



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik **iwf**



Vorlesung Fertigungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder, Dr.-Ing. Anke Müller, 25. Juni 2018
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik **iwf**



Kapitel 10: Fertigungsmesstechnik und Prozessüberwachung

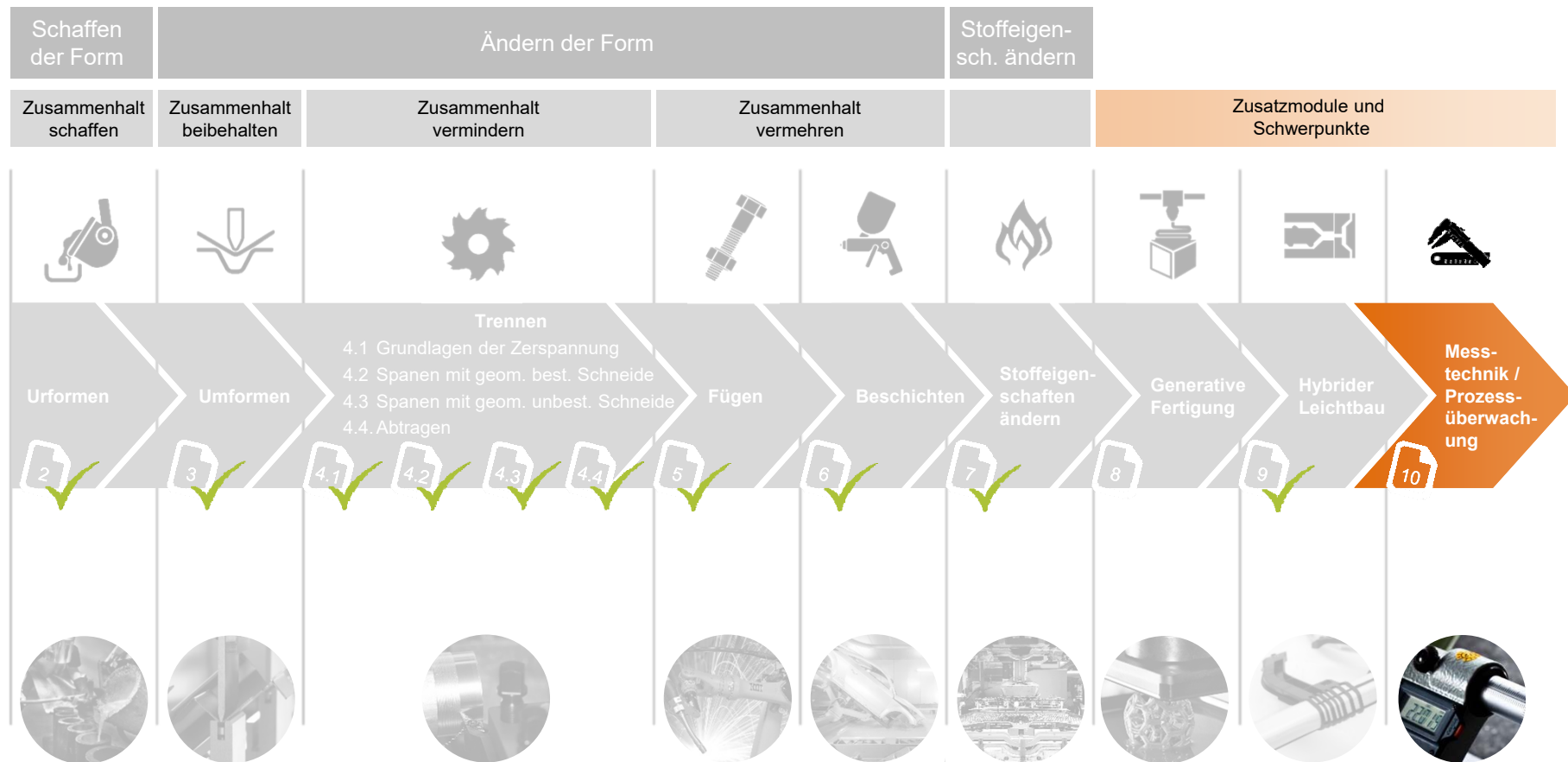
Dr.-Ing. Anke Müller, 25. Juni 2018

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

Einheiten der Vorlesung Fertigungstechnik

Fertigungsmesstechnik und Prozessüberwachung

Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580



Technische
Universität
Braunschweig

10. Juli 2017 | Folie 4

Bildquellen: Pexels

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik **WZL**

Ziele der heutigen Vorlesung/Übung



Fertigungsmesstechnik

Definition Messen und Prüfen

Messen: Vergleichen mit einer vereinbarten Einheit
Messwert = Zahl * Einheit

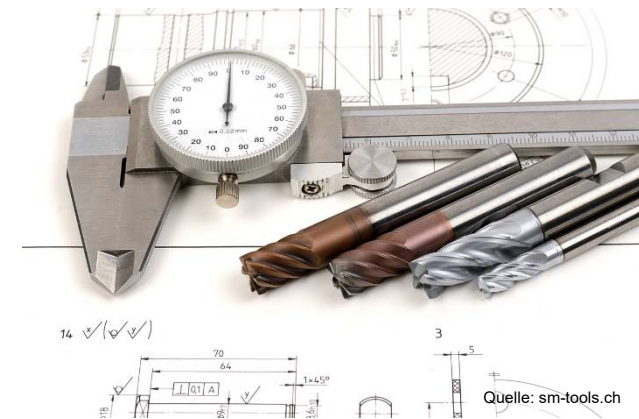
Prüfen: Untersuchen, inwieweit ein Objekt eine Forderung erfüllt

Unterscheidung zwischen:

- nicht-maßlicher/qualitativer und
- maßgeblicher/quantitativer Prüfung

Prüfobjekte in der Fertigungstechnik sind:

- Werkstücke
- Maschinen und Werkzeuge
- Mess- und Prüfmittel



Fertigungsmesstechnik

Typische Prüfaufgaben

Werkstoffprüfung	Geometrieprüfung	Sensorische Prüfung	Funktionsprüfung
Riss	Form	Farbe	Kraft
Gefüge	Maß	Glanz	Geräusch
Härte	Lage	Geruch	Moment
E-Modul	Rauheit	Haptik	Drehzahl
...

In der industriellen Fertigung kommt der **Geometrieprüfung** die größte Bedeutung zu



Fertigungsmesstechnik

Gestaltabweichung



Wirtschaftliche Fertigung:

→ Achtung bei Angabe von Toleranzen in technischen Zeichnungen

Nur so genau wie notwendig und nicht so genau wie möglich produzieren!



