

# *„Automatisierung von zeitaufwendigen Rüstaufgaben an Werkzeugmaschinen“*



Siemens ES64F4

## Gliederung



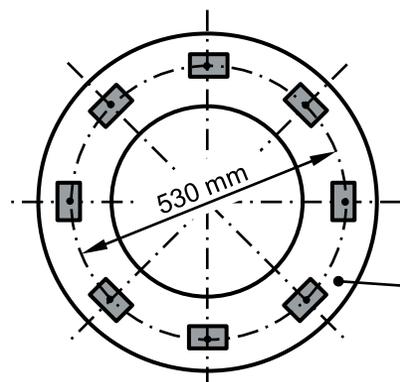
Quelle: S. Terfloth

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

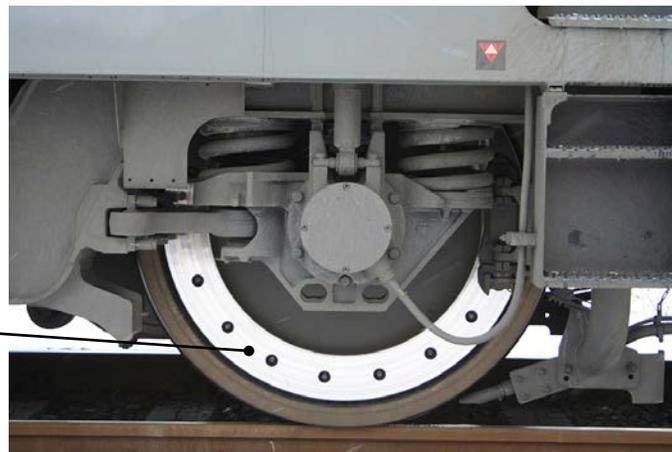
## Gliederung

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

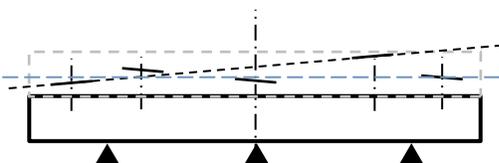
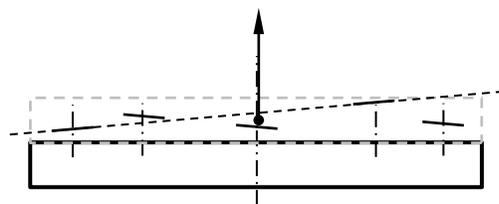
## Anwendungsbeispiel: Bearbeitung von Bremscheiben für Schienenfahrzeuge (geflanscht)



Rückseite



Quelle: S. Terfloth



Mittellinie

### - Werkstück :

Bremscheiben für Schienenfahrzeuge  
(gegossen)

