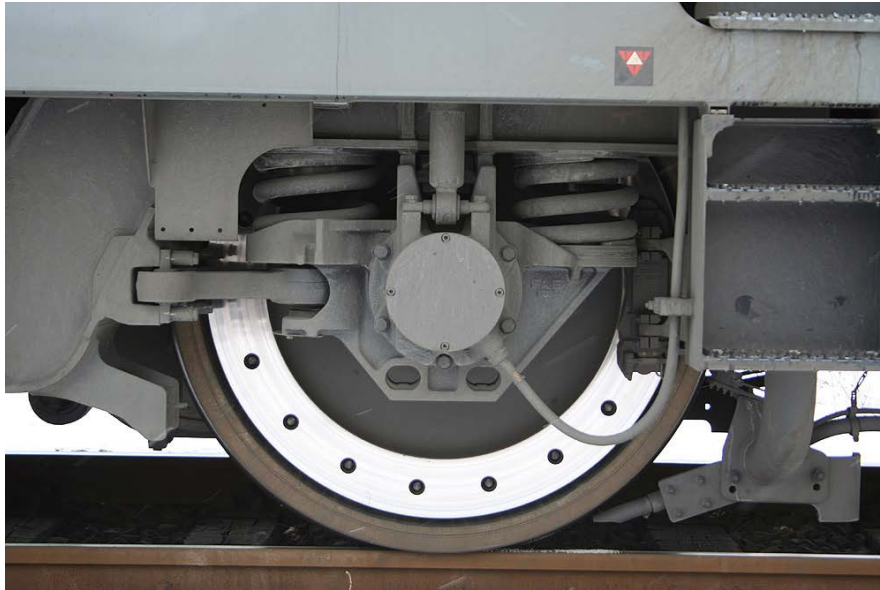


„Automatisierung von zeitaufwendigen Rüstaufgaben an Werkzeugmaschinen“



Siemens ES64F4

Gliederung



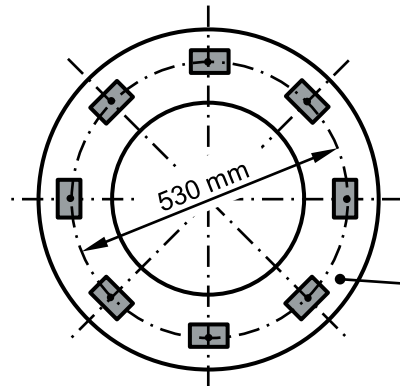
Quelle: S. Terfloth

- Einleitung
- Manuelle Ausrichtung
- Automatisierungsstufe I
- Automatisierungsstufe II
- Modell für Ausrichtearbeiten
- Wirtschaftliche Analyse
- Zusammenfassung

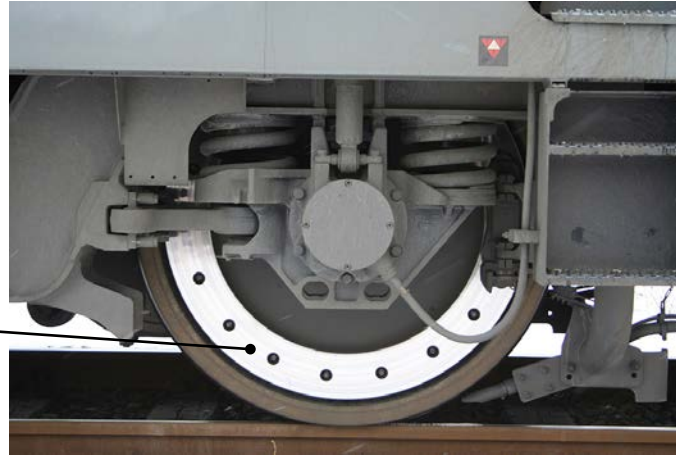
Gliederung

- Einleitung
- Manuelle Ausrichtung
- Automatisierungsstufe I
- Automatisierungsstufe II
- Modell für Ausrichtearbeiten
- Wirtschaftliche Analyse
- Zusammenfassung

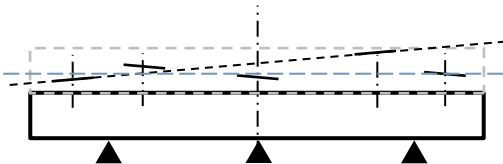
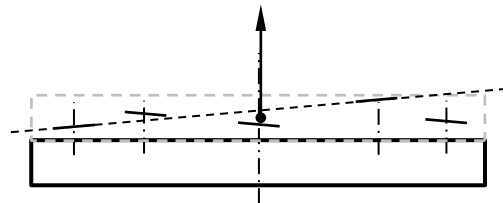
Anwendungsbeispiel: Bearbeitung von Bremscheiben für Schienenfahrzeuge (geflanscht)



Rückseite



Quelle: S. Terfloth



Mittellinie

- Werkstück :

Bremscheiben für Schienenfahrzeuge
(gegossen)

8 Bearbeitungsflächen

Durchmesser des Teilkreises

\varnothing 530 mm

- Aufspannung :

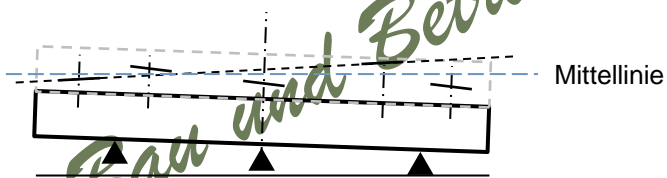
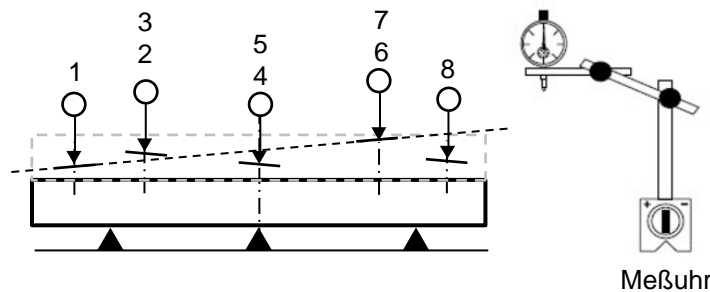
Problem der sehr zeitaufwendigen

Werkstückausrichtung

Gliederung

- Einleitung
- **Manuelle Ausrichtung**
- Automatisierungsstufe I
- Automatisierungsstufe II
- Modell für Ausrichtearbeiten
- Wirtschaftliche Analyse
- Zusammenfassung

