

Streifenprojektion in der Fertigungsmesstechnik am Beispiel präzisionsgeschmiedeter Zahnräder

Institut für Mess- und Regelungstechnik
Universität Hannover

- **Präzisionsgeschmiedete Zahnräder**
- **Verzahnungsfehler**
- **Zielsetzung**
- **Streifenprojektionsaufbau**
- **Optische Geometrieerfassung**
- **Auswertung**
- **Ausblick**

- Qualitätsgesicherte Herstellung von Hochleistungspräzisionsbauteilen
- Verbesserung der Bauteileigenschaften
- Minimierung von Fertigungsschritten, in einer durchgängigen Prozesskette
- Verringerung der Umweltbelastung
- Fertigung von komplexen Geometrien (Zahnrad)



Scheren



Erwärmen



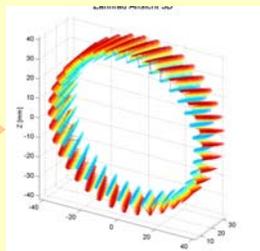
Präzisions-
schmieden



integrierte
Wärmebehandlung



Lager,
Transport /
Abkühlen



flächige
3D-Prüfung



Hartfeinbe-
arbeitung



Prüfen



schrägverzahn-
tes
Zahnrad

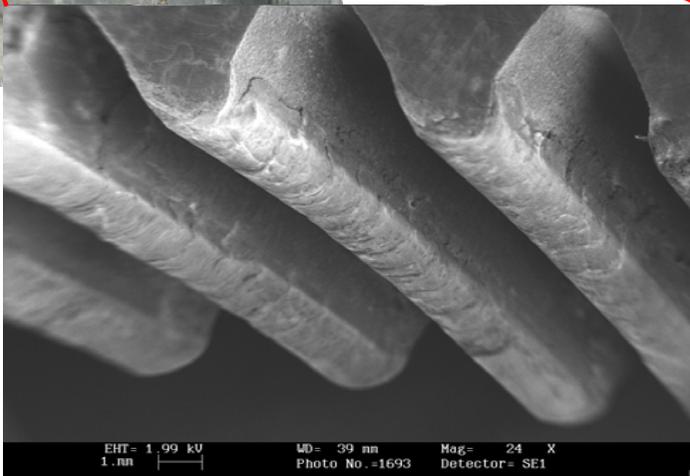
Matrize

- Verschleiß
- Kantenverrundungen
- Risse
- Ausbrüche



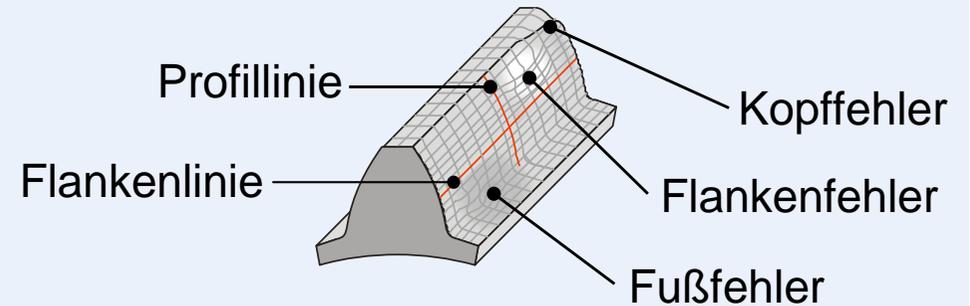
Werkzeug für
Aussenverzahnung

Detail



EHT= 1.99 kV WD= 39 nm Mag= 24 X
1. nm Photo No. =1693 Detector= SE1

Verzahnungsgeometrie



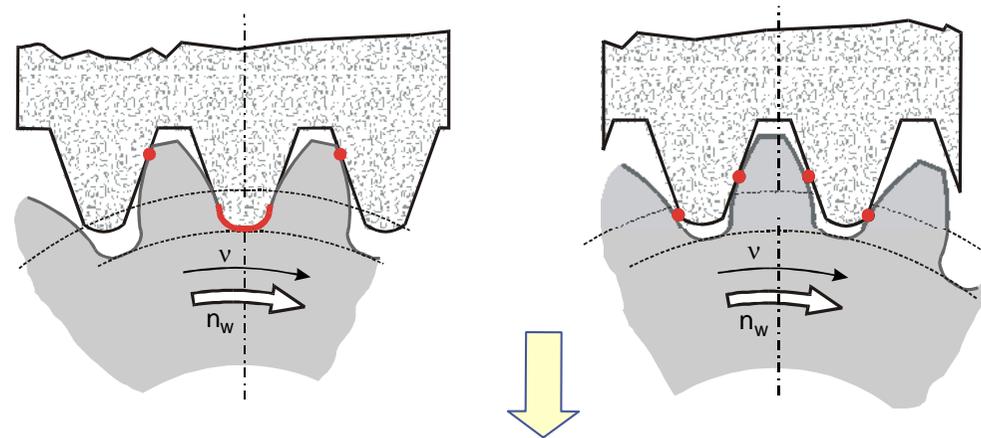
- individuelle Verzahnungsfehler
- keine Referenzflächen
- Modifikation durch Schleifaufmaß
- Bohrung fehlt als Bezug
- Exzenterfehler

Messung aller Zähne

Kennzeichen der neuen Prozesskette:

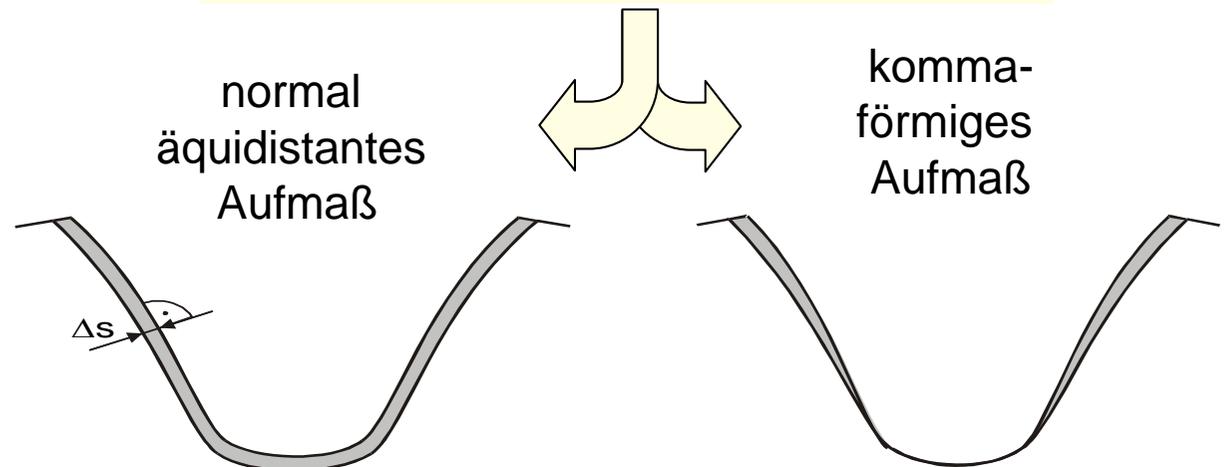
Verfahren mit hoher Mengenleistung

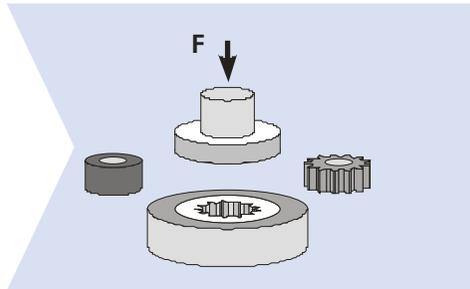
Hartfeinbearbeitung der Verzahnung:
kontinuierliches Wälzschleifen