Die Gestalt von Bauteilen kann in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- **Grobgestalt** (Maß, Form, Lage)
- **Feingestalt** (Welligkeit, Rauheit)

Gestaltabweichung: die Gesamtheit aller Abweichungen, die zwischen der Ist-Oberfläche und der Soll-Oberfläche liegen

Fertigungsmesstechnik

Gestaltabweichung nach DIN 4760

Gestaltabweichung (als Profilschnitt überhöht dargestellt)	Beispiele für die Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache
1. Ordnung: Formabweichungen 	Geradheits-, Ebenheits-, Rundheits- Abweichung, u.a.	Fehler in den Führungen der Werkzeugmaschine, Durchbiegung der Maschine oder des Werkstückes, falsche Einspannung des Werkstückes, Härteverzug, Verschleiß
2. Ordnung: Welligkeit 	Wellen (siehe DIN 4761)	außermittige Einspannung, Form- oder Laufabweichungen eines Fräasers, Schwingungen der Werkzeugmaschine oder des Werkzeuges
3. Ordnung: Rauheit 	Rillen (siehe DIN 4761)	Form der Werkzeugschneide, Vorschub oder Zustellung des Werkzeuges
4. Ordnung: Rauheit 	Riefen, Schuppen, Kuppen (siehe DIN 4761)	Vorgang der Spanbildung (Reißspan, Scherspan, Aufbau-schneide), Werkstoffverformung beim Strahlen, Knospenbildung bei galvanischer Behandlung
5. Ordnung: Rauheit 	Gefügestruktur	Kristallisationsvorgänge, Veränderung der Oberfläche durch chemische Einwirkung (z.B. Beizen), Korrosionsvorgänge
6. Ordnung: 	Gitteraufbau des Werkstoffes	

Die dargestellten Gestaltabweichungen 1. bis 4. Ordnung überlagern sich in der Regel zu der Ist-Oberfläche.
Beispiel:



Nach DIN 4760



Technische
Universität
Braunschweig

Dr.-Ing. Anke Müller | Fertigungstechnik

10. Juli 2017 | Folie 13

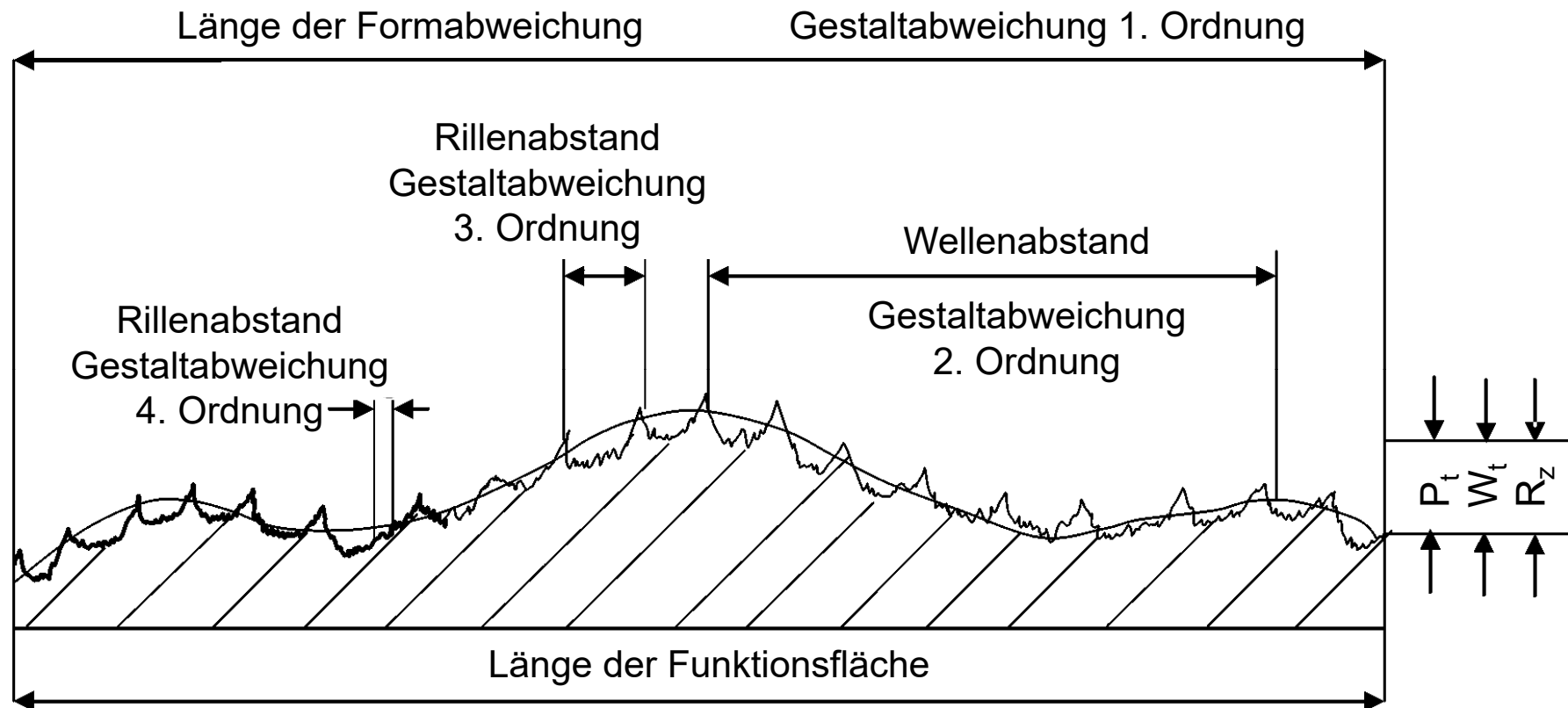
Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik



Fertigungsmesstechnik

Gestaltabweichung nach DIN 4760

i.A. überlagern sich Rauheit und Welligkeit → beide Feingestaltabweichungen getrennt voneinander erfassen



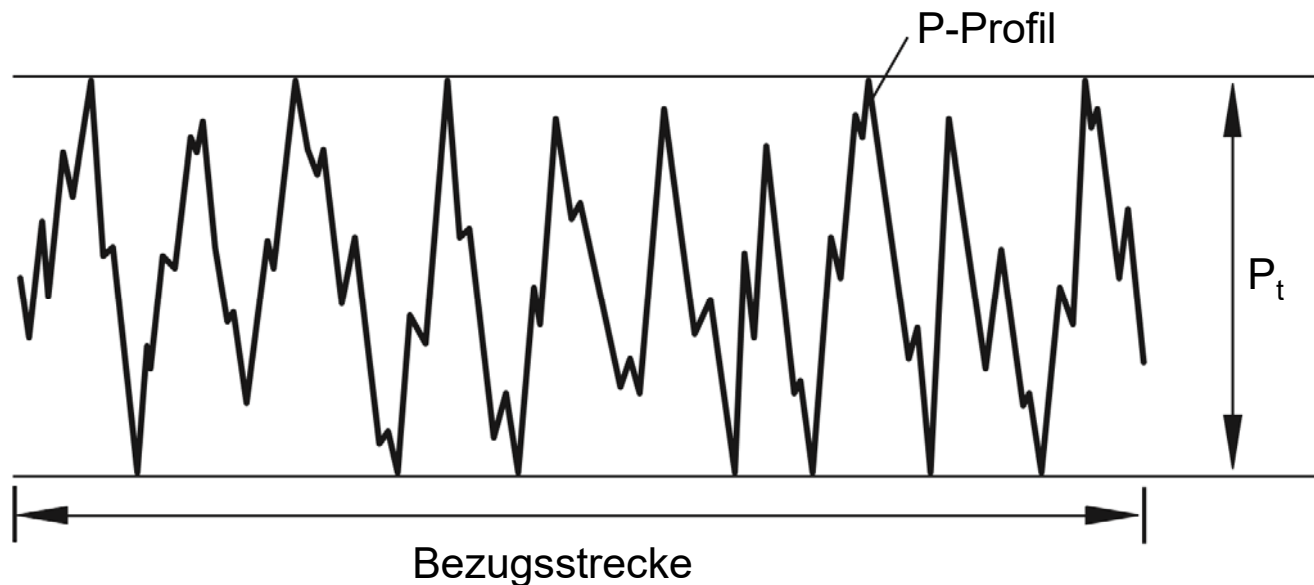
Nach DIN 4287

Grundlagen der Fertigungsmesstechnik

Messgrößen zur Beschreibung techn. Oberflächen

Profiltiefe P_t :

