

DE =	EN =	PT =	VN =
Eigenspannungen Röntgen 1/8			

**Röntgenographische Eigenspannungsmessung**

**1 Einführung**

In diesem Versuch werden die Grundlagen der röntgenographischen Eigenspannungsmessung erarbeitet und die Möglichkeiten und Grenzen dieses Messverfahrens am Beispiel einer randschichtgehärteten Probe diskutiert

**2 Grundlagen**

**2.1 Der Begriff „Eigenspannungen“**

Unter Eigenspannungen versteht man allgemein Spannungen in einem Bauteil, auf das keine äußeren mechanischen Beanspruchungen einwirken und das einem räumlich und zeitlich konstanten Temperaturfeld unterliegt. Die mit den Eigenspannungen verbundenen inneren Kräfte und Momente sind im mechanischen Gleichgewicht.

Je nach ihrer Reichweite werden Eigenspannungen in solche 1., 2. und 3. Art unterteilt:

- Eigenspannungen 3. Art (inhomogene Mikrospannungen) sind mikroskopischer Natur. Sie ändern Betrag und/oder Richtung innerhalb eines Kornes. Sie entstehen in der Nähe eines Gitterfehlers, z.B. einer Versetzung
- Eigenspannungen 2. Art (homogene Mikrospannungen) sind innerhalb eines Kornes konstant, variieren aber von Korn zu Korn. Sie sind Folge der Streckgrenzenanisotropie, d.h. die Streckgrenze verschiedener Phasen im Werkstoff ist unterschiedlich, dadurch erfolgt eine plastische Verformung inhomogen. Grund für diese Eigenspannungen können auch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten verschiedener Phasen in mehrphasigen Werkstoffen sein
- Eigenspannungen 1. Art (Makrospannungen) erstrecken sich über makroskopische Bereiche eines Werkstücks, d.h. über mehrere Körner. Eigenspannungen 1. Art entstehen beispielsweise bei der Umformung, mechanischer Bearbeitung oder bei der Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe.

Bild 1 zeigt den schematischen Verlauf der Spannungen längs eines Gefüge-ausschnittes mit der entsprechenden Definition der Eigenspannungen 1., 2. und 3. Art.

gezeichnet:	HPW	Datum:		education project	Röntgenographie	translate/en_ds/p_ct/vn_ro	origin: internet
Aenderung:	an	Datum:	25.07.2017	WIAP KFKOK	Radiography	r1	datei_wi_8_f_1_19_f2310_r1_Roentgenographische
Aenderung:	control 2	Data:		Safenwil Schweiz	spear 2	<a href="http://www.wiap.ch">www.wiap.ch</a>	idee of / from HPW

DE =	EN =	PT =	VN =
Eigenspannungen Röntgen 2/8			

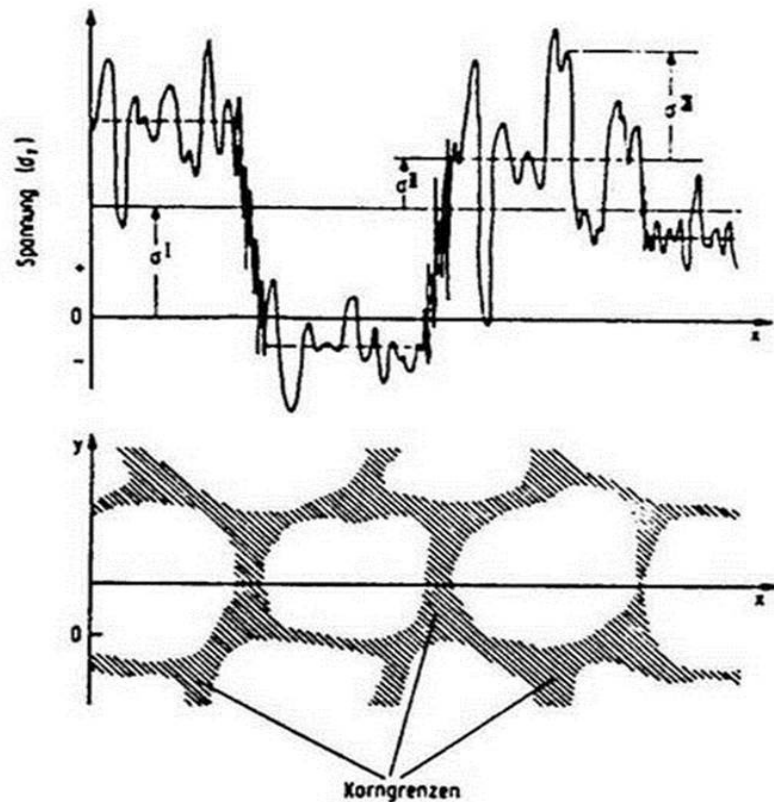
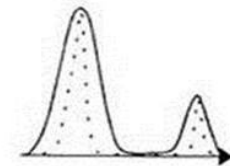