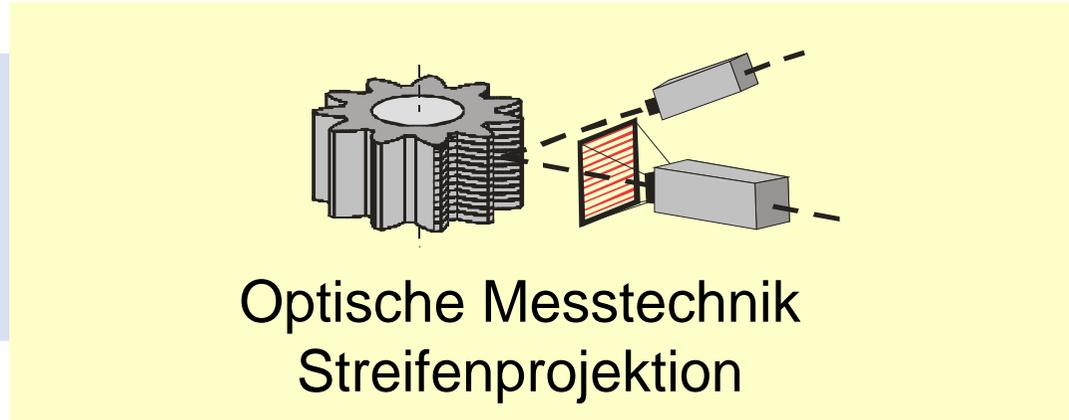
Entwicklung der Prozessstrategie

Bestimmung und Fertigung der idealen Aufmaßverteilung im Zahnfuß

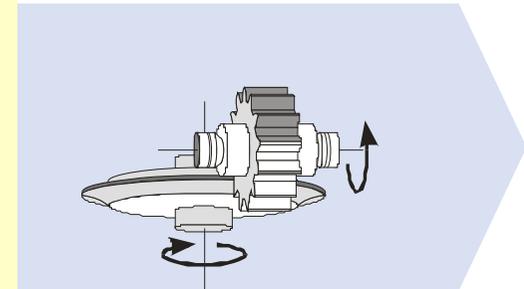




**Umformung
Wärmebehandlung**



**Optische Messtechnik
Streifenprojektion**



Hartfeinbearbeitung

- Schnelle und fertigungsbegleitende Bauteilbeurteilung
- Verringerung der Prüfzeit
- Fester geometrischer Bezug (Drehachse)
- Verringerung der Messunsicherheit durch kleine Sehfelder
- Hohe Punktdichte
- Problemorientierte Bewertungsmethoden

**Prozessintegrierte Qualitätskontrolle
Keine Substitution von KMG für Fertigteile**

Schrägverzahntes Zahnrad

Zähnezahl:	37
Normalmodul:	2
Schrägungswinkel:	20°
Teilkreisdurchmesser:	78,75 mm
Kopfkreisdurchmesser:	82,75 mm
Fußkreisdurchmesser:	73,3 mm
Masse:	470 g

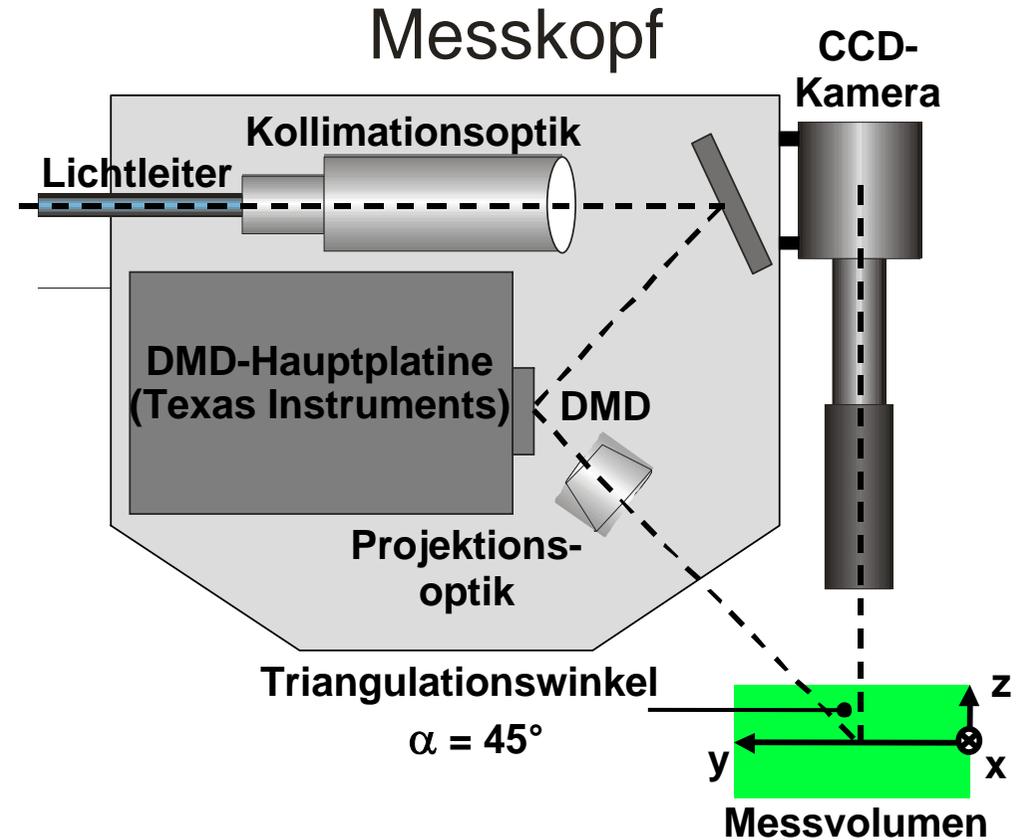
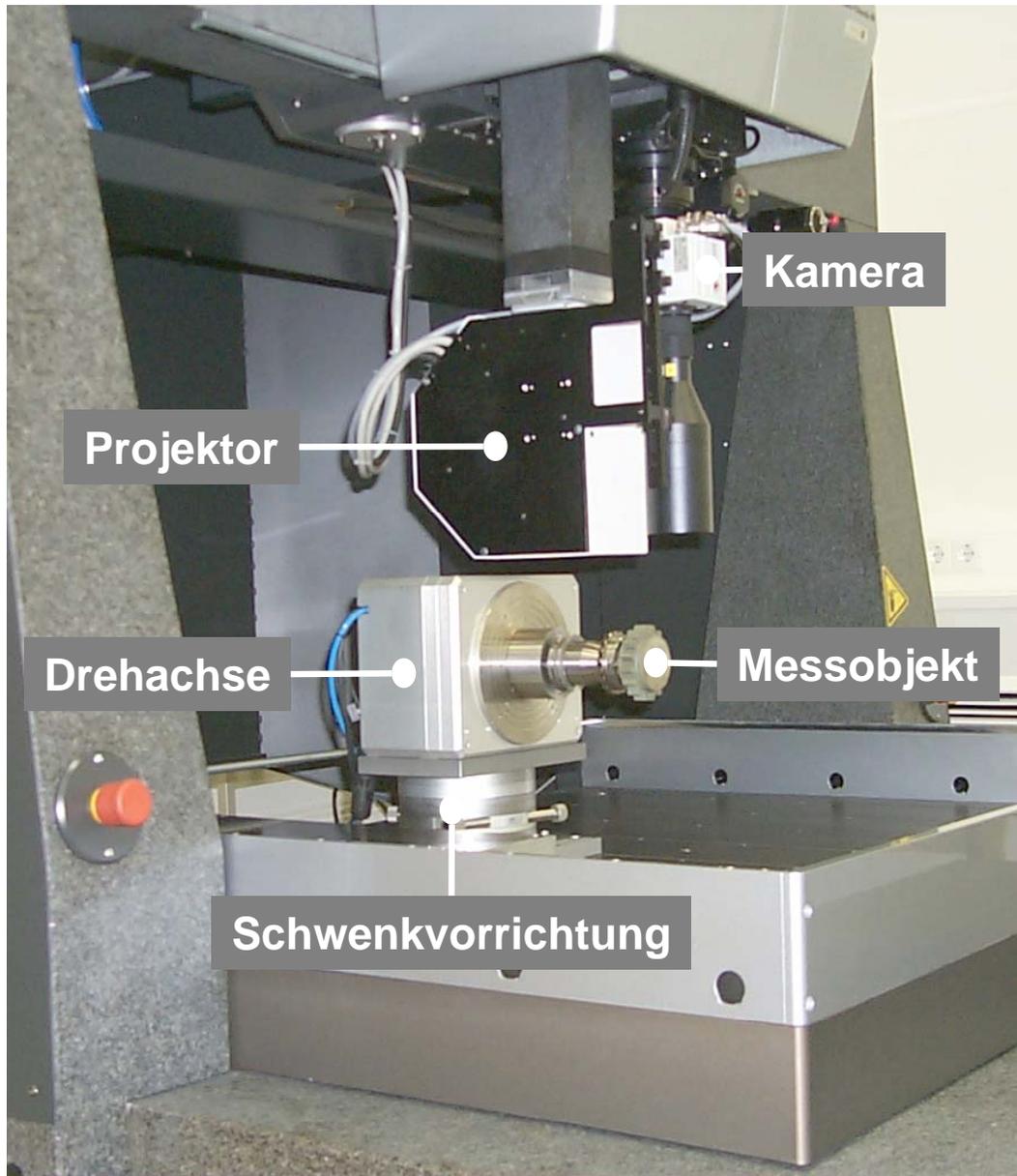


Gradverzahntes Zahnrad

Zähnezahl:	16
Normalmodul:	4,5
Schrägungswinkel:	0°
Teilkreisdurchmesser:	72,00 mm
Kopfkreisdurchmesser:	82,45 mm
Fußkreisdurchmesser:	62,3 mm
Masse:	620 g