Ohne Automatisierung: Manuelle Ausrichtung mit Meßuhr



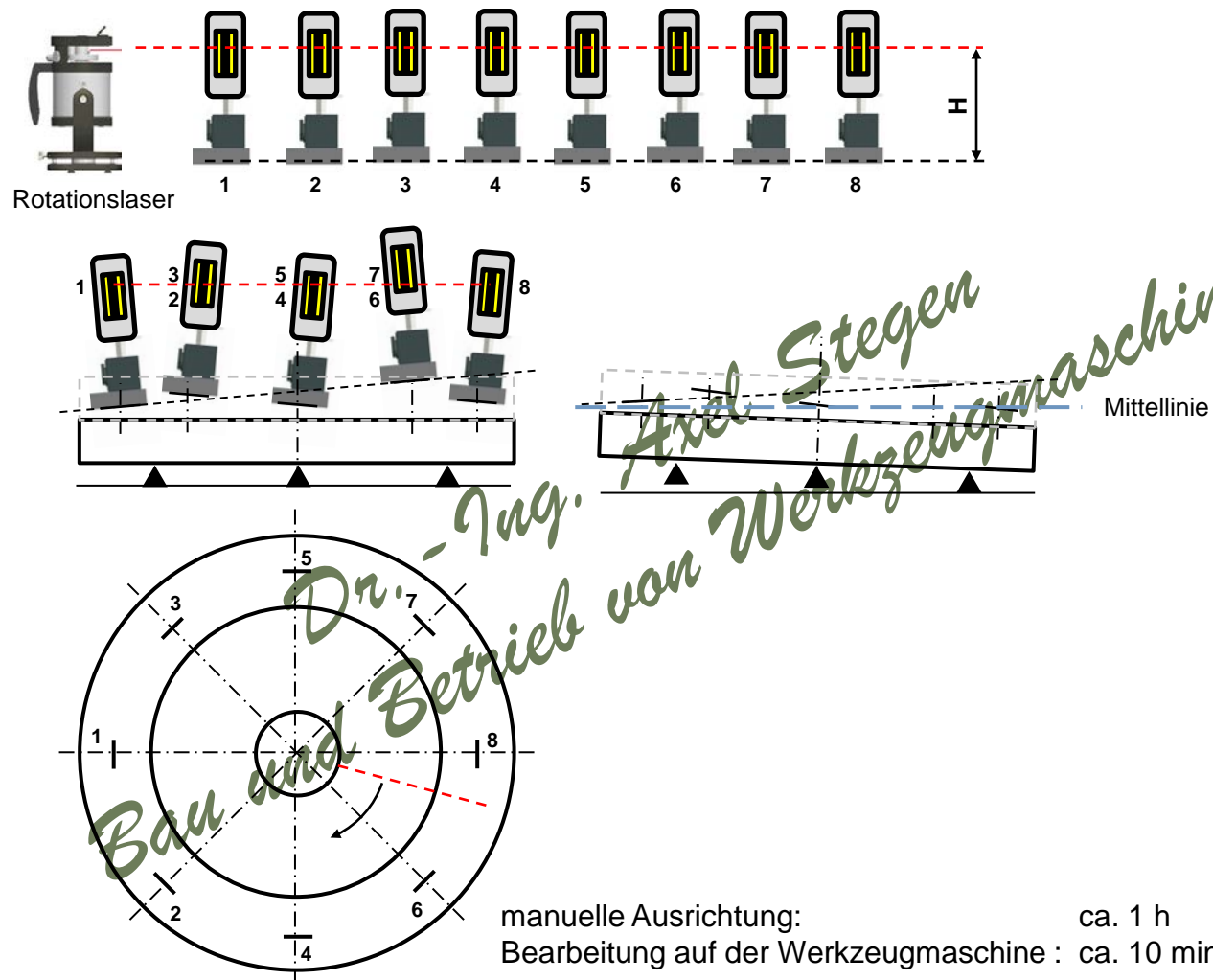
manuelle Ausrichtung: ca. 2 h
Bearbeitung auf der Werkzeugmaschine : ca. 10 min

- mit 8 Meßuhren wird die Position der zu bearbeitenden Flächen während der Ausrichtung überprüft
- nach der Werkstückausrichtung kann für die Bearbeitung eine 3-Achsmaschine verwendet werden
- die Ausrichtung muß für jedes Werkstück erneut durchgeführt werden
- Zeitverhältnis : 12:1

Gliederung

- Einleitung
- Manuelle Ausrichtung
- Automatisierungsstufe I
- Automatisierungsstufe II
- Modell für Ausrichtearbeiten
- Wirtschaftliche Analyse
- Zusammenfassung

Stufe I : Manuelle Ausrichtung mit positionsempfindlichen Photodioden (PSD) & Rotationslaser



- Ausrichtung der 8 PSD in der gleichen Höhe
- die PSD müssen an ihre Position auf dem Werkstück gebracht werden
- der Rotationslaser muß in der Mitte des Werkstückes am Maschinentisch einer 3-Achsmaschine befestigt werden
- Das Werkstück kann ausgerichtet werden, indem auf einem Monitor die Signale der 8 PDS verfolgt werden.
- Zeitverhältnis: 6:1

Gliederung

- Einleitung
- Manuelle Ausrichtung
- Automatisierungsstufe I
- **Automatisierungsstufe II**
- Modell für Ausrichtearbeiten
- Wirtschaftliche Analyse
- Zusammenfassung

Stufe II : Messung, Ausrichtung & Bearbeitung von der Werkzeugmaschine

Messung von der Werkzeugmaschine selbst



selbständige Ausrichtung auf einer 5-Achsmaschine: ca. 5 min
Bearbeitung auf der Werkzeugmaschine: ca. 10 min

- Messung durch die Werkzeugmaschine selbst mit einem taktilen Meßfühler
- selbständige Ausrichtung durch die 5-Achsmaschine
- keine Berechnung hierfür verfügbar
- aber ein großer wirtschaftlicher Vorteil ist zu erwarten
- Berechnungskosten können auf alle Werkstücke verteilt werden
- Berechnung ist sehr sinnvoll!
- Zeitverhältnis: 1:2

Gliederung

- Einleitung
- Manuelle Ausrichtung
- Automatisierungsstufe I
- Automatisierungsstufe II
- **Modell für Ausrichtearbeiten**
- Wirtschaftliche Analyse
- Zusammenfassung

Vorgehensweise: Automatische Ausrichtung

Modellentwicklung (analytisch)



Aufspannung des Werkstückes



Einwechseln des Meßfühlers



Feststellung der Position der zu bearbeitenden Flächen



Speicherung der Meßwerte



Modell (Analytische Geometrie 12. Klasse)



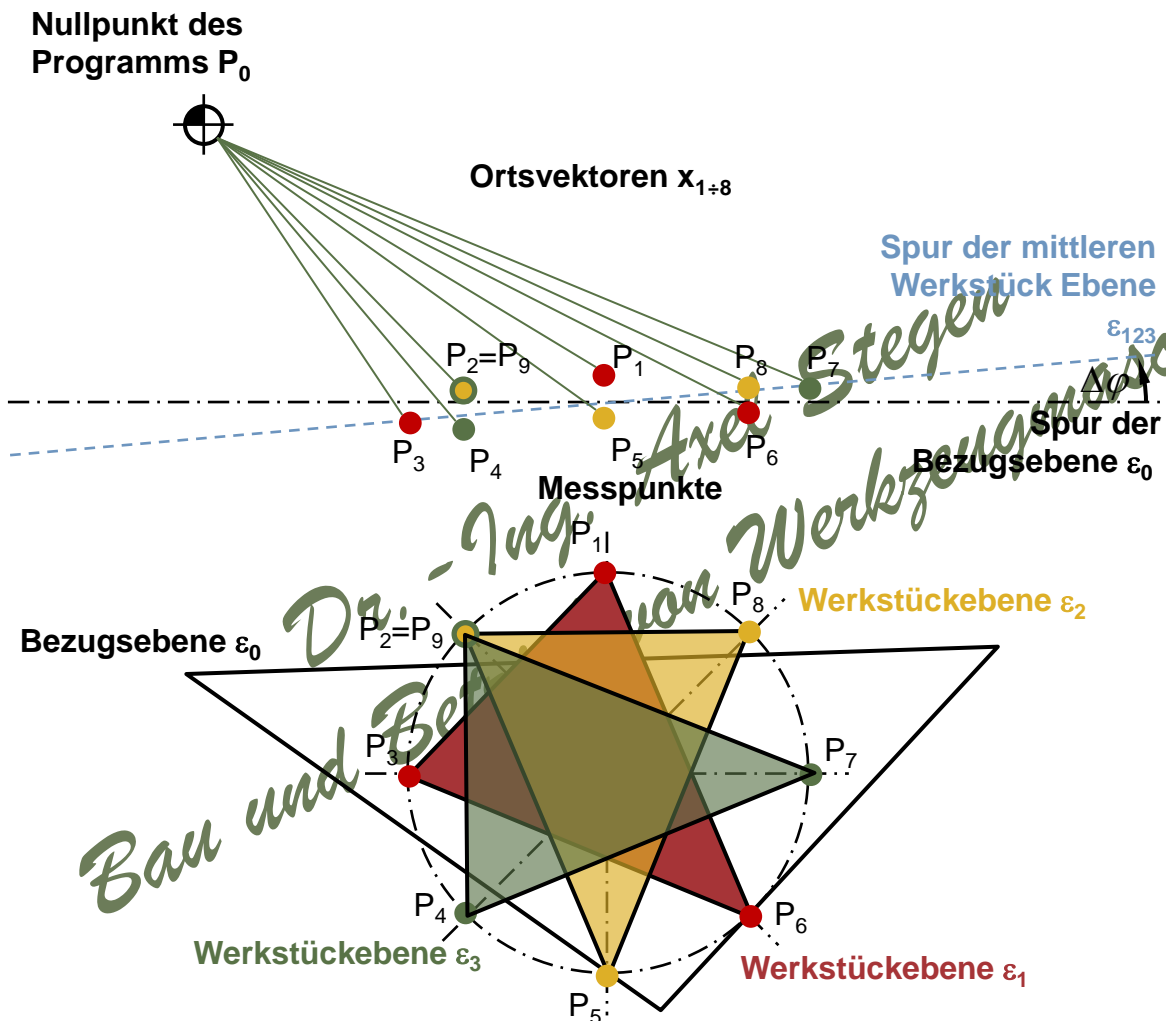
Berechnung der Korrekturwinkel $\Delta\varphi_A$ und $\Delta\varphi_C$!