Bild 1: Schematischer Verlauf der Eigenspannungen längs der Oberfläche eines Gefügausschnittes einer Metallprobe

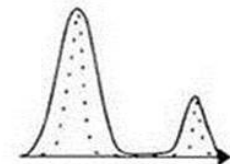
Da bei der Röntgenbeugungsaufnahme polykristalliner Werkstoffe im allgemeinen mehrere Körner vom Röntgenstrahl erfasst werden, sind Eigenspannungen 2. und 3. Art nicht unterscheidbar und den Eigenspannungen 1. Art überlagert. Sie führen aufgrund einer höheren Streubreite der Netzebenenabstände zu einer Verbreiterung der Peaks. Eigenspannungen 1. Art bewirken hingegen eine Verschiebung der Peakmaxima um  $\Delta\vartheta$ , da alle reflektierenden Netzebenen einer Netzebenenschar in gleicher Weise verzerrt werden. Dies wird in Bild 2 verdeutlicht

### Eigenspannungen 1., 2., und 3. Art

#### Eigenspannungen 3. Art



#### Eigenspannungen 2. Art



#### Eigenspannungen 1. Art

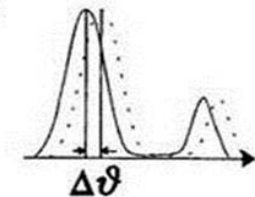


Bild 2: Auswirkung der Eigenspannungen 1., 2. und 3. Art auf die Peaks einer Röntgenbeugungsaufnahme

gezeichnet:	HPW	Datum:		education project	Röntgenographie	translate/en_ds/p_ct/vn_ro	origin: internet
Aenderung:	an	Datum:	25.07.2017	WIAP KFKOK	Radiography	r1	datei_wi_8_f_1_19_f2310_r1_Roentgenographische
Aenderung:	control 2	Data:		Safenwil Schweiz	spear 2	<a href="http://www.wiap.ch">www.wiap.ch</a>	idee of / from HPW

DE =	EN =	PT =	VN =
Eigenspannungen Röntgen 3/8			

**2.2 Messung von Eigenspannungen (sin<sup>2</sup>γ-Verfahren)**

Für die experimentelle Bestimmung von Eigenspannungen stehen verschiedenste zerstörende und zerstörungsfreie Messverfahren zur Verfügung. Die wichtigste zerstörungsfreie Methode stellen die röntgenographischen Messverfahren dar. Zu dieser Gruppe gehört auch das im Rahmen dieses Versuchs vorgestellte sin<sup>2</sup>γ-Verfahren.