Optisch diffuse Oberfläche



Projektor:	1024 x 768 Spiegel
CCD-Kamera:	1024 x 1020 Pixel
Lateralauflösung:	39 μm
Vertikalauflösung:	0,4 μm
Belichtungszeit:	1,5 s
Auswertung:	18 s

- Messung Graycode und Phaseshift
- System erfüllt Scheimpflugbedingung
- Projektion zentralperspektivisch
- Kameraoptik telezentrisch

Kamerakalibrierung

- Gittermethode (Frankowski)
- Kollinearitätsgleichung
- Bestimmung durch Bündelausgleich

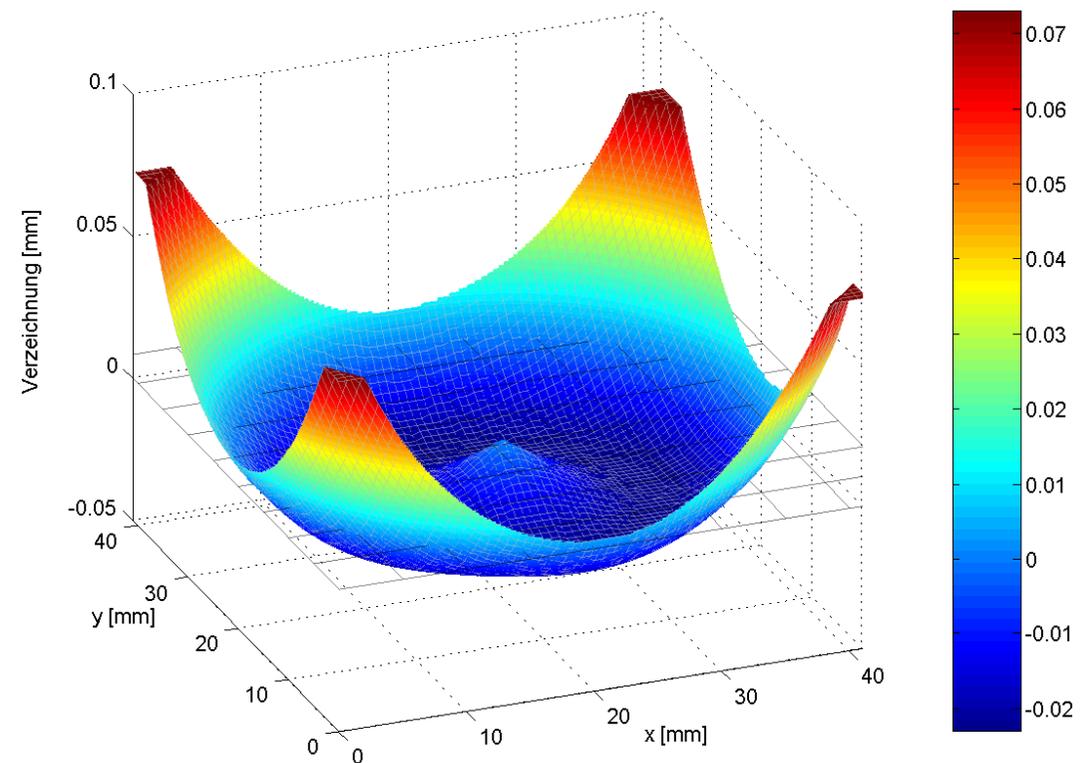
Messvolumen:

X =40 mm

Y =40 mm

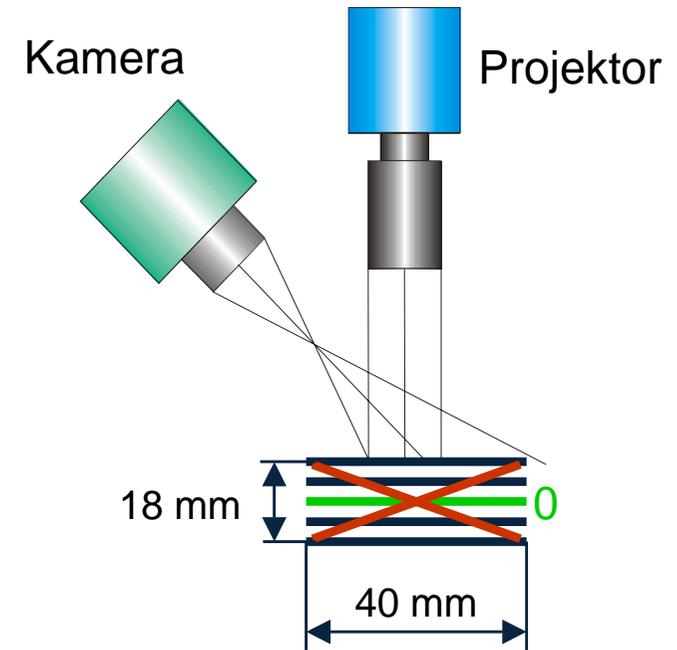
Z =18 mm

Laterale Verzeichnungen



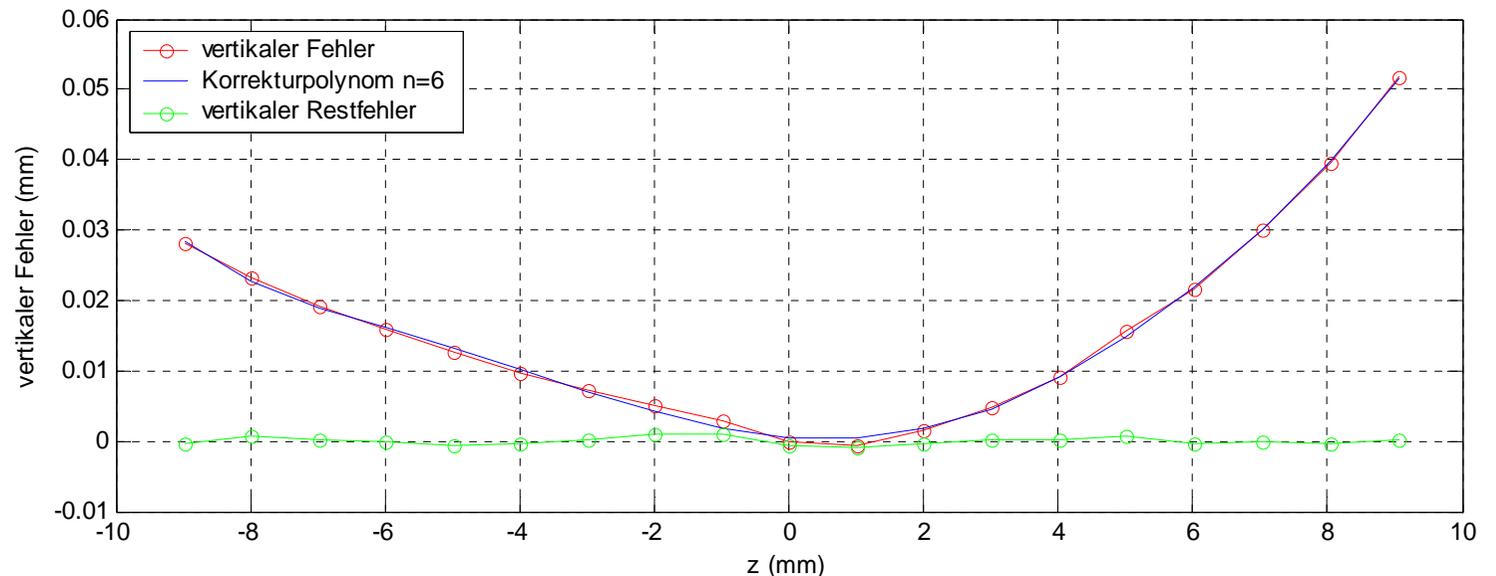
Projektorkalibrierung

- Mehrebenenmethode (Frankowski)
- Photogrammetrischer Ansatz
- Semi-empirisches Tele-Kameramodell
- Kollinearitätsgleichung
- 5 parallele + 2 schräge Ebenen