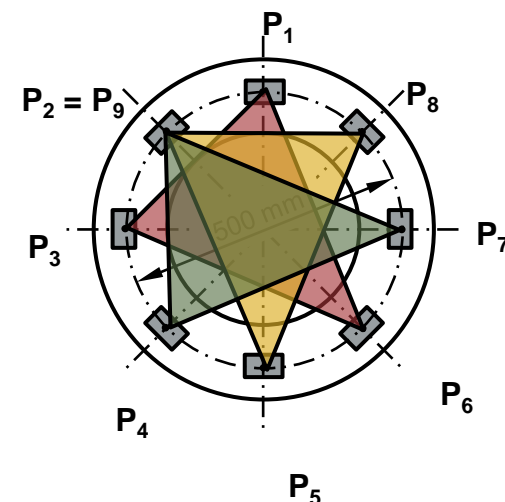
Bearbeitung des Werkstückes mit minimalem Zeitaufwand!

- Vorgehensweise

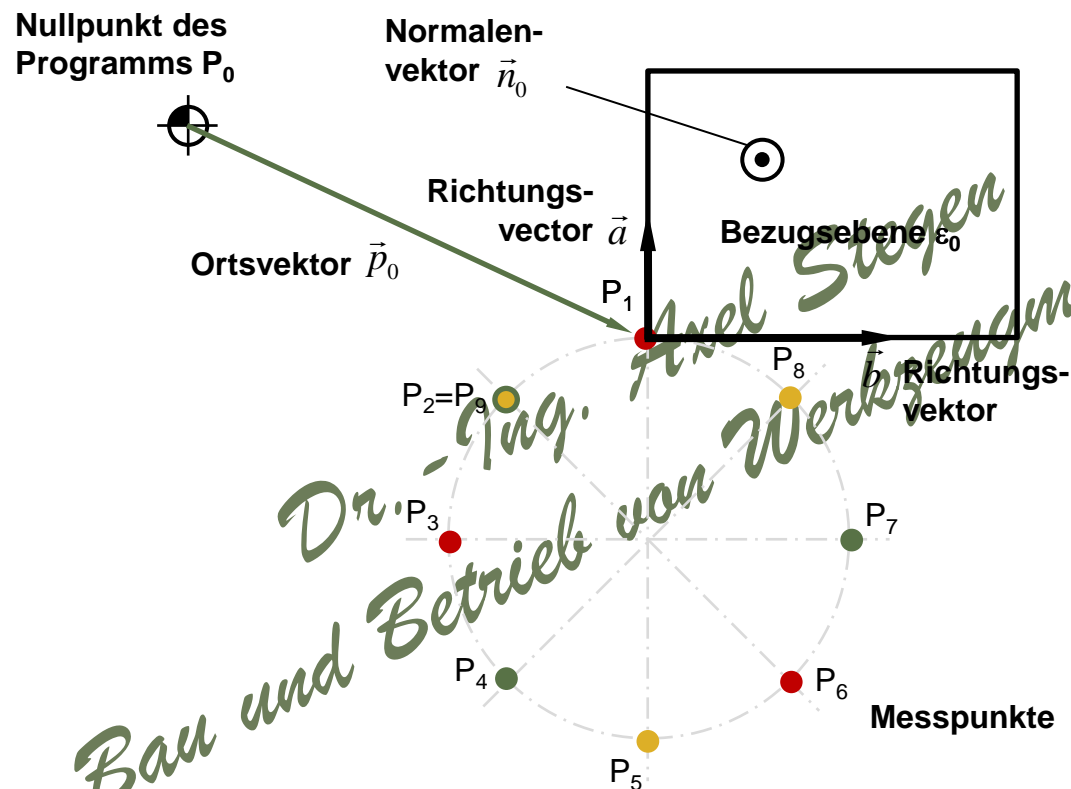
Durchführung der Messungen: Modellidee



- Prinzip eines Neigungstisches
- Modellüberblick
- 3 Ebenen definiert durch 3 Punkte
- 1 Punkt wird zweimal verwendet
- Mittelung erfolgt durch die Normalenvektoren



Modellentwicklung: Bezugsebene des Maschinentisches



- Festlegung der Ortsvektoren
- Gleichung der Bezugsebene:
$$\epsilon_0: \vec{x} = \vec{p}_0 + s_0 \cdot \vec{a}_0 + t_0 \cdot \vec{b}_0$$
- Berechnung des Normalenvektors der Bezugsebene \vec{n}_0