Spannungen 1. Art führen zu einer elastischen Verzerrung der Elementarzelle. Ändert sich der Netzebenenabstand aufgrund einer am Gitter wirkenden Kraft von  $D_0$  nach  $D$ , so führt dies zu einer Veränderung der Lage der Interferenzlinie, wie Bild 3 verdeutlicht

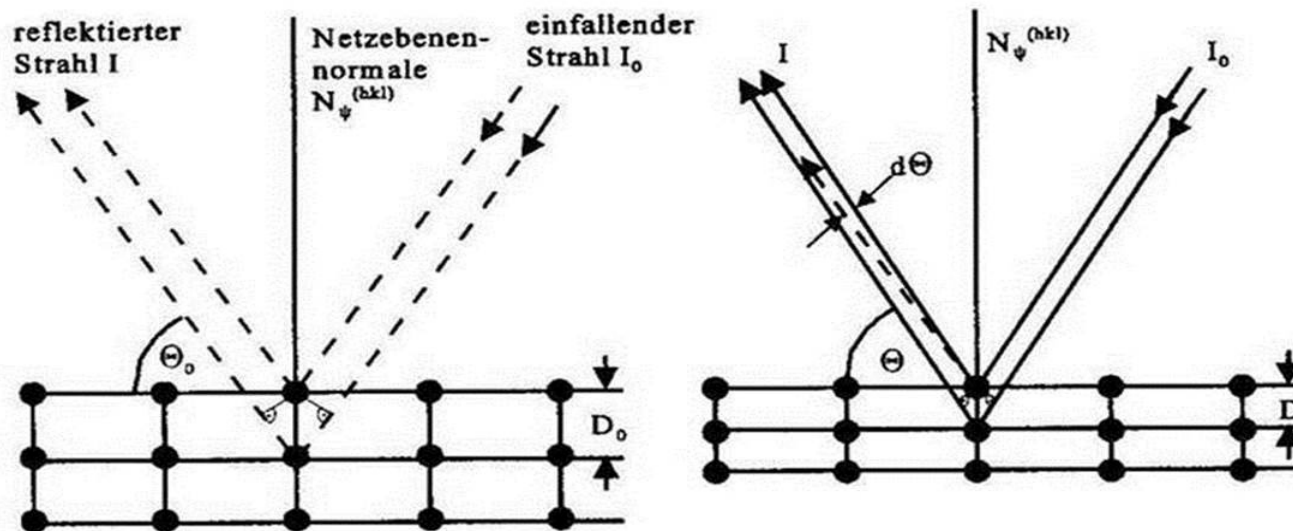


Bild 3: Bragg'sche Reflexion an einem spannungsfreien (links) und einem verspannten Gitter (rechts)

Da die Eindringtiefe der Röntgenstrahlung gering ist (ca. 10-20 µm, abhängig von Material und verwendeter Strahlung), werden nur oberflächennahe Bereiche der Probe erfasst. Eine eventuell vorhanden z-Komponente des Spannungstensors geht an der Oberfläche mangels einer Einspannung immer gegen null. Das heißt, man misst unter der Voraussetzung, dass im erfassten Probenvolumen keine z-Spannungskomponente vorhanden ist, einen zweiachsigen (ebenen) Spannungszustand in der Probenoberfläche.

gezeichnet:	HPW	Datum:		education project	Röntgenographie	translate/en_ds/p_ct/vn_ro	origin: internet
Aenderung:	an	Datum:	25.07.2017	WIAP KFKOK	Radiography	r1	datei_wi_8_f_1_19_f2310_r1_Roentgenographische
Aenderung:	control 2	Data:		Safenwil Schweiz	spear 2	<a href="http://www.wiap.ch">www.wiap.ch</a>	idee of / from HPW

DE =

EN =

PT =

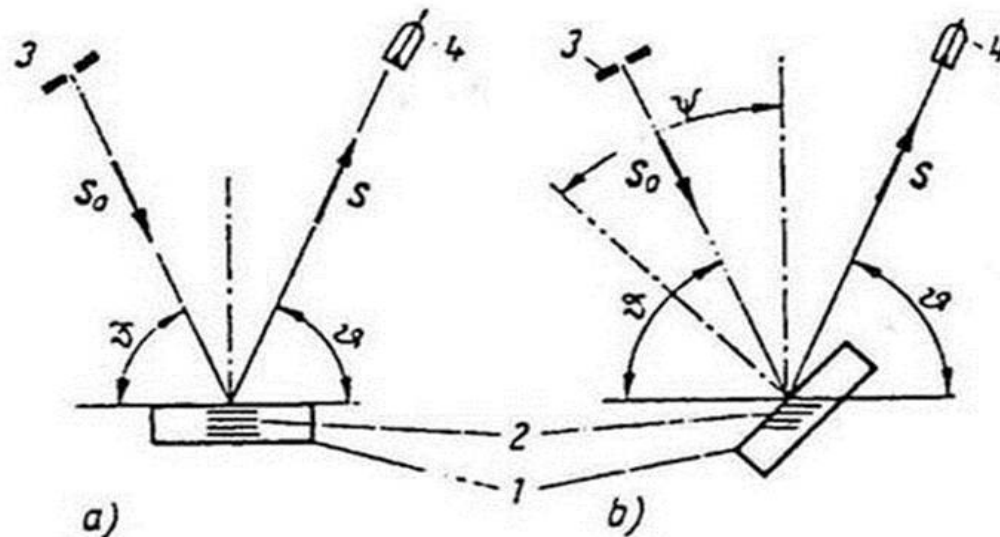
VN =

## Eigenspannungen Röntgen 4/8

Bild 4 erläutert die Aufnahmetechnik bei der röntgenographischen Spannungsmessung. Während bei der Diffraktometeraufnahme in üblicher Strahlgeometrie nur Netzebenen zur Reflexion kommen, die parallel zur Probenoberfläche liegen, erreicht man durch eine Kippung der Probe um den Winkel  $\psi$ , dass bei der Spannungsmessung auch solche Netzebenen reflektieren, die nicht parallel zur Oberfläche orientiert sind.

a) Diffraktometerverfahren in üblicher Strahlgeometrie: Die reflektierenden Netzebenen liegen parallel zur Probenoberfläche ( $\psi = 0^\circ$ )

b)  $\sin^2\psi$  - Verfahren: Die reflektierenden Netzebenen liegen nicht parallel zur Probenoberfläche ( $\psi \neq 0^\circ$ )



1: Probe

2: reflektierende Netzebenen

3: Eintrittsblende

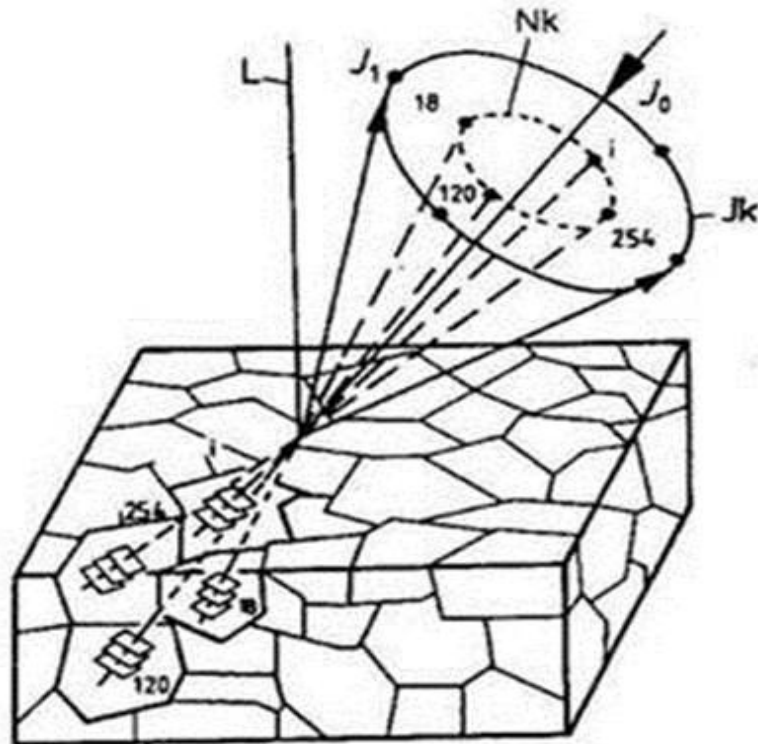
4: Zählrohr

Bild 4: Aufnahmetechnik bei der röntgenographischen Spannungsmessung

Bei der Untersuchung polykristalliner Werkstoffe werden mehrere Kristallite vom Primärstrahl erfasst. Misst man in unterschiedlichen Richtungen  $\psi$  einer Probe, so erhält man die Intensität von Netzebenen unterschiedlicher Orientierung, die bei Anliegen einer Spannung unterschiedliche Netzebenenabstände