Summe aus der Höhe der größten Profilspitze und der Tiefe des größten Profiltals des P-Profiles innerhalb der Bezugsstrecke. P_t ist also Maß für die über die Bezugsstrecke erfassten Gestaltsabweichungen der Oberfläche (Form, Welligkeit, Rauheit)



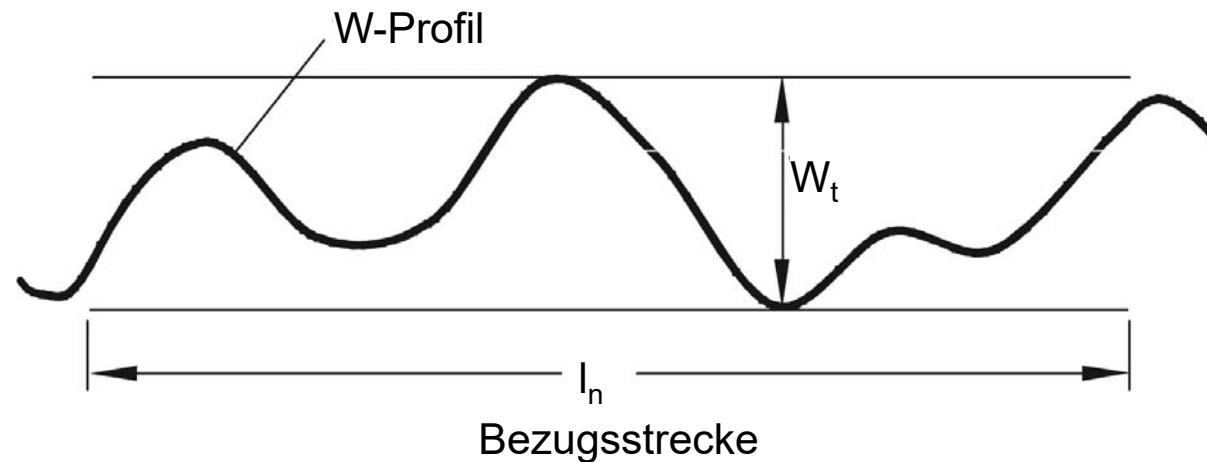
Nach DIN 4287

Grundlagen der Fertigungsmesstechnik

Messgrößen zur Beschreibung techn. Oberflächen

Wellentiefe W_t :

Summe aus der Höhe der größten Profilspitze und der Tiefe des größten Profiltals des W-Profiles innerhalb der Messstrecke. W_t ist ein Maß für die Welligkeit der Oberfläche.



Grundlagen der Fertigungsmesstechnik

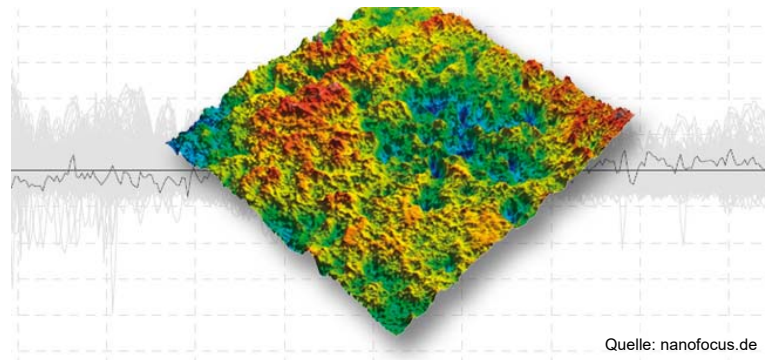
Messgrößen zur Beschreibung techn. Oberflächen

Einzelrautiefe R_{zi} :

Summe aus der Höhe der größten Profilspitze und der Tiefe des größten Profiltals des Rauheitsprofils R innerhalb der Einzelmessstrecke l_r . Die Länge von l_r entspricht der in DIN EN ISO 4288 genannten Grenzwellenlänge λ_c .

Maximale Rautiefe R_{max} :

größte Einzelrautiefe R_{zi} innerhalb der gesamten Messstrecke l_n . R_{max} ist ein Maß für die Ausprägung der Oberflächenrauheit senkrecht zur Prüffläche.



Rauheitsmessung

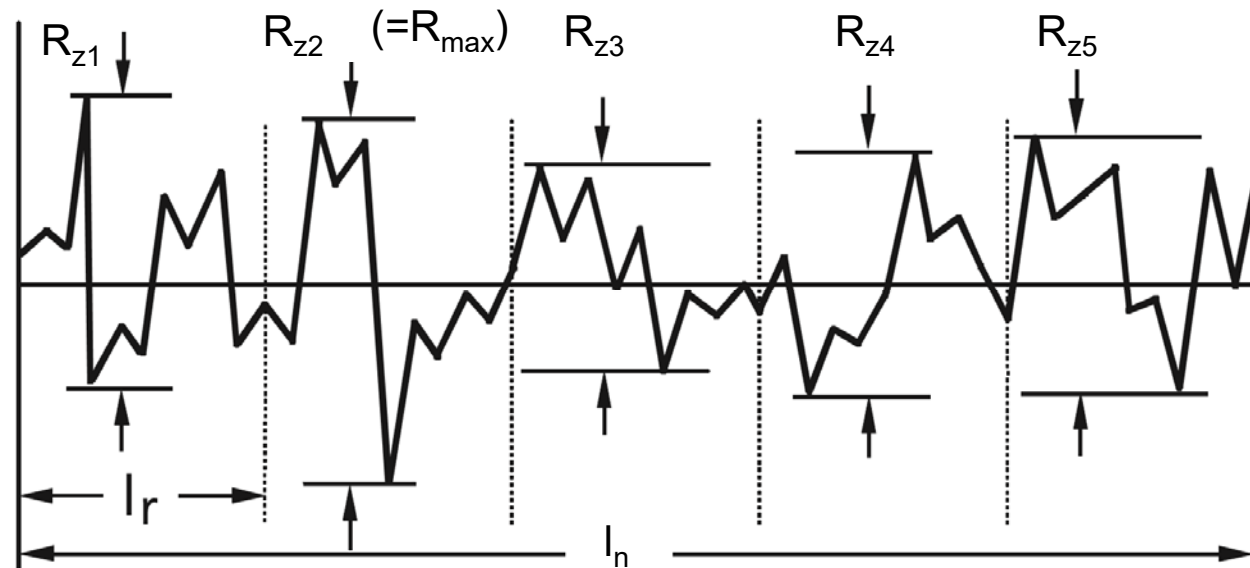
Grundlagen der Fertigungsmesstechnik

Messgrößen zur Beschreibung techn. Oberflächen

Gemittelte Rautiefe R_z :

Arithmetisches Mittel aus den fünf Einzelrautiefe R_{zi} , deren Einzelmessstrecken aneinandergrenzen.

