

KONSTRUKTIONSBEGLEITENDE ANALYSE AUF FERTIGBARKEIT VON TOLERANZFESTLEGUNGEN AUF BASIS DES KONSTRUKTIONSSYSTEMS MFK

Rüdiger Hochmuth

Ausgangsbasis für die Überprüfung der Fertigbarkeit eines toleranzbehafteten Produkts ist die Vorgabe der Toleranzinformationen durch das Synthesemodul des Laboratoriums für Konstruktionslehre (LKL), nach der Tolerierungsmethode zur funktionsgerechten Toleranzfestlegung. Diese Informationen sind über das Produktmodell des Konstruktionssystems *mfk*, als Schnittstelle zwischen den drei Modulen, für die Analysemodule zugänglich. Die Analyseergebnisse werden dem Synthesemodul wiederum zugänglich gemacht um im Sinne einer iterativen Schleife die Toleranzfestlegungen zu optimieren (Bild 1).

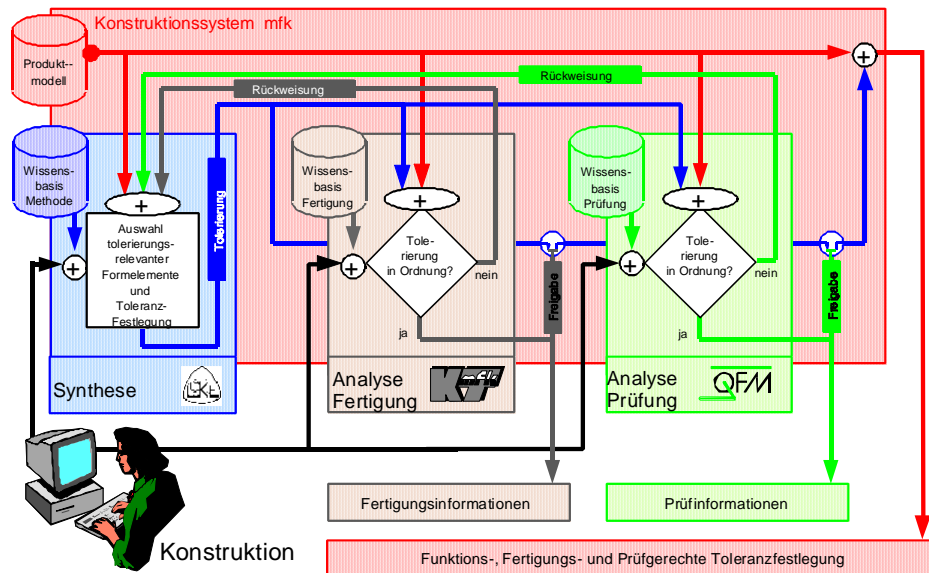


Bild 1: Regelkreis des Projekts "Systemgerechte Grenzgestaltdefinition" (nach /11/)

1 Kriterien zur Beurteilung der Toleranzfestlegung

Grundlage für das Konzept der Analyse auf Fertigbarkeit von Toleranzfestlegungen bildet die Definition der Fertigungsunsicherheit nach /1/ (Bild 2).

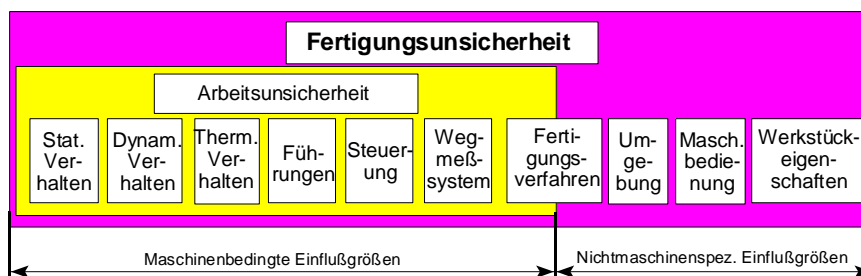


Bild 2: Einteilung der Fertigungsunsicherheit nach Einflussgrößen (nach /1/)

Nach /1/ läßt sich die Fertigungsunsicherheit in maschinenbedingte und nichtmaschinenspezifische Einflußgrößen einteilen. Unter nichtmaschinenspezifischen Einflußgrößen versteht man die Auswirkung von Umgebung, Bedienung und Werkstückeigenschaften auf die erreichbare Genauigkeit des zu fertigenden Bauteils. Die maschinenbedingten Einflußgrößen umfassen das statische, dynamische und thermische Verhalten der Werkzeugmaschine sowie die Genauigkeit von Führungen, Steuerungen und Wegmeßsystemen. Das Fertigungsverfahren bezieht sich sowohl auf die maschinenbedingten als auch auf nichtmaschinenspezifische Einflußgrößen. Die Gesamtheit der maschinenbedingten Einflüsse charakterisiert die Arbeitsgenauigkeit der Maschine. Maschinenbedingte Einflüsse unterteilen sich in zufällige und systematische Größen (Bild 3). Zur Beurteilung der Arbeitsgenauigkeit sind zwei Wege bekannt. Dies sind

- die Ermittlung von wichtigen, die Genauigkeit beeinflussenden Kenngrößen an der unbelasteten Maschine (direkte Messung) und
- die indirekte Messung über die Bearbeitung einer statistisch ausreichenden Zahl von Prüfwerkstücken geeigneter Abmessungen.