8 Bearbeitungsflächen

Durchmesser des Teilkreises

$\varnothing$  530 mm

### - Aufspannung :

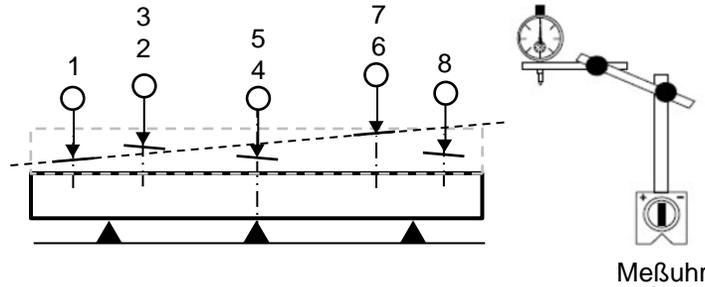
Problem der sehr zeitaufwendigen

Werkstückausrichtung

## Gliederung

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

## Ohne Automatisierung: Manuelle Ausrichtung mit Meßuhr



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

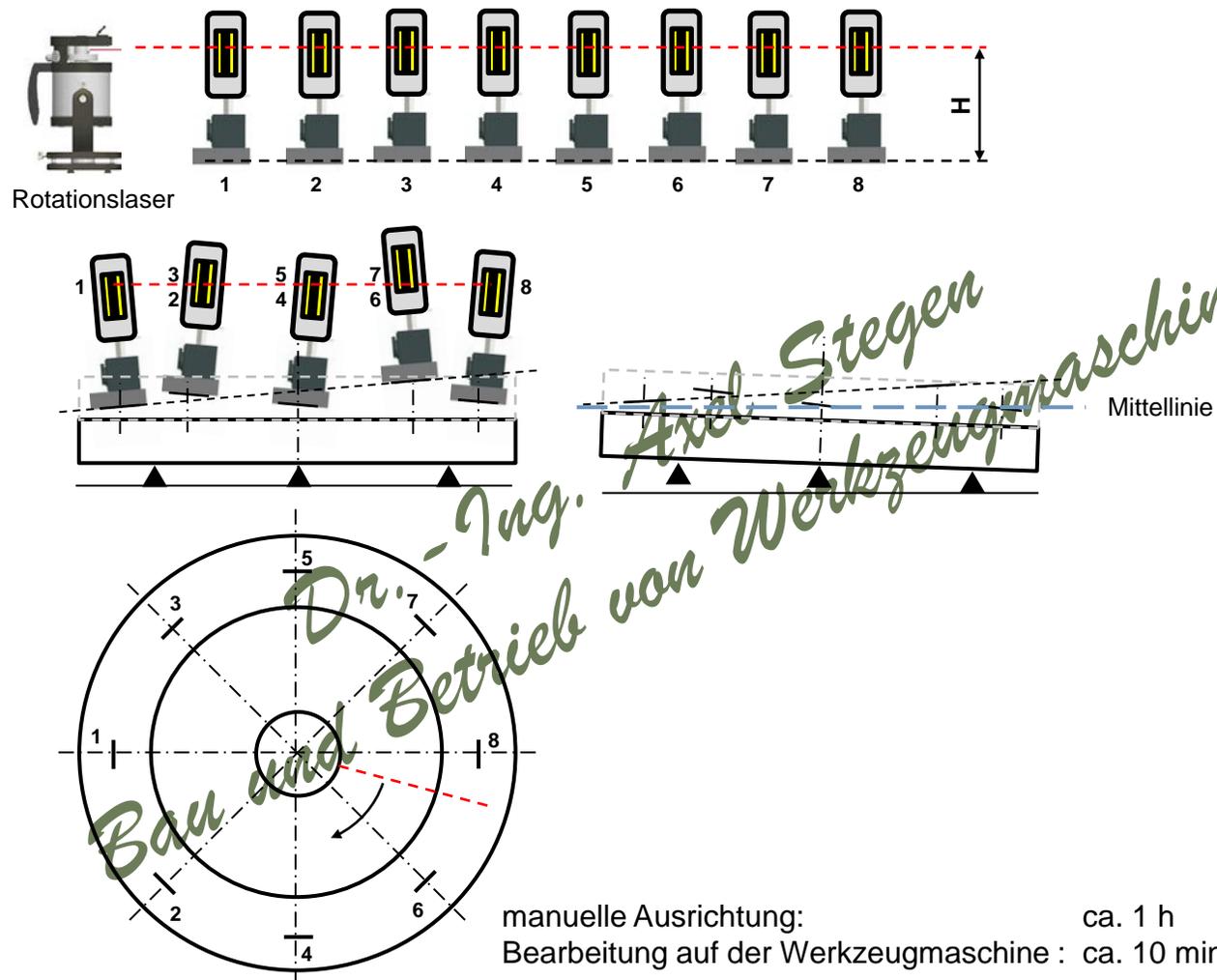
manuelle Ausrichtung: ca. 2 h  
Bearbeitung auf der Werkzeugmaschine : ca. 10 min

- 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



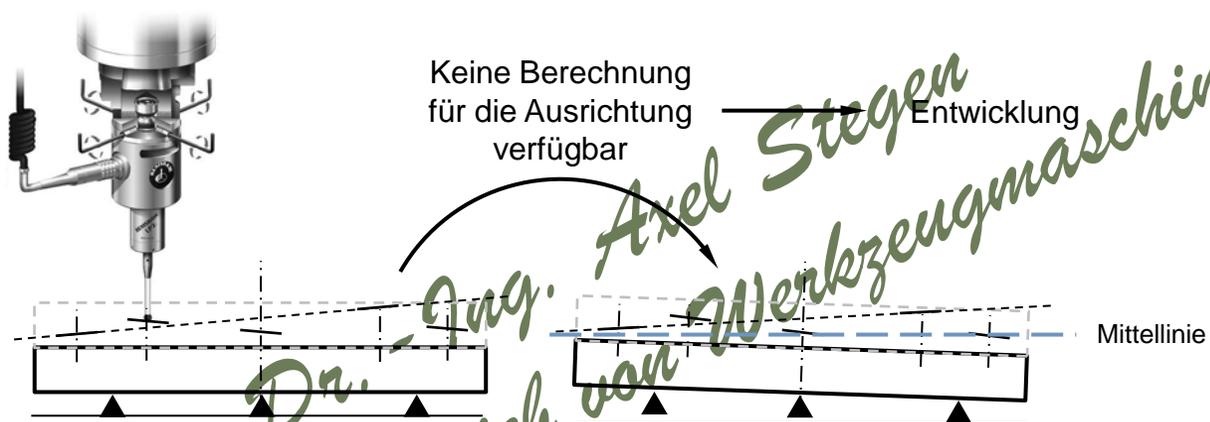
- Ausrichtung der 8 PSD in der gleichen Höhe
- die PSD müssen an ihre Position auf dem Werkstück gebracht werden
- der Rotationslaser muß in der Mitte des Werkstückes am Maschinentisch einer 3-Achsmaschine befestigt werden
- Das Werkstück kann ausgerichtet werden, indem auf einem Monitor die Signale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