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_z(i)$$



Nach DIN 4287

Grundlagen der Fertigungsmesstechnik

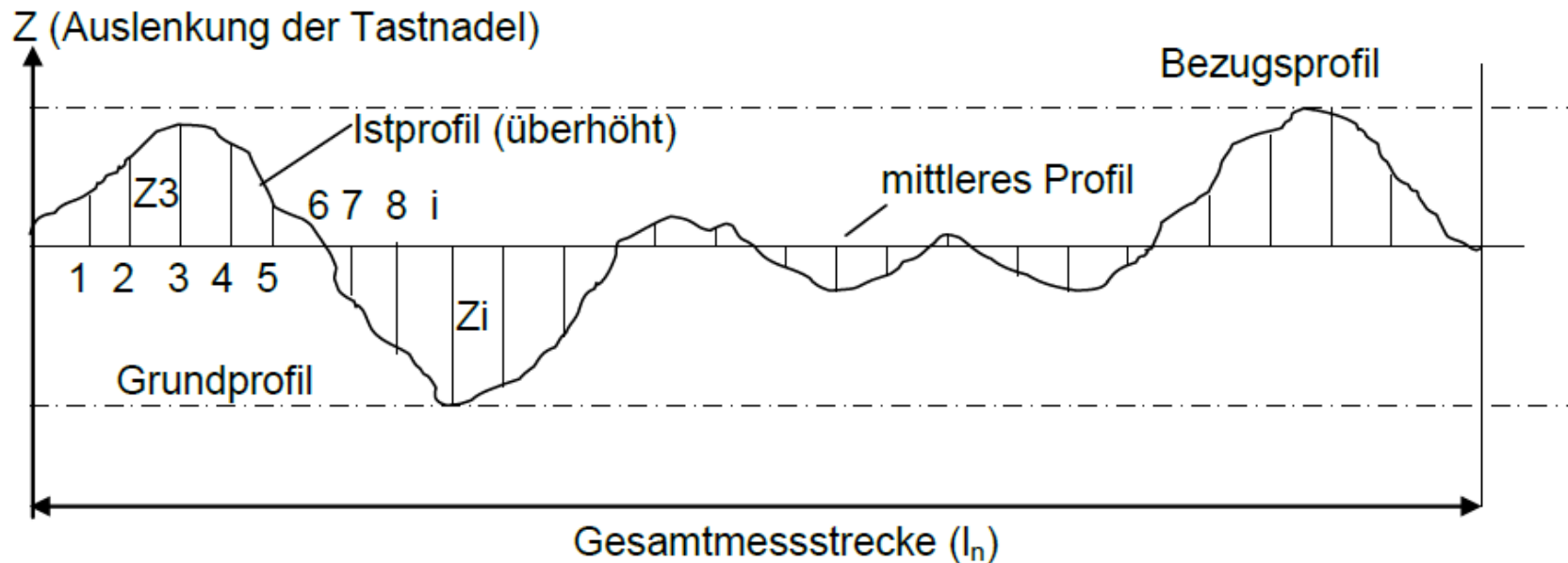
Messgrößen zur Beschreibung techn. Oberflächen

Arithmetischer Mittenrauwert R_a :

Arithmetischer Mittelwert der Beträge aller Profilwerte des Rauheitsprofils.

Sie ist einfach zu messen, besitzt aber nur eine sehr eingeschränkte Aussage für die Ausprägung einzelner Profilmerkmale.

$$R_a = \frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} |Z(x)| dx$$



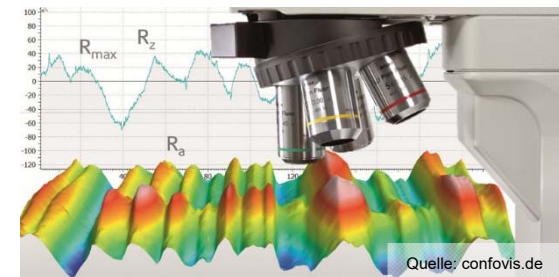
Nach DIN 4287

Grundlagen der Fertigungsmesstechnik

Messgeräte zur Beschreibung techn. Oberflächen

Taktil	Optisch
Tastschnittgerät (mechanische Abtastung)	Mikroskopie (z.B. konfokal, Laser~, Interferometer)
<ul style="list-style-type: none"> + Standard, umfassendes Normenwerk + reproduzierbare Ergebnisse + lange Messstrecken (50-100 mm) - geringe Tastgeschwindigkeit - berührendes Verfahren (Deformation, Kratzspuren) - Radius der Tastspitze 	<ul style="list-style-type: none"> + berührungslos + schnell + hohe Auflösung von $<1 \mu\text{m}$ möglich - meist kleines Messfeld

- empfindlich gegen Erschütterungen und Vibrationen
 - schwingungsisolierte Lagerung sinnvoll
 - Ergebnisse taktil/optisch
meist nicht direkt vergleichbar

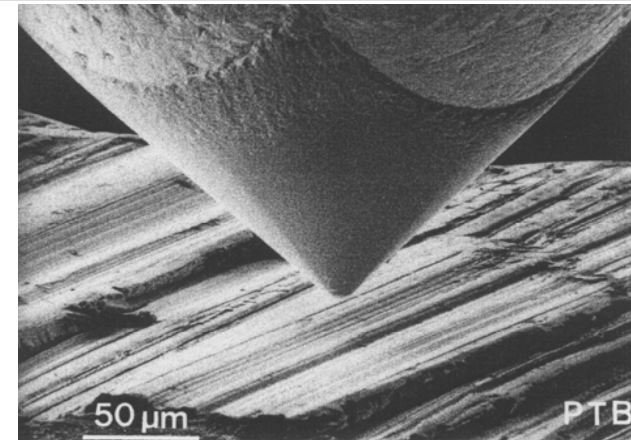


Grundlagen der Fertigungsmesstechnik

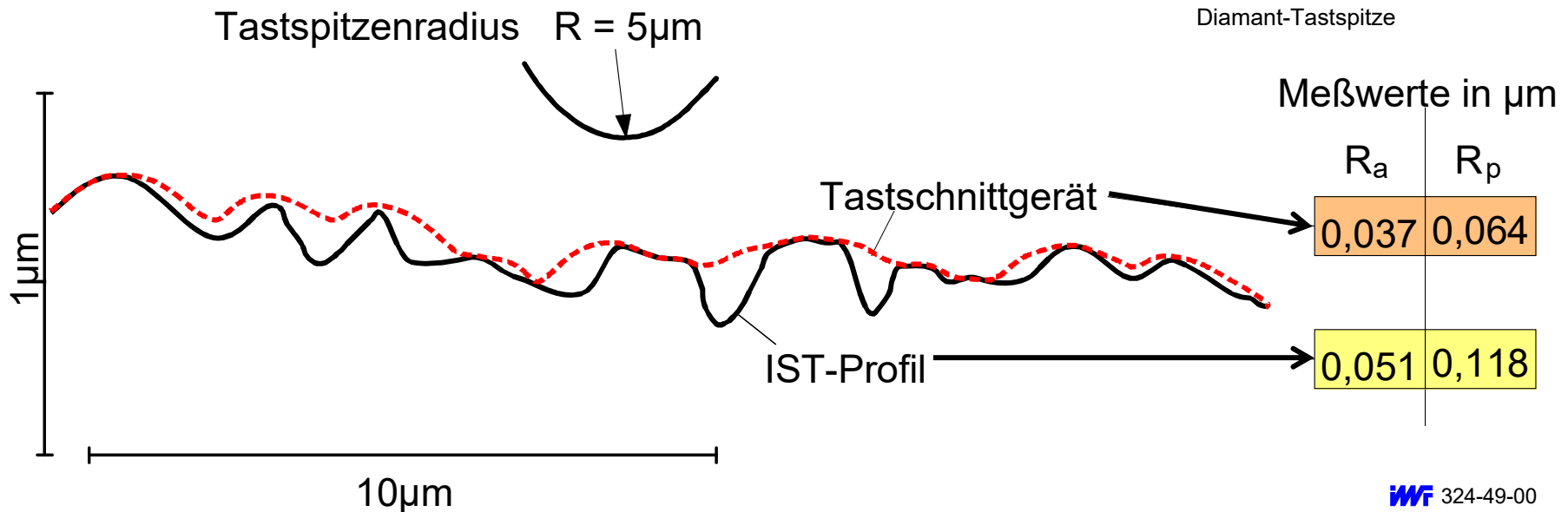
Messgeräte zur Beschreibung techn. Oberflächen