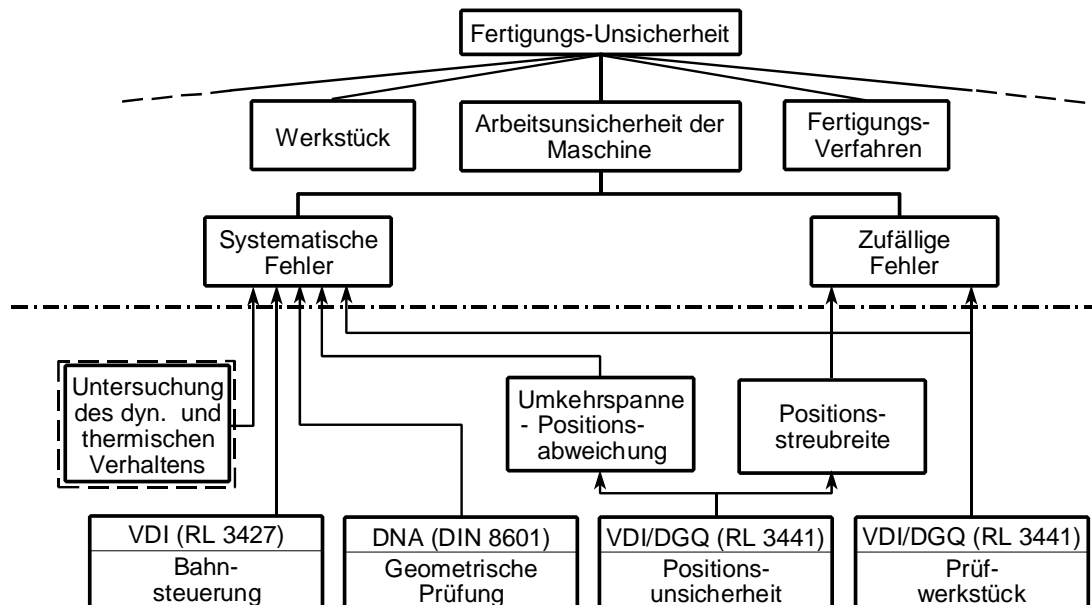


Bild 3: Maschinenbedingte Einflußgrößen auf die Fertigungsunsicherheit (/1/)

Jede dieser Methoden für sich reicht nicht aus, um die Arbeitsgenauigkeit wiederzugeben. So fehlen bei der direkten Messung sämtliche statischen, dynamischen und thermischen Einflüsse, wohingegen die indirekte Messung nur einen sehr kleinen Ausschnitt des Arbeitsraumes erfaßt. Zu den direkten Messungen gehören Geometrische Prüfungen der Werkzeugmaschine nach der Normenreihe /2/ ff. sowie die Bestimmung der Positionsunsicherheit nach /3/. Indirekte Messungen sind in der Normenreihe /3/ ff. für alle gängigen Maschinenkonzepte genormt.

Unter Genauigkeit versteht man in der Technologie des Maschinenbaus [...] in DIN 55350 den Grad der Übereinstimmung der hergestellten Erzeugnisse mit dem vorher festgelegten Prototyp oder Muster. Je größer die Übereinstimmung ist, um so höher ist die Genauigkeit (/4/).

Ausgehend von den Untersuchungen der Fertigungsunsicherheit wurden Methoden zur Abschätzung der Einflußfaktoren auf die Fertigungsunsicherheit für rotationssymmetrische Bauteile (Wellen mit Nuten, Fasen) erarbeitet. Hierbei wurden die maschinenbedingten Einflüsse der Geometrischen Prüfung (/2/), des Prüfwerkstücks und der Positionsunsicherheit (/3/) auf die Arbeitsunsicherheit der Werkzeugmaschine (Dreh- und Schleifmaschine) sowie der Einfluß des Fertigungsverfahrens betrachtet.

Zur Abschätzung der erreichbaren Genauigkeiten an geometrischen Flächen eines Bauteils müssen die notwendigen Bearbeitungsschritte, die Spannstellen sowie der Bearbeitungsweg relativ zu den Spannstellen ermittelt werden. Hierzu ist es notwendig, die Bearbeitungsschritte der Herstellung für das angewandte Fertigungsverfahren in der technologisch richtigen Reihenfolge zu generieren. Zur Abschätzung der Fertigungsmöglichkeiten sind unterschiedliche Werkzeugmaschinen in die Betrachtung einzubeziehen.