Modellentwicklung: erste Werkstückebene

Nullpunkt des Programms P_0



Ortsvektor \vec{p}_1

P_1

Normalenvektor \vec{n}_1

Richtungsvektor \vec{a}_1

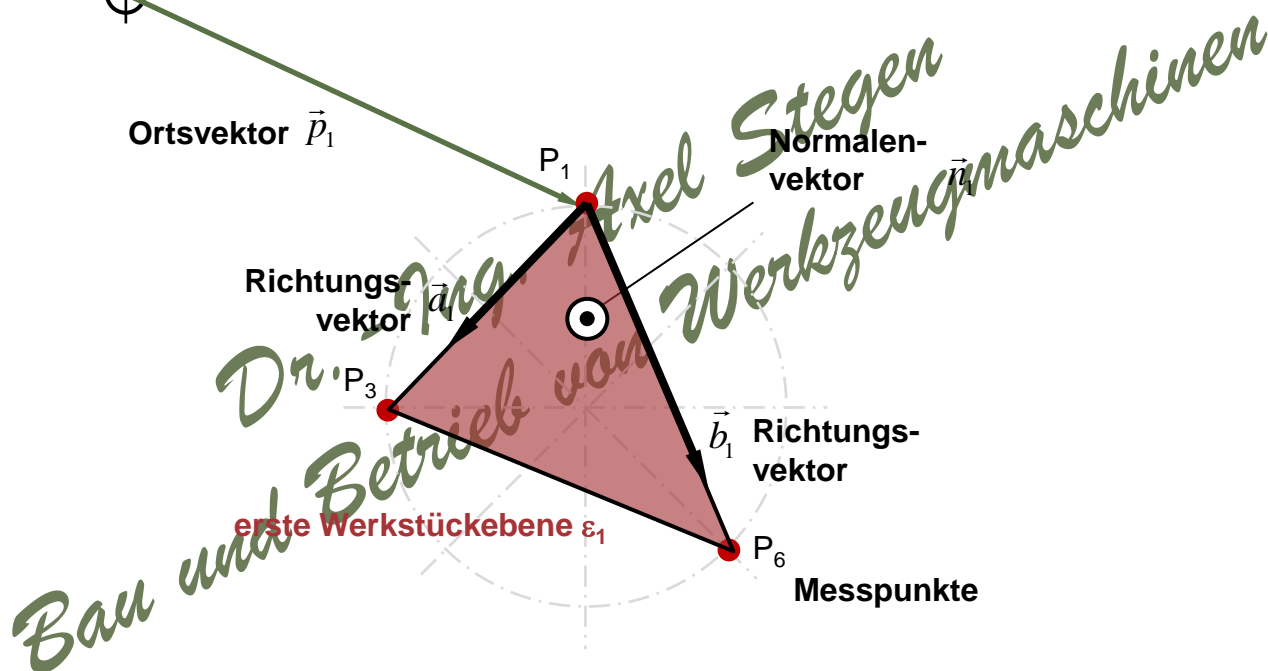
P_3

Richtungsvektor \vec{b}_1

P_6

Messpunkte

erste Werkstückebene ε_1



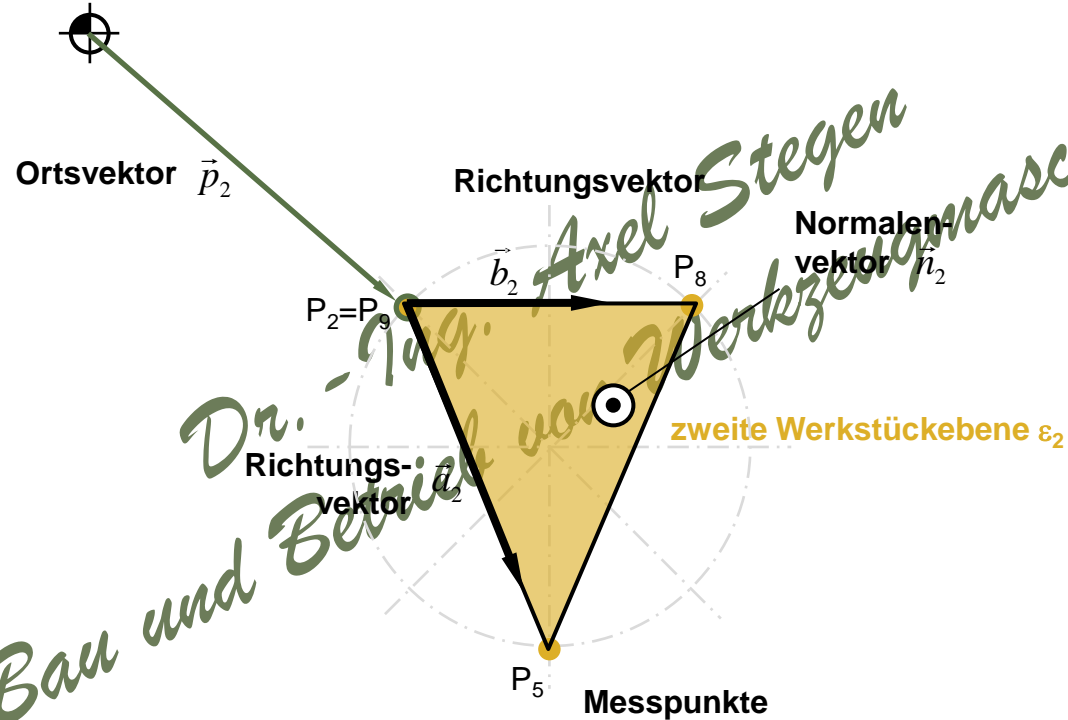
- Festlegung der Ortsvektoren
- Ebenengleichung der ersten Werkstückebene

$$\varepsilon_1: \vec{x} = \vec{p}_1 + s_1 \cdot \vec{a}_1 + t_1 \cdot \vec{b}_1$$

- Berechnung des Normalenvektors der ersten Werkstückebene \vec{n}_1

Modellentwicklung: zweite Werkstückebene

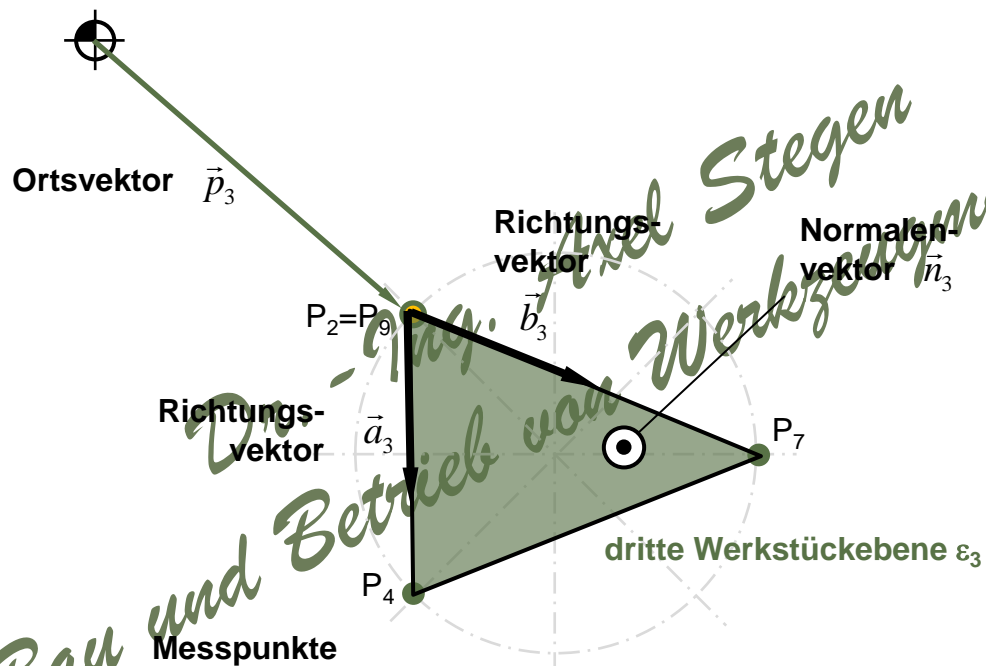
Nullpunkt des
Programms P_0



- Festlegung der Ortsvektoren
- Aufstellung der Ebenengleichung der zweiten Werkstückebene
$$\varepsilon_2: \vec{x} = \vec{p}_2 + s_2 \cdot \vec{a}_2 + t_2 \cdot \vec{b}_2$$
- Berechnung des Normalenvektors der zweiten Werkstückebene \vec{n}_2

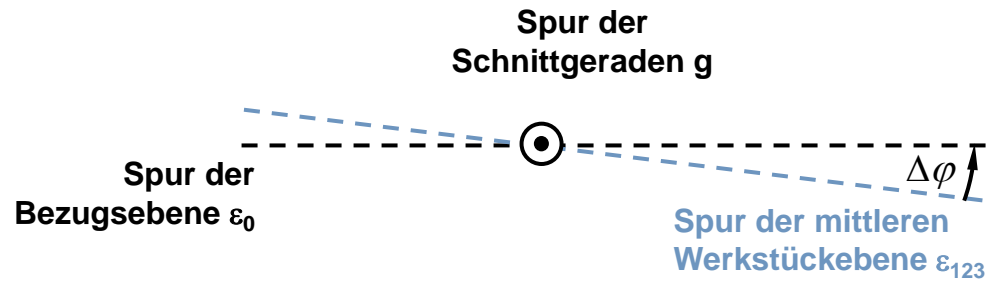
Modellentwicklung: dritte Werkstückebene

Nullpunkt des
Programms P_0



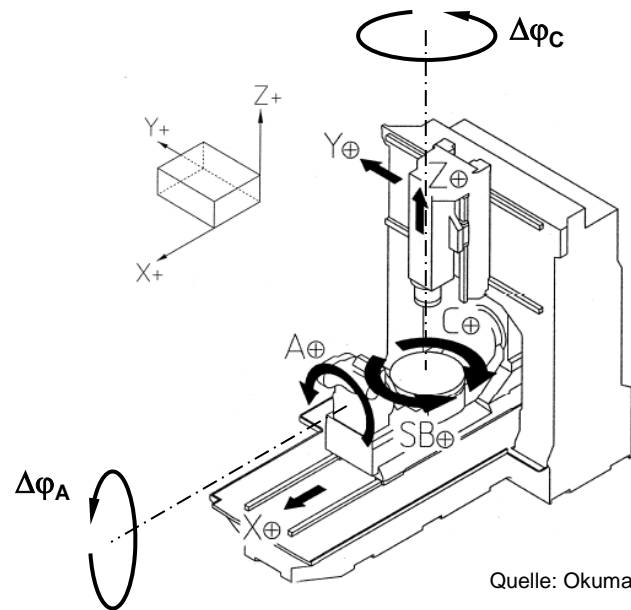
- Festlegung der Ortsvektoren
- Aufstellung der Ebenengleichung des Werkstückes
$$\varepsilon_3 : \vec{x} = \vec{p}_3 + s_3 \cdot \vec{a}_3 + t_3 \cdot \vec{b}_3$$
- Berechnung des Normalenvektors der dritten Werkstückebene \vec{n}_3
- Mittlerer Normalenvektor der drei Ebenen des Werkstückes \vec{n}_{123}

Grundaufgabe: Schnitt Ebene - Ebene



- Schnitt der Bezugsebene mit der mittleren Werkstückebene:
$$g: \vec{x} = \vec{p}_g + t_g \cdot \vec{c}$$
- Berechnung des Gesamtkorrekturwinkels $\Delta\varphi$ (A,C)
- Berechnung der Korrekturwinkel $\Delta\varphi_A$ (A) & $\Delta\varphi_C$ (C) !
- die Drehachse ist die Schnittgerade g !
- nur die Richtungsvektoren sind wichtig !

Analyse des entwickelten Modells



- einmalige Modellentwicklung
- mehrfache Verwendung des Modells
- digitale Anwendung des Modells
- einfache & ungenaue Aufspannung des Werkstückes
- Berechnung der Korrekturwinkel auf Knopfdruck
- große Zeiteinsparung bei der Werkstückaufspannung !
- nur ein NC-Programm !
- geschickte Nutzung der Werkzeugmaschine !!!

Anwendungsbeispiel: Ausrichtung eines Bremscheibenkörpers

Tafel für die Korrekturwerte für Werkstück Ausrichtungen bei schiefen Oberflächen
(Prinzipale "Neigungstisch")

Tafel 1 : Meßwerteingabe und Voranalyse

| | | | | | | | | | |
|----------------------------------|------|-----------------|----|-----------------|---------|------|-----------|--|--|
| | | | | | | | | | |
| | P1 : | X _{p1} | = | 265,0000 | | P1 : | 265,0000 | | |
| | | Y _{p1} | | 0,0000 | | | 0,0000 | | |
| | | Z _{p1} | | 65,5520 | | | 65,5520 | | |
| | P2 : | X _{q1} | = | 187,3833 | | P3 : | 0,0000 | | |
| | | Y _{q1} | | 187,3833 | | | 265,0000 | | |
| | | Z _{q1} | | 66,3250 | | | 66,2340 | | |
| | P3 : | X _{r1} | = | 0,0000 | | P6 : | 187,3833 | | |
| | | Y _{r1} | | 265,0000 | | | -187,3833 | | |
| | | Z _{r1} | | 64,2340 | | | 66,4890 | | |
| | P4 : | X _{p2} | = | -187,3833 | | P2 : | 187,3833 | | |
| | | Y _{p2} | | 187,3833 | | | 187,3833 | | |
| | | Z _{p2} | | 65,0530 | | | 66,3250 | | |
| | P5 : | X _{q2} | = | 265,0000 | | P5 : | -265,0000 | | |
| | | Y _{q2} | | 0,0000 | | | 0,0000 | | |
| | | Z _{q2} | | 64,1290 | | | 64,1290 | | |
| | P6 : | X _{r2} | = | -187,3833 | | P8 : | 187,3833 | | |
| | | Y _{r2} | | -187,3833 | | | -187,3833 | | |
| | | Z _{r2} | | 66,4890 | | | 66,5520 | | |
| | P7 : | X _t | = | -187,3833 | | P4 : | -187,3833 | | |
| | | Y _t | | -265,0000 | | | 187,3833 | | |
| | | Z _t | | 66,0070 | | | 65,0530 | | |
| | P8 : | X _e | = | 187,3833 | | P7 : | -187,3833 | | |
| | | Y _e | | -187,3833 | | | -265,0000 | | |
| | | Z _e | | 66,5520 | | | 66,0070 | | |
| | | | | | | P2 : | 187,3833 | | |
| | | | | | | | 187,3833 | | |
| | | | | | | | 66,3250 | | |
| Gesamtabweichung der Höhe Δz : | | 2,423 | mm | | | | | | |
| Korrekturwinkel φ _A : | | -0,22 | ° | | | | | | |
| Korrekturwinkel φ _C : | | 47,81 | ° | | | | | | |
| | | | | mittlere Höhe : | 65,6296 | mm | | | |

*Dr.-Ing. Axel Stegen
Bau und Betrieb von Werkzeugmaschinen*

- Eingabetafel
- blaue Zahlen können verändert werden
- schwarze Zahlen werden automatisch berechnet
- rechte Seite: Umrechnung der Meßpunkte zur Weiterverwendung

Anwendungsbeispiel: Ebenengleichungen

Gleichung der Bezugsebene ε_0 :

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------|---|---|---|--|---|---------|--|---|---------|---|
| ε_0 : | \mathbf{x}_0 | = | $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ | = | $\begin{bmatrix} 265,000 \\ 0,000 \\ 65,630 \end{bmatrix}$ | + | s_0 · | $\begin{bmatrix} -265,000 \\ 265,000 \\ 0,000 \end{bmatrix}$ | + | t_0 · | $\begin{bmatrix} -452,383 \\ -187,383 \\ 0,000 \end{bmatrix}$ |
|-------------------|----------------|---|---|---|--|---|---------|--|---|---------|---|

Gleichung der Werkstückebene ε_1 :

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------|---|---|---|--|---|---------|---|---|---------|---|
| ε_1 : | \mathbf{x}_1 | = | $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ | = | $\begin{bmatrix} 265,000 \\ 0,000 \\ 65,552 \end{bmatrix}$ | + | s_1 · | $\begin{bmatrix} -265,000 \\ 265,000 \\ -1,318 \end{bmatrix}$ | + | t_1 · | $\begin{bmatrix} -452,383 \\ -187,383 \\ 0,937 \end{bmatrix}$ |
|-------------------|----------------|---|---|---|--|---|---------|---|---|---------|---|

Gleichung der Werkstückebene ε_2 :

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------|---|---|---|--|---|---------|--|---|---------|--|
| ε_2 : | \mathbf{x}_2 | = | $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ | = | $\begin{bmatrix} 187,383 \\ 287,383 \\ 16,325 \end{bmatrix}$ | + | s_2 · | $\begin{bmatrix} -452,383 \\ -187,383 \\ -2,196 \end{bmatrix}$ | + | t_2 · | $\begin{bmatrix} 0,000 \\ -374,767 \\ 0,227 \end{bmatrix}$ |
|-------------------|----------------|---|---|---|--|---|---------|--|---|---------|--|

Gleichung der Werkstückebene ε_3 :

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------|---|---|---|---|---|---------|--|---|---------|---|
| ε_3 : | \mathbf{x}_3 | = | $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ | = | $\begin{bmatrix} -187,383 \\ 187,383 \\ 65,053 \end{bmatrix}$ | + | s_3 · | $\begin{bmatrix} 0,000 \\ -452,383 \\ 0,954 \end{bmatrix}$ | + | t_3 · | $\begin{bmatrix} 374,767 \\ 0,000 \\ 1,272 \end{bmatrix}$ |
|-------------------|----------------|---|---|---|---|---|---------|--|---|---------|---|

- analytische Beschreibung der Bezugsebene ε_0
- analytische Beschreibung der Werkstückebenen ε_1 , ε_2 und ε_3

Anwendungsbeispiel: Normalenvektoren der Ebenen

Normalenvektor der Bezugsebene n_0 :

| | | | | | | | |
|--|-------|---|-------|---|-------------|--|--|
| | | | x_a | = | 0,000 | | |
| | n_0 | = | y_a | = | 0,000 | | |
| | | | z_a | = | 169.538,147 | | |

Normalenvektor der Werkstückebene n_1 :

| | | | | | | | |
|--|-------|---|----------|---|-------------|--|----------------------------|
| | | | x_{n1} | = | 1,334 | | |
| | n_1 | = | y_{n1} | = | 844,546 | | |
| | | | z_{n1} | = | 169.538,147 | | $n_1 = 169.540 \text{ mm}$ |

Normalenvektor der Werkstückebene n_2 :

| | | | | | | | |
|--|-------|---|----------|---|-------------|--|----------------------------|
| | | | x_{n2} | = | -865,523 | | |
| | n_2 | = | y_{n2} | = | 169.538,147 | | |
| | | | z_{n2} | = | 169.538,147 | | $n_2 = 169.540 \text{ mm}$ |

Normalenvektor der Werkstückebene n_3 :

| | | | | | | | |
|--|-------|---|----------|---|-------------|--|----------------------------|
| | | | x_{n3} | = | -575,432 | | |
| | n_3 | = | y_{n3} | = | 357,527 | | |
| | | | z_{n3} | = | 169.538,147 | | $n_3 = 169.540 \text{ mm}$ |

- Berechnung des Normalenvektors der Bezugsebene
- Berechnung der Normalenvektoren der Werkstückebenen n_1 , n_2 and n_3
- Aufstellung des mittleren Normalenvektors der Werkstückflächen

mittlerer Normalenvektor der Werkstückebene n_{123} :

| | | | | | | | |
|--|-----------|---|-----------|---|-------------|--|--|
| | | | x_{n12} | = | -479,874 | | |
| | n_{123} | = | y_{n12} | = | 434,922 | | |
| | | | z_{n12} | = | 169.538,147 | | |

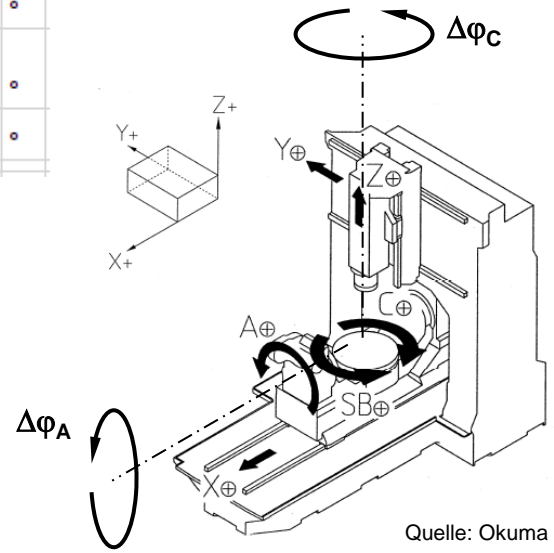
Anwendungsbeispiel: Ergebnis

Schnittgerade g von ε_0 und ε_{123} :

$$g: \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + t \cdot \begin{bmatrix} 0,906 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

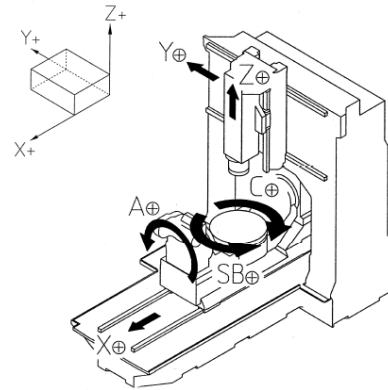
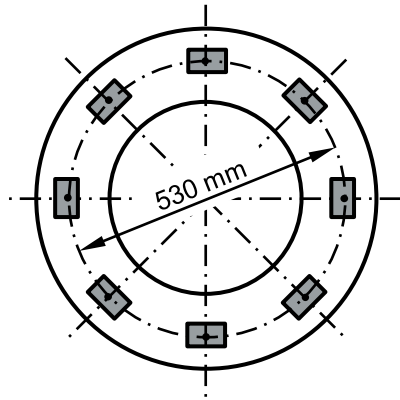
Korrekturwinkel:

| | |
|--|-----------------|
| Gesamtkorrekturwinkel $\Delta\phi_g$: | 0,219 ° |
| Korrekturwinkel $\Delta\phi_A$: | <u>-0,219</u> ° |
| Korrekturwinkel $\Delta\phi_C$: | <u>47,813</u> ° |



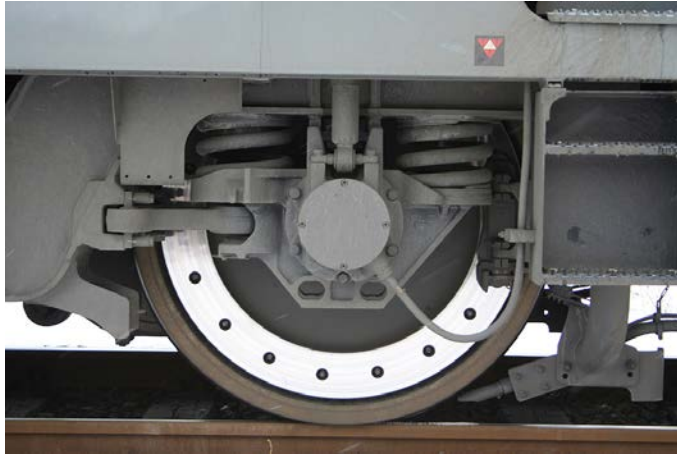
- analytische Beschreibung der Schnittgeraden
- Ergebnis: zwei Korrekturwinkel!

Anwendungsbeispiel: Pfiffige Bearbeitung einer Bremsscheibe

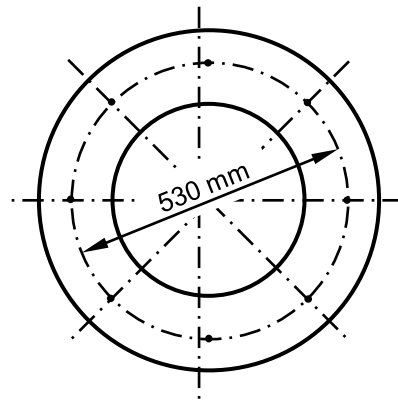


- **Werkstück :**
Bremsscheiben für Schienenfahrzeuge
(gegossen)
8 Bearbeitungsflächen
Teilkreisdurchmesser \varnothing 530 mm
- **Meßfühler :**
Renishaw QMP 60
- **5-Achsmaschine :**
Okuma MU 8000V-L
- **Aufspannung :**
Problem zeitaufwendiger Ausrichtungen

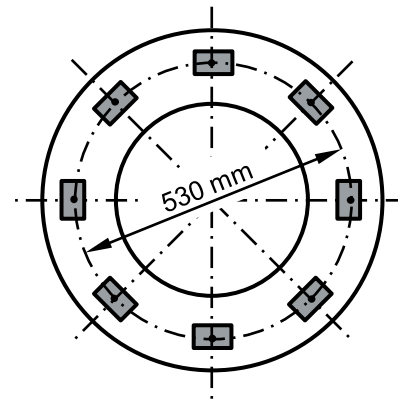
Eindrücke eines Probeschnittes



Quelle: S. Terfloth



Vorderseite



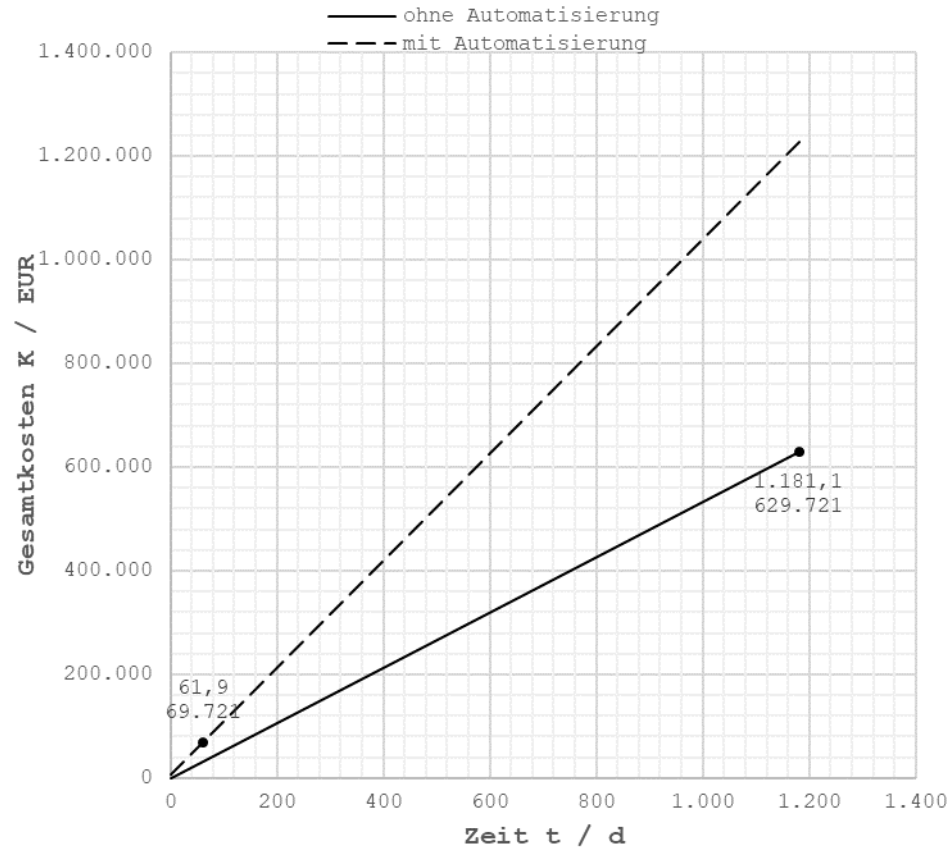
Rückseite

- eine Delegation stand an der Werkzeugmaschine
- der Bediener startete den Vorgang
- die Werkzeugmaschine zuckte zweimal
- die Delegation murmelte erstaunt
- die Bearbeitung wurde durchgeführt
- Ergebnis: Spitzenqualität

Gliederung

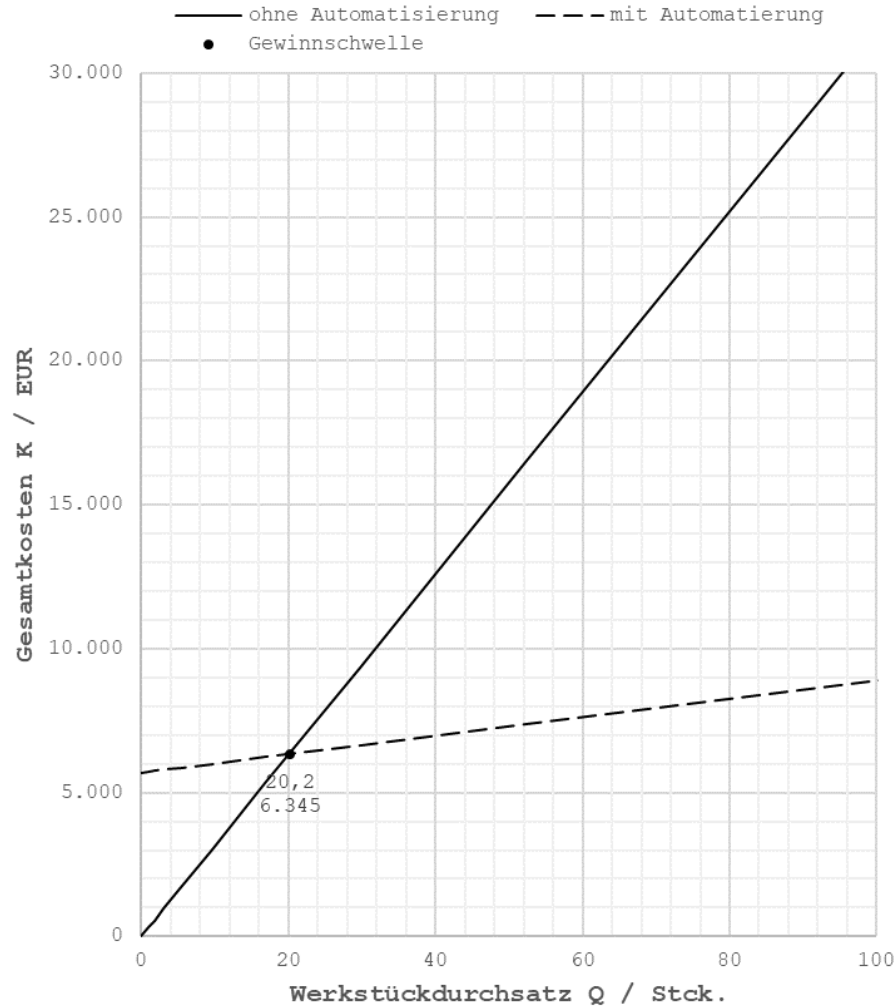
- Einleitung
- Manuelle Ausrichtung
- Automatisierungsstufe I
- Automatisierungsstufe II
- Modell für Ausrichtearbeiten
- **Wirtschaftliche Analyse**
- Zusammenfassung

Wirtschaftliche Analyse



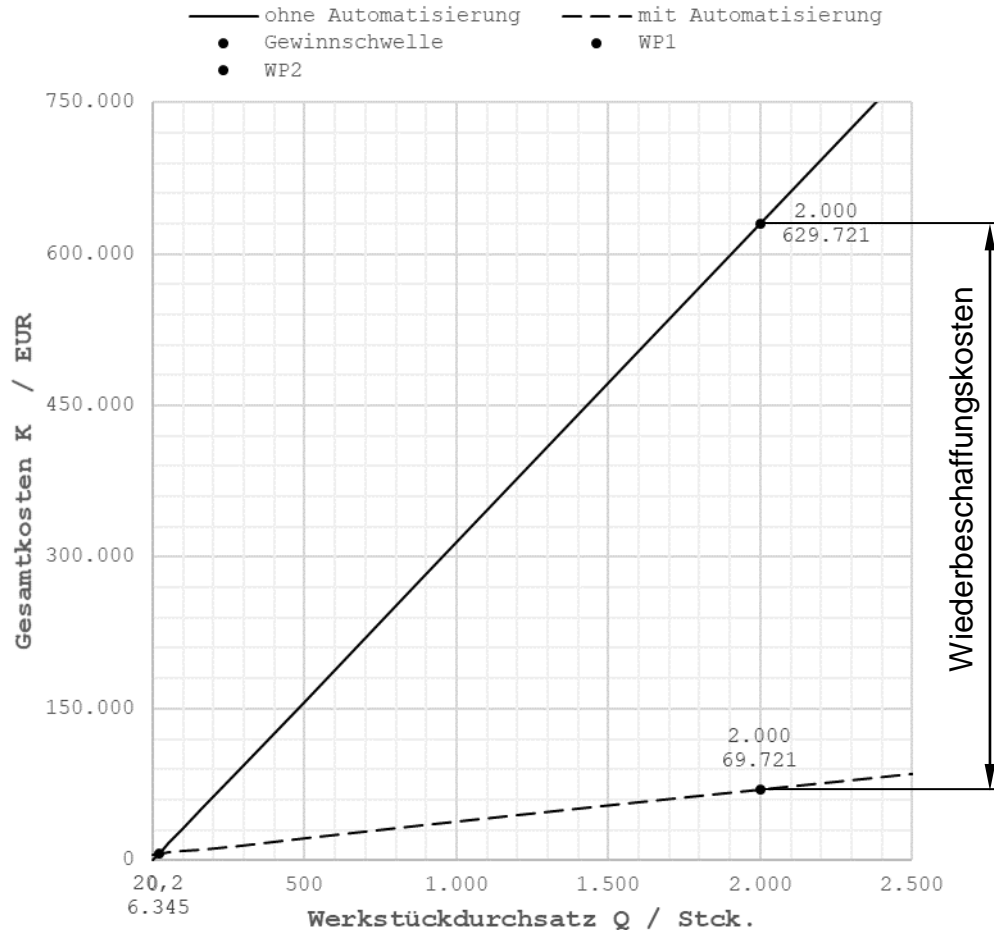
- Analyse der Kosten
- das automatisierte System ist teurer als das nicht automatisierte System
- Beachte: Das Ergebnis ist wichtig
- Die Stückkosten sind zu berechnen!

Wirtschaftliche Analyse: Kostenvergleichsrechnung (lineare Skalierung)



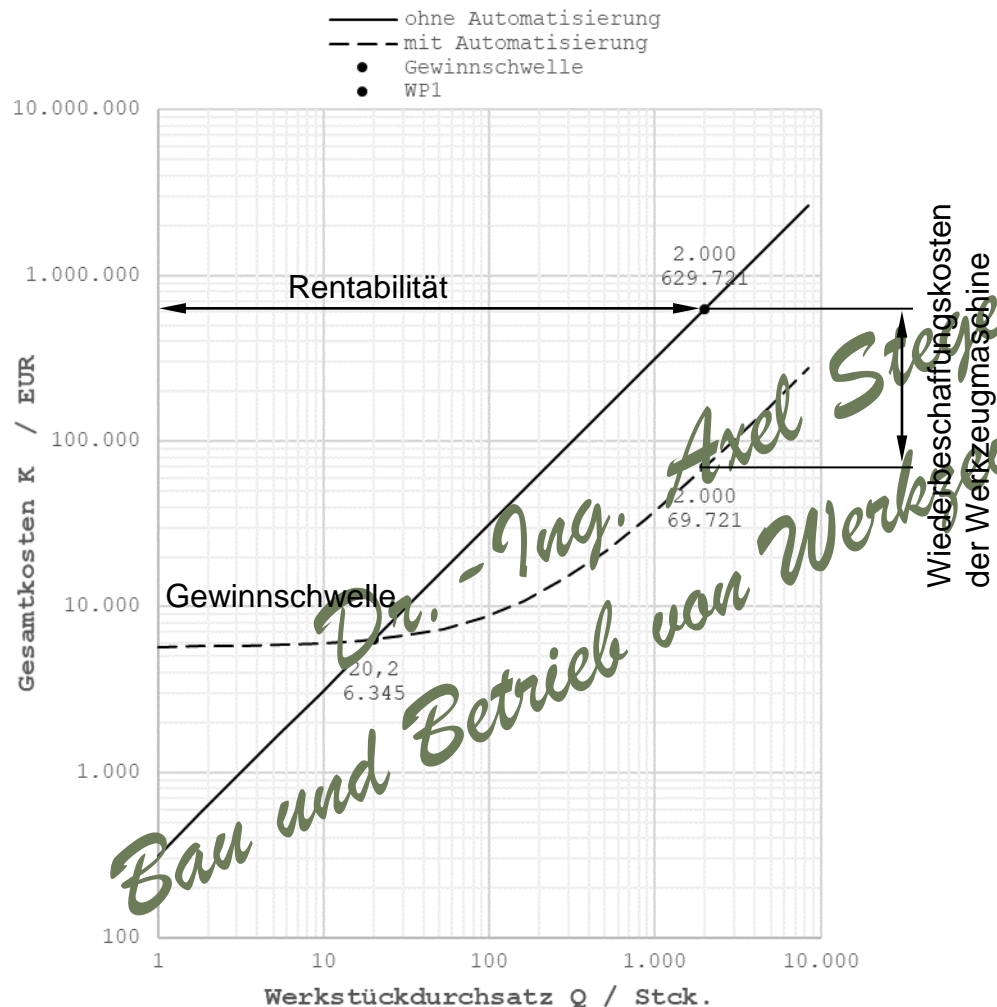
- Hier sind die Gesamtkosten über den Werkstückdurchsatz aufgetragen.
- Die Gewinnschwelle ist eingezeichnet.
- Es ist zu erkennen, daß die Gesamtkosten des automatisierten Systems größer als vor her sind, aber die Steigerung des Werkstückdurchsatzes ist größer als die Steigung der Gesamtkosten.
- Das kennzeichnet das Prinzip der Automatisierung!

Wirtschaftliche Analyse: Kostenvergleichsrechnung (lineare Skalierung)



- Die Investition hat sich bereits nach 2.000 Werkstücken rentiert!
- dies kann in einem Vierteljahr erreicht werden!
- Verglichen mit der konventionellen Bearbeitung ergibt sich die Möglichkeit zusätzlich 19 Werkzeugmaschinen zu finanzieren! (wenn am Markt so viele Werkstücke abgesetzt werden können)

Wirtschaftliche Analyse: Kostenvergleichsrechnung (logarithmische Skalierung)



- Für einen besseren Kostenüberblick ist es nötig eine logarithmische Skalierung zu verwenden.
- Dadurch werden Rentabilität und Gewinnschwelle in einem Diagramm sichtbar!
- Die Einsatzmöglichkeiten von 5-Achs-maschinen liegen nicht nur im Bereich der 5-achsigen Simultanbearbeitung!

Gliederung

- Einleitung
- Manuelle Ausrichtung
- Automatisierungsstufe I
- Automatisierungsstufe II
- Modell für Ausrichtearbeiten
- Wirtschaftliche Analyse
- Zusammenfassung

Zusammenfassung



- Betrachtungsschwerpunkt: geschickte Nutzung von Werkzeugmaschinen für die Bearbeitung von typischen Werkstücken aus dem Bereich der Schienenfahrzeugtechnik
- Ein mathematisches Modell wurde in erklärt.
- Das Werkstück wurde gezeigt.
- Die Automatisierung wurde wirtschaftlich analysiert.
- Im Vergleich mit einem sehr geringen Automatisierungsgrad, werden die wirtschaftlichen Vorteile sehr deutlich!