Tastschnittgeräte:

Abweichung der Tastschnittmessung
von der Ist-Oberfläche aufgrund
des Tastspitzenradius



Diamant-Tastspitze



WF 324-49-00

Quelle: PTB



Technische
Universität
Braunschweig

Dr.-Ing. Anke Müller | Fertigungstechnik

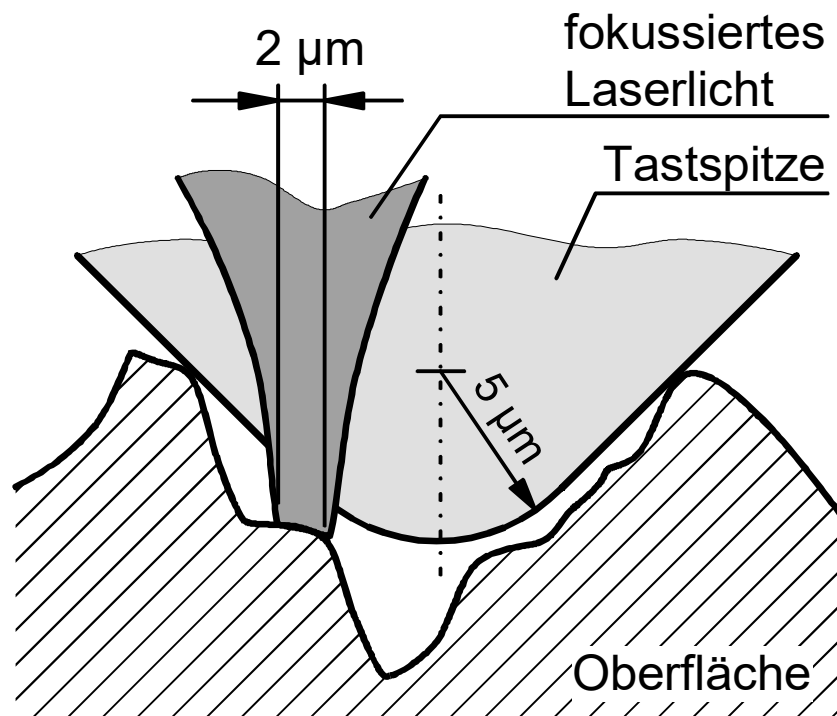
10. Juli 2017 | Folie 24

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik **WF**

Grundlagen der Fertigungsmesstechnik

Messgeräte zur Beschreibung techn. Oberflächen

Vergleich taktile und optische Messung (Interferometrie):



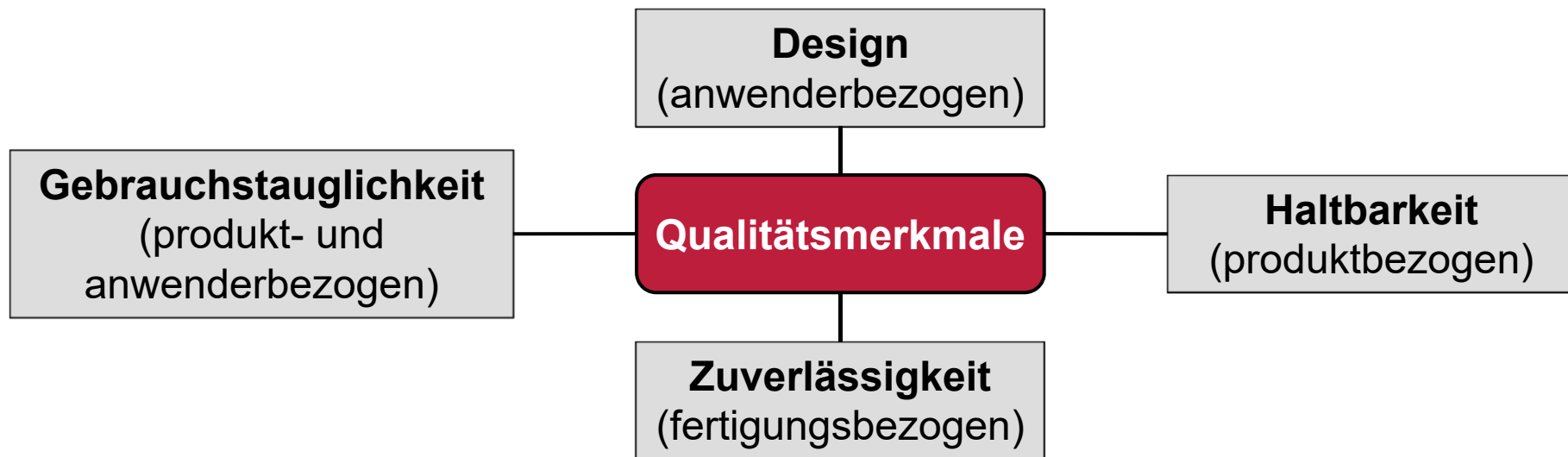
- **Taktil:**
Kegelwinkel Tastdiamant 90°
Tastspitzenradius $R_s = 5 \mu\text{m}$
- **Optisch (Beispiel):**
Fokusbereich $d = 2 \mu\text{m}$
Max. Flankenwinkel 70°

Fertigungsmesstechnik

Definition Qualität

Fertigungsbezogener Ansatz:

- Qualität ist Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen.
- Deutsches Institut für Normung (DIN) in Zusammenarbeit mit der Deutschen Gesellschaft für Qualität (DGQ)



Fertigungsmesstechnik

Qualitätssicherung

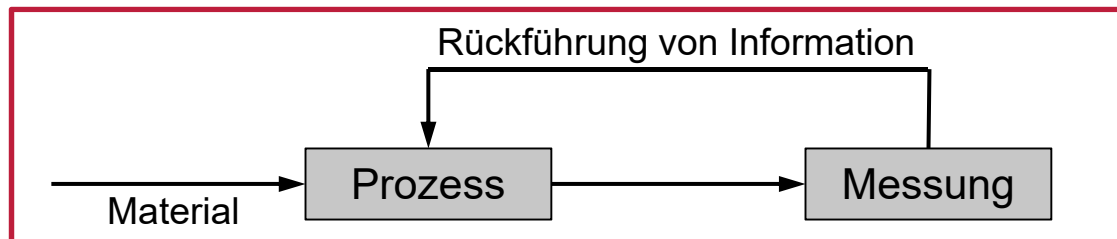
Aufgaben der Qualitätssicherung:

Sicherstellung fehlerfreier Produkte, d.h. so wie der Kunde sie erwartet

Durchführung:

Rückführung der Messdaten in einen Qualitätsregelkreis

- Behebung der Ursachen von Abweichungen
- langfristige Stabilisierung des Fertigungsprozesses
- Reduzierung der Material- und Nachbearbeitungskosten
- Planbarkeit von Terminen und Mengen wird verbessert