2 Das Toleranzanalysemodul im Konstruktionssystem *mfk*

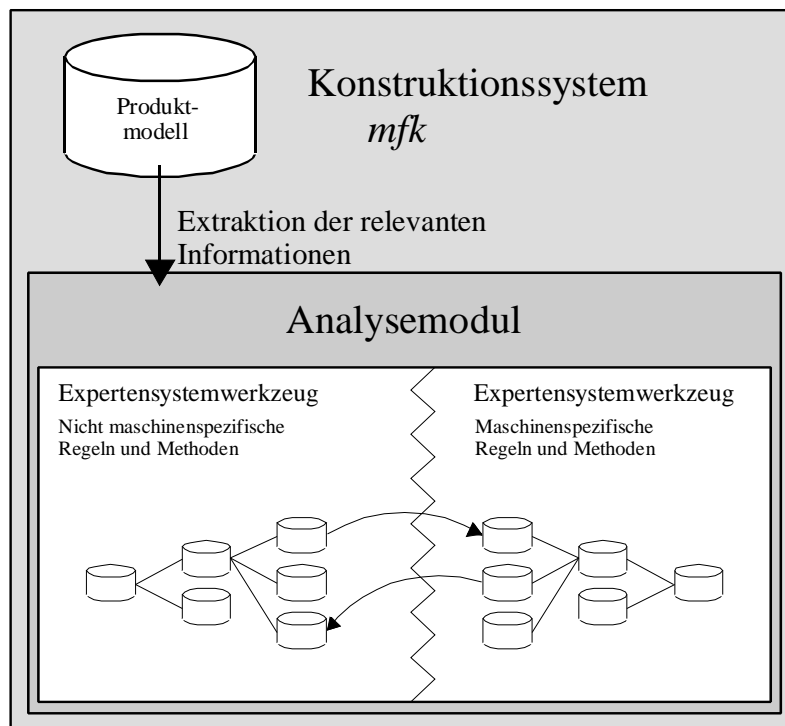


Bild 4: Grobkonzept des Analysemoduls

Da das Konstruktionssystem *mfk* die Denk- und Arbeitsweise des Konstrukteurs in den Phasen des Konstruktionsprozesses nach VDI 2221 unterstützt, sind die für die Analyse notwendigen Informationen über geometrische, technologische, funktionale und organisatorische Elemente bereits im Produktmodell enthalten und können für die Analyse genutzt werden (/5/).

Die Toleranzanalyse setzt sich aus der Analysevorbereitung und der Diagnose zusammen. Alle notwendigen Informationen müssen im ersten Analyseschritt (Analysevorbereitung) aus dem Produktmodell des Konstruktionssystems *mfk* extrahiert werden (Bild 4). Die

Toleranzangaben (technologische Daten) sind für die Analyse nutzbar, da sie im Gegensatz zu Angaben in herkömmlichen CAD-Systemen nicht nur symbolischen Charakter haben, sondern als Element mit Relationen zu der geometrischen Fläche bzw. zu den davon abgeleiteten Elementen mit den Informationen Bezugselement/e, Toleranzwert, Materialbedingung, Begründung der Vergabe dieser Toleranzart und des -wertes vorliegen.

Durch die Anbindung eines Expertensystemwerkzeugs an das Konstruktionssystem *mfk* (/6/) mit einer bidirektionalen Schnittstelle zwischen Konstruktionssystem und Expertensystem ist die Anwendung von Regeln und Methoden auf die Informationen des Produktmodells möglich (Bild 5).