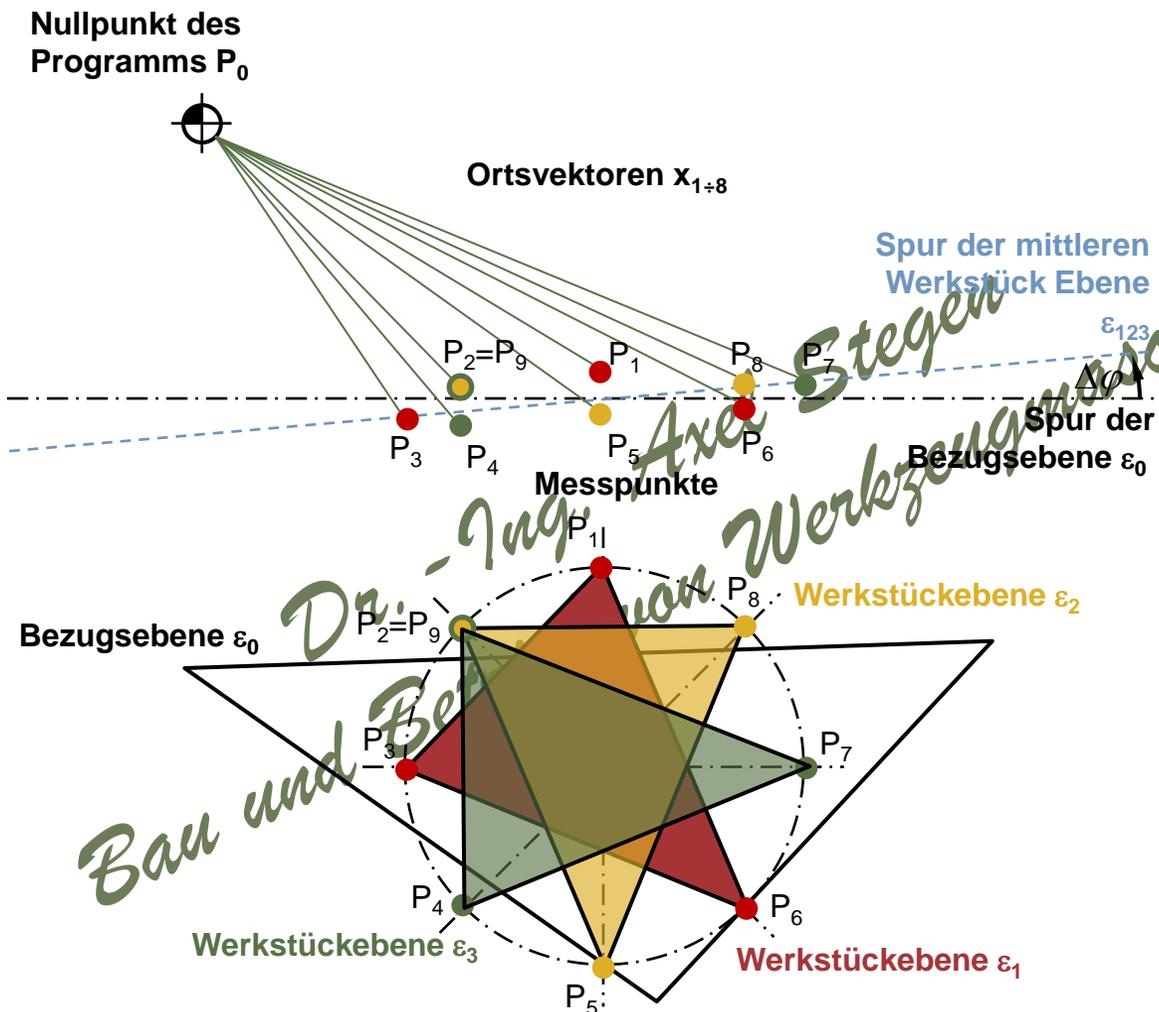
Berechnung der Korrekturwinkel  $\Delta\varphi_A$  und  $\Delta\varphi_C$  !



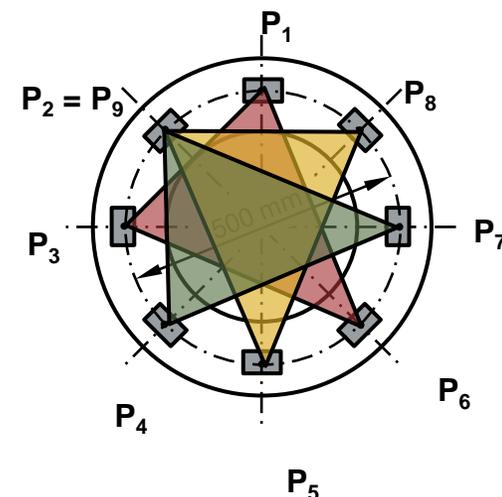
Bearbeitung des Werkstückes mit minimalem Zeitaufwand!

- Vorgehensweise

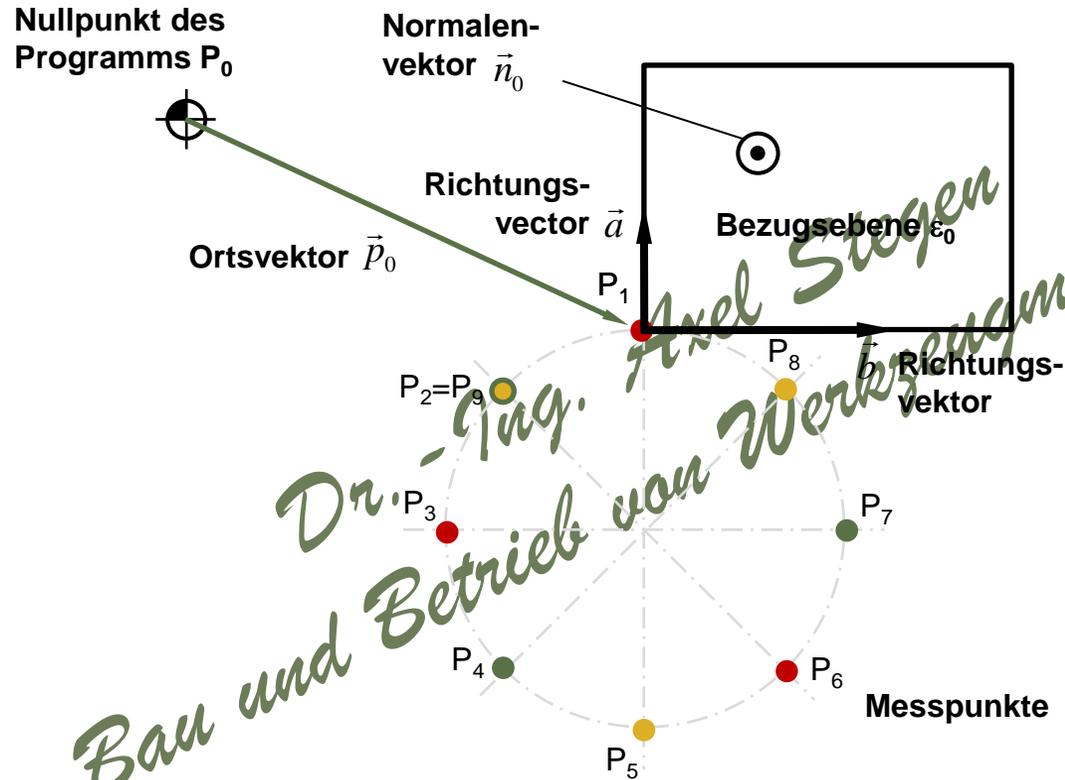
## Durchführung der Messungen: Modellidee