- Systematische Grundlage bildet hierbei die **statistische Prozessregelung SPC** (Statistical Process Control)

Fertigungsmesstechnik

Die statistische Prozessregelung SPC

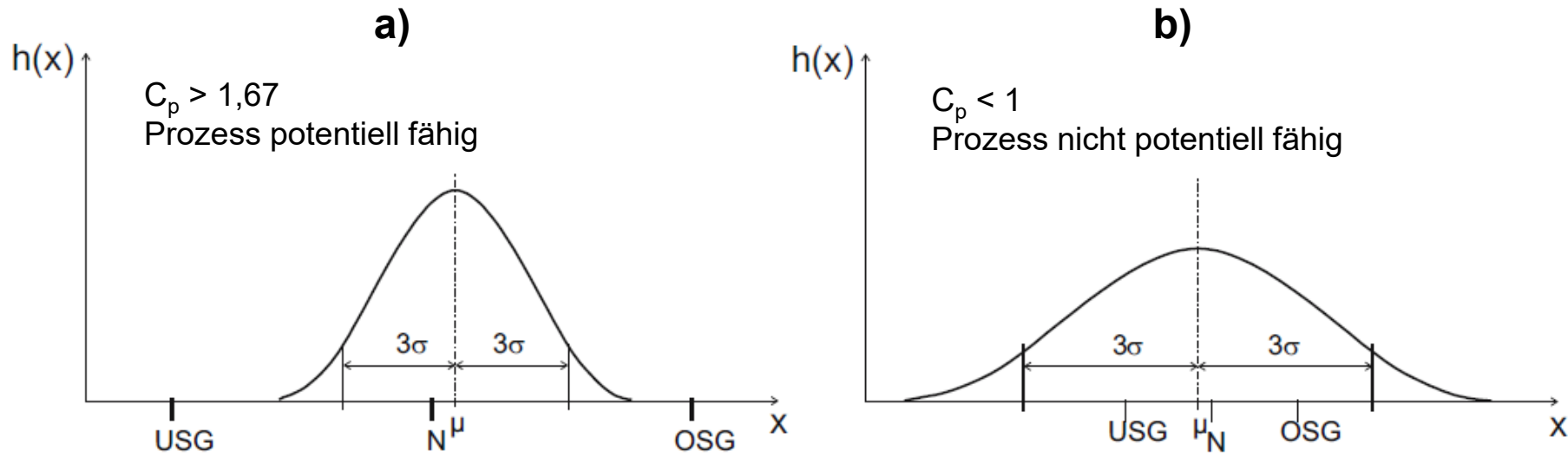
- Vergleich der stat. Streuung des Prozesses mit dem für die jeweilige Messgröße zugelassenen Toleranzintervall

$$c_p = \frac{OSG - USG}{6\sigma}$$

- OSG: obere Sollwertgrenze
 - USG: untere Sollwertgrenze
- Maß für die Streuung: Vertrauensintervall des Erwartungswertes mit der stat. Sicherheit 99,7% (Grundlage: Normalverteilung)
- Nur wenn Streuung deutlich kleiner ist als das Vertrauensintervall, kann der Prozess überhaupt beherrscht werden.
- Es gilt:
Potentiell fähige Prozesse: $c_p > 1,67$

Fertigungsmesstechnik

Die statistische Prozessregelung SPC



USG: untere Sollwertgrenze
OSG: obere Sollwertgrenze
N: Nennwert
 μ : Erwartungswert
 σ : Standardabweichung

a) Prozess ist potentiell fähig, da die Streuung kleiner als der Toleranzbereich ist

b) Prozess ist nicht potentiell fähig, da die Streuung größer als der Toleranzbereich ist



Fertigungsmesstechnik

Die statistische Prozessregelung SPC

- Die tatsächliche Prozessfähigkeit setzt sich zusammen aus der Streuung (c_p -Koeffizient) und der hinreichend zentralen Verteilung im Intervall.
- Der Abstand zwischen dem Erwartungswert und oberer bzw. unterer Sollwertgrenze muss möglichst groß sein.

$$c_{pk} = \min\left(\frac{OSG - \mu}{3\sigma}; \frac{\mu - USG}{3\sigma}\right)$$

c_{pk} : Index der tatsächlichen Prozessfähigkeit

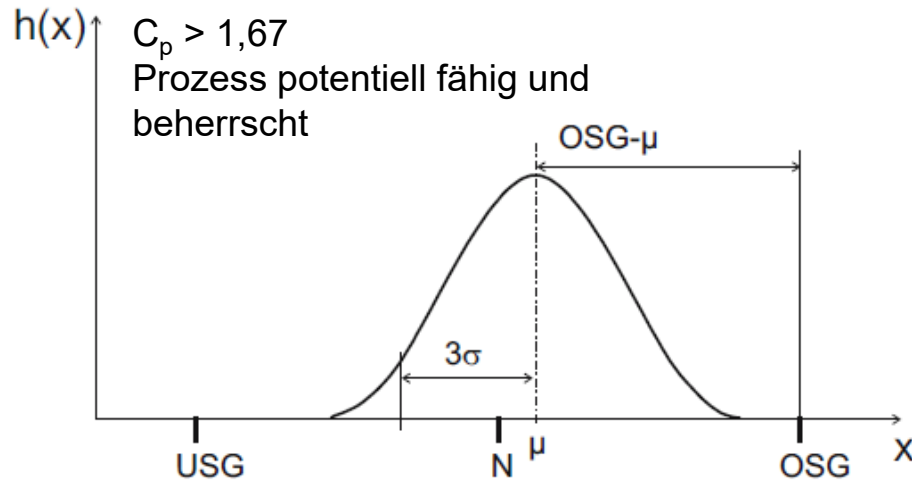
$c_{pk} > 1,67$: beherrschter Prozess



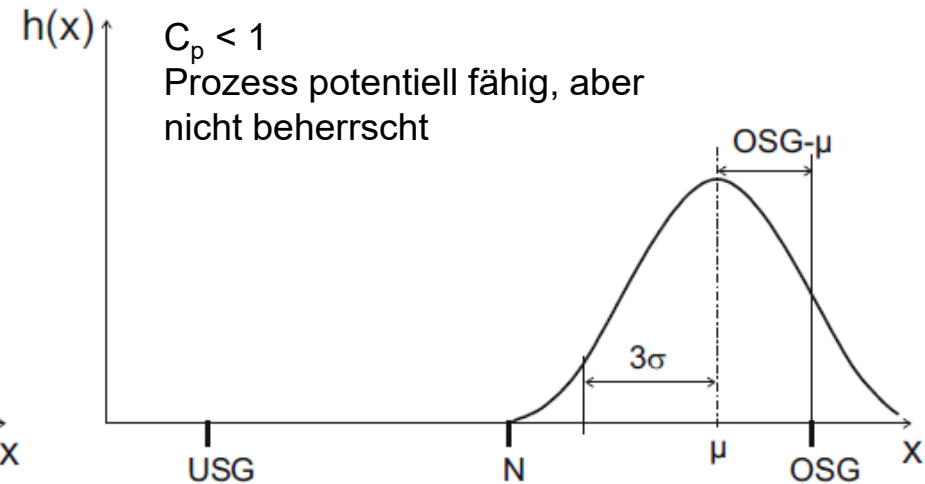
Fertigungsmesstechnik

Die statistische Prozessregelung SPC

a)



b)