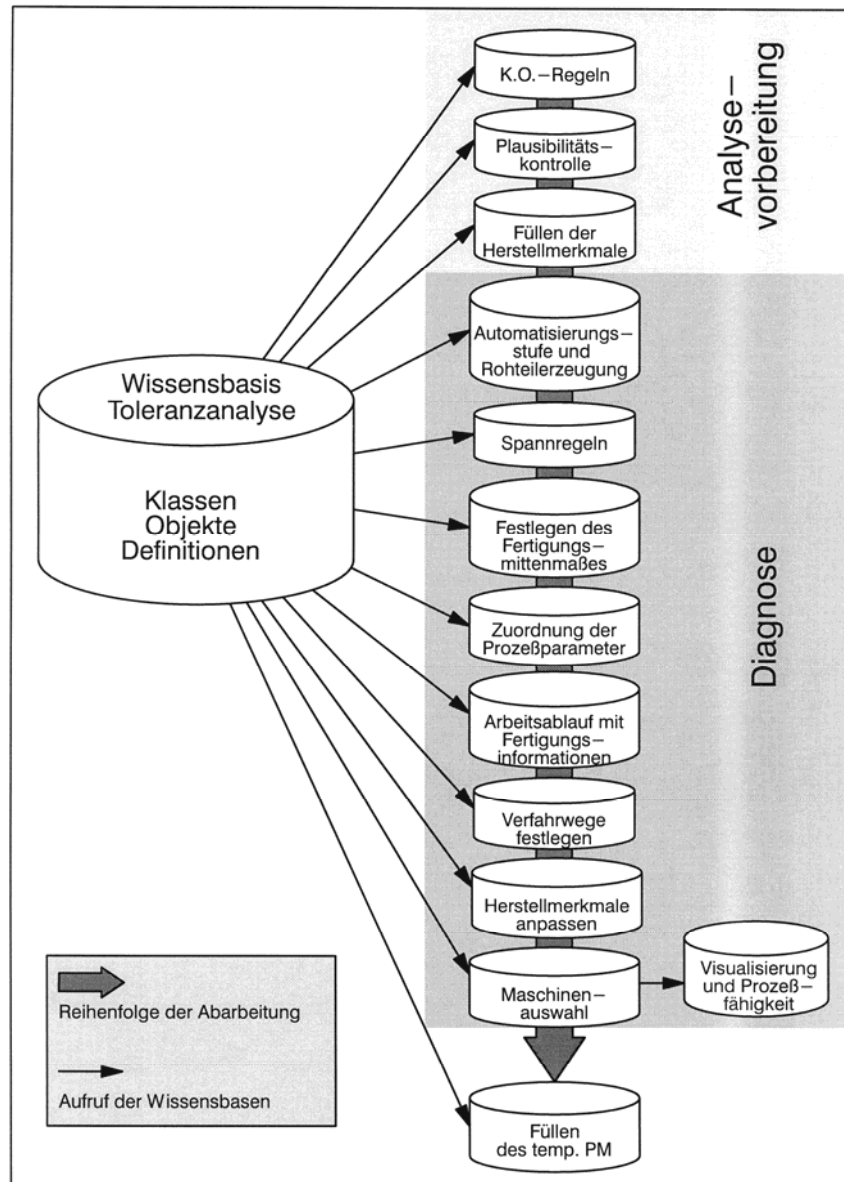


Bild 5: Gliederung des Arbeitsablaufs

Die Analyse setzt sich aus insgesamt 12 Schritten zusammen. Als zusätzliche Sicherheit zur Vermeidung inkorrekt vergabener Toleranzen ist in der Analysevorbereitung der Diagnose eine Plausibilitätsprüfung vorgeschaltet, die Toleranzangaben auf ihre Richtigkeit überprüft, Tolerierungsfehler aufdeckt und diese in Interaktion mit dem Konstrukteur korrigiert. Hierzu sind Regeln (Bild 6) hinterlegt, die die Allgmeintoleranzangaben, den Tolerierungsgrundsatz

und einige Toleranzvergaben auf Plausibilität überprüfen und gegebenenfalls entsprechende Schritte der Korrektur mit dem Konstrukteur einleiten und an das Synthesemodul eine Meldung übermitteln. Dies ist für einen wiederholten Durchlauf der Schleife "Synthese - Analyse - Synthese" sinnvoll, um inkonsistente Zustände aufzudecken.

WENN	DANN
Allgemeintoleranz fehlt	Definition nach DIN ISO 2768mH, Rücksprache
Tolerierungsgrundsatz fehlt	Definition nach DIN 7167, Rücksprache
Zylindermantelfläche eine Lagersitzfläche ist	sind Form-, Maß- und Lagetoleranzen erforderlich
Mehrere Durchmesser-toleranzen auf Zylindermantelflächen existieren	Löschen überflüssiger Angaben nach Rücksprache
Redundante Toleranzangaben existieren	Löschen unnötiger Vergaben nach Rücksprache
Rundheit einer Fläche > Zylindrizität	Rundheit löschen
...	...

Bild 6: Darstellung einiger Regeln der Plausibilitätsprüfung

Die Informationen werden durch die Klasse "Herstellmerkmale" strukturiert im Expertensystemwerkzeug aufbereitet. Sie enthalten die Informationen der geometrischen Flächen sowie der davon abgeleiteten Elemente (z.B. Achse eines Zylinders oder Symmetrieebene einer Paßfedernut) und Informationen der Toleranzen auf dieser Fläche bzw. des davon abgeleiteten Elements.

Unter einem Herstellmerkmal sei in diesem Zusammenhang ein Objekt gemeint, an das die notwendigen geometrischen und technologischen Informationen (Toleranzinformationen und Prozeßinformationen) eines zu bearbeitenden Elements (z.B. Zylindermantelfläche oder Nut) und der davon abgeleiteten Elemente gekoppelt sind (Bild 7) und die in einer technologisch sinnvollen Reihenfolge geordnet werden können.

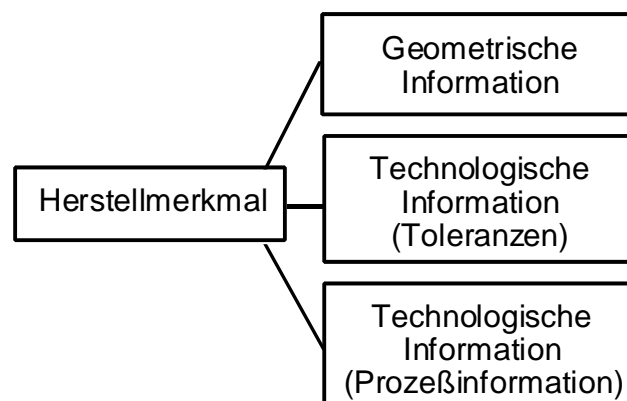


Bild 7: Definition des Herstellmerkmals

Die Objekte der Klasse Herstellmerkmale stehen für die Diagnose zur Verfügung. Die Wissensbasis der Diagnose besteht aus modular angeordneten Teilwissensbasen (Regeln,

Methoden und Fakten), die in Abhängigkeit des zu bearbeitenden Elements, der vergebenen Toleranzen sowie des Tolerierungsgrundsatzes angesprochen werden. Aufgrund der modularen Struktur besteht die Möglichkeit der leichten Erweiterbarkeit der Wissensbasen auf weitere Fertigungsverfahren und Werkstückspektren (z.B. prismatischer Form).

Ziel dieser Strukturierung ist die Kopplung der notwendigen Informationen einer Bearbeitungsfläche bzw. -elements inklusive der Lage der Bearbeitungsfläche zur Spannfläche. Dadurch wird die Ermittlung einer technologisch sinnvollen Reihenfolge der Bearbeitung möglich. Ausgehend von diesen Informationen kann unter Beachtung der oben beschriebenen maschinenbedingten Einflußgrößen sowie der Spannfläche die erreichbare Genauigkeit eines Herstellmerkmals nach Form, Maß und Lage abgeschätzt werden.

In der Diagnose wird die Automatisierungsstufe, das Rohteil, die Spannstellen, das Fertigungsmittelnmaß (unter Beachtung der Form- und Maßtoleranzen), Prozessparameter, Arbeitsablauf und Verfahrenswege festgelegt.

Die Automatisierungsstufe wird durch die zu fertigende Stückzahl, enthalten im Produktmodell definiert. Abhängig von der Stückzahl wird bei kleinen Stückzahlen das Bauteil mit einem Umspannschritt hergestellt, mittlere Stückzahlen ermöglichen das Abarbeiten vom Stangenmaterial, bei großen Stückzahlen sei der Rohling vorgeschmiedet.

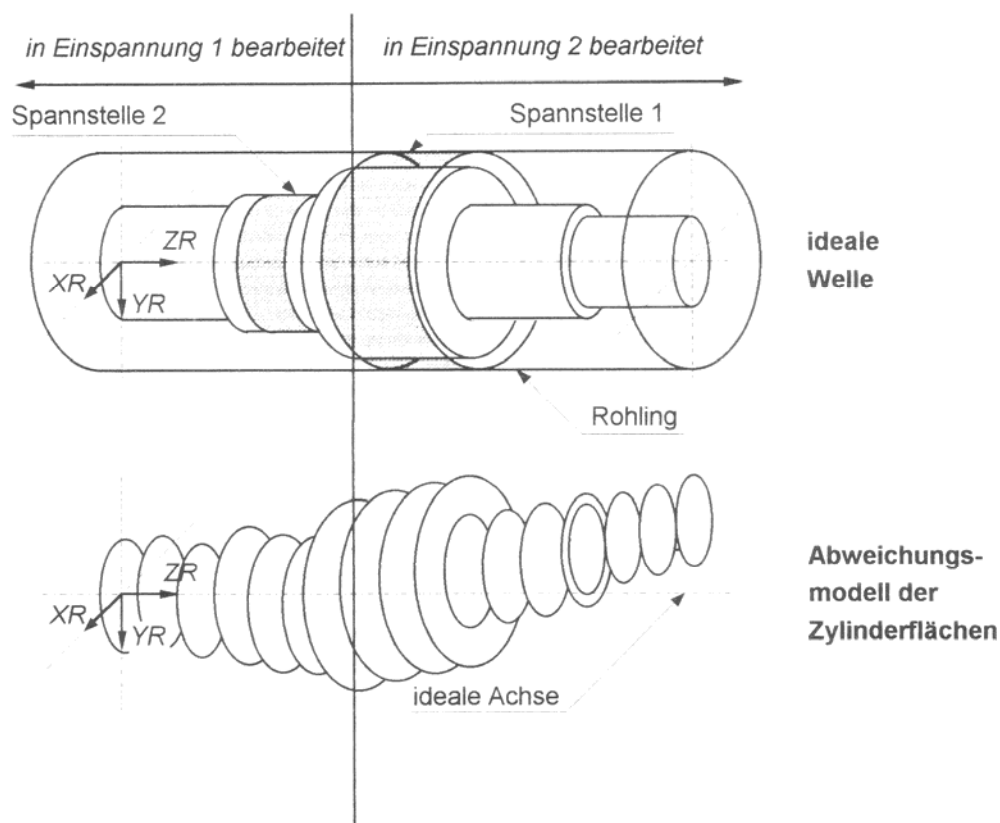


Bild 8: Einfluß der Spannstelle auf die erreichbare Genauigkeit

Die Automatisierungsstufe und die Form des Rohlings bestimmen die Lage der Spannflächen, um alle Flächen bearbeiten zu können. Für die zweite Spannung wird nach Möglichkeit eine genau bearbeitete Fläche (gute Form- und Maßgenauigkeit) genutzt. Diese Betrachtung der Spannung ist wichtig, da aufgrund von Umspannungen die erzielbaren Lagegenauigkeiten verschlechtert werden (Bild 8).

Die Nennmaßgeometrie mit eventuell asymmetrischer Toleranzlage wird auf das Fertigungsmittenmaß mit symmetrischer Toleranzlage umgerechnet. Vorhandene Formtoleranzen werden gemäß /7/ für Durchmessermaßtoleranzen behandelt:

- für die Hüllbedingung:
 $\text{reduzierter } OGW_{\text{Ma\ss}} = \text{Ma\ss} \text{toleranzwert} - \text{Formtoleranzwert}$
 $\text{Fertigungsmittenma\ss} = 0.5 \cdot (\text{reduzierter } OGW_{\text{Ma\ss}} - UGW_{\text{Ma\ss}}) + \text{Nenndurchmesser}$
- für die Unabhängigkeit:
 $\text{Fertigungsmittenma\ss} = 0.5 \cdot (OGW_{\text{Ma\ss}} - UGW_{\text{Ma\ss}}) + \text{Nenndurchmesser}$

Den zu bearbeitenden Flächen werden Prozeßparameter aus einer Datenbank zugeordnet. Um die elastische Deformation des zu bearbeitenden Werkstücks aufgrund der Schnittkräfte zu verringern, werden die Prozeßparameter Schnittgeschwindigkeit, Schnitttiefe und Vorschub in Abhängigkeit der Anforderungen an Form-, Lage- und Maßgenauigkeit angepaßt.

Für den Arbeitsablauf werden die Herstellmerkmale in einer sinnvollen Reihenfolge verknüpft, so daß zuerst geschruppt und geschlichtet und im Anschluß für die Flächen höherer geforderter Genauigkeit, die mit der aktuell betrachteten Maschinenkombination nicht erreicht werden, feingedreht und geschliffen wird. Diese Untersuchungen werden für alle Kombinationen von Maschinen des Maschinenparks durchgeführt, um die Möglichkeit der Fertigung zu überprüfen und mit den Toleranzfestlegungen abzugleichen. Beispielsweise ist es denkbar, die geforderte Genauigkeit auf einer qualifizierten Drehmaschine oder aber mit einer Kombination aus Dreh- und Schleifmaschine zu erreichen.

Die Verfahrenswege im Maschinenkoordinatensystem resultieren aus dem Arbeitsablauf und der Spannstelle für den jeweiligen Bearbeitungsschritt.

Ausgehend von dem Arbeitsablauf und den maschinenbedingten Einflußgrößen läßt sich auf die erreichbare Genauigkeit eines Herstellmerkmals in Abhängigkeit der Aufspannung und Verfahrenswege relativ zur Aufspannung schließen. Hierzu wurden Modelle für verschiedene Bearbeitungsschritte entworfen (Bild 9).

		Formelement			
		Zylinder- fläche	Plan- fläche	Einstich	
Bearbeitung	Drehen ohne Körnerspitze	Modell 1	Modell 2	Modell 3	! Drehen von Zylindermantelflächen ohne Körnerspitze (Modell 1) ! Drehen von Zylindermantelflächen mit Körnerspitze (Modell 4)
	Drehen mit Körnerspitze	Modell 4	Modell 5	Modell 6	! Spitzenloses Außenrundscheifen von Zylindermantelflächen (Modell 7) ! Außenrundscheifen von Zylindermantelflächen zwischen Spitzen (Modell 8)
	spitzenloses Außenrund- scheifen	Modell 7	X	X	! Drehen von Planflächen ohne Körnerspitze (Modell 2)
	Außenrund- scheifen mit Spitzen	Modell 8	X	X	! Drehen von Planflächen mit Körnerspitze (Modell 5) ! Drehen von Einstichen ohne Körnerspitze (Modell 3) ! Drehen von Einstichen mit Körnerspitze (Modell 6)

Bild 9: Übersicht über berücksichtigte Bearbeitungsschritte

	Ursache	Wirkung	Einfluß		
			Form	Maß	Lage
Längsdrehoperation ohne Körnerspitze	Radialschlag (Rundlaufabweichung der Arbeitsspindel)	Mittlerer Radialschlag führt zu Achsverlagerung, Abweichungen davon zu Formfehlern	4	4	4
	Bettschlittenbewegung: Geradheit und Parallelität zur Arbeitsspindelachse	Ungleichförmige Bettschlittenbewegung bewirkt Durchmesserschwankungen	4	4	
Plandrehoperation ohne Körnerspitze	Axialruhe der Arbeitsspindel (Axialschlag)	Verwindung der Planfläche	4	4	4
	Rundlaufabweichung der Arbeitsspindel (nur mittlerer Radialschlag beim Drehen ohne Körnerspitze)	Verschiebung der Planfläche gegenüber der idealen Achse	4	4	4
	Rechtwinkligkeit der Arbeitsspindelachse zur Bewegung des Querschlittens (Ober Schlitten)	Kegelig entartete Planfläche	4	4	
Längsdrehoperation mit Körnerspitze	Radialschlag (Rundlaufabweichung) der Arbeitsspindel	Mittlerer Radialschlag entfällt, Abweichungen davon bewirken Formfehler	4	4	4
	Bettschlittenbewegung: Geradheit und Parallelität zur Arbeitsspindelachse	Ungleichmäßige Bettschlittenbewegung bewirkt Durchmesserschwankung	4	4	
	Abstandsgleichheit der Zentrierspitzen (Versatz der Zentrierspitzen entspricht schiefer Werkstückeinspannung)	Versatz der Zentrierspitzen führt zu einer kegeligen Ausbildung der Zylinderfläche	4	4	
Plandrehoperation mit Körnerspitze	Axialruhe der Arbeitsspindel (Axialschlag)	Verwindung der Planfläche	4	4	4
	Rechtwinkligkeit der Arbeitsspindelachse zur Bewegung des Querschlittens (Ober Schlitten)	Kegelig entartete Planfläche	4	4	
	Reitstockversatz (Abstandsgleichheit der Zentrierspitzen)	Zapfenbildung an Wellenden	4	4	