- 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

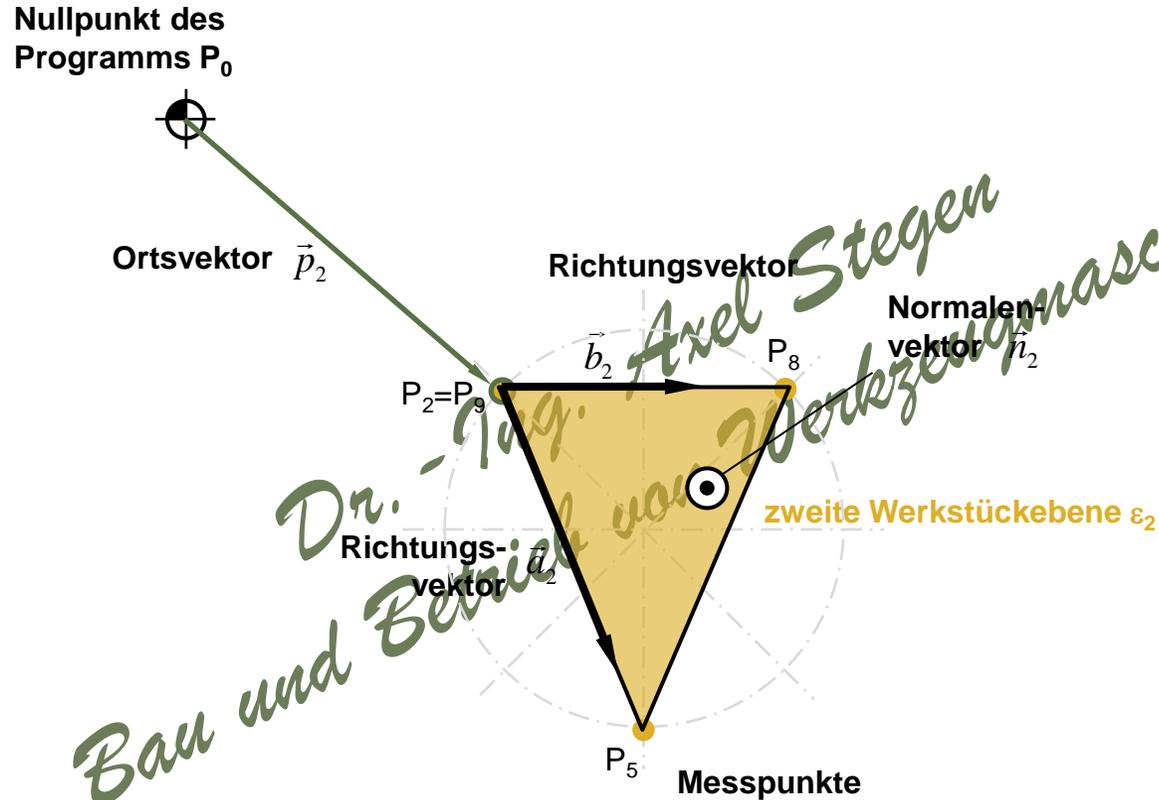
erste Werkstückebene  $\varepsilon_1$

- 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  $\vec{n}_1$

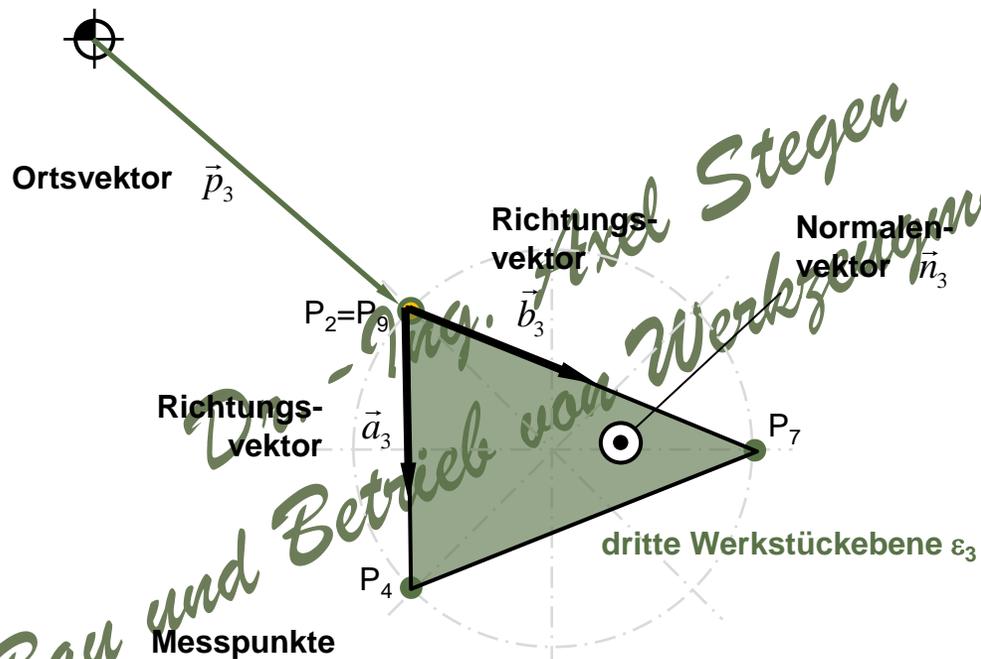
## Modellentwicklung: zweite Werkstückebene



- 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  $\vec{n}_2$

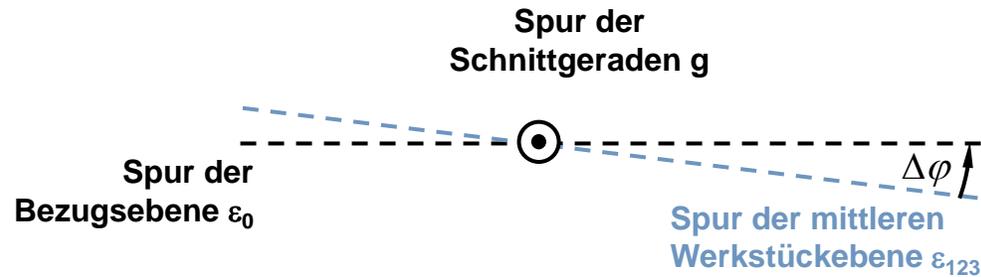
## Modellentwicklung: dritte Werkstückebene

Nullpunkt des  
Programms  $P_0$



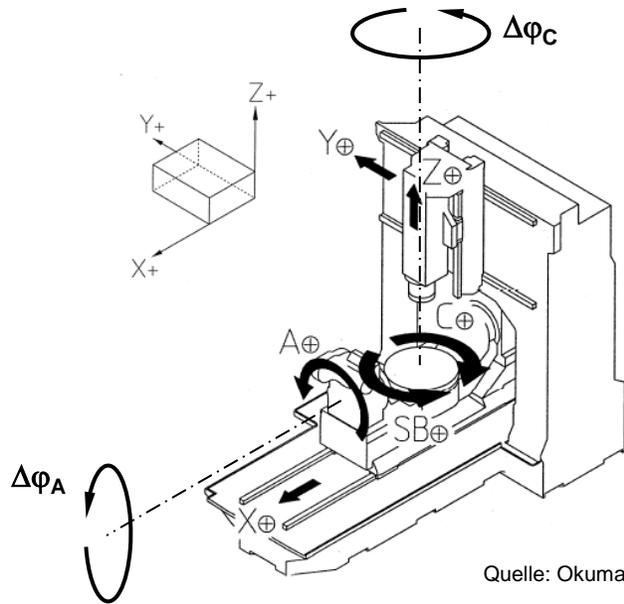
- Festlegung der Ortsvektoren
- Aufstellung der Ebenengleichung des Werkstückes
$$\varepsilon_3 : \vec{x} = \vec{p}_3 + s_3 \cdot \vec{a}_3 + t_3 \cdot \vec{b}_3$$
- Berechnung des Normalenvektors der dritten Werkstückebene  $\vec{n}_3$
- Mittlerer Normalenvektor der drei Ebenen des Werkstückes  $\vec{n}_{123}$

## 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: Ebenengleichungen

Gleichung der Bezugsebene  $\varepsilon_0$  :

|                   |                |   |   |   |  |   |         |  |   |         |   |
|-------------------|----------------|---|---|---|--|---|---------|--|---|---------|---|
| $\varepsilon_0$ : | $\mathbf{x}_0$ | = | $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ | = | $\begin{bmatrix} 265,000 \\ 0,000 \\ 65,630 \end{bmatrix}$ | + | $s_0$ · | $\begin{bmatrix} -265,000 \\ 265,000 \\ 0,000 \end{bmatrix}$ | + | $t_0$ · | $\begin{bmatrix} -452,383 \\ -187,383 \\ 0,000 \end{bmatrix}$ |
|-------------------|----------------|---|---|---|--|---|---------|--|---|---------|---|

Gleichung der Werkstückebene  $\varepsilon_1$  :

|                   |                |   |   |   |  |   |         |   |   |         |   |
|-------------------|----------------|---|---|---|--|---|---------|---|---|---------|---|
| $\varepsilon_1$ : | $\mathbf{x}_1$ | = | $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ | = | $\begin{bmatrix} 265,000 \\ 0,000 \\ 65,552 \end{bmatrix}$ | + | $s_1$ · | $\begin{bmatrix} -265,000 \\ 265,000 \\ -1,318 \end{bmatrix}$ | + | $t_1$ · | $\begin{bmatrix} -452,383 \\ -187,383 \\ 0,937 \end{bmatrix}$ |
|-------------------|----------------|---|---|---|--|---|---------|---|---|---------|---|

Gleichung der Werkstückebene  $\varepsilon_2$  :

|                   |                |   |   |   |  |   |         |  |   |         |  |
|-------------------|----------------|---|---|---|--|---|---------|--|---|---------|--|
| $\varepsilon_2$ : | $\mathbf{x}_2$ | = | $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ | = | $\begin{bmatrix} 187,383 \\ 287,383 \\ 16,325 \end{bmatrix}$ | + | $s_2$ · | $\begin{bmatrix} -452,383 \\ -187,383 \\ -2,196 \end{bmatrix}$ | + | $t_2$ · | $\begin{bmatrix} 0,000 \\ -374,767 \\ 0,227 \end{bmatrix}$ |
|-------------------|----------------|---|---|---|--|---|---------|--|---|---------|--|

Gleichung der Werkstückebene  $\varepsilon_3$  :

|                   |                |   |   |   |   |   |         |  |   |         |   |
|-------------------|----------------|---|---|---|---|---|---------|--|---|---------|---|
| $\varepsilon_3$ : | $\mathbf{x}_3$ | = | $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ | = | $\begin{bmatrix} -187,383 \\ 187,383 \\ 65,053 \end{bmatrix}$ | + | $s_3$ · | $\begin{bmatrix} 0,000 \\ -452,383 \\ 0,954 \end{bmatrix}$ | + | $t_3$ · | $\begin{bmatrix} 374,767 \\ 0,000 \\ 1,272 \end{bmatrix}$ |
|-------------------|----------------|---|---|---|---|---|---------|--|---|---------|---|

- analytische Beschreibung der Bezugsebene  $\varepsilon_0$
- analytische Beschreibung der Werkstückebenen  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  und  $\varepsilon_3$

## 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 |  |  |

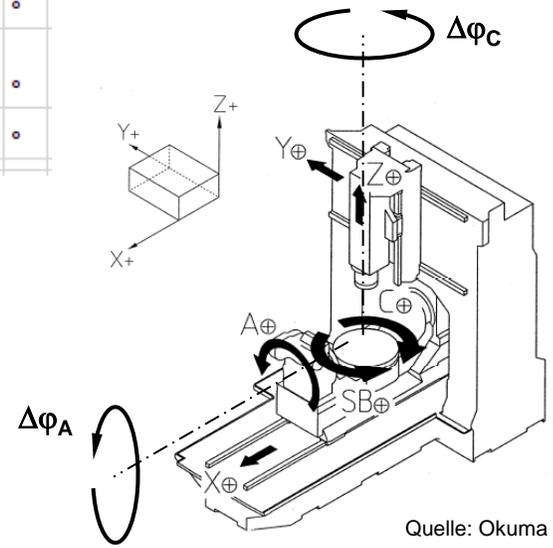
## Anwendungsbeispiel: Ergebnis

Schnittgerade  $g$  von  $\varepsilon_0$  und  $\varepsilon_{123}$  :

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

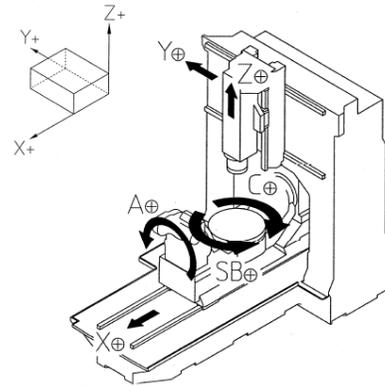
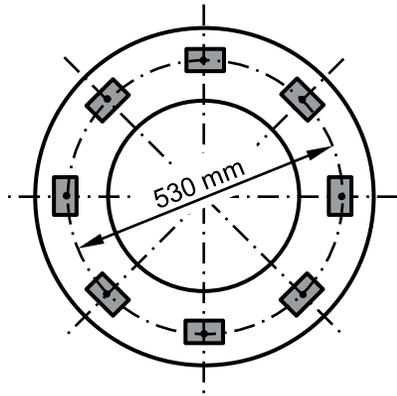
Korrekturwinkel:

|  |                 |
|--|-----------------|
| 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

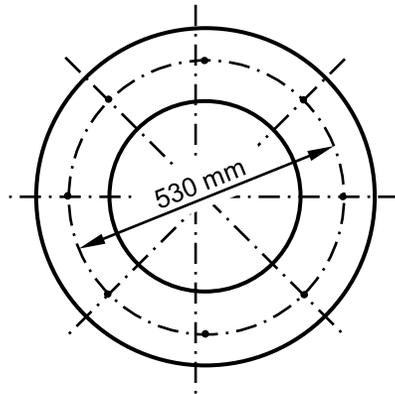


- **Werkstück :**  
Bremsscheiben für Schienenfahrzeuge  
(gegossen)  
8 Bearbeitungsflächen  
Teilkreisdurchmesser  $\varnothing$  530 mm
- **Meßfühler :**  
Renishaw QMP 60
- **5-Achsmaschine :**  
Okuma MU 8000V-L
- **Aufspannung :**  
Problem zeitaufwendiger Ausrichtungen

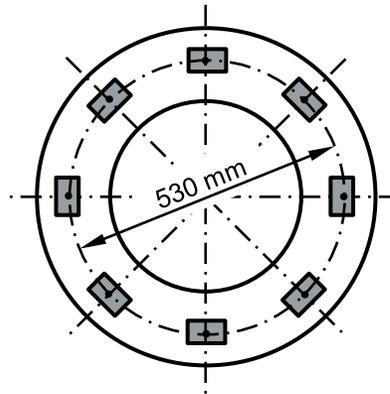
## Eindrücke eines Probeschnittes



Quelle: S. Terfloth



Vorderseite



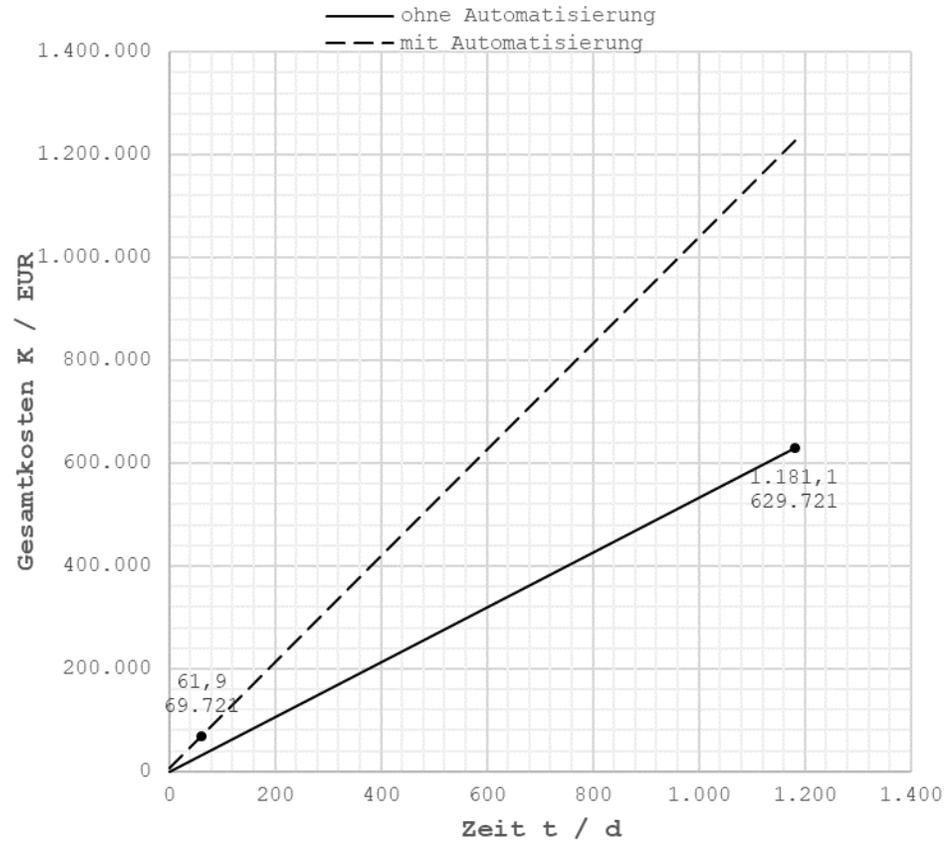
Rückseite

- 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

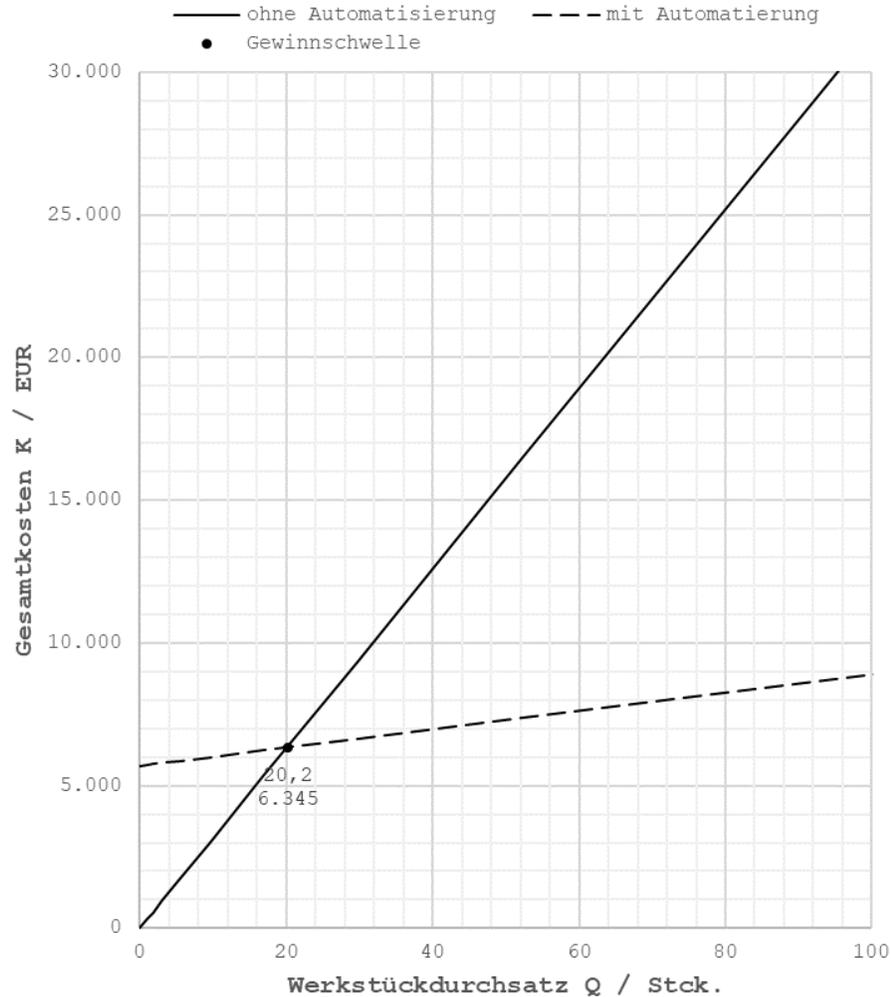
- Einleitung
- Manuelle Ausrichtung
- Automatisierungsstufe I
- Automatisierungsstufe II
- Modell für Ausrichtearbeiten
- **Wirtschaftliche Analyse**
- Zusammenfassung

## Wirtschaftliche Analyse



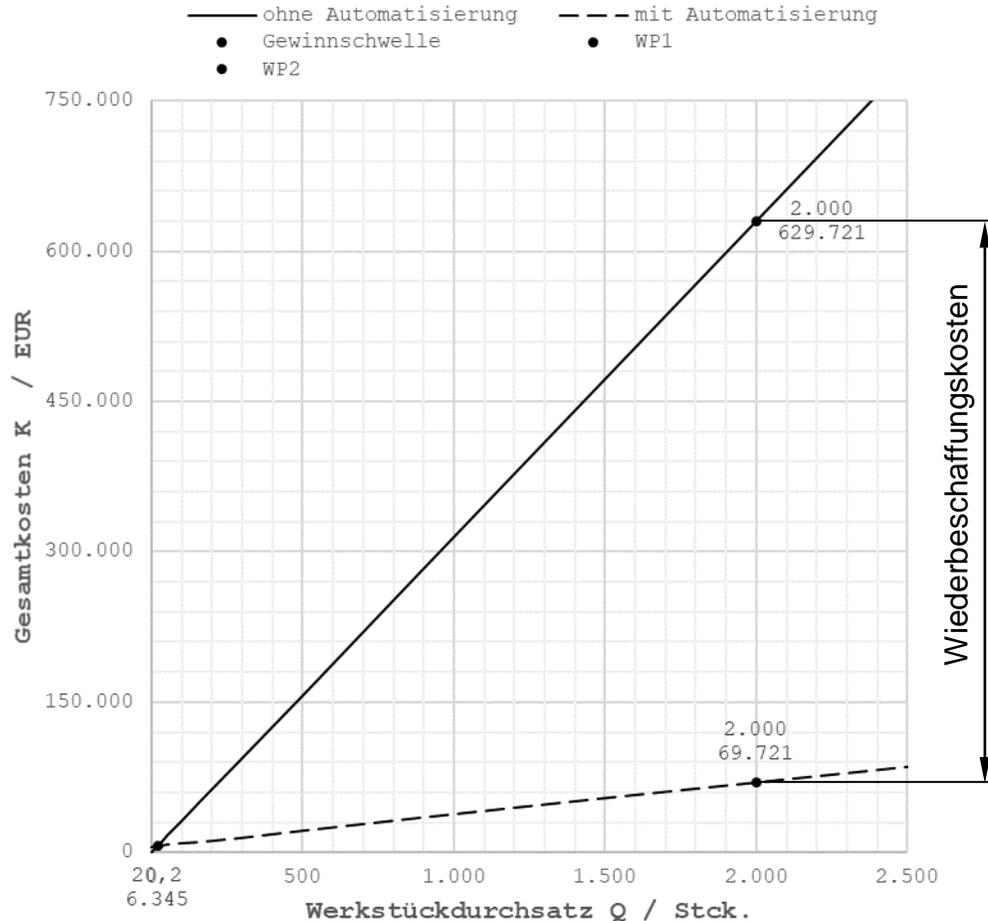
- Analyse der Kosten
- das automatisierte System ist teurer als das nicht automatisierte System
- Beachte: Das Ergebnis ist wichtig
- Die Stückkosten sind zu berechnen!

## Wirtschaftliche Analyse: Kostenvergleichsrechnung (lineare Skalierung)



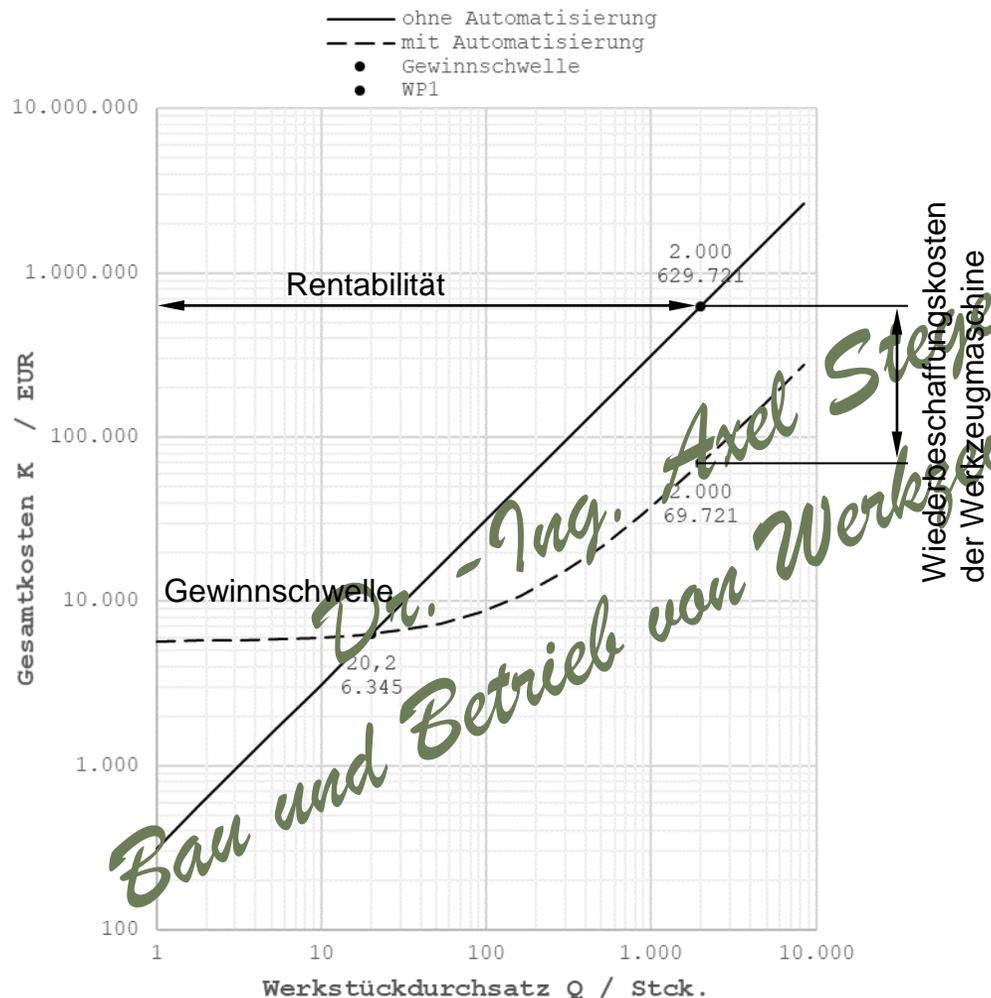
- Hier sind die Gesamtkosten über den Werkstückdurchsatz aufgetragen.
- Die Gewinnschwelle ist eingezeichnet.
- Es ist zu erkennen, daß die Gesamtkosten des automatisierten Systems größer als vor her sind, aber die Steigerung des Werkstückdurchsatzes ist größer als die Steigung der Gesamtkosten.
- Das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