USG: untere Sollwertgrenze
OSG: obere Sollwertgrenze
N: Nennwert
 μ : Erwartungswert
 σ : Standardabweichung

a) Beherrschter Prozess

b) Nicht beherrschter Prozess



Technische
Universität
Braunschweig

Dr.-Ing. Anke Müller | Fertigungstechnik

10. Juli 2017 | Folie 31

Quelle: Handbuch für Mess- und Automatisierungstechnik

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik **WMF**

Grundlagen der Prozessüberwachung

Anforderungen an den Prozess

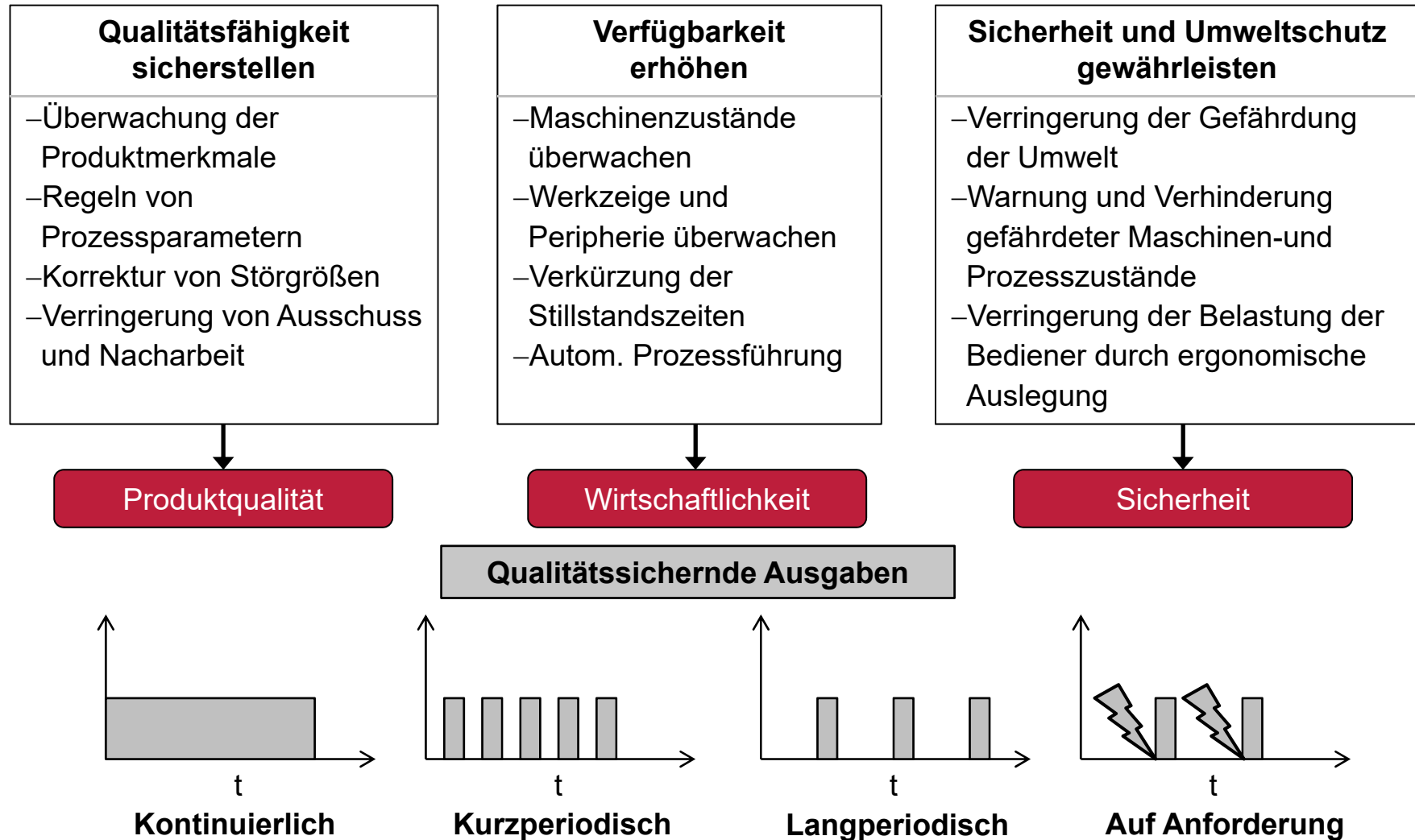
- Wachsende Produktqualität
- Kurze Innovationszeiten
- Hohe Variantenvielfalt
- Umweltgerechte Produktgestaltung
- Zunehmender Kostendruck



- Hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten und Genauigkeiten
- Prozessüberwachung zur Sicherstellung der Qualitätsfähigkeit, Erhöhung der Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen sowie zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen

Grundlagen der Prozessüberwachung

Ziele der Prozessüberwachung



Grundlagen der Prozessüberwachung

Aufgaben

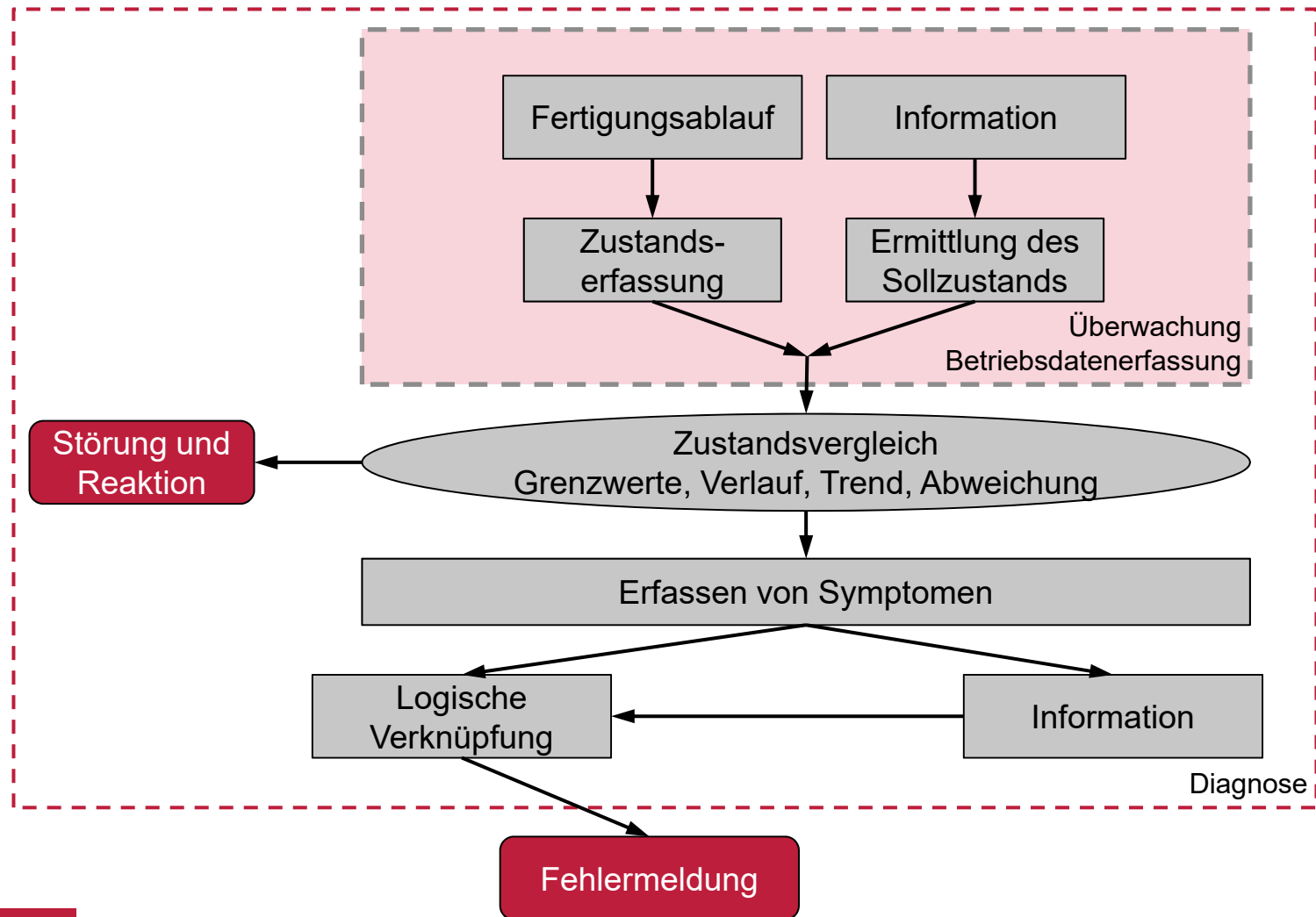
Aufgaben der Prozessüberwachung:

- Erfassen des gegenwärtigen Zustands eines Prozesses oder Systems
- Vergleich des gegenwärtigen Zustands mit dem Sollzustand
- Bei Nicht-Vorliegen des Sollzustands: Einleitung von Maßnahmen, wie z.B. Fehlermeldungen



Grundlagen der Prozessüberwachung

Der Zerspanprozess

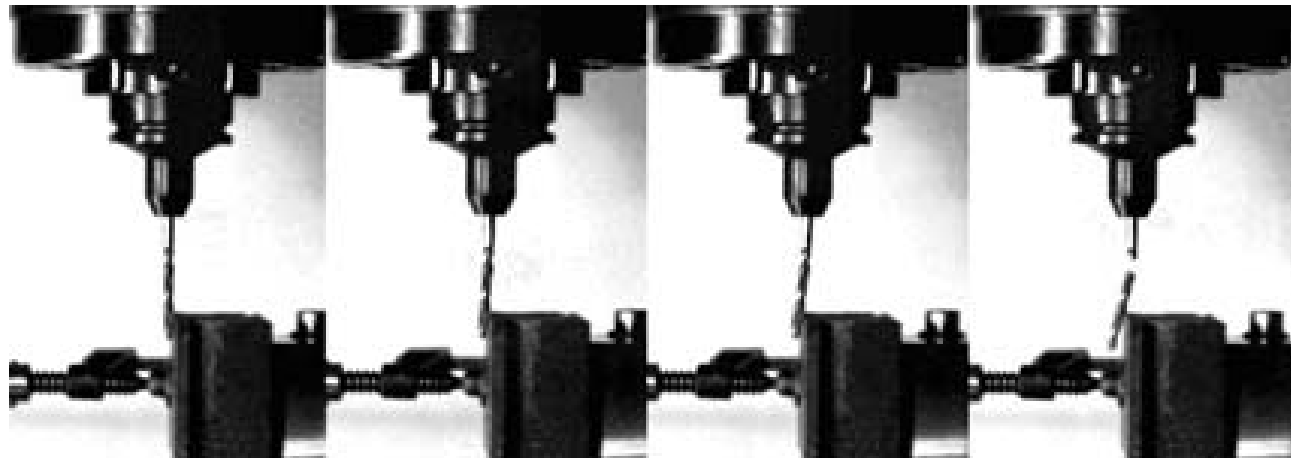


Grundlagen der Prozessüberwachung

Störungsarten im Prozess

Kritische Störungsarten:

- Kollision
- Werkzeugbruch
- Überlast (z.B. Werkstoffinhomogenitäten, Aufmaßschwankungen)
- Instabiler Prozess (Rattern, ungünstiger Spanfluss)
- Schneidenausbruch
- Werkzeugverschleiß



Hochgeschwindigkeitsaufnahme einer Kollision

Quelle: Universität Stuttgart

Grundlagen der Prozessüberwachung

Prinzipien der Prozessüberwachung

- **Kontinuierliche Überwachung**

- z.B.: Temperaturmessung bei schnelllaufenden Arbeitsspindeln

- **Periodische Überwachung**

- kurzperiodisch: pro Werkstück
 - langperiodisch: pro Charge oder je Schicht (Wartung)
 - sporadisch: Fehlerbehandlungsmaßnahmen

- Elektrische, geometrische, mechanische und kinematische Messgrößen können mit Sensoren und Messgeräten vor, während oder nach dem Prozess (**Pre-, In- oder Post-Prozess**) erfasst und ausgewertet werden.



Grundlagen der Prozessüberwachung

Messen nicht elektrischer Größen – Einschub Sensorik

Gewünschte Eigenschaften von Sensoren:

- Umwandlung einer physikalischen Größe in ein zur Weiterverarbeitung geeignetes Signal
- Sensitivität: möglichst hohe Empfindlichkeit bezüglich zu messender Größe
- Selektivität: möglichst niedrige Querempfindlichkeit bezüglich anderer Größen
- Stabilität: möglich gleich bleibendes Verhalten in allen Umgebungsbedingungen und über die Zeit



Quelle: eddylab.de

Wirbelstromsensoren



Quelle: physicalacoustics.com

AE-Sensor



Quelle: <http://pdb2.turck.de>

Radarsensor

Grundlagen der Prozessüberwachung

Messen nicht elektrischer Größen – Einschub Sensorik

Sensor-Fusion:

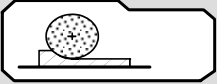
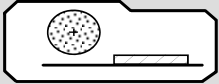

- Informationen mehrerer Sensoren werden zusammengeführt
- Reduzierung statistischer Messfehler
- Möglicher Einsatz verschiedener Messprinzipien => verbesserte Informationsgüte

Beispiele für Sensor-Fusion:

- Stereosehen: aus 2 Kameras wird ein Stereo-Bild aufgebaut
- Navigationsgerät: GPS-Signale und andere lokale wie Geschwindigkeit, Lenkwinkel etc. werden zusammengeführt
- Fahrerassistenzsysteme



Sensoren zur prozessnahen Qualitätsprüfung bei der Schleifbearbeitung

	Kenngröße			Sensorsystem
In-Prozess 	Temperatur	Prozess		Thermoelement Thermokamera Pyrometer
	Schleifkräfte Konditionierkräfte			Piezosensor Kombisensor (AE/Kraft)
	Acoustic Emission $\geq 20 \text{ kHz}$			Piezosensor Kombisensor (AE/Kraft)
	Schwingungen $\leq 20 \text{ kHz}$			Piezosensor Mikromechanischer Sensor
Prozessnah 	Scheibenverschleiß	Qualität		Radarsensor
	Schleiffrisse			Wirbelstromsensor
	Scheibenverschleiß			Laserscanner, Antastsensor
	Maß, Form, Lage			Induktive Taster
Post-Prozess 	Rauheit			Tastnadel
	Maß, Form, Lage			Koordinatenmessmaschine
	Scheibenverschleiß			Profilprojektor
	Randzone (Härte, Risse, Brand,...)			Gefügeschliffe, chemische Analysen, Barkhausen, usw.



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik **iwf**



Vorlesung Fertigungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder, Dr.-Ing. Anke Müller, 25. Juni 2018
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik