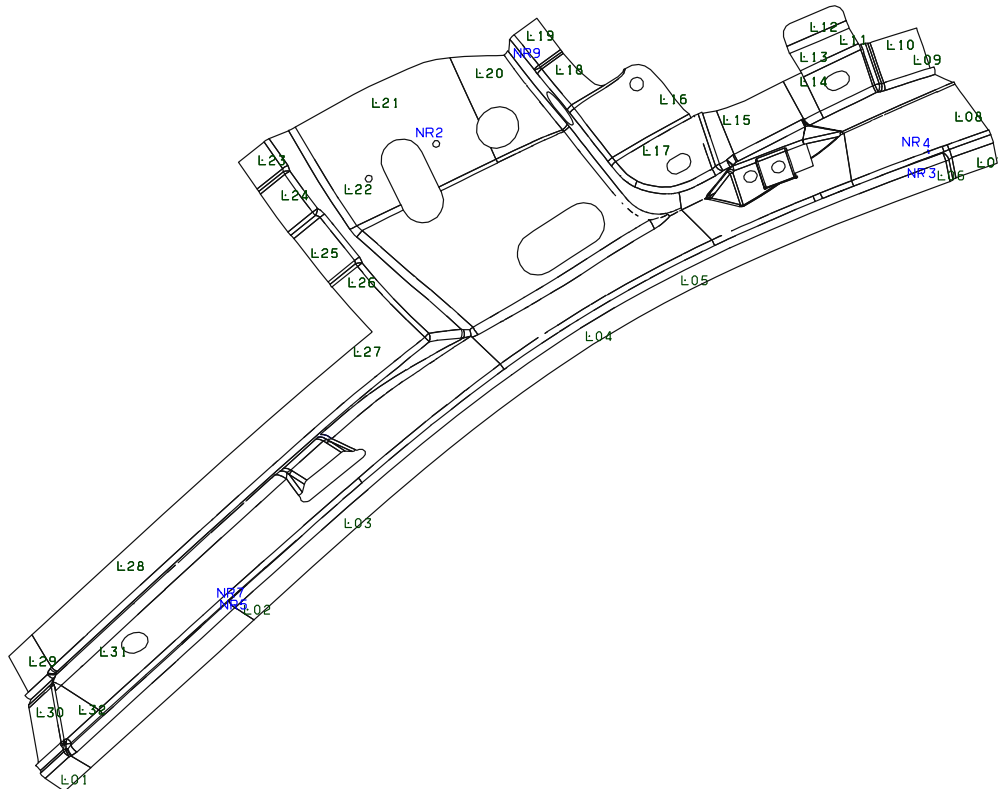


Bild 67: Lage der Meßpunkte und Bezugsstellen der A-Säule innen oben

Die Bezugsstellen bilden die Einspannungen für das FEM-Modell, die Meßpunkte stellen die Lastfälle dar. Aus dem folgenden Bild ist die Güte des Netzes erkennbar.

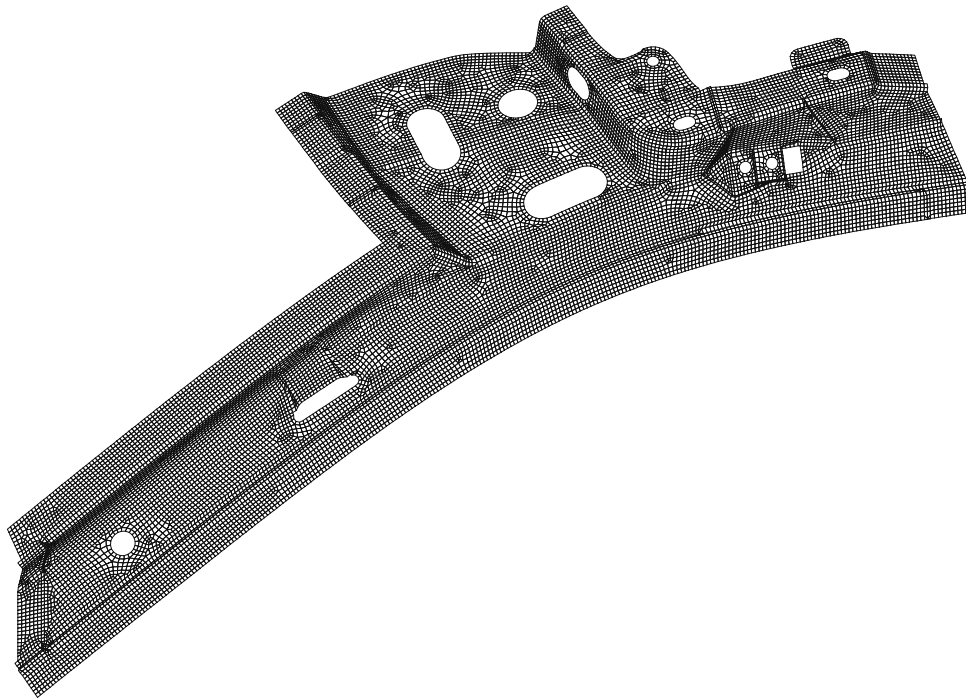


Bild 68: FEM-Netz mit durchschnittlicher Kantenlänge von 2mm

In Bild 69 sind die gemessene Streuung, die FEM-Verschiebungen und Streuungen durch die Verkippung der Bezugsstellen dargestellt. Der Fehlerbalken der gemessenen Streuung entspricht dem Gesamtfehler zur Bestimmung der Streuung (vgl. Kap. 5.2).

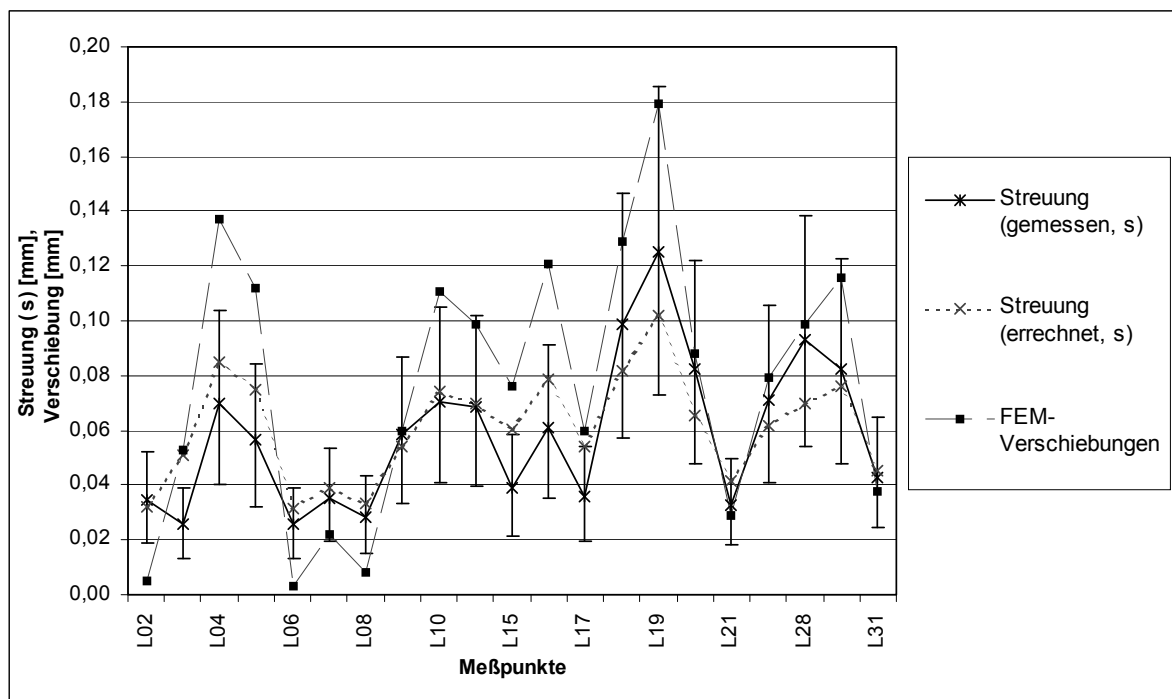


Bild 69: Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Streuungen, bereinigt

Dieser Ansatz zur Streuungsvorhersage läßt sich gut verwenden, um Fehler im Fertigungsprozeß aufzudecken. Die teilweise nicht so gute Überdeckung zwischen Messung und Realität wurde mit Hilfe einer Messung nach jeder Stufe untersucht.

Dadurch wurde ein Positionsfehler des Nachschlagewerkzeugs gefunden, der einen Verzug des Preßteils bewirkte.

Bei einem Vergleich der Streuungen und FEM-Verschiebungen des S-Rails und der A-Säule fällt auf, daß die A-Säule wesentlich geringere Streuungen aufweist, die durch die geringeren Verschiebungen (höhere Steifigkeit) verursacht werden.

Zur Bestimmung des Einflusses verschiedener Chargen wird die A-Säule (unten) über mehrere Chargen hinweg mit einer Stichprobengröße größer als 100 Stück gemessen. Zwischen den einzelnen Chargen findet ein Werkzeugwechsel und Materialwechsel statt. Die Meßpunkte sind auf Flanschen und Schnitten am Bauteil angeordnet.

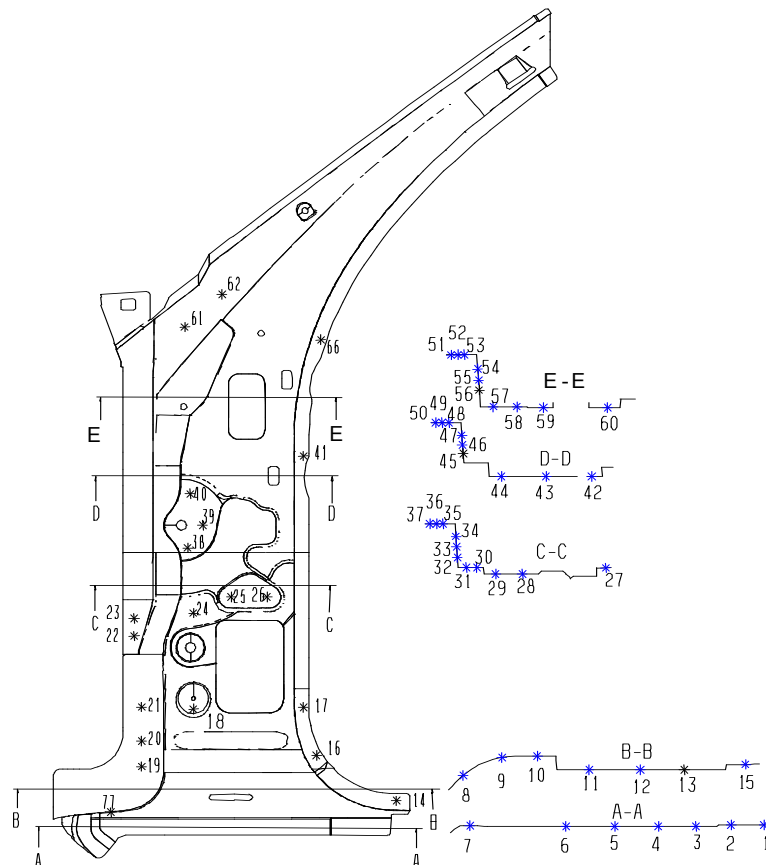


Bild 70: Meßpunkte der A-Säule (unten)

Die Meßergebnisse des Schnitts E-E sind exemplarisch in dem nächsten Diagramm (Bild 71) dargestellt. Die übrigen Meßergebnisse und die Streuungsvorhersage finden sich im Anhang F.

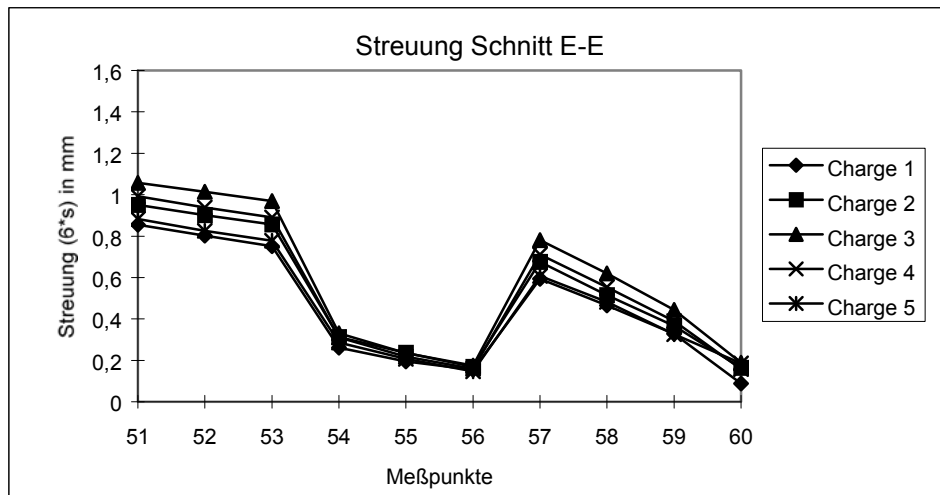


Bild 71: Vergleichende Streuung von fünf Chargen

Die geringe Abweichung der Streuung der einzelnen Chargen zueinander fällt auf. Die einzelnen Streuungen unterscheiden sich um weniger als 20% und in dieser Größenordnung liegt der Fehler zur Bestimmung der Streuung (vgl. Kap. 5.2).

Anders verhält sich der Mittelwert an den einzelnen Meßpunkten. Dies zeigt für den gleichen Schnitt Bild 72.

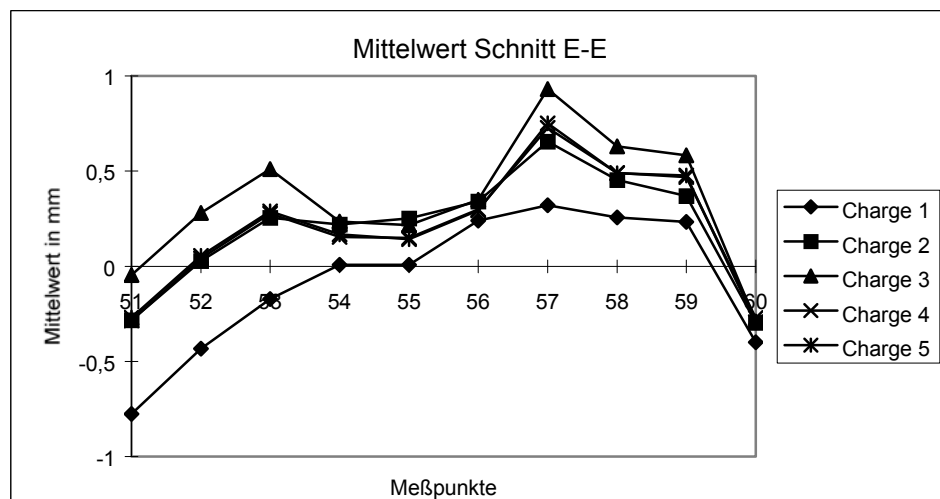


Bild 72: Vergleichende Mittelwerte von fünf Chargen

Die Unterschiede hier sind auf jeweils einen Werkzeugwechsel sowie unterschiedliches Material zurückzuführen.

Aus dieser Erkenntnis erwächst die Notwendigkeit die gängige Tolerierungspraxis zu ändern.

5.3.2 Art der Tolerierung

Bislang werden die Flächen mit der Toleranz „Profil einer Fläche“ versehen. Im folgenden Beispiel ist ein typischer Fall dargestellt.

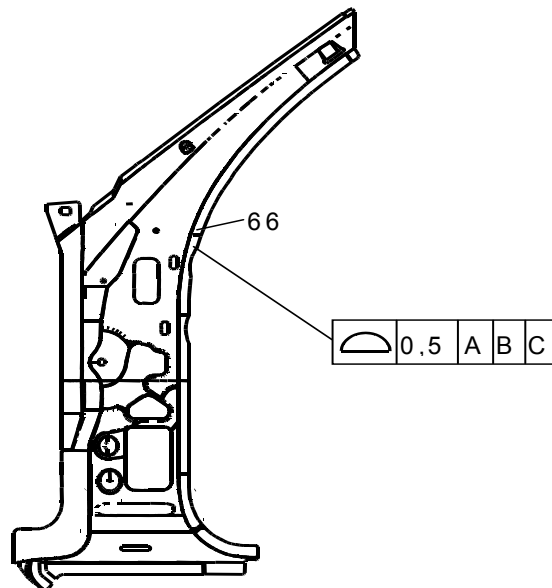


Bild 73: Toleranz an einem Preßteil

Der Toleranzeintrag bedeutet, daß der Flansch um $\pm 0,25\text{mm}$ gegenüber seiner CAD-NULL-Lage streuen kann. Messungen belegen, daß die tatsächliche Streuung wesentlich kleiner ist. Am Meßpunkt 66, der exemplarisch im nächsten Bild dargestellt ist, beträgt der Streubereich $6 \cdot s = 0,3\text{mm}$.

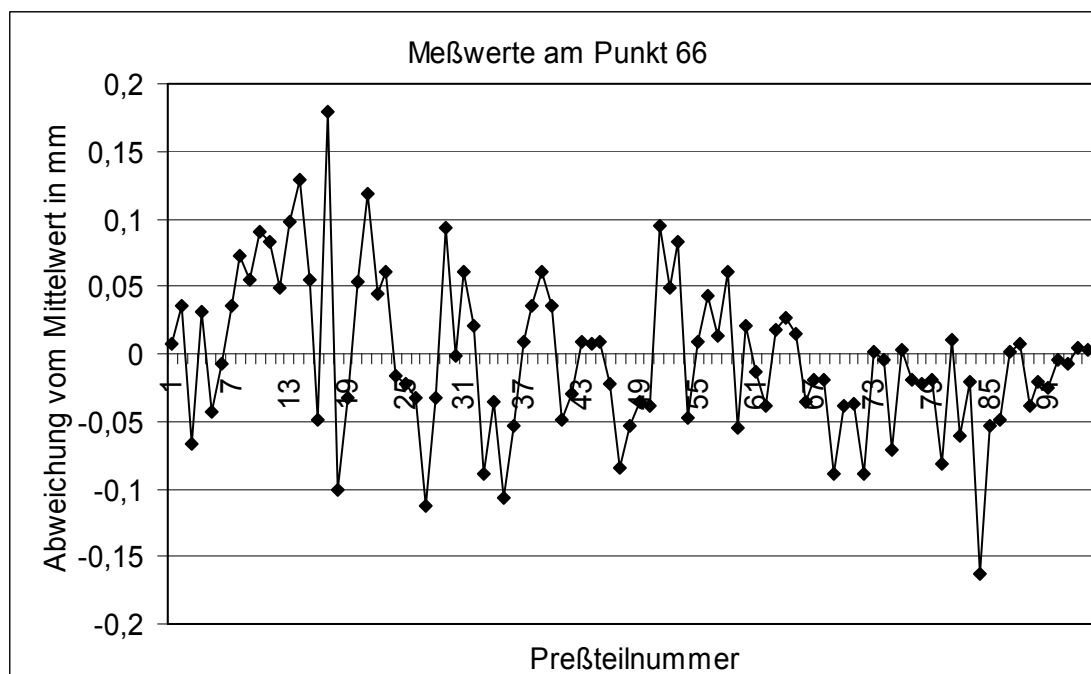


Bild 74: Meßwerte an einem Meßpunkt über mehrere Preßteile

Die Differenz zu dem Toleranzwert wird benötigt, damit der Mittelwert innerhalb des Toleranzbands liegt. Mit der zu Grunde liegenden Art der Tolerierung berechnet die Toleranzanalyse nicht das richtige Ergebnis und die Realität verhält sich ebenfalls

nicht der Tolerierung entsprechend. Als Konsequenz muß die Tolerierung geändert werden.

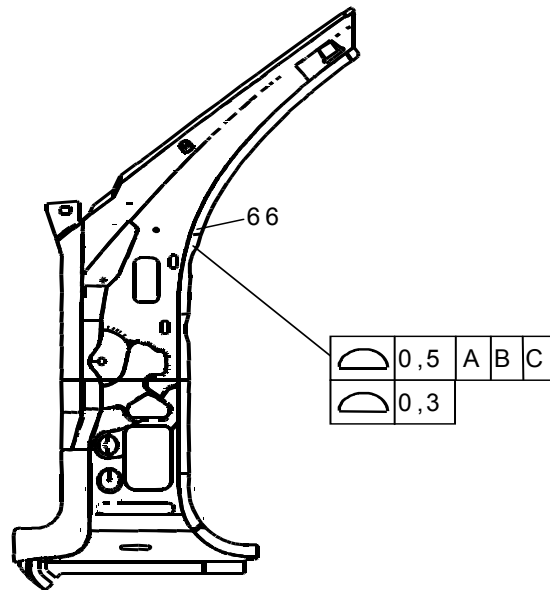


Bild 75: Kombinierte Tolerierung

Dies bedeutet, daß die Geometrie um 0,3mm in einem Gesamtband von 0,5mm streut. Die Methode der kombinierten Tolerierung entspricht somit wesentlich besser den realen Meßergebnissen.

5.4 Rohbaustreuungen

Im Rohbau werden aus Einzelteilen bzw. Unterzusammenbauten durch Fügen Zusammenbauten hergestellt. Dieser Ablauf ist schematisch im nächsten Bild dargestellt.

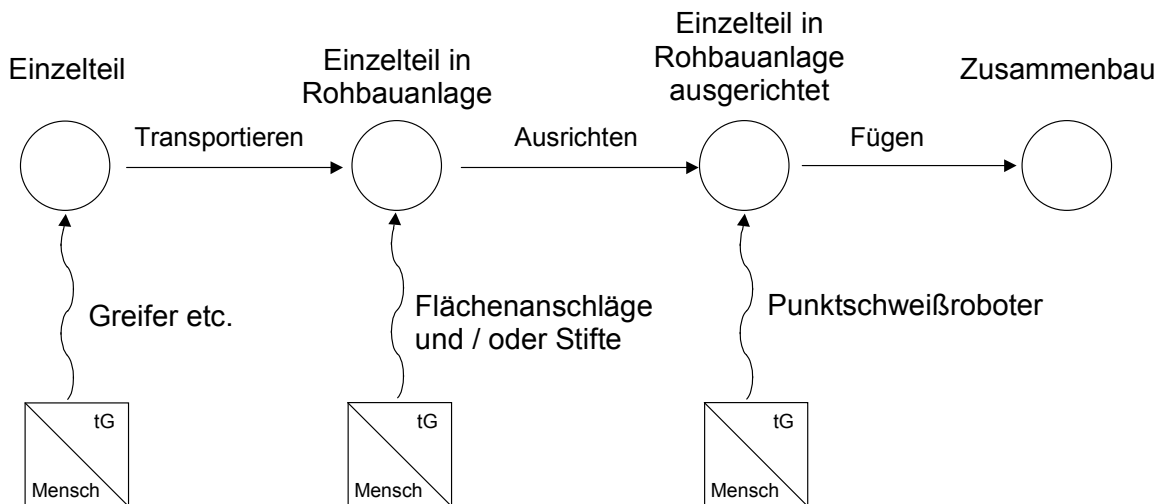


Bild 76: Rohbauprozess

Für die Streuung des Zusammenbaus gibt es zwei Ursachen:

1. Aufnahme und Ausrichtung der Teile
2. Effekte des Fügeverfahrens

Die Effekte des Fügeverfahrens werden vernachlässigt, da bewußt Verfahren wie z.B. Punktschweißen mit möglichst geringen Toleranzeffekten verwendet werden.

Zur Aufnahme werden in der Regel Loch-Stift-Paarungen oder flächige Anschläge mit Spannern verwendet. Die Streuung der beiden Möglichkeiten ergibt sich bei Normalverteilungsannahme zu:

Loch-Stift-Paarung

$$s_{\text{Ausrichtung}} = \sqrt{s_{\text{Lage im Lochspiel}}^2 + s_{\text{Position des Stifts}}^2 + s_{\text{Position des Lochs}}^2}$$

$$\text{mit } s_{\text{Lage im Lochspiel}} = \sqrt{s_{\text{Durchmesser, Loch}}^2 + s_{\text{Durchmesser, Stift}}^2 + \left(\frac{d_{\text{Loch}} - d_{\text{Stift}}}{6}\right)^2}$$

Der Term $(d_{\text{Loch}} - d_{\text{Stift}})/6$ entspricht der Nominalspielstreuung unter der Annahme, daß eine Normalverteilung mit $6 \cdot s$ zu Grunde liegt.

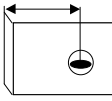
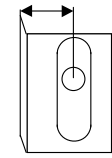
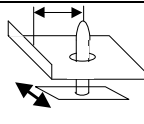
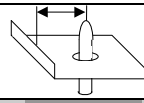


Flächige Anschläge mit Spannern

$$s_{\text{Ausrichtung}} = \sqrt{s_{\text{Position des Anschlags}}^2 + s_{\text{Profil einer Fläche, Anschlag}}^2 + s_{\text{Profil einer Fläche, Preßteil}}^2}$$

Die einzelnen Streuungsterme müssen daraufhin untersucht werden, ob Streuungen tatsächlich vorliegen. Im Fall einer Positionstoleranz eines Stifts von z.B. 0,2mm tritt bei wiederholter Verwendung dieses Stifts keine Streuung, sondern nur eine Mittelwertverschiebung auf. Werden für diese Paarung viele verschiedene Stifte verwendet, geht die Toleranz in die Streuung ein.

Tabelle 5 enthält alle erforderlichen Informationen zur Loch-Stift-Paarung.

Tabelle 5: Stift in der Anlage (Positionierung im Fahrzeugnetz)

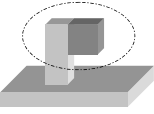
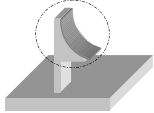
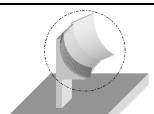
Bezeichnung	Skizze	Minimales Lochspiel [mm]	Durchmessertoleranz des Stifts [mm]	Positionstoleranz des Stifts in der Anlage		Bereich der Querverschiebbarkeit im Loch [mm]	Verfahrensgrenzen	Zusätzliche Aufwendungen
				starr [mm]	herausfahrbare [mm]			
Schwertstift		0,1	0,05	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	< 2	Nur bedingt in Untergruppen ohne Funktion; Beschädigungen => nicht für Lackablauflöcher, die wasserdicht verschlossen werden müssen	Richtarbeiten je nach Materialstärke und Einsatzort notwendig
Langlochaufnahme		0,1	0,05	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	± 2	Beschädigung auf der langen Fläche bei großen Kräften, Kosten, Baugröße	
Schwimmender Stift		0,1	0,05	$\pm 0,15$	$\pm 0,2$	± 2	Bauraum	teuer
Runder Stift		0,1	0,05	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	-		
Kegelstift		-	-	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$		werden vermieden	
Spreizstift		-	-	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$			

Bei der prozeßsicheren Verwendung von Stiften ist generell folgendes zu beachten:

- Mindestblechdicke 0,88mm, um Lochbeschädigungen zu vermeiden
- Kragenlöcher oder Doppler, falls dünnere Bleche verwendet werden
- Einfädelautomatik bei Stiftdurchmessern kleiner als 20mm, damit das Teil prozeßsicher in die Anlage eingelegt werden kann

Die flächigen Anschläge unterteilen sich gemäß der Krümmung ihrer Kontaktfläche, die relevanten Informationen sind in der nachstehenden Tabelle enthalten.

Tabelle 6: Flächige Anschläge

Bezeichnung	Skizze	Toleranz	
		Profil einer Fläche [mm]	Position [mm]
Ebenes Formstück		0,1 ... 0,5	0,1 ... 0,2
1-D gekrümmtes Formstück		0,1 ... -0,5	0,1 ... 0,2
2-D gekrümmtes Formstück		0,1 ... 0,5	0,1 ... 0,2

Bei Anschlägen ist in der Regel die Verwendung von Spannern erforderlich, damit das Bauteil auch wirklich am Anschlag anliegt.

Liegt eine kombinierte Aufnahme vor, bei der sowohl durch ein Loch und eine Form aufgenommen wird, muß genau geprüft werden wodurch die Positionierung erfolgt.

In der Regel dient das Loch der Vorzentrierung und die Fläche bestimmt die exakte Position (Bild 77). In diesem Fall ist dem Katalog der Wert für eine Formaufnahme zu entnehmen.

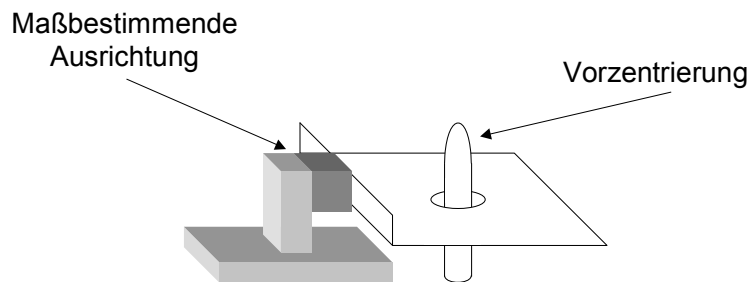


Bild 77: Kombinierte Aufnahme

6 Optimierungsstrategien

Durch Optimierungsstrategien soll die Konstruktion weniger anfällig gegen die Auswirkungen von Toleranzen gestaltet werden. Für diese Strategien gibt es zwei mögliche Anwender.

- Der für ein Einzelteil oder Zusammenbau verantwortliche Konstrukteur
- Die das Toleranzmanagement durchführende Arbeitsgruppe

Bild 78 zeigt schematisch die Anwendung der Optimierungsstrategien auf einen Teilausschnitt des Entwicklungsprozesses.

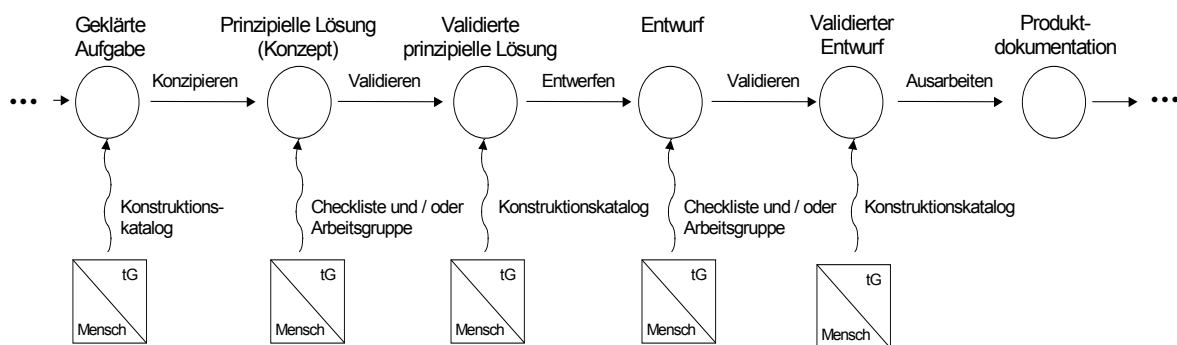


Bild 78: Anwendung der Optimierungsstrategien durch den Konstrukteur

Dieser Prozeß beinhaltet den kreativen Anteil des Konzipierens und Entwerfens. Mittels Konstruktionskatalogen kann der Konstrukteur bei diesen Tätigkeiten unterstützt werden. Für die überprüfenden Operationen gibt es im wesentlichen zwei Arten der Unterstützung; zum einen können Checklisten eingesetzt werden, zum anderen kann die Arbeitsgruppe (vgl. Kap. 3) die Überprüfung durchführen und Verbesserungsvorschläge unterbreiten.

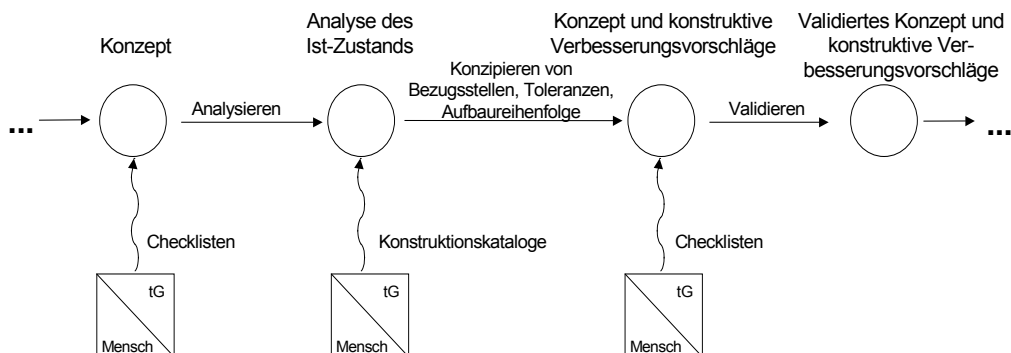


Bild 79: Anwendung der Optimierungsstrategien durch die interdisziplinäre Arbeitsgruppe

In diesem Fall führt die Arbeitsgruppe zunächst eine Ist-Zustandsanalyse durch. In einem kreativen Schritt werden die zusätzlich erforderlichen Informationen generiert und die Verbesserungsvorschläge erarbeitet. Nach einer Validierung fließen die Ergebnisse zum Konstrukteur zurück.

Beiden Anwendungsgebieten ist gemeinsam, daß mit Checklisten sowohl Konstruktionsüberprüfungen durchgeführt werden können als auch die Kreativität angeregt wird und mit Konstruktionskatalogen kreative Tätigkeiten zur Lösungsfindung unterstützt werden, wenn sie entsprechend verwendet werden z.B. beim Browsen. Eine Kreativitätseinengung findet nur statt, wenn rein über den Zugriffsteil Lösungen gesucht werden.

Beide Hilfsmittel werden unter dem Gesichtspunkt des Toleranzmanagements entwickelt. Doch zuvor werden die allgemeinen Prinzipien des toleranzgerechten Konstruierens vorgestellt.

6.1 Generelle Prinzipien des toleranzgerechten Konstruierens

Steife Bauteile

Messungen haben ergeben, daß Bauteilsteifigkeit und Streuung im Zusammenhang stehen. Daher ist in toleranzkritischer Richtung eine möglichst hohe Steifigkeit anzustreben, bzw. im allgemeinen durch die Formgebung eine möglichst hohe Steifigkeit zu erzielen (vgl. Kap. 5.3.1).

Großvolumige MAG-Nähte

Beim MAG-Schweißen kann ein Toleranzausgleich durch das große Volumen der Naht erzielt werden. Dabei muß die Gefahr des Schweißverzugs durch die hohe Wärmeeinbringung berücksichtigt werden. Beispielsweise kann ein solcher Toleranzausgleich bei der Anbindung des Frontmodulträgers an den Längsträger vorgesehen werden. Die angeschweißte Haltekonsole kann in allen Raumrichtungen freipositioniert werden, bevor sie geschweißt wird.

6.2 Checklisten

Mit Hilfe von Checklisten können Konstruktionen auf die Erfüllung bestimmter Anforderungen hin geprüft werden. Durch Fragen werden Denkprozeß und Intuition ange-regt [Pah-97].

Checklisten sind nur dann zweckmäßig, wenn sie auch längere Zeit aktuell bleiben. Deshalb sollten für das entsprechende Gebiet nur allgemeingültige Prinzipien enthal-ten sein. Für einen einfachen Einsatz sollte ihr Umfang überschaubar sein. Umfang-reiche Listen wirken ermüdend und verringern daher die Akzeptanz der Anwender. Checklisten sollten nach Möglichkeit leicht einprägsam sein und den Denkprozeß des Anwenders so steuern, daß er ohne weitere Hilfsmittel von sich aus auf die wesentlichen Fragen stößt [Pah-97].

Ziel ist es, den Konstrukteur auf die wesentlichen Punkte der toleranzgerechten Gestaltung aufmerksam zu machen sowie Fehler und Probleme mit Hilfe der Check-liste zu erkennen. Die vollständige Abdeckung des Lösungsspektrums ist dann im nächsten Schritt mit Hilfe der Konstruktionskataloge möglich.

Zur Erstellung der Checkliste wurde der Produktionsprozeß im Karosseriebau auf wichtige, nach Möglichkeit wiederkehrende Merkmale der toleranzgerechten Gestal-tung hin untersucht. Weiterhin wurden bestehende Checklisten aus der Literatur auf ihre Gültigkeit für die toleranzgerechte Gestaltung von Karosserien überprüft [Ehr-79], [Koh-95], [Rot-94]. Aus den gefundenen Merkmalen wurden anschließend die Fragen gebildet. Sie sind nach den Funktionen der Produktionsprozeßkette Karosse-riebau (s.a. Bild 80) geordnet. Prinzipien, welche für mehrere Funktionen relevant sind, werden nur einmal unter dem Stichpunkt „Allgemein“ erwähnt, um den Umfang der Checkliste zu begrenzen.

Zur Überprüfung einer Konstruktion, sowohl eines Einzelteils, als auch eines Zu-sammenbaus, sollte die komplette Checkliste durchgearbeitet werden. Die Be-schränkung auf einzelne Punkte ist nicht sinnvoll, da Streuungen während des ge-samten Produktionsprozesses entstehen.

Die Checkliste ist im Anhang D aufgeführt.

6.3 Konstruktionskataloge

Mit Konstruktionskatalogen lassen sich mehrere Aufgaben lösen [Rot-94]:

- Vergrößern des Spektrums möglicher Lösungen
- Erleichtern der Auswahl besonders geeigneter Lösungen
- Unterstützen des systematischen und gezielten Vorgehens

Zur generellen und optimalen Verfügbarkeit von toleranzgerechten Gestaltungsregeln im Karosseriebau wurden für die vorliegende Arbeit Gestaltungsregeln aus der Literatur und der industriellen Praxis abgeleitet sowie neue Regeln generiert und in Form von Konstruktionskatalogen gesammelt.

6.3.1 Aufbau der Konstruktionskataloge

Der im Folgenden beschriebene Aufbau der Konstruktionskataloge gliedert sich in die Einteilung in verschiedene Kataloge sowie den prinzipiellen Aufbau der einzelnen.

6.3.1.1 Gliederung in verschiedene Kataloge

Der Aufbau der Konstruktionskataloge orientiert sich am Produktionsprozesses im Karosseriebau, der in dem folgenden Bild dargestellt ist.

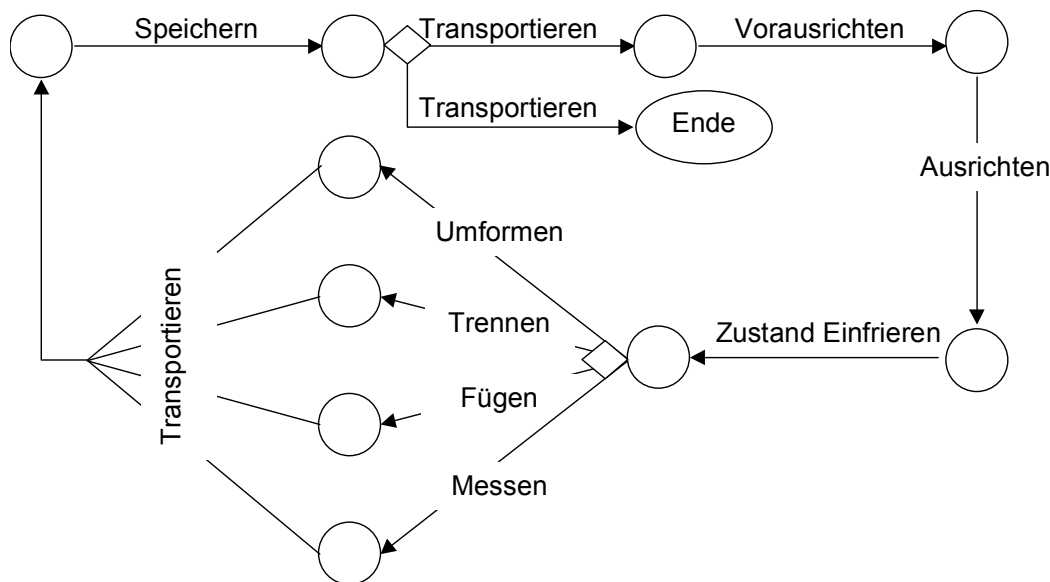


Bild 80: Produktionsprozesskette Karosseriebau

Die verwendeten Bezeichnungen für die Operationen orientieren sich an der Normung. Es wurde lediglich stellenweise zur leichteren Verständlichkeit in der betrieblichen Praxis davon abgewichen. Die verschiedenen Operationen werden nacheinander durchlaufen, wobei zur Fertigung eines Einzelteils oder Zusammenbaus i.a. mehrere Iterationszyklen durchlaufen werden. Ausgangspunkt ist das gespeicherte Blechcoil, Halbzeug, Einzelteil oder der Zusammenbau. Daran schließt sich der

Transport an. Unter Transportieren wird hier das Bewegen eines Teils von seinem Ausgangsort zur Maschine verstanden. In der Anlage wird das Teil nicht maßbestimmend vorausgerichtet. Bei der anschließenden Operation des Ausrichtens wird das Teil in die maßbestimmende Lage gebracht, dieser Zustand wird dann eingefroren. Es schließen sich nun alternativ die Operationen Umformen, Trennen, Fügen, Messen oder Beschichten an, bei denen die Geometrie beeinflusst oder überprüft wird. Nachdem die jeweilige Operation beendet ist, werden die Teile zum erneuten Vorausrichten oder zum Speichern transportiert.

Die Unterteilung der Produktionsprozesskette in der oben genannten Form ist für eine Untergliederung der vorhandenen Beispiele gut geeignet, da die Fertigung einer Fahrzeugkarosserie mit den genannten Operationen komplett beschrieben werden kann. Die Untergliederung mit den genannten Merkmalen ist abzählbar und eindeutig.

Zu allen Prozessschritten wurde ein Übersichtskatalog erstellt. In jedem Übersichtskatalog wird ein breites Spektrum von Lösungen erfaßt. Die Kataloge Ausrichten und Umformen erfordern wegen ihres Umfangs eine Untergliederung in Detailkataloge.

6.3.1.2 Gliederungsteil

Um die Gliederungsmerkmale und -werte zu finden, die sich zur eindeutigen Gliederung der Gestaltungsregeln eignen, wurden alle Regeln, die thematisch einem Prozessschritt zuzuordnen sind, auf ihre Gemeinsamkeiten und ihre Unterschiede untersucht. Um ein möglichst vollständiges Feld von Merkmalen zu erhalten, wurde neben der Methode des Brainstormings auch eine Tabelle mit Gliederungs- und Zugriffsmerkmalen zu Hilfe genommen [Die-81], sowie die Fachliteratur auf weitere Merkmale hin untersucht.

In den Gliederungseigenschaften müssen die wesentlichen Eigenschaften der Gestaltungsregeln erfaßt werden. Die Gliederung der Kataloge wurde nach Möglichkeit hierarchisch mit der Verfahrensart auf der ersten Gliederungsebene durchgeführt. Die verschiedenen Verfahren wurden entsprechenden Normen oder Richtlinien entnommen und sind somit vollständig. Auf der nächsten Ebene wurde die Region als Gliederungsmerkmal verwendet. Die relevanten Regionen sind im allgemeinen Bauteil und Vorrichtung. Auf der dritten Gliederungsebene wurden generelle Eigenschaften der Gestaltungsregeln zur Untergliederung verwendet. Dies können zum Beispiel Verahreigenschaften sein. Auf dieser Ebene ist die Vollständigkeit der Gliederungswerte nicht in jedem Fall eindeutig nachweisbar, da die meisten technischen Objekte von einer Vielzahl von Eigenschaften beschrieben werden. Allerdings wurde Wert darauf gelegt alle Merkmale zu erfassen, die die Toleranzproblematik im vorliegenden Fall vollständig beschreiben.

Um noch eine weitere Untergliederung der Gestaltungsregeln vornehmen zu können, wurden spezielle Eigenschaften, wie z.B. Geometrieelemente oder Anzahl der Fügestellen, verwendet. Für die Vollständigkeit der Werte gilt analog zur dritten Gliederungsebene, daß versucht wurde, alle toleranzrelevanten Werte zu erfassen. Aufgrund der Vielzahl möglicher Werte ist dies aber nicht immer realisierbar. Zur besse-

ren Verdeutlichung sind hier noch einmal die Untergliederungsebenen der Gestaltungsregeln dargestellt.

Tabelle 7: Gliederungskonzept der Konstruktionskataloge

Gliederungsebene	Einsatzbereich	Beispiel
Prozeßschritt	Übersichtskataloge	Ausrichten, Umformen
Verfahrensart	Detailkatalog	Teile auf Teil, Ziehen
Verfahrensart	Gliederungsteil	Umformen, Schweißen
Region	Gliederungsteil	Vorrichtung, Bauteil
generelle Eigenschaften	Gliederungsteil	Verfahrenseigenschaften
spezielle Eigenschaften	Gliederungsteil	Geometrieelemente, Anzahl der Fügestellen

Nicht in jedem Fall ist allerdings eine Unterteilung der Gestaltungsregeln in fünf bzw. sechs Ebenen notwendig. Aus diesem Grund wurden für einige Kataloge nur ein Teil der Gliederungsebenen verwendet.

6.3.1.3 Hauptteil

Im Hauptteil der Konstruktionskataloge sind die eigentlichen Informationen gesammelt. Sie bestehen aus einer textuellen Gestaltungsregel und einer Skizze. Für Optimierungsregeln bietet sich die Vorher-Nachher-Darstellung an. Der Aufbau nach Koller [Kol-95] (vgl. Kap. 2, Stand der Technik) hat sich bei Untersuchungen des Anwenderverhaltens als nicht optimal erwiesen, da die Testanwender sofort auf die Beispiele geschaut und die textuelle Gestaltungsregel somit übersprungen haben. Die Testpersonen waren die Teilnehmer eines interdisziplinär zusammengesetzten Toleranzarbeitskreises, da sie u.a. die potentiellen Anwender sind. Dabei wurden ca. 50 Personen befragt. In einer Funktionsdarstellung (Ausgangszustand, Gestaltungsregel, optimierter Zustand) hingegen wird die Gestaltungsregel vom Anwender wesentlich stärker wahrgenommen.

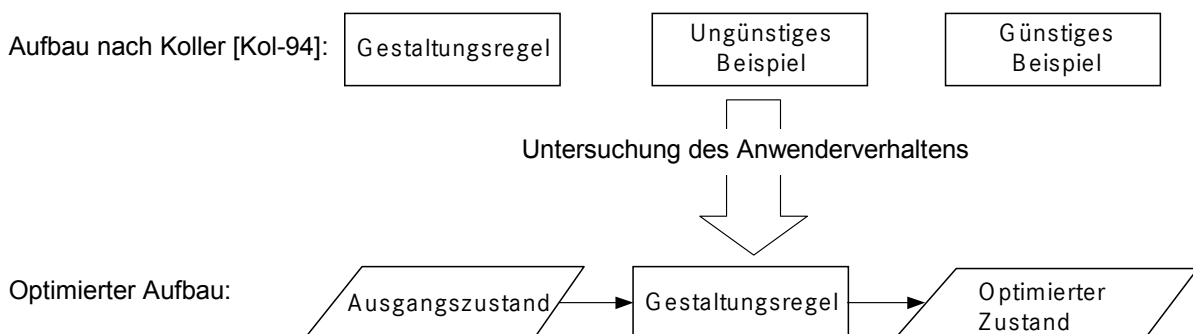


Bild 81: Unterteilung des Hauptteils als Nachbildung des Optimierungsprozesses

Der Grund für die gewollt starke Betonung der Gestaltungsregel beruht auf der Tatsache, daß die Gestaltungsregel einen größeren Bereich abdeckt als die flankierenden Skizzen.

6.3.1.4 Zugriffsteil

Im Gegensatz zu Gliederungs- und Hauptteil der Konstruktionskataloge, die formal streng gehandhabt werden müssen, kann der Zugriffsteil eher an die Bedürfnisse des Anwenders angepaßt werden [Rot-94]. Er soll dem Anwender das Auffinden der für ihn relevanten Lösung mittels des Ausschlußverfahrens erleichtern.

Für den Anwender der Konstruktionskataloge zum toleranzgerechten Gestalten im Karosseriebau ist in erster Linie wichtig zu wissen, welche Arten von Toleranzen mit einer Gestaltungsregel beeinflusst werden können. Es wurden für den Zugriffsteil der Konstruktionskataloge deshalb Zugriffsmerkmale gewählt, die das Optimierungspotential der einzelnen Toleranzarten aufzeigen, siehe auch Bild 82.




Profil einer Linie bezogen auf A, B, C		x	A	B	C
Profil einer Fläche bezogen auf A, B, C		x	A	B	C
Position bezogen auf A, B, C		x	A	B	C

Bild 82: Toleranzbezeichnungen für Form- und Lagetoleranzen

Zu diesen Form- und Lagetoleranzen kommen noch die Maßtoleranzen hinzu. Mit den entsprechenden Regeln können Länge und Winkel optimiert werden. Die genannten Zugriffsmerkmale wurden mit den dazugehörigen Toleranzsymbolen im Konstruktionskatalog dokumentiert und unter der Bezeichnung Toleranzoptimierung zusammengefaßt.

Weiterhin wurde die Möglichkeit der Beeinflussung von Streuungen in den Zugriffsteil der Konstruktionskataloge aufgenommen. Die drei Möglichkeiten sind:

- Streuungen vermeiden
- Streuungen ausgleichen
- Streuungen in nicht sichtbare Bereiche verlegen

Um dem Konstrukteur noch eine weitere Hilfe zu geben, wurde das Optimierungspotential der Gestaltungsregeln bewertet. Dies erleichtert das Auffinden der geeigneten Gestaltungsregeln. Für die Bewertung wurde eine Wertskala mit fünf Werten gemäß VDI-Richtlinie 2225 [VDI-2225] verwendet (Tabelle 8). Für diese relativ kleine Wertskala spricht die Tatsache, daß das Potential sehr stark vom konkreten Anwendungsfall abhängt.

Tabelle 8: Wertskala für den Zugriffsteil

Wert	Effekt auf Toleranzoptimierung und Streuungsbeeinflussung
--	stark negativer Effekt
-	negativer Effekt
0	kein Effekt
+	positiver Effekt
++	stark positiver Effekt

6.3.1.5 Anhang

Im Anhang der Konstruktionskataloge werden Begründungen und Bemerkungen zu den Gestaltungsregeln des Hauptteils gesammelt. Zur leichteren Verständlichkeit sind zu den Regeln noch zusätzliche Begründungen gegeben worden.

In einer weiteren Spalte des Anhangs wird auf die zu beachtenden Randbedingungen bei Verwendung einer bestimmten Gestaltungsregel hingewiesen. Diese stellt den erforderlichen Praxisbezug her. In untenstehender Tabelle sind die Randbedingungen enthalten:

Tabelle 9: Liste der zu beachtenden Randbedingungen

Akustik	Dichtigkeit	Logistik
Anbindung	Einrichtzeit	Materialkosten
Anlagenverfügbarkeit	Ergonomie	Montagefolge
Ausrichtung	Festigkeit	Netzparallelität
Ausrichtzeit	Formfehler in Löchern	Orientierungsänderung
Automatisierung	Fügefølge	Reparatur
Bauraum	Fügeverfahren	Sicherheit
Bauteilbeschädigung	Funktion	Steifigkeit
Bauteilgeometrie	Genauigkeit	Teilezahl
Bauteilgewicht	Gewicht	Verschnittgröße
Bauteilgröße	Fertigbarkeit	Werkzeugkosten
Bauteilkomplexität	Kraftbegrenzung	Zugänglichkeit
Bauteilkosten	Lagerfläche (Platzbedarf)	
Design	Lochdurchmesser	

Soweit eine signifikante Änderung der Randbedingungen erkennbar ist, wird diese in den Konstruktionskatalogen durch einen Pfeil gekennzeichnet (\uparrow, \downarrow). So wird z.B. verdeutlicht, ob lokal Kosten steigen oder fallen. Die Produktherstellungskosten müssen in der Summe sinken. Dies wird durch Einsparung von Nacharbeit, höhere Anlagenverfügbarkeit etc. erreicht. Mit dem Stichpunkt Sicherheit sind Einflüsse auf das Crashverhalten des Fahrzeugs bezeichnet.

6.3.2 Handhabung der Konstruktionskataloge

Die vorliegenden Konstruktionskataloge zum toleranzgerechten Konstruieren sollen eine Hilfestellung zur Lösung von Toleranzproblemen im Karosseriebau geben. Die Palette möglicher Lösungen kann wesentlich erweitert werden, wenn der Produktionsprozeß systematisch mit den Katalogen untersucht wird. Dabei ist zu berücksichtigen, daß durchaus Widersprüche zwischen Regeln oder konkurrierenden Zielen auftreten können. Zur Lösungsfindung können die Vorgehensschritte nach Bild 83 abgearbeitet werden. Widersprüche lassen sich am einfachsten im interdisziplinären Toleranzarbeitskreis aufklären, da hier das erforderliche Know-How zur Bewertung der verschiedenen Möglichkeiten vorhanden ist.

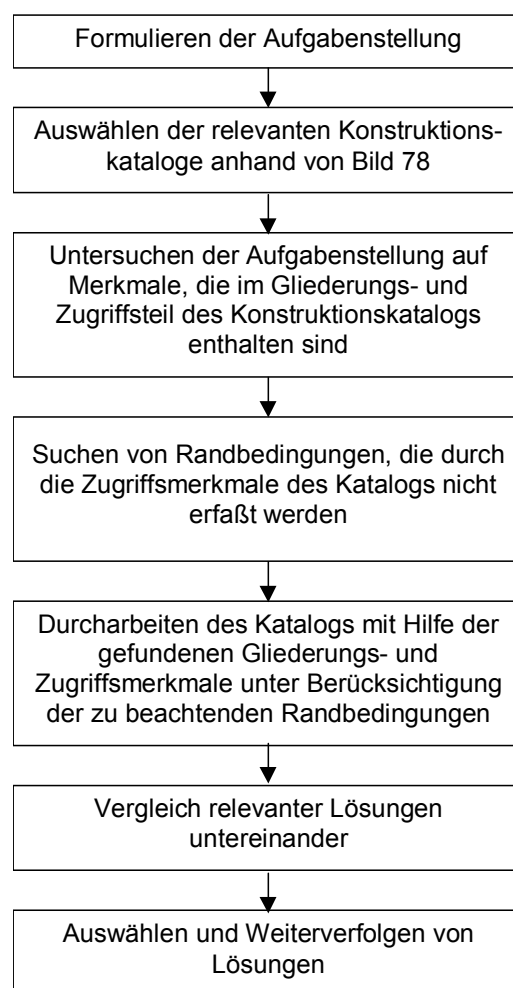


Bild 83: Anwendung der Konstruktionskataloge

Alle Kataloge sind auf dieselbe Weise durcharbeiten.

Nicht nur das systematische Vorgehen anhand der genannten Arbeitsschritte führt zu Lösungen. Um sich ein Bild von den möglichen Lösungen für Toleranzprobleme zu verschaffen, ist es auch sinnvoll, die Kataloge zur Kreativitätsanregung einmal komplett durcharbeiten. Besonders die Kataloge zum Ausrichten enthalten hier wertvolle Anregungen für die konstruktive Praxis.

6.3.3 Kataloge entlang der Prozeßkette

Die in Bild 80 dargestellte Prozeßkette bildet die Operationen des Prozeßablaufs in der Karosseriefertigung nach. Bild 84 zeigt als Illustration der vorangegangenen Kapitel einen Ausschnitt aus dem Konstruktionskatalog „Ausrichten“.

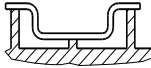
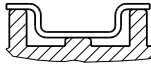
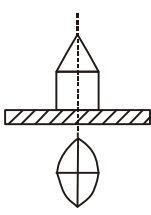
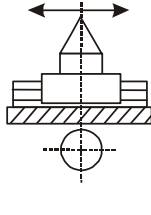
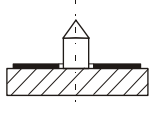
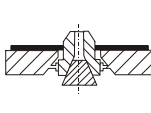
Gliederungsteil		Hauptteil			Zugriffsteil				Anhang						
Region	Eigenschaft	Einfluß	Ausgangszustand	Gestaltungsregel	Optimierter Zustand	Toleranzoptimierung			Streuungen			Begründung	zu beachtende Randbedingungen		
						Nr.	□ X A B C	□ X A B C	⊕ X A B C	Maßtoleranz	Vermeiden			Ausgleichen	Verstecken
Vorrichtung selbst	Größe der Kontaktfläche			Außenhautteile großflächig unterstützen		5	0	+	0	0	+	0	0	Beschädigung der Oberfläche vermeiden	Vorrichtungskosten ↑
	Beschädigung Vermeiden	Art der Aufnahme		Aufnahmen mit einem freien Freiheitsgrad mit schwimmend gelagertem Aufnahmestift ausführen		6	0	+	+	+	0	+	0	Beschädigung des Lochs durch Schwertstifte vermeiden	Genauigkeit ↑ Vorrichtungskosten ↑ Anlagenverfügbarkeit ↑
	Beschädigung Ausgleichen			Aufnahmebolzen von durch mehrere Aufnahmevorgänge beschädigten Aufnahmelöchern, als Spreizstift ausführen		7	0	+	+	+	0	+	0	Aufweitung des Lochs ausgleichen	Bauteilgröße Genauigkeit ↑ Lochdurchmesser, Vorrichtungskosten

Bild 84: Katalogausschnitt „Ausrichten“

Die einzelnen Kataloge zu den entsprechenden Operationen befinden sich im Anhang E.

7 Toleranzanalyse

Unabhängig von der Art der Durchführung des Toleranzmanagements wird in jedem Fall die Auswirkung von Streuungen mittels einer Toleranzrechnung analysiert.

Diese Untersuchung kann unter zwei Gesichtspunkten durchgeführt werden.

- Qualitative Analyse (Variantenvergleich)
Die Genauigkeit des Rechenverfahrens ist von untergeordneter Bedeutung, da nur die Relation zwischen den einzelnen Varianten relevant ist und nicht der absolute Wert der Streuung.
- Quantitative Analyse
In diesem Fall ist die Genauigkeit des Rechenverfahrens von hoher Wichtigkeit, da der absolute Wert der Streuung zu bestimmen ist.

Bei beiden Untersuchungen wird in der Regel ein Software-Tool eingesetzt. Bei diesen Werkzeugen ist kritisch zu prüfen, welche Voraussetzungen für deren Einsatz gegeben sein müssen und welche Güte die Ergebnisse haben werden.

7.1 Voraussetzungen

Die Voraussetzungen für die Berechnung resultieren aus dem angewandten Rechenverfahren. Dies ist in der Regel eine Monte Carlo-Simulation. Das Hauptproblem ist, daß weder elastische und plastische Verformungen noch statisch überbestimmte Bauteile berücksichtigt werden können. Dies ist besonders im Bereich der Blechverarbeitung wegen der geringen Steifigkeit der Einzelteile und teilweise auch der Zusammenbauten von Nachteil.

Die Voraussetzungen sind somit:

- Starre Bauteile
- Statisch bestimmte Aufnahmen

Ein Verlassen dieser beiden Annahmen wäre dann zulässig, wenn die Toleranzanalyse mit einer FEM-Rechnung gekoppelt wird. Dies ist in absehbarer Zeit wegen des hohen Zeitbedarfs einer FEM-Rechnung nicht möglich, da dann für eine Toleranzanalyse 1000-5000 FEM-Rechnungen durchgeführt werden müssen. Der Zeitbedarf resultiert nicht nur aus der Rechenzeit, sondern auch aus der geforderten höheren Qualität des CAD-Modells und der erforderlichen Netzgenerierung.

7.2 Güte der Ergebnisse

Bei der Ergebnisqualität muß zwischen zwei Aspekten unterschieden werden.

- a) Wie gut wird ein theoretischer Sachverhalt berechnet?
(Numerische Genauigkeit)
- b) Wie gut spiegelt das Rechenergebnis die Realität wieder?
(Modellgenauigkeit)

7.2.1 Numerische Genauigkeit

Um sich auf das Ergebnis einer Rechnung verlassen zu können, wird ein Testszenario entwickelt und das Rechenergebnis der Toleranzanalysesoftware (CATVSA) mit dem eines Statistikprogramms (SPSS) verglichen. Dieser Vergleich sichert sowohl die Streuung als Zahlenwert als auch die Art der Verteilung und die Einflußgrößen ab. Die Stärke von CAD-gestützten Programmen ist die 3-D Toleranzrechnung. Daher wird ein überschaubares 3-D Testmodell entwickelt.

Dazu werden drei identische Bauteile rechtwinklig aufeinandergestellt. Das Bild zeigt die Gestalt eines der Bauteile.

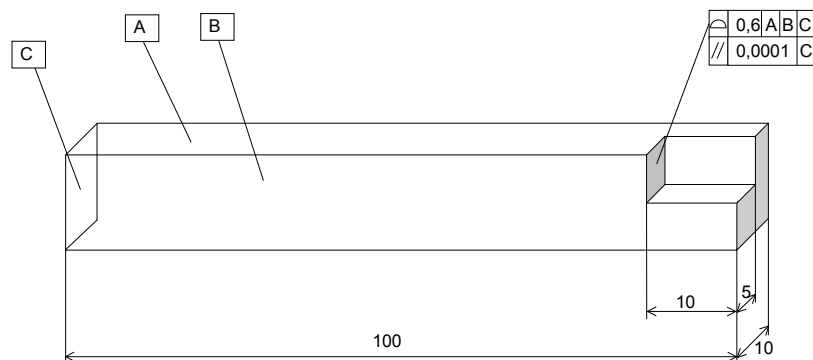


Bild 85: Testbauteil

Ausgenommen einer Fläche sind alle toleranzfrei. Damit bleibt das Modell sehr übersichtlich.

Nachstehendes Bild zeigt den räumlichen Zusammenbau der drei Teile. Daß anstatt des Toleranzsymbols „Profil einer Fläche“ das Positionstoleranzsymbol angezeigt wird, ist ein Fehler in Catia 4.18, welcher bei ebenen Flächen auftritt. Die zusätzliche Einschränkung der Parallelität bewirkt, daß keine signifikanten Verkippungen auftreten.

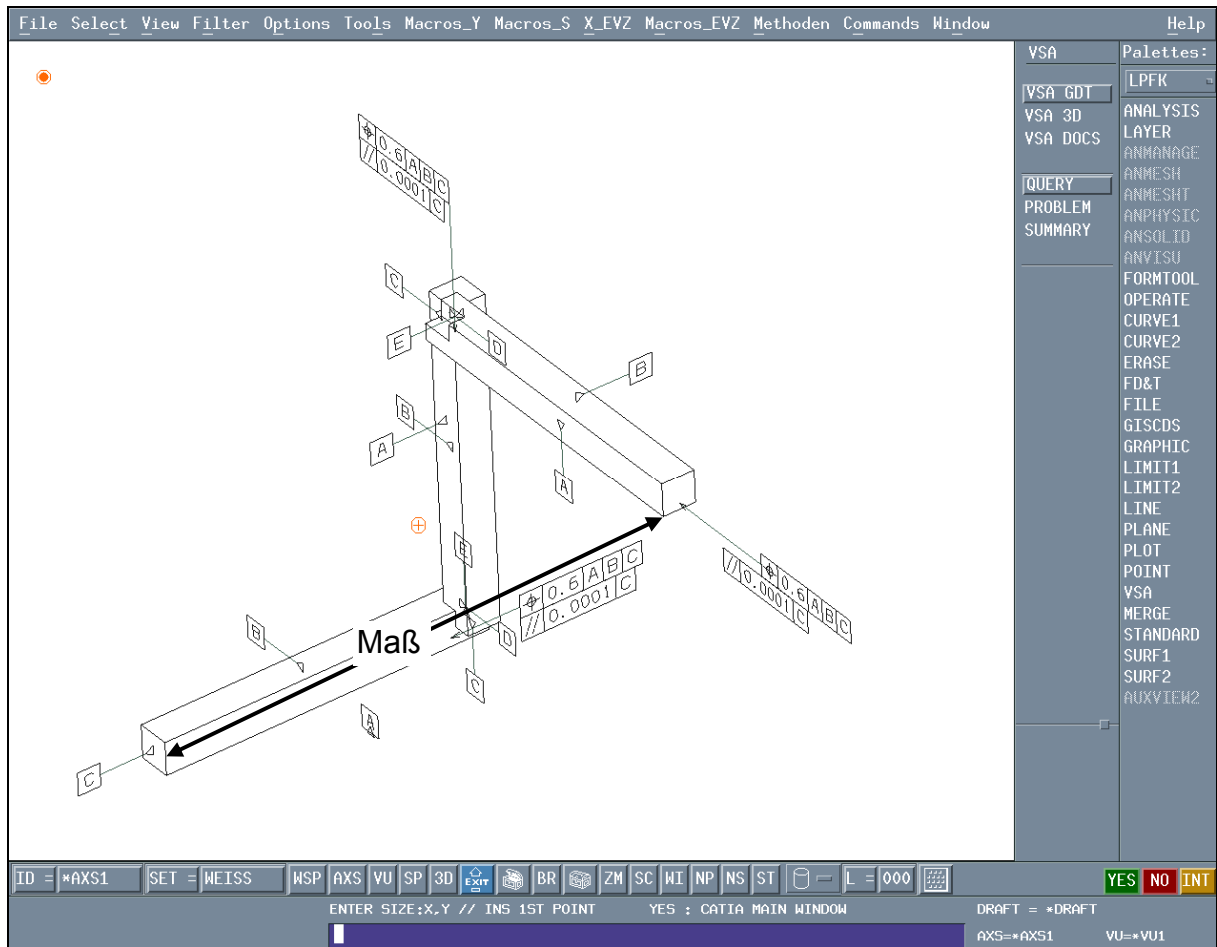


Bild 86: Zusammenbau der drei Testbauteile

Unter der Annahme einer Normalverteilung werden die Streuungen der drei Bauteile räumlich addiert. Das Referenzergebnis von SPSS ist $6 \cdot \sigma = 0,6$. Dies ist in Bild 87 dargestellt.

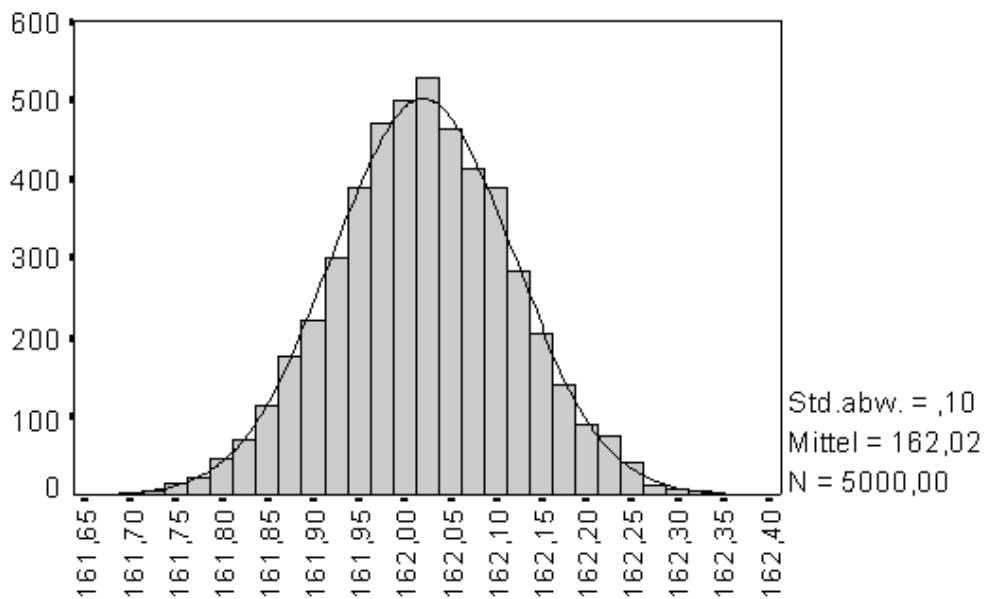


Bild 87: Simulationsergebnis SPSS

Die Auswertung mit CATVSA ergibt $6 \cdot \sigma = 0,5993$.

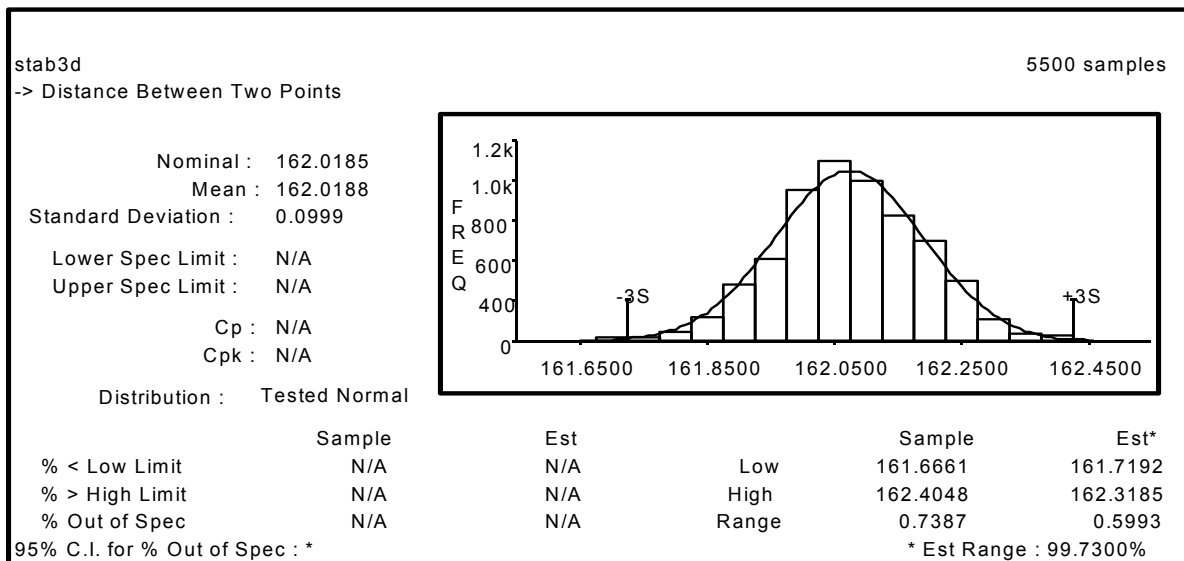


Bild 88: Simulationsergebnis CATVSA

Da die Abweichung erst in der vierten Nachkommastelle auftritt, ist dieses Verfahren hinreichend genau.

7.2.2 Modellgenauigkeit

Die Realitätsnähe der Simulationsergebnisse wird am Beispiel eines Vorbaus als komplexer Zusammenbau untersucht. Der Zusammenbau wird zu 100% im Produktionsprozeß gemessen. Daher steht ausreichend statistisches Material für den Vergleich zur Verfügung. Mittels einer Toleranzsimulation wird der Vorbau an den Meßpunkten (Ausschnitt in Bild 89) untersucht. Weitere Punkte finden sich in Anhang G.

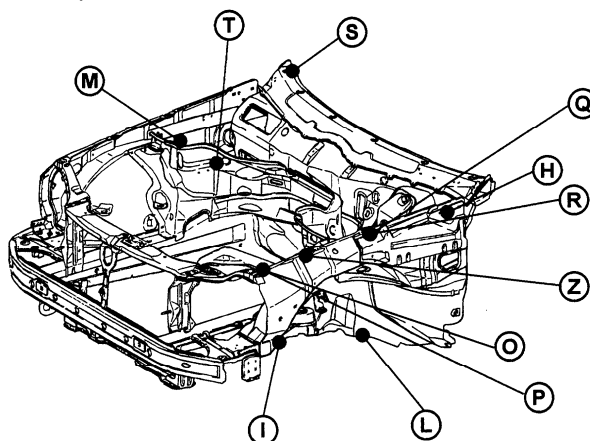


Bild 89: Meßpunkte Vorbau Ansicht A

Für alle Meßpunkte wurde die prozentuale Abweichung der Simulationsergebnisse von den Messungen ($n=1000$) ermittelt (Bild 90).

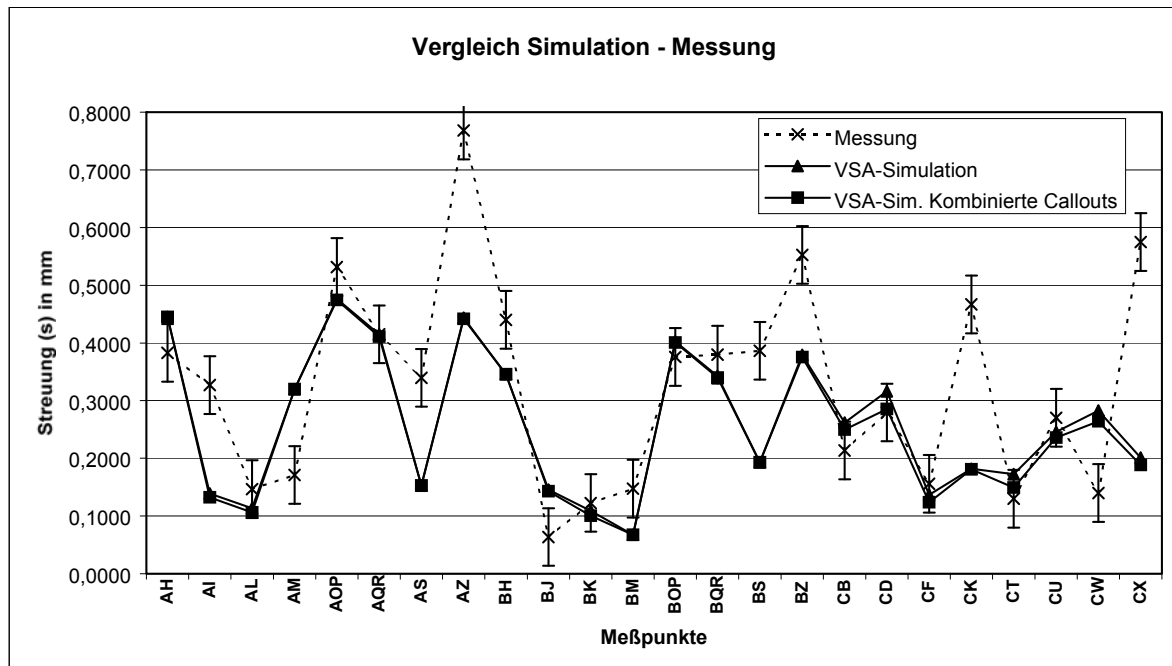


Bild 90: Abweichung zwischen Messung und Simulation

In der Mehrzahl der Punkte stimmt die Simulation gut mit den Meßwerten überein. Teilweise ist die Abweichung sehr groß, dies ist auf plastische und elastische Verformungen in der Rohbauanlage zurückzuführen. In diesem Beispiel ist kein signifikanter Unterschied zwischen der herkömmlichen und der kombinierten Tolerierung (vgl. Kap. 5.3.2) zu erkennen. Die Ursache ist, daß hauptsächlich Loch-Stift-Paarungen verwendet wurden.

Die Toleranzsimulation kann daher für die Vorhersage des Streuungswerts nur in spannungsfrei gefügten Zonen verwendet werden. Sie ist ein geeignetes Hilfsmittel für den Vergleich von Varianten, wenn bei diesen ähnliche Verformungszustände angenommen werden können.

8 Verifikation und Nutzen

8.1 Allgemein

Der Nutzen der Anwendung eines entwicklungsprozeßintegrierten Toleranzmanagements gliedert sich in den Nutzen eines optimierten Entwicklungsprozesses und den eines stabilen, reproduzierbaren Fertigungsprozesses.

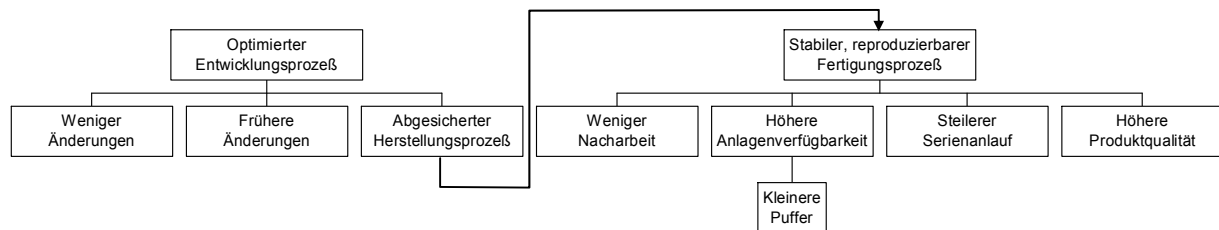


Bild 91: Unmittelbarer Nutzen des Toleranzmanagements

Dieser Nutzen läßt sich letztendlich auf die drei Zielgrößen Kosten, Qualität und Zeit reduzieren (Bild 92). Aus dem Punkt Produktqualität resultiert ferner eine höhere Kundenzufriedenheit.

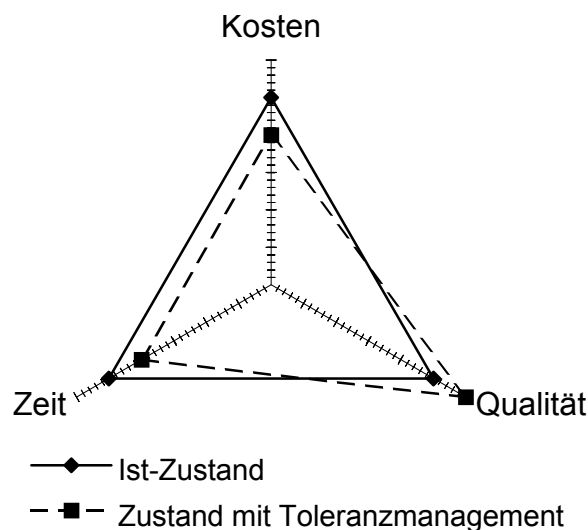


Bild 92: Nutzen der Toleranzmanagements

Zur quantitativen Abschätzung des Nutzens eines Toleranzmanagements auf die Fahrzeugentwicklung muß theoretisch der gesamte Entwicklungsprozeß je einmal mit und ohne Anwendung des Toleranzmanagements durchlaufen werden. Die Vergleichbarkeit mit vorhergehenden Entwicklungsprozessen ist nicht gegeben, da sich die Prozesse verändert haben und neue Technologien wie z.B. DMU eingeführt wurden, die ebenfalls in diesem Spannungsdreieck optimierend wirken.

Eine qualitative Abschätzung des Nutzens über den gesamten Entwicklungsprozeß ist dennoch möglich.

Das finanzielle Potential liegt in der Differenz der Einsparungen durch das Toleranzmanagement zu den verursachten zusätzliche Aufwendungen. Dies ist in Bild 93 gegenübergestellt.

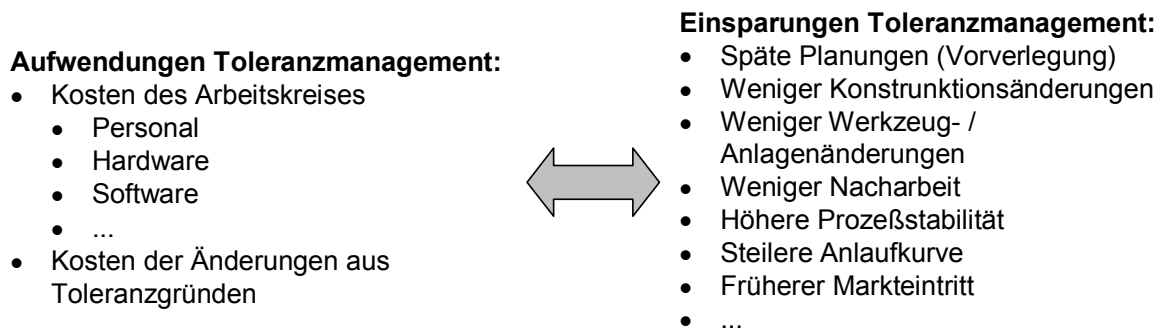


Bild 93: Kosten / Einsparungen durch das Toleranzmanagement

Die Aufwendungen, die durch das Toleranzmanagement entstehen, sind gleich oder kleiner als diejenigen für späte Planungen, um die Toleranzprobleme in den Griff zu bekommen.

Durch die frühe Berücksichtigung von Toleranzen kann die Konstruktion dem entsprechend gestaltet werden. Anderenfalls kann es zu aufwendigen Notlösungen am Fahrzeug kommen.

Selbst bei pessimistischer Abschätzung, d.h. Vernachlässigung aller Potentiale aus einem besseren Produkt (Qualitätsverbesserung) bleibt allein aus der Reduzierung und Vorverlegung von Änderungen ein beträchtliches Potential, da die Änderungskosten im zweistelligen Millionenbereich liegen. Werden im Extremfall Änderungen vom Serienanlauf in die Konzeptphase verschoben, entfallen alle Werkzeugänderungen sowohl für Preßteile als auch für Rohbauanlagen.

Das Einsparungspotential durch Verringerung der Nacharbeit liegt in ähnlicher Größenordnung.

Eine höhere Anlagenverfügbarkeit trägt zu einer steileren Anlaufkurve bei. Am Beispiel A-Klasse und Golf IV wird sehr deutlich, welche Folgen ein flacher Anlauf hat, denn das Fahrzeug ohne Lieferzeit hätte sich am Markt wesentlich besser durchgesetzt.

Mittels des Einsatzes eines Toleranzmanagements ist es möglich, die Produktqualität und damit den Kundennutzen zu steigern. Nur so sind die gesteigerten Anforderungen an das Produkt bei sinnvollem Aufwand zu realisieren (vgl. Kap. 8.2).

Das Toleranzmanagement wurde in einer frühen Entwicklungsphase auf ein komplettes Fahrzeug (E-Klasse-Nachfolger) angewendet. Die vorgeschlagenen Abläufe und Vorgehensweisen haben sich in der Praxis bewährt. Das Hauptproblem bestand in der erforderlichen Qualifizierung der Projektbeteiligten, in der Bereitschaft, vorhandene Prozesse zu verändern und das Toleranzmanagement in einen Prozeß zu integrieren, der keine Zeit- / Kapazitätsreserven für diese Zusatzaufgabe besaß. Das

Ergebnis sind über 200 Konstruktionsänderungen zur toleranzgerechten Gestaltung der Karosserie.

8.2 Konkrete Anwendung

Da die Inhalte des Toleranzprojekts für den E-Klasse-Nachfolger, der sich noch in der Entwicklung befindet, nicht veröffentlicht werden können, wurde die Anwendbarkeit der Vorgehensweisen und Optimierungsstrategien exemplarisch in einem gesonderten Projekt an einem bestehenden Fahrzeug untersucht. Das in einem Fall ein neues Fahrzeug entwickelt und im andern ein bestehendes optimiert wird, bewirkt keinen nennenswerten Unterschied in der Vorgehensweise. Es ist lediglich der Konstruktionsstand eingefroren, d.h. es könnte ein beliebiger Stand innerhalb der Entwicklung sein, und die Ausgangssituation ist nicht hypothetisch, sondern bereits bekannt.

Der Fokus in diesem Projekt lag auf den Spalten und Übergängen der Heckleuchte zu den umliegenden Bauteilen. Aus der Darstellung (Bild 94) ist ersichtlich, wie die Heckleuchte von den drei Baugruppen Seitenwand, Rückwandtür und Stoßfänger eingeschlossen wird.

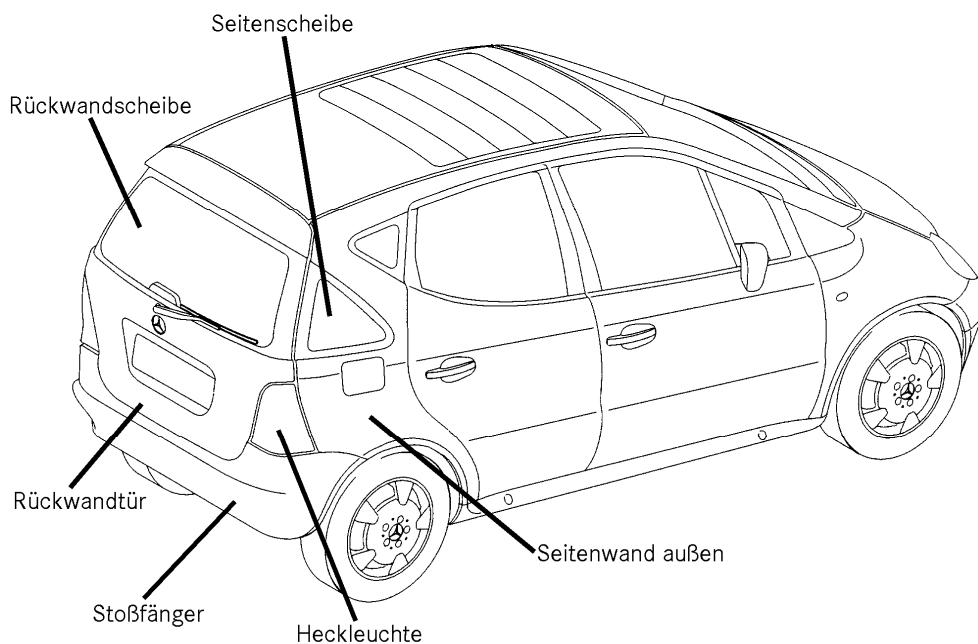


Bild 94: Heckansicht der A-Klasse

In Realität würde der Ausgangszustand von Konstruktion, Qualitätssicherung, Preßwerk-, Rohbau- und Montageplanung beurteilt, hier wurde dies von der Qualitätssicherung, Preßwerk, Rohbau, Montage und den dazugehörigen Planungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 95 verdeutlicht. Die Pfeile symbolisieren eine Verdrehung der Leuchte in der y-z-Ebene (im Uhrzeigersinn), eine Verschiebung nach oben, und eine Verschiebung der Unterseite der Heckleuchte nach hinten. Dadurch

ergibt sich bei einzelnen Fahrzeugen ein negativer visueller Eindruck, da die Leuchte relativ zu Rückwandtür und Karosserie verdreht ist.

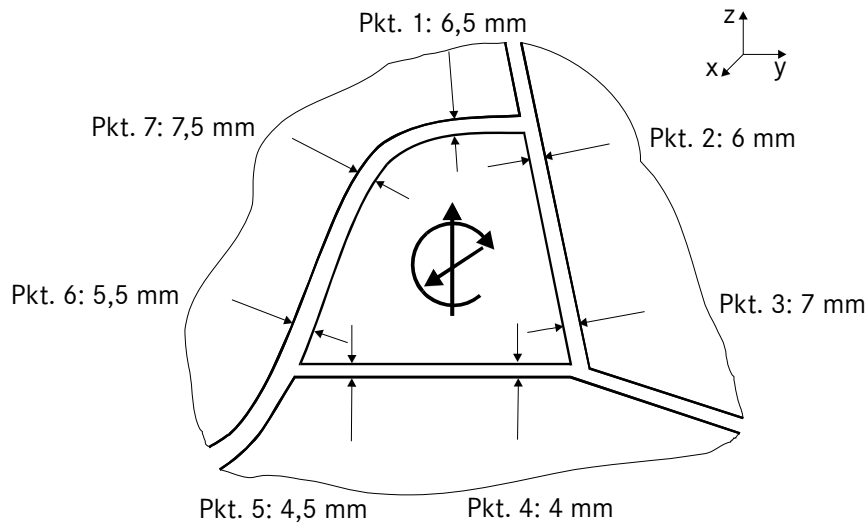
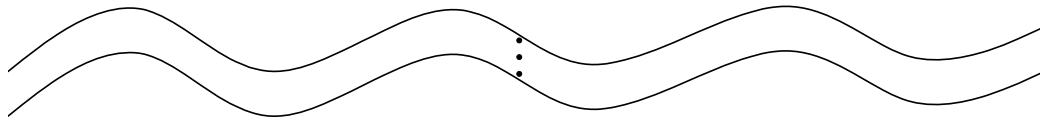


Bild 95: Mittelwerte der gemessenen Fugenbreiten (Werte auf 0,5 mm gerundet)

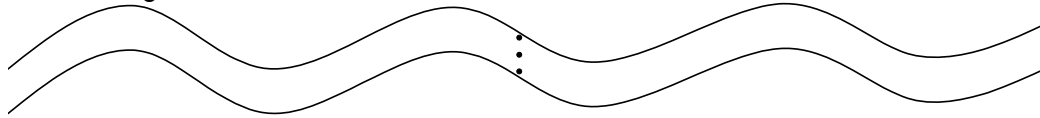
CNC-Messungen bestätigen die Verschiebung der Leuchtenunterseite um +0,76mm nach hinten. An der Oberseite ist die Leuchte mit +0,17mm nicht so deutlich nach hinten verschoben, wodurch sich eine Neigung der Heckleuchte ergibt.

Nach der meßtechnischen Analyse des Zustandes im Bereich der Heckleuchte wird die Situation nun systematisch mit der Checkliste zum toleranzgerechten Konstruieren gemeinsam mit den vorgenannten Bereichen untersucht. Es folgt ein Auszug aus der beantworteten Checkliste.



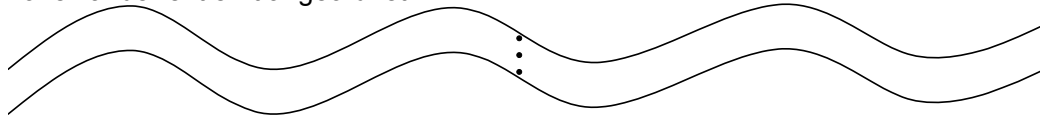
Wo liegen die Funktionsmaße?

Als Funktion wird hier die richtige Position der Leuchte im Vergleich zu den umliegenden Bauteilen betrachtet. Für die richtige Positionierung der Heckleuchte ist die Lage der Schraubenbolzen zueinander, ebenso wie ihre Lage zur Leuchtenaußenkontur entscheidend. Angeordnet sind die Bolzen recht weit in der Mitte der Leuchte. Abweichungen der x-Position der Befestigungslöcher werden durch den Hebel verstärkt, der sich aus dem Abstand zwischen Bolzen und Außenkontur ergibt. Sie werden auf die x-Position der Leuchtenaußenkontur übertragen, haben aber auch Abweichungen in y-Richtung und z-Richtung zur Folge. Durch das geringe Übermaß der Befestigungslöcher von 0,5mm ist die Leuchte bei Abweichungen der Löcher zueinander nicht mehr montierbar.



Aufnahmestellen so weit wie möglich voneinander entfernt angeordnet?

Im Rahmen der durch die 3-2-1-Regel und die durchgängige Aufnahme gesetzten Grenzen sind die Bezugsstellen der untersuchten Bauteile so weit wie möglich voneinander entfernt angeordnet.



Aufnahmestellen netzparallel und eben ausgeführt?

Bis auf wenige Ausnahmen sind die Bezugsstellen der Vorrichtungen zur Fertigung der Seitenwand innen netzparallel ausgeführt. Die Geometrie der Bezugsstellen ist an die jeweilige Oberflächengeometrie angepaßt und im allgemeinen nicht eben.

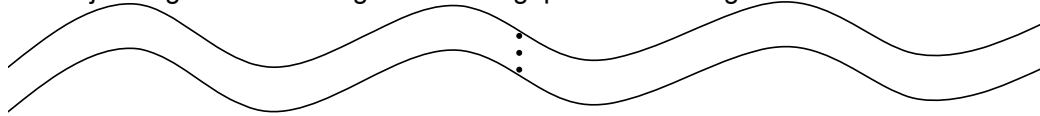


Bild 96: Auszug aus der Checkliste

Nach der Überprüfung wurden die gefundenen Schwachstellen mit Hilfe der Konstruktionskataloge zum toleranzgerechten Konstruieren überarbeitet. Dabei wurde, um den Konstruktionsprozeß zu simulieren, die Lösungsfindung alleine durchgeführt. Exemplarisch werden einige der gefundenen Lösungen dargestellt.

- Vergrößern des Abstands der Befestigungspunkte der Heckleuchte
Durch die Checklistenfrage „Wo liegen die Funktionsmaße?“ fiel der geringe Abstand der Befestigungspunkte der Heckleuchte zueinander und zur Außenkontur der Heckleuchte auf. Diese Hebelwirkung verstärkt Streuungen der Lage der Befestigungspunkte und führt zu verstärkten Streuungen der Lage der Außenkontur der Heckleuchte zu den umliegenden Baugruppen.
Auf diese Problemstellung trifft die Gestaltungsregel 9 „Aufnahmestellen weit auseinander anordnen“ aus dem Katalog „Ausrichten – Einzel“ zu.
Durch die Vergrößerung des Abstands der Befestigungspunkte kann der Einfluß der Hebelwirkung minimiert werden. Auftretende Streuungen der Lage der Befestigungspunkte

stigungspunkte werden dann nicht mehr im bisherigen Maße verstärkt. Bild 97 verdeutlicht die Anwendung der Regel.

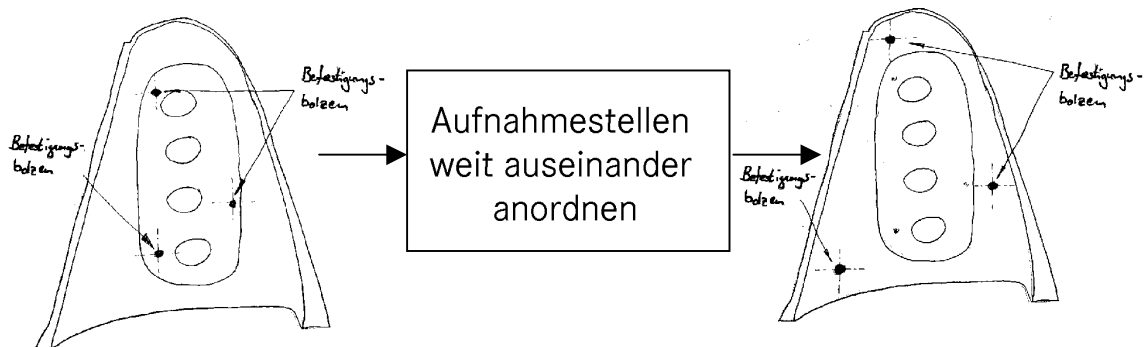


Bild 97: Abstand der Heckleuchtenbefestigungspunkte

Wegen der geringen Breite der Aufnahme Heckleuchte kann es notwendig werden, die Befestigungslöcher in die benachbarten Preßteile zu stanzen. Dies ist mit relativ geringen Kosten verbunden, da die Befestigungslöcher erst nach dem Fügen der Aufnahme Heckleuchte gestanzt werden und somit eine kostenintensive Änderung des Preßwerkzeugs entfällt.

- Justieren des Stanzroboters

Eine weitere Möglichkeit der Streuungskompensation wurde während der Untersuchung der Fertigungsanlagen gefunden. Sie kann als Abwandlung der Gestaltungsregel Nr.11 "Ausrichten – Teil in Vorrichtung", "Funktionsmaße mit Flächenanschlüssen positionieren" eingeordnet werden. Nach dieser Regel sollen sich Bezugsstellen an den relevanten Funktionen orientieren, um den Einfluß von Streuungen nicht relevanter Bauteile auszuschließen.

Im behandelten Beispiel werden die Befestigungslöcher der Heckleuchte erst in die Rohkarosserie gestanzt, nachdem die Aufnahme der Heckleuchte gefügt wurde. Alle drei Befestigungslöcher werden mit demselben Werkzeug in einem Fertigungsschritt gestanzt. Eine Streuungskompensation ist möglich, wenn das Stanzwerkzeug in Abhängigkeit von den tatsächlich am Fahrzeugen auftretenden Streuungen positioniert werden kann. Die Justierung des Roboterarms, der das Stanzwerkzeug trägt, sollte sich am Mittelwert der vorliegenden Streuungen orientieren. Verdeutlicht wird die Anwendung der oben erläuterten Gestaltungsregel in dem folgenden Bild.

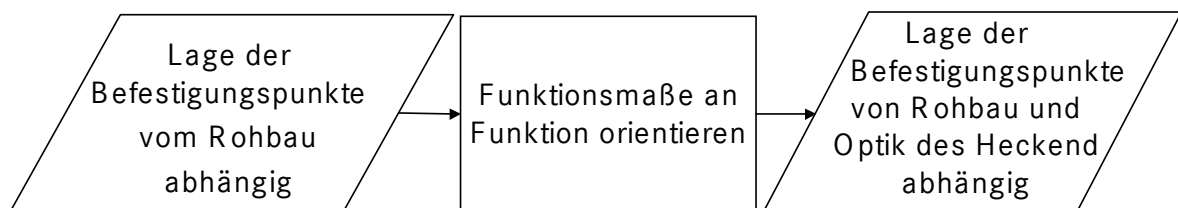


Bild: 98: Justierung des Roboterarms

- Montage von Heckleuchte und Rückwandtür mit Spaltkeilen

Zum Ausgleich von Streuungen kann die Ausrichtung der Heckleuchte mit Hilfe von Distanzstücken (Spaltkeile) durchgeführt werden, wie von Regel Nr. 7 "Zusätzliche Distanzstücke zum Ausrichten von Bauteilen verwenden" im Konstruktionskatalog "Ausrichten – Teil auf Teil" vorgeschlagen wird.

Insgesamt wurden 15 Lösungen gefunden. Sie sind nach dem Aufwand der Realisierung und dem Nutzen klassifizierbar. Die Aufwandsklassifizierung untergliedert sich in kurzfristige Lösungen, die in die laufende Serie eingebracht werden können, sowie mittel- und langfristige Lösungen, die erst bei einer Modellpflege oder einem Nachfolgetyp realisierbar sind.

Diese Lösungen wurden allen beteiligten Bereichen vorgestellt. Die Vertreter waren positiv überrascht, in welcher kurzer Zeit und mit welchem geringem Aufwand neue Lösungen gefunden wurden. Die Effizienz der Optimierungsstrategien beruht auf den vielfältigen Arten der unterstützten Lösungsfindung. Diese sind:

- Checkliste und Konstruktionskatalog
- Checkliste und intuitive Lösung
- Konstruktionskatalog

9 Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb des Qualitätsmanagements wird der Themenkomplex Toleranzen kaum beachtet. Im Hinblick auf Toleranzen sind insbesondere das Fehlen geeigneter Vorgehensweisen zur deren Vergabe und Optimierung, das Fehlen von erforderlichem Fertigungswissen und die Einbindung in den Entwicklungsprozeß die bestehenden Problemfelder.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Konzept zum Toleranzmanagement entwickelt. Dieses ist in den Entwicklungsprozeß integriert worden und enthält in verschiedenen Detaillierungsstufen die Vorgehensweise von der Idee bis zum abgesicherten Toleranzkonzept. Darüber hinaus wurden die in der Vorgehensweise enthaltenen Hilfsmittel entwickelt.

Diese Vorgehensweise beschreibt zum einen, wann im Entwicklungsprozeß welche Aktivitäten in bezug auf Toleranzen stattfinden müssen, und zum anderen wie die toleranzrelevanten Größen festgelegt werden.

Die Streuungen der Einzelteile und Anlagen sind ein wesentlicher Bestandteil des Toleranzkonzepts. Zur Bestimmung der Streuung der Preßteile wurde ein FEM-gestütztes Konzept entwickelt, mit dem unter Berücksichtigung des Bezugsstellenwechsels die Streuung an Preßteilen vorhergesagt werden kann. Zusätzlich sind die Streuungen bei der Zusammenbau-Erstellung aufgeführt.

Um zu einer möglichst toleranzgerechten Konstruktion zu gelangen, wurden Optimierungsstrategien in Form von Konstruktionskatalogen und Checklisten, die sich in ihrem Aufbau am Fertigungsprozeß orientieren, entwickelt.

Die Beurteilung des Toleranzverhaltens findet auf der Basis von Toleranzanalysen statt. Hier wurde die Anwendbarkeit des verwendeten Verfahrens für den Bereich des Karosseriebaus validiert.

Insgesamt wurde sowohl durch die Vorverlegung und Reduzierung von Änderungen als auch mittels der toleranzgerechten Gestaltung als Folge des hier entwickelten Toleranzmanagements ein wesentlicher Beitrag zur Verkürzung der Entwicklungszeit und zur Kostenreduzierung geleistet. Durch die toleranzgerechte Gestaltung wird darüber hinaus eine weitere Qualitätssteigerung möglich.

Die intensive Anwendung und Übertragung auf breitere Anwendungsgebiete trägt dazu bei, das bestehende Fertigungswissen zu vergrößern. Dadurch wird zum einen die Wissensbasis des Toleranzmanagements ausgebaut und zum anderen wird die Fertigungsprozeßbeherrschung verbessert. Dabei können weitere Rationalisierungspotentiale identifiziert werden. Durch die Forcierung des Einsatz von tolerierten CAD-

Modellen kann der Digital Mock Up (DMU) realitätsnäher werden und die Funktionsimulationen toleranzbehaftet durchgeführt werden.

Eine Möglichkeit zum noch effizienteren Einsatzes des in dieser Arbeit vorgeschlagenen Toleranzmanagements besteht durch eine Rechnerunterstützung. Dies bietet sich besonders für die Checkliste und die Konstruktionskataloge an. Für die Checkliste würde eine Regelprüfung innerhalb einer DMU-Prozeßsimulation anbieten. Kataloge können hypertextbasiert zur Verfügung gestellt werden. Dabei ist jedoch kritisch zu beachten, daß dies in einer kreativitätsanregenden Weise geschieht.

10 Literaturverzeichnis

- [Abd-94] Abdel-Malek, Layek; Asadathorn, Nutthapol: Process and design tolerance in relation to manufacturing cost: A review and extension, The engineering economist, Volume 40, No. 1, page 73-100, Fall 1994
- [And-90] Anderson, E. M.: Design for Manufacturability, CIM Press 1990, C.A.
- [Bir-96] Birkhofer, H.: Höhere Konstruktionslehre, Umdruck zur Vorlesung Wintersemester, Block B Methodisches Vorgehen, TH Darmstadt, 1996
- [Bus-95] Busick, David R.; Beiter, Kurt A.; Ishii, Kos: Use of process simulation to assess tolerance feasibility, Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings v 3 1995, Soc. of plastic Engineers, Brookfield, CT, USA, page 3835-3839, 1995
- [Dcs-96] NN.: Schulungsunterlagen zum Kurs „Dimensional Management“, DCS, Dimensional Control System Inc., 1996
- [Die-81] Diekhöner, G.: Erstellen und Anwenden von Konstruktionskatalogen im Rahmen des methodischen Konstruierens, VDI-Verlag, Düsseldorf 1981
- [Die-96] Dietrich, Edgar; Schulze, Alfred: Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozeßqualifikation, Carl Hanser Verlag München, Wien, ISBN 3-446-18780-4, 1996
- [DIN-1101] NN.: Form- und Lagetolerierung. Entwurf. Hrsg. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, Köln, 1995
- [DIN-2692] NN.: Maximum Material Prinzip, DIN ISO 2692, Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 1000 Berlin 30, 1990
- [DIN-5459] NN.: Technische Zeichnungen, Form- und Lagetolerierung, DIN ISO 5459, Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 1000 Berlin 30, Januar 1982
- [DIN-7155] NN.: ISO-Passungen für Einheitswelle; Toleranzfelder, Abmaße in mm, DIN ISO 5459, Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 1000 Berlin 30, August 1966
- [DIN-8402] NN.: Qualitätsmanagement, DIN EN ISO 8402, Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 1000 Berlin 30, August 1994
- [DIN-8580] NN.: Fertigungsverfahren; Einteilung, Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 1000 Berlin
- [DIN-9004] NN.: Qualitätsmanagement und Elemente eines Qualitätssicherungssystems – Leitfaden, DIN ISO 9004, EN 29004, Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 1000 Berlin 30, Mai 1990
- [DIN-55350] NN.: Begriffe zu Qualitätsmanagement und Statistik, DIN 55350-11, Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 1000 Berlin 30, August 1995

- [DIN-58700] NN.: ISO-Passungen; Toleranzfeldauswahl für die Feinwerktechnik, Toleranzfelder, DIN 55350-11, Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 1000 Berlin 30, März 1978
- [Don-91] Dong, Z.; Hu, W.: Optimal process sequence identification and optimal process tolerance assignment in computer-aided process planning, Computers in Industry 17 page 19-32, 1991
- [Fra-94] Franke, H.-J.; Sauermann, F.: Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung durch Toleranzsynthese, VDI Bericht 1106, Seite 223-242, VDI Verlag, 1994
- [Fra-94b] Franke, H.-J.; Sauermann, F.: Qualitätssicherung durch den Einsatz der rechnerunterstützten Toleranzsynthese, S. 47-52 FQS-Schrift 96-04, Forschungsgemeinschaft Qualitätssicherung e.V. Frankfurt am Main, 1994
- [Hey-87] Heyde, W.: Die Ökonomie der betrieblichen Forschung und Entwicklung, Verlag Die Wirtschaft, Berlin 1987
- [Hol-94] Holland, Martin: Prozeßgerechte Toleranzfestlegung, Bereitstellung von Prozeßgenauigkeitsinformationen für die Konstruktion, VDI-Fortschrittsberichte Reihe 20 Nr. 137, VDI-Verlag Düsseldorf 1994
- [Jor-91] Jordan, W.: Der Tolerierungsgrundsatz – eine unbekannte Größe mit schwerwiegenden Folgen, Konstruktion 43, Seite 170-176, 1991
- [Kan-95] Kanai, S.; Onozuka, M.; Takahashi, H.: Optimal Tolerance Synthesis by Genetic Algorithm under Machining and Assembly Constrains, Proceedings of the 4th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Paris, France, Int. Instr. of Production Eng. Res., 1995 p. 263-282]
- [Kap-88] Kapur, Kailash C.: Product and Process Design Optimization by Design of Experiments Using Taguchi Methods, Society of Automotive Engineers, Inc. 0148-7191/88/0412-0821, 1988
- [Kes-51] Kesselring, F.: Bewertung von Konstruktionen. Ein Mittel zur Steuerung von Konstruktionsarbeit, Deutscher Ingenieurverlag, Düsseldorf 1951
- [Koc-83] Koch, Peter: Lehrbrief Methodisch-systemwissenschaftliche Arbeitsweise bei der Problemlösung in Forschung und Entwicklungsprozessen, Bauakademie der DDR, Berlin/Jena 1983
- [Koh-95] Kohlhase, N.: Checkliste Konstruktion, Darmstadt zu beziehen über Prof. Birkhofer, TH Darmstadt 1995
- [Kol-95] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau, Grundlagen des methodischen Konstruierens, 2. Auflage, Springer Verlag Berlin, 1995
- [Kus-95] Kusiak, Andrew; Feng, Chang-Xue: Deterministic tolerance synthesis: a comparative study, Computer Aided Design Volume 27 Number 10 Page 759-768, Oct 1995

- [Mil-94] Milberg, J; Reinhart, G; Trunzer, W.: Präventive Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden, S. 83-88 FQS-Schrift 96-04, Forschungsgemeinschaft Qualitätssicherung e.V. Frankfurt am Main, 1994
- [Mül-89] Müller, G.: Lexikon Technologie, Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co, Haan, 1989
- [Nag-94] Nagarwalla, Moiz Y.; P. Simin; Pulat, Raman, Shivakumar Ramakumar: Process selection and tolerance allocation for minimum cost assembly, PED-Vol. 68-1, Manufacturing Science and Engineering, Volume 1, page 47-55, ASME 1994
- [Ngo-94] Ngoi, Bryan Kok Ann; Kuan, Yew Chuan: Tolerance analysis and synthesis across assemblies: state of the art review, Journal of Electronics Manufacturing 4, page 17-31, 1994
- [Ngo-97] Ngoi, B. K. A.; Ong, C. T.: A Tolerancing Optimisation Method for Product Design, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, page 290-299, 1997
- [Opi-71] Opitz, H.: Produktplanung – Konstruktion – Arbeitsvorbereitung. Rationalisierungsschwerpunkte bei der Produktentstehung, Girardet, Essen, 1971
- [Pah-97] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre, Springer Verlag, Berlin 1997
- [Pfe-93] Pfeifer, T: Qualitätsmanagement, Carl Hanser Verlag München, Wien, 1993
- [Pos-91] Post, S.: Verification of Warpage Simulation in Injection Molding, Columbus, OH, The Ohio State University, 1991
- [Rot-81] Roth, Karlheinz: Konstruktionskataloge und ihr Einsatz beim methodischen Konstruieren, VDI-Z 123, S. 413-418
- [Rot-94] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Bd. I-III, Springer Verlag, Berlin 1994
- [Sch-94b] Schütte, W.; Jorden, W.: Methodische Form- und Lagetolerierung am Beispiel eines Kreuzgelenks, S. 137-152 FQS-Schrift 96-04, Forschungsgemeinschaft Qualitätssicherung e.V. Frankfurt am Main, 1994
- [Sch-94c] Schrems, O.; Hirschmann, K. H.; Lechner, G.: Steigerung der Tolerierungsfähigkeit in der Konstruktion, S. 129-137, FQS-Schrift 96-04, Forschungsgemeinschaft Qualitätssicherung e.V. Frankfurt am Main, 1994]
- [Sch-95] Schütte, W.: Methodische Form- und Lagetolerierung, Dissertation, Laboratorium für Konstruktionslehre, Universität-GH Paderborn, 1995
- [Sel-97] Selzle, Herrmann: Piëch liebt die Kunst der Fuge, Automobil-Produktion, S. 3, Okt. 1997
- [Spu-94] Spur, G.: Handbuch der Fertigungstechnik, Band 6, Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag, München 1996

- [Spu-96] Spur, G.: Die Genauigkeit von Maschinen, Carl Hanser Verlag, München 1996
- [Tag-86a] Taguchi, G.: Introduction to Quality Engineering, Designing Quality into Products and Processes, Asian Productivity Organisation, 1986
- [Tag-86b] Taguchi, G.: Quality Engineering, Minimierung von Verlusten durch Prozeßbeherrschung, gmft-Gesellschaft für Management und Technologie-Verlags KG, Lothstaße 1a, D-8000 München 2, 1986
- [Van-89] Vannoy, E. Harold; Davis, James A.: Test Development Using the QFD Approach, Society of Automotive Engineers, Inc. 0148-7191/89/0227-0807, 1987
- [VDI-2221] VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, VDI-Verlag Düsseldorf 1993
- [VDI-2222] VDI 2222 Blatt 1 (Technische Regel): Konstruktionsmethodik – Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, 1997; VDI 2222 Blatt 2: Konstruktionsmethodik; Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen (Technische Regel), VDI-Verlag Düsseldorf 1982
- [VDI-2225] VDI 2225: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure. Ausg. 1977
- [VDI-2247] VDI Richtlinie 2247, Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung, Entwurf, VDI-Verlag Düsseldorf 1994
- [Voe-97] Voegelé, A.: Konstruktions- und Entwicklungsmanagement, Verlag Moderne Industrie, Landsberg / Lech, 1997
- [VW-97] Volkswagen AG: Der neue Golf. ATZ-MTZ Supplement 1997
- [Web-94] Weber, Ch.; Stark, R.: Stand und Perspektiven der rechnergestützten Toleranzanalyse und -synthese, VDI Bericht 1106, Seite 203-222, VDI Verlag, 1994
- [Yeo-96] Yeo, S. H.; Ngoi, B. K. A., Chen, H.: A Cost-Tolerance Model for Process Sequence Optimisation, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, page 423-431, 1996
- [Zha-92] Zhang, C.; Wang, H. P.; Li, J. K.: Simultaneous optimization of design and manufacturing – Tolerances with Process (Machine) Selection, Annals of the CIRP Vol. 41/1/1992, page 569-572
- [Zha-93a] Zhang, Chun; Wang, Hsu-Pin: Optimal process sequence selection and manufacturing tolerance allocation, Journal of Design and Manufacturing 3, page 135-146, 1993