Bild 10: Darstellung von Ursache, Wirkung und Einfluß auf die erreichbare Genauigkeit nach Form, Maß und Lage

Bild 10 zeigt die maschinenbedingten Ursachen und ihre Auswirkungen auf die zu fertigende Zylindermantelfläche und Planfläche.

Die maschinenspezifischen Einflußgrößen der Betriebsmittel liegen in einer Datenbank vor, die firmenspezifisch definiert und gewartet werden kann.

Ausgehend von der erreichbaren Genauigkeit eines Herstellmerkmals bzw. des davon abgeleiteten Elements, gegliedert nach den Kriterien Prüfwerkstück, geometrische Prüfung der Werkzeugmaschine und Positionsunsicherheit der CNC-Maschinenachsen, ist ein Abgleich mit den geforderten Genauigkeiten nach Form, Maß und Lage möglich.

3 Darstellung der Analyseergebnisse

Die Analyseergebnisse werden dem Konstrukteur auf Wunsch für jedes Herstellmerkmal gegliedert nach Toleranzinformationen, technologischen Parametern (Prozeßparameter) und Genauigkeit der aktuell betrachteten Maschinenkombination aufgelistet. Hierbei wird das entsprechende Herstellmerkmal im CAD-System markiert und die Informationen tabellarisch mit einem Hilfswerkzeug (Web-Browser) visualisiert (Bild 11).

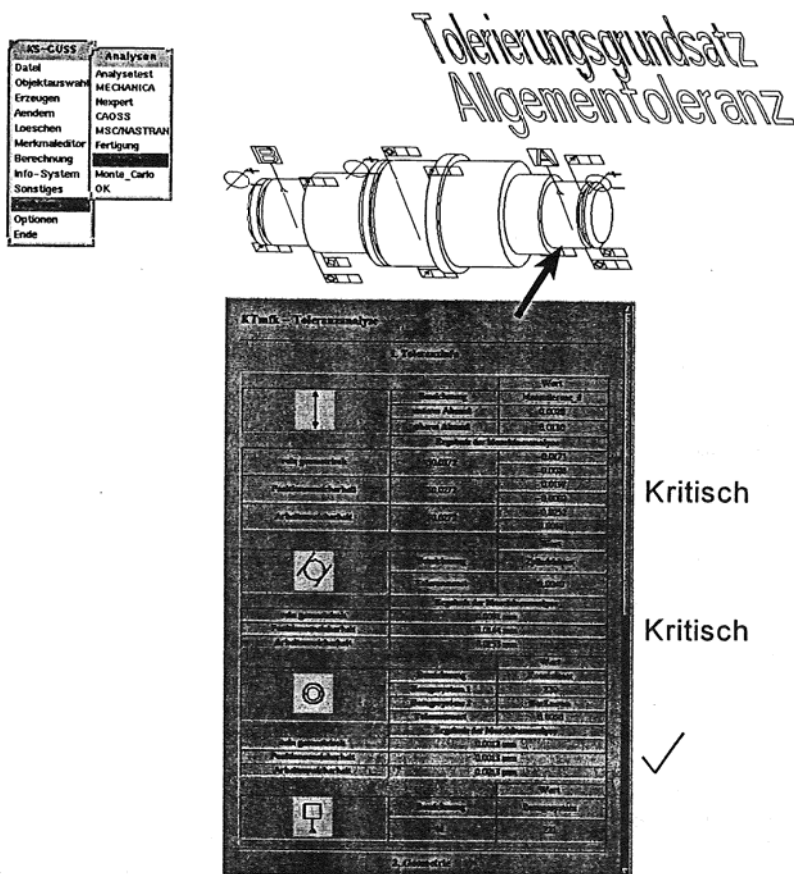


Bild 11: Beispiel einer Darstellung der Analyseergebnisse im System

Festgestellte Verstöße gegen die Fertigbarkeit von Toleranzfestlegungen werden dem Synthesemodul über das Produktmodell des Konstruktionssystems *mfk* im Sinne einer Rückkopplung gemeldet.

Bauteil: Antriebswelle		Bearbeitungsschritt:	30
Tolerierungsgrundsatz: DIN ISO 8015/UNABHAENGIGKEITSPRINZIP		Bezeichnung:	Laengsfeindreihen150
Begründung: Huellbedingung wird explizit definiert		Bearbeitung:	Feindreihen
Allgemeintoleranz:		Fertigungsdurchmesser:	50.0055 -0.0035/0.0035 mm
Begründung: genuegt den Anforderungen		Toleranzinformation:	
Form/Lage: mittel-grob		Bezeichnung:	Durchmesser-Masstoleranz
Masstoleranz: mittel		Materialbedingung:	Prinzip des Tolerierungsgrundsatzes gilt.
Stueckzahl: 250		Abmass:	0.0020...0.0130
Bauteil wird waehrend der Bearbeitung umgespannt.		Erreichbare Werte:	
Rohlingsabmessungen:		rein geometrisch:	50.02636 -0.00375/-0.01627 mm
Durchmesser: 100 mm		Positionsunsicherheit:	50.02636 -0.00109/-0.01892 mm
Laenge: 294 mm		Arbeitsunsicherheit:	50.02636 0.00435/-0.02436 mm
Spannebene1:		Bezeichnung:	Zylindrizitaet
Abstand zur Ebene1: 112.00 mm		Toleranzwert:	0.0040
Abstand zur Ebene2: 182.00 mm		Erreichbare Werte:	
Spannebene2:		rein geometrisch:	0.00803 mm
Abstand zur Ebene1: 142.00 mm		Positionsunsicherheit:	0.01334 mm
Abstand zur Ebene2: 152.00 mm		Arbeitsunsicherheit:	0.02422 mm
* Drehmaschine: Maschine1 *		Bezeichnung:	Koaxialitaet der Achse
* Drehlaenge: 1800 mm *		Bezugssystem1:	221
* Umlaufdurchmesser: 700 mm *		Bezugssystem2:	
* Resultat: !ACHTUNG! Fertigung ist NICHT moeglich! *		Toleranzwert:	0.0050
		Erreichbare Werte:	
		rein geometrisch:	0.00126 mm
		Positionsunsicherheit:	0.00126 mm
		Arbeitsunsicherheit:	0.00126 mm
		Bezeichnung:	Bezugssystem Id: 220
		Verfahrwege in Bezug auf Spannstelle2:	
		x-Richtung:	25.00275 mm
		z-Richtung:	140.00000 mm ... 100.00000 mm
		Schnitttiefe [mm]:	1.0
		Vorschub [mm]:	0.2
		Schnittgeschw. [m/min]:	221.3
		Freiwinkel [Grad]:	[6.0...10.0]
		Spanwinkel [Grad]:	[12.0...18.0]
		Neigungswinkel [Grad]:	-4.0
		Werkzeugradius [mm]:	1.2
		Erreichbare	
		Rauhtiefe [1/1000 mm]:	4.3



Bild 13: Auszug aus einem Ergebnisprotokoll der Analyse auf Fertigungsgerechtigkeit

4 Literatur

- /1/ Pfeifer, T.; Fürst, A.; Wiechern, R.: Prüfwerkstücke als Kriterium zur Beurteilung der Arbeitsgenauigkeit von NC-Werkzeugmaschinen, Westdeutscher Verlag Opladen, 1978
- /2/ Normen DIN 8601, DIN 8605, DIN 8606, DIN 8607, DIN 8609, DIN 8630, DIN 8631, DIN 8632, DIN 8634
- /3/ Richtlinien VDI/DGQ 3441, VDI/DGQ 3442, VDI/DGQ 3445, Statistische Prüfung der Arbeitsgenauigkeit, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1977
- /4/ Spur, G.: Die Genauigkeit von Maschinen - Eine Konstruktionslehre, Carl Hanser Verlag, München, 1996
- /5/ Meerkamm, H.; Löffel, Ch.; Schweiger, W.: Integration von Berechnungswerkzeugen in den Konstruktionsprozeß - ein ganzheitlicher Ansatz auf Basis des Konstruktionssystems mfk, Konstruktion, 1997
- /6/ Bachschuster, St.: Architektur und Konzept zur Realisierung eines produktspezifisch erweiterbaren Konstruktionssystems, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1997
- /7/ Szyminski, S.: Toleranzen und Passungen: Grundlagen und Anwendung, Vieweg Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1993
- /8/ Trumpold, H., Beck, Ch., Richter, G., Toleranzsysteme und Toleranzdesign, Carl Hanser Verlag, München, 1997
- /9/ Dietrich, E.; Schulze, A.: Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozeßqualifikation, Carl Hanser Verlag, München, 1996
- /10/ Norm DIN ISO 1101, Form- und Lagetolerierung, Beuth Verlag, Berlin, 1995
- /11/ Meerkamm, H.; Weckenmann, A.; Jorden, W.: Systemgerechte Grenzgestaltdefinition, Paketantrag, Erlangen, Paderborn, 1994, 1997

Dipl.-Ing. Rüdiger Hochmuth
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Martensstr. 9
D-91058 Erlangen
Tel.: 09131/85-7987
Email: hochmuth@mfk.uni-erlangen.de
URL: <http://www.mfk.uni-erlangen.de>