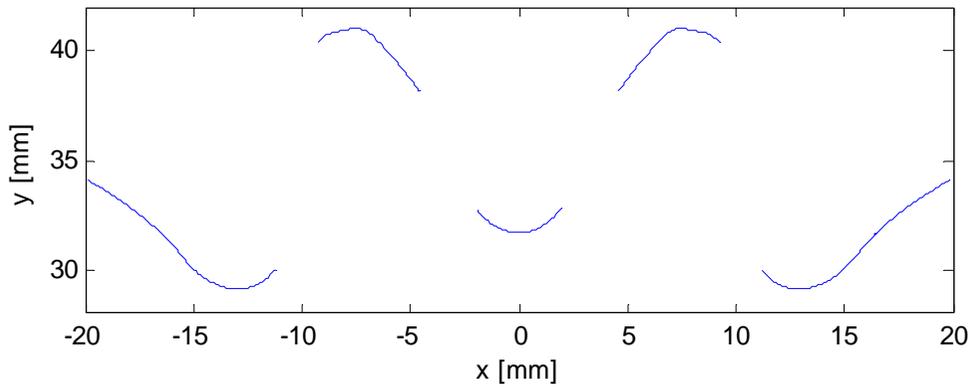


Nachkorrektur

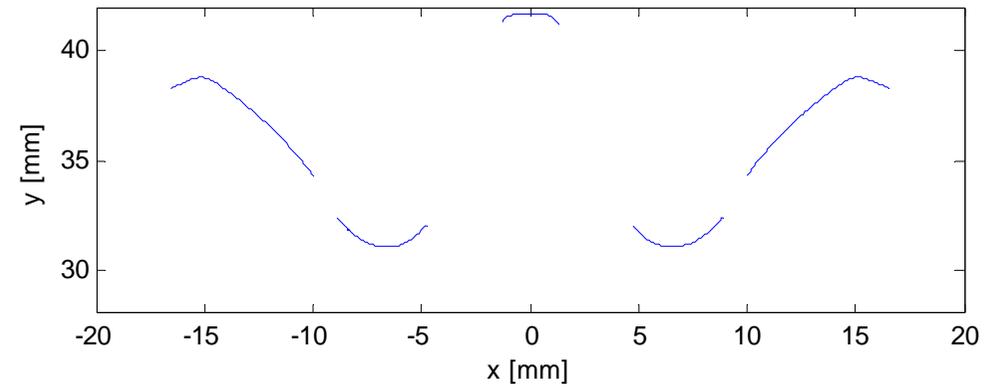
Korrektur systematischer vertikaler Abweichungen durch Einsatz einer hochgenauen Z-Achse



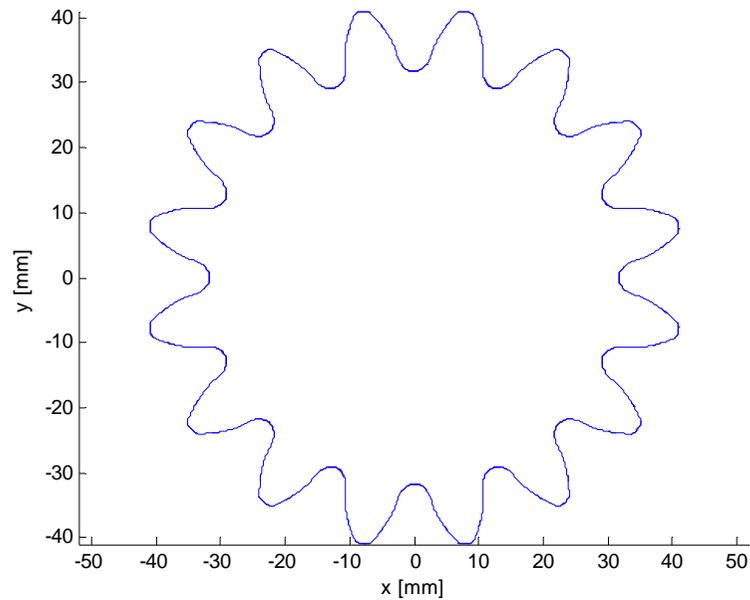
Zahnlücke



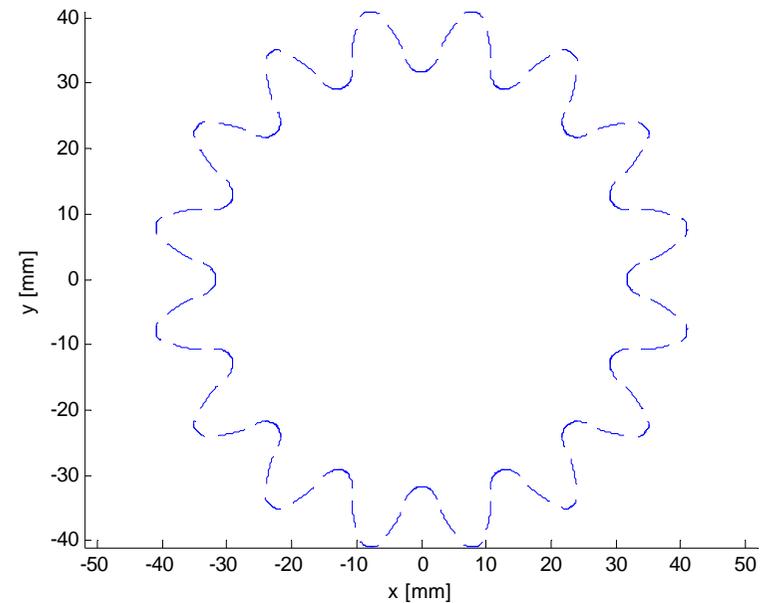
Zahn



Rekombination mit Gradient 45° halbe Teilung



Rekombination mit Gradient 45° ganze Teilung



Halbe Teilung

- Langsame aber genauere Geometrieerfassung
- Kleinere Gradienten
- Größere Gesamtdatenmenge

Ganze Teilung

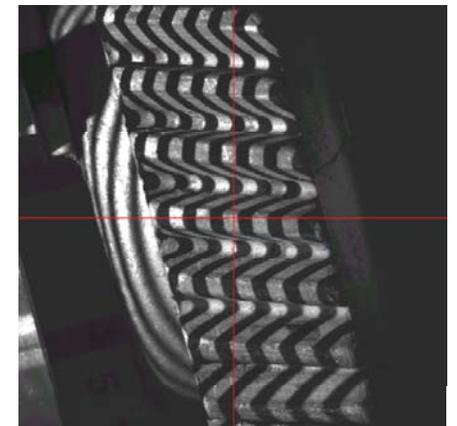
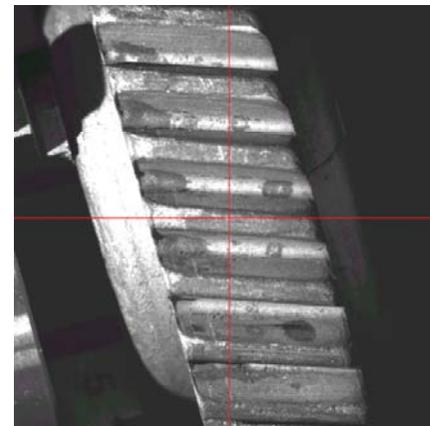
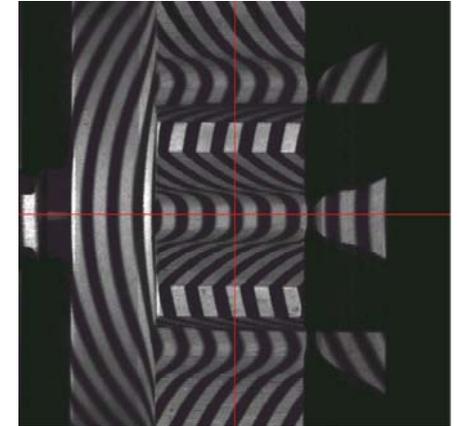
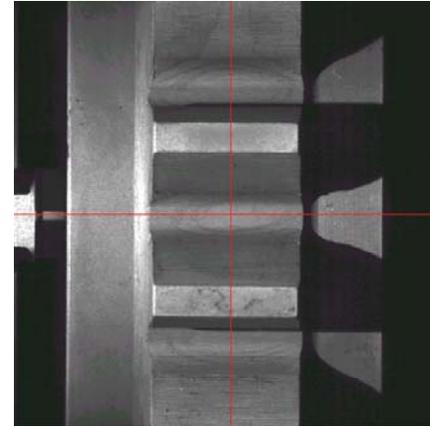
- Schnelle aber ungenauere Geometrieerfassung
- Größere Gradienten
- Kleinere Gesamtdatenmenge

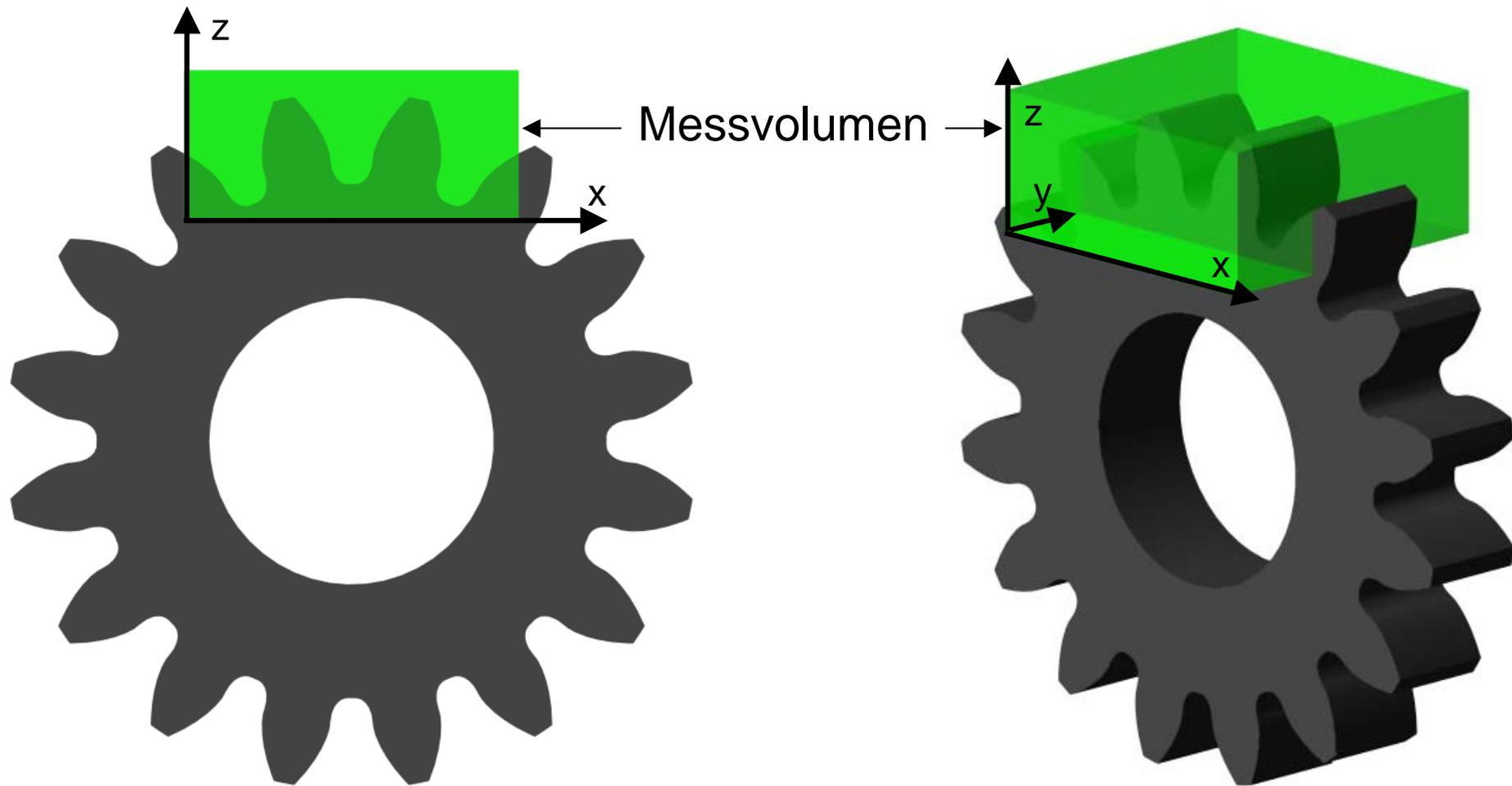
Verkürzung der Rechenzeiten

- Messung mit festem geometrischem Bezug (Drehachse)
- Kein bezugsloses Matching
- Keine Aufgabe der Nachbarschaftsbeziehungen
- Keine Neuvernetzung oder Triangulation der Daten

Sensorblickfeld

- Messung von Schrägverzahnungen durch Schwenken der Drehachse
- Minimierung der abgeschatteten Bereiche





Messvolumen: 40 mm x 40 mm x 18 mm

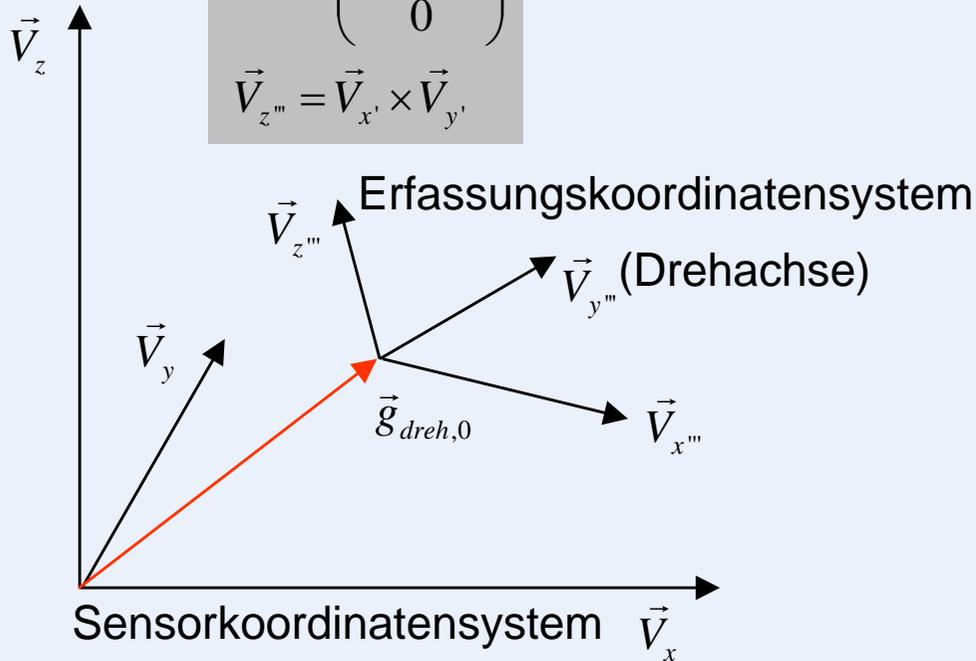
Verzahnung: $z = 16$; $m = 4,5$; $\alpha = 20^\circ$; $\beta = 0^\circ$

Definition eines globalen Erfassungskoordinatensystems

Bestimmung einer kathesischen Basis aus der Drehachse

$$\begin{pmatrix} g_{dreh,x} \\ 0 \\ g_{dreh,z} \end{pmatrix} + \lambda \cdot \vec{n}_{dreh}$$

$$\begin{aligned} \vec{V}_{y'''} &= \vec{n}_{dreh} \\ \vec{V}_{x'''} &= \begin{pmatrix} n_{dreh,y} \\ -n_{dreh,x} \\ 0 \end{pmatrix} \\ \vec{V}_{z'''} &= \vec{V}_{x'''} \times \vec{V}_{y'''} \end{aligned}$$



Schritte zur Transformation der Messpunkte

1. Translation

$$\vec{p}' = \vec{p} - \vec{g}_{dreh,0}$$

2. Rotation (Nullstellung)

$$\vec{p}'' = \begin{pmatrix} v_{xx'''} & v_{xy'''} & v_{xz'''} \\ v_{yx'''} & v_{yy'''} & v_{yz'''} \\ v_{zx'''} & v_{zy'''} & v_{zz'''} \end{pmatrix} \cdot \vec{p}'$$

3. Rotation (Drehwinkel δ_y der Drehachse)

$$\vec{p}''' = \begin{pmatrix} \cos \delta_y & 0 & \sin \delta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \delta_y & 0 & \cos \delta_y \end{pmatrix} \cdot \vec{p}''$$

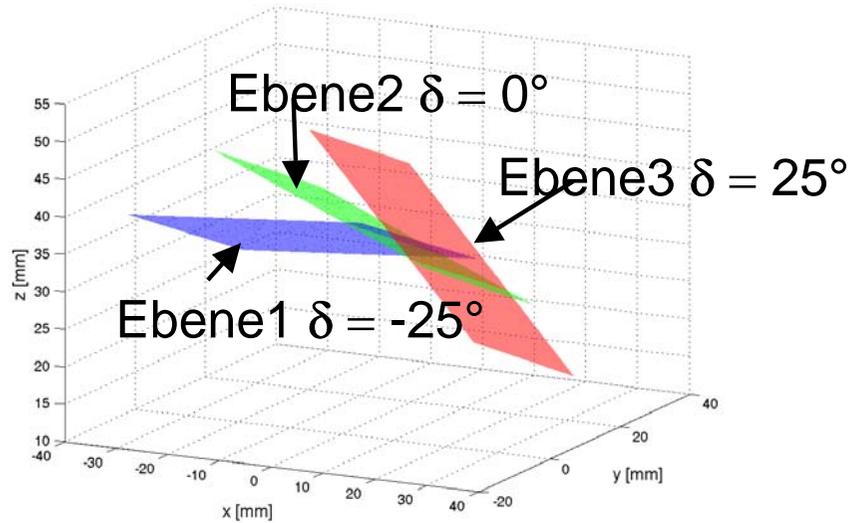
	Bestimmung der Drehachse des Systems durch ...
Taktil	... den Einsatz des taktilen Sensors (Taster) und Verwendung der Führungen des KMG
Optisch indirekt	... den Einsatz des Streifenlichtsensors und Verwendung der Führungen des KMG
Optisch direkt	... den Einsatz des ortsfesten Streifenlichtsensors

Vorgaben

- Anpassung der Objektive an eine möglichst genaue teilungsbezogene Datenerfassung
- Kleine Messvolumina von: 40mm x 40mm x 20mm
- Drehachse liegt nicht im Messvolumen

Lösung

Verwendung eines an die Werkstückgeometrie angepassten Normals zur Bestimmung der Drehachse mit einem ortsfesten Streifenlichtsensor

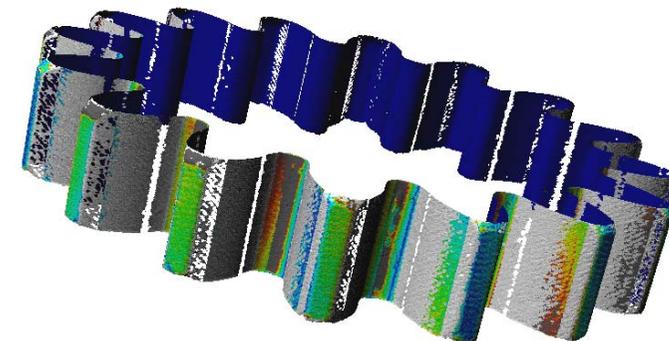


Abweichungen der Teildatensätze zueinander

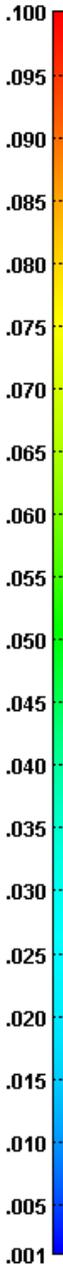
Bestimmung mit Ebenen



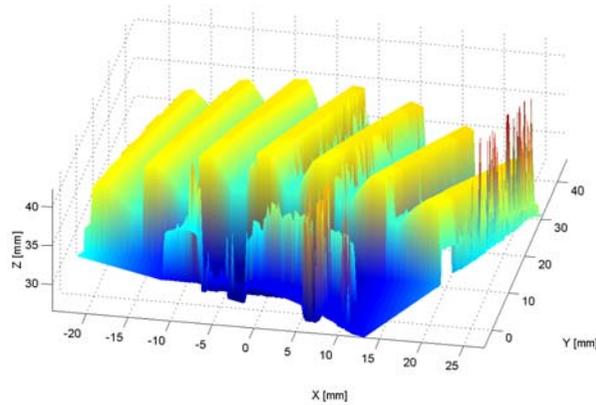
Bestimmung mit Zylinder



- Messung mehrerer verdrehter Ebenen
- Auswertung der Normalenvektoren
- Minimierungsproblem zur Bestimmung der Rotationsparameter (räumliche Helmert-Transformation)
- Geringere Unsicherheit verglichen mit Zylinder

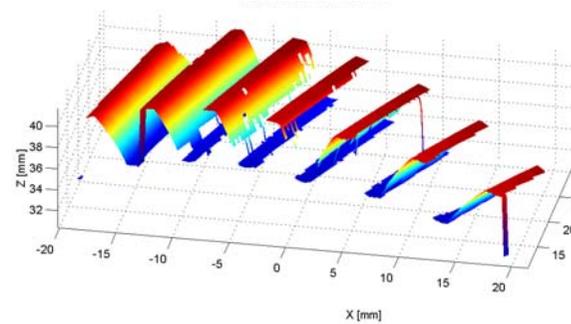


Rohdaten



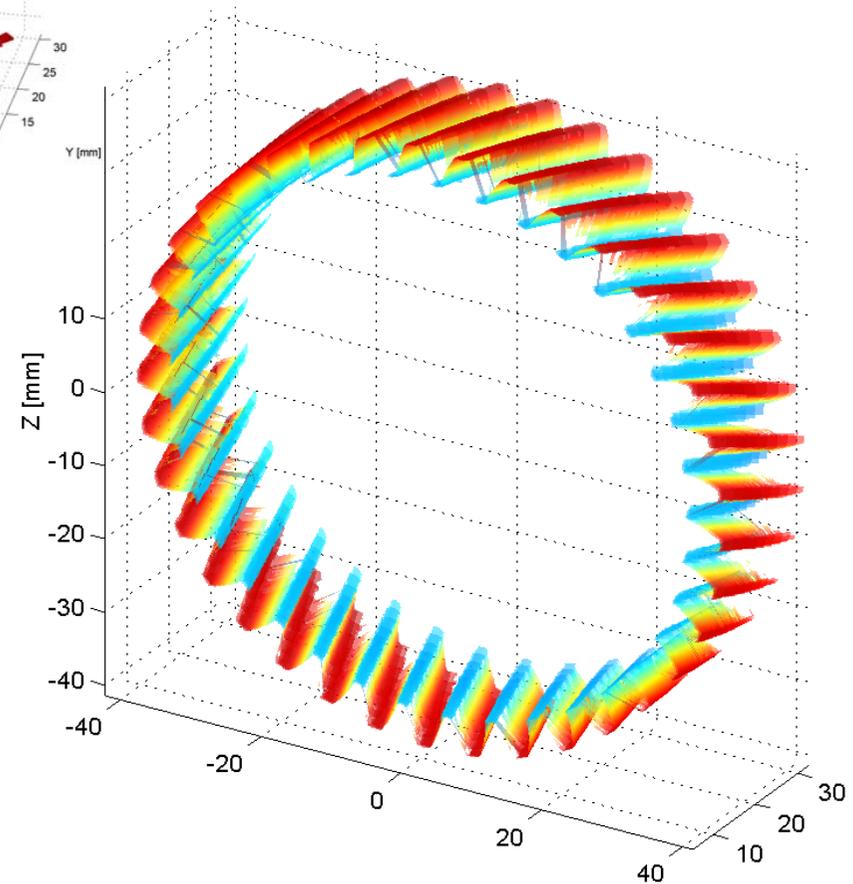
ca. 10^6 Punkte

Einzeldatensatz



ca. 220.000 Punkte

Gesamtgeometrie

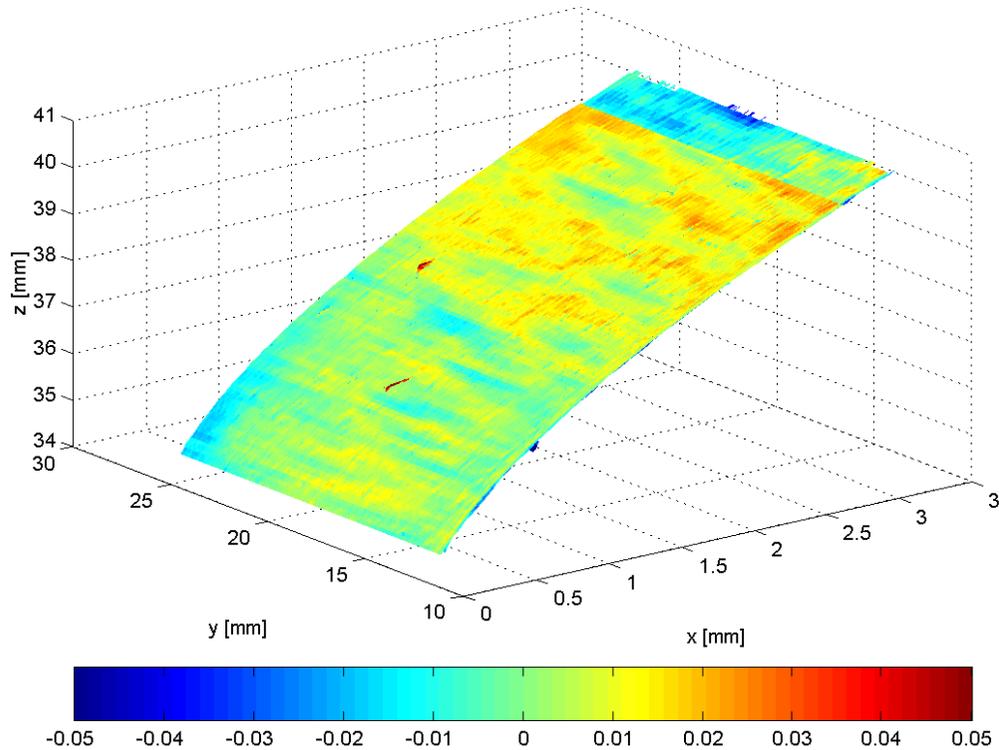


ca. $8 \cdot 10^6$ Punkte (ganze Teilung)

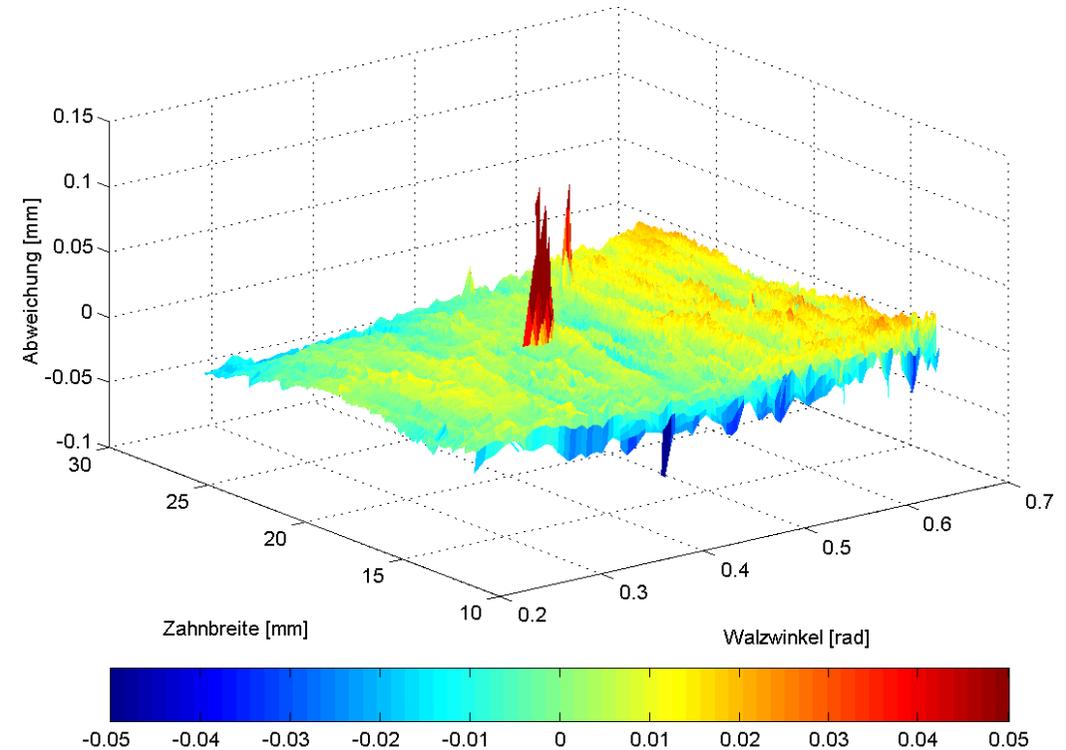
Rekombination der Geometrie

- Datenvorverarbeitung (Maskierung, Filter)
- Definition eines globalen Koordinatensystems
- geometrische Transformation der Messpunkte

Abweichungen auf Zahnflanke

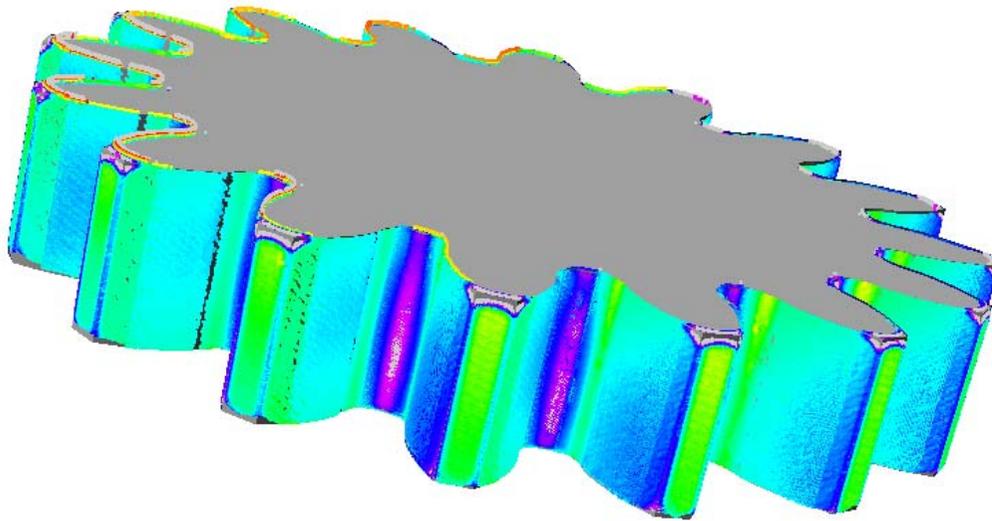


Abweichungen über Wälzweg od. -winkel



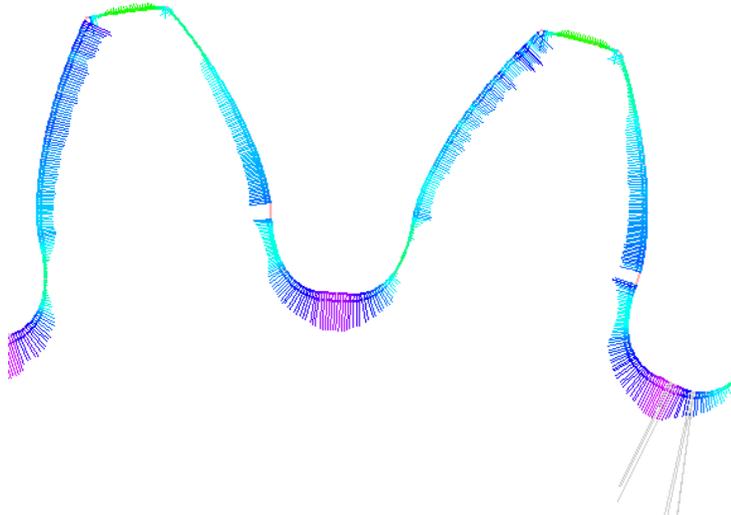
- Einpassung der Verzahnungsgeometrie auf Sollgeometrie
- Minimierung der Fehlerquadrate über die Funktionsflächen

Interaktive 3D Ansicht

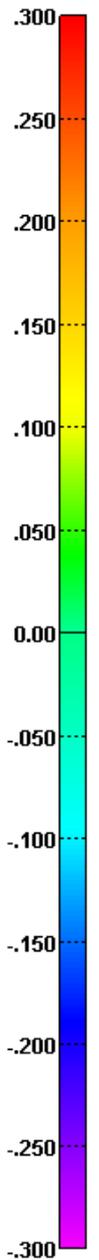
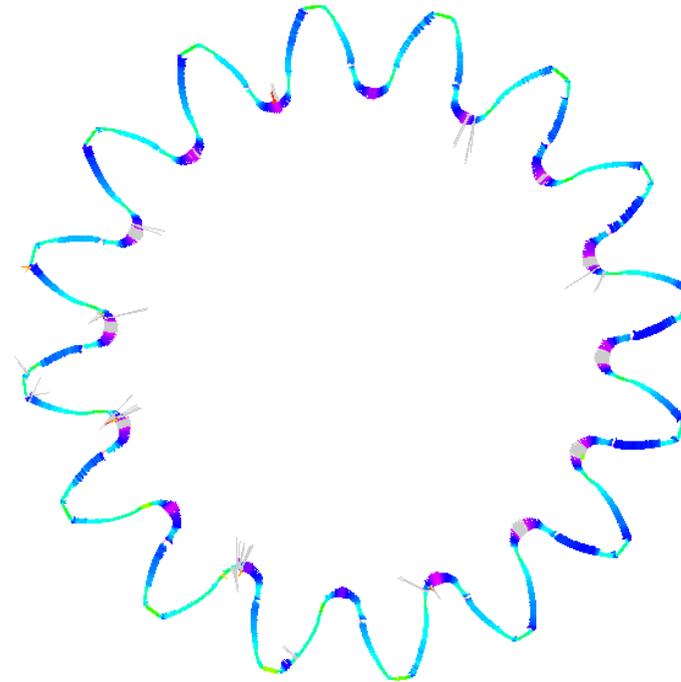


- CAD Referenz
- Einpassung
- Betrachtung von Evolventen, Kopf- und Fußbereichen

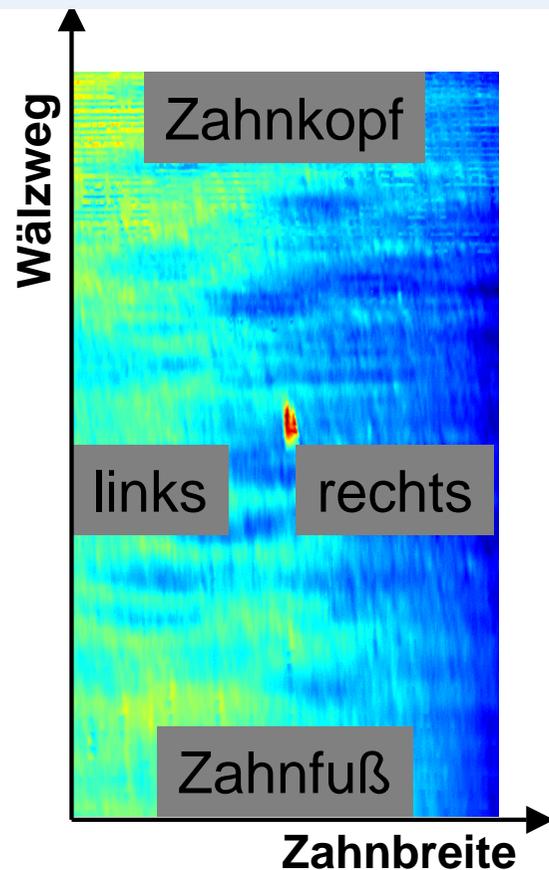
Stirnschnitt - Detail



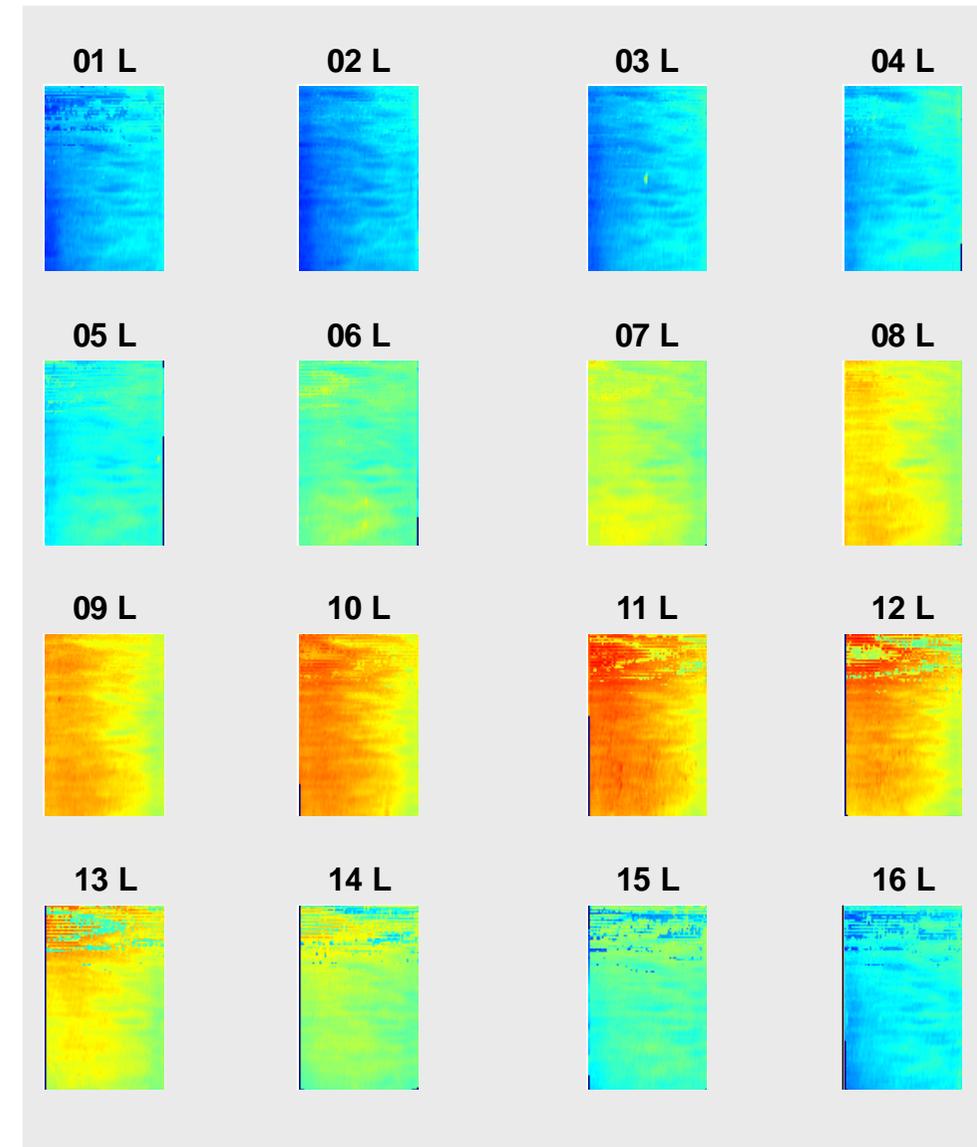
Stirnschnitt



- Einpassung auf Idealgeometrie
- Betrachtung der Funktionselemente (Evolventen)
- Bestimmung der Flankenflächen-Formabweichung u. -Gesamtabweichung



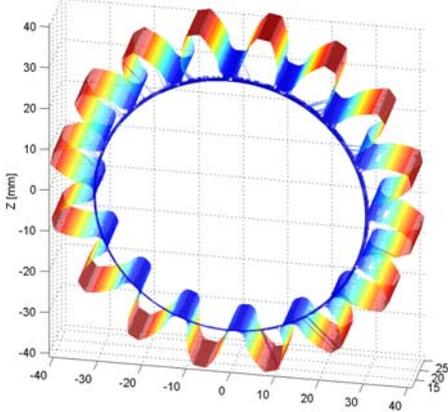
Abweichungen aller linken Flanken



Lehrzahnrad

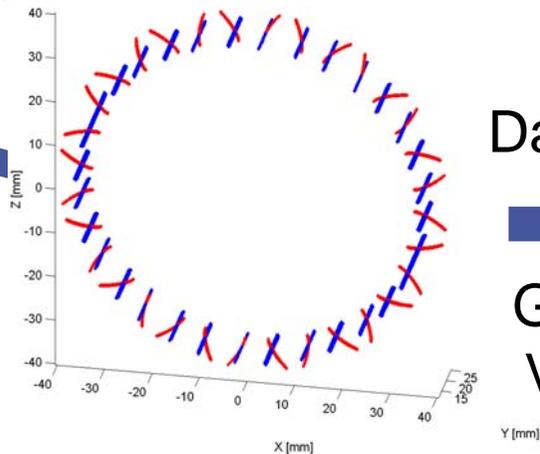


3D Messung



Überführung der Messdaten
in normgerechte Auswertung
(DIN / VDI)

Profil + Linie

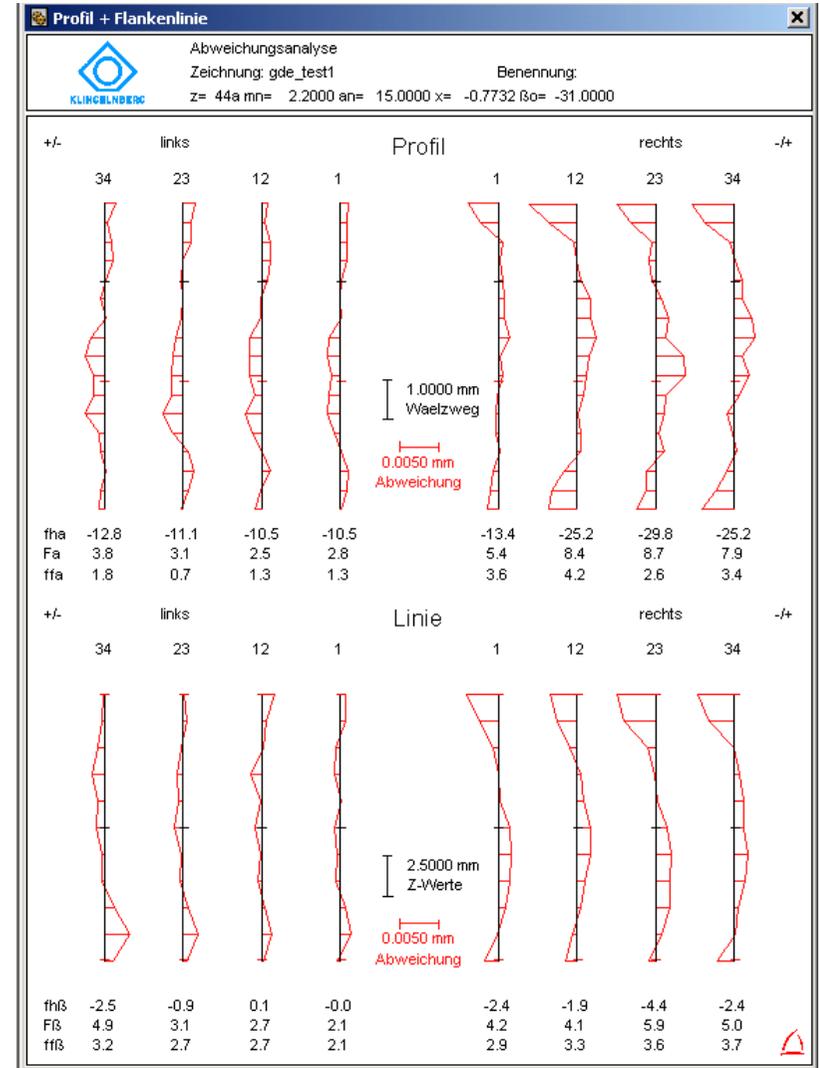


Datenexport



GDE nach
VDI 2610

Standardauswertung Rundlauf, Dicke Teilung Profil, Flanke



- Verzicht auf KMG
- Kleiner Messkreis
- Robuster Aufbau
- Integration der Drehachse
- Linearführung (Z-Achse)