gezeichnet:	HPW	Datum:		education project	Röntgenographie	translate/en_ds/p_ct/vn_ro	origin: internet
Aenderung:	an	Datum:	25.07.2017	WIAP KFKOK	Radiography	r1	datei_wi_8_f_1_19_f2310_r1_Roentgenographische
Aenderung:	control 2	Data:		Safenwil Schweiz	spear 2	<a href="http://www.wiap.ch">www.wiap.ch</a>	idee of / from HPW

DE =	EN =	PT =	VN =
Eigenspannungen Röntgen 5/8			



- L Oberflächenlot
- Ik Interferenzkegel
- Nk Normalenkegel
- $J_0$  einfallender Strahl
- $J_1$  reflektierter Strahl

Bild 5: Entstehung des Interferenzkegels in vielkristallinen Werkstoffen

gezeichnet:	HPW	Datum:		education project	Röntgenographie	translate/en_ds/p_ct/vn_ro	origin: internet
Aenderung:	an	Datum:	25.07.2017	WIAP KFKOK	Radiography	r1	datei_wi_8_f_1_19_f2310_r1_Roentgenographische
Aenderung:	control 2	Data:		Safenwil Schweiz	spear 2	<a href="http://www.wiap.ch">www.wiap.ch</a>	idee of / from HPW

DE =	EN =	PT =	VN =
Eigenspannungen Röntgen 6/8			

Für die Bestimmung der Spannung im Festkörper ist die Verknüpfung der gemessenen Gitterdehnung mit elastizitätstheoretischen Gesichtspunkten notwendig.

Legt man das in Bild 6 dargestellte Koordinatensystem mit den Winkeln  $\varphi$  und  $\psi$  zugrunde, so lautet die Beziehung zwischen der gemessenen Dehnung  $\varepsilon_{\varphi,\psi}$  und den oberflächenparallelen Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  sowie den Hauptdehnungen  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  und  $\varepsilon_3$ :

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \varepsilon_1 \cos^2 \varphi \sin^2 \psi + \varepsilon_2 \sin^2 \varphi \sin^2 \psi + \varepsilon_3 \cos^2 \psi$$

Die Verknüpfung der Hauptdehnungen mit den Hauptspannungen ist durch das Hookesche Gesetz gegeben:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2) \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1) \quad \varepsilon_3 = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2)$$

Damit lässt sich Gleichung 1 schreiben als

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \frac{\nu+1}{E}(\sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi) \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2)$$

Durch Einführung der Voigtschen Elastizitätskonstanten

$$\frac{1}{2}S_2 = \frac{\nu+1}{E} \quad S_1 = -\frac{\nu}{E}$$

Erhält man die Grundgleichung der röntgenographischen Verfahren zur Ermittlung elastischer Spannungen in ihrer gebräuchlichsten Darstellung:

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \frac{1}{2}S_2 \cdot \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi + S_1(\sigma_1 + \sigma_2)$$

mit

$$\sigma_{\varphi} = \sigma_1 \cdot \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi$$

gezeichnet:	HPW	Datum:		education project	Röntgenographie	translate/en_ds/p_ct/vn_ro	origin: internet
Aenderung:	an	Datum:	25.07.2017	WIAP KFKOK	Radiography	r1	datei_wi_8_f_1_19_f2310_r1_Roentgenographische
Aenderung:	control 2	Data:		Safenwil Schweiz	spear 2	<a href="http://www.wiap.ch">www.wiap.ch</a>	idee of / from HPW



DE =	EN =	PT =	VN =
Eigenspannungen Röntgen 7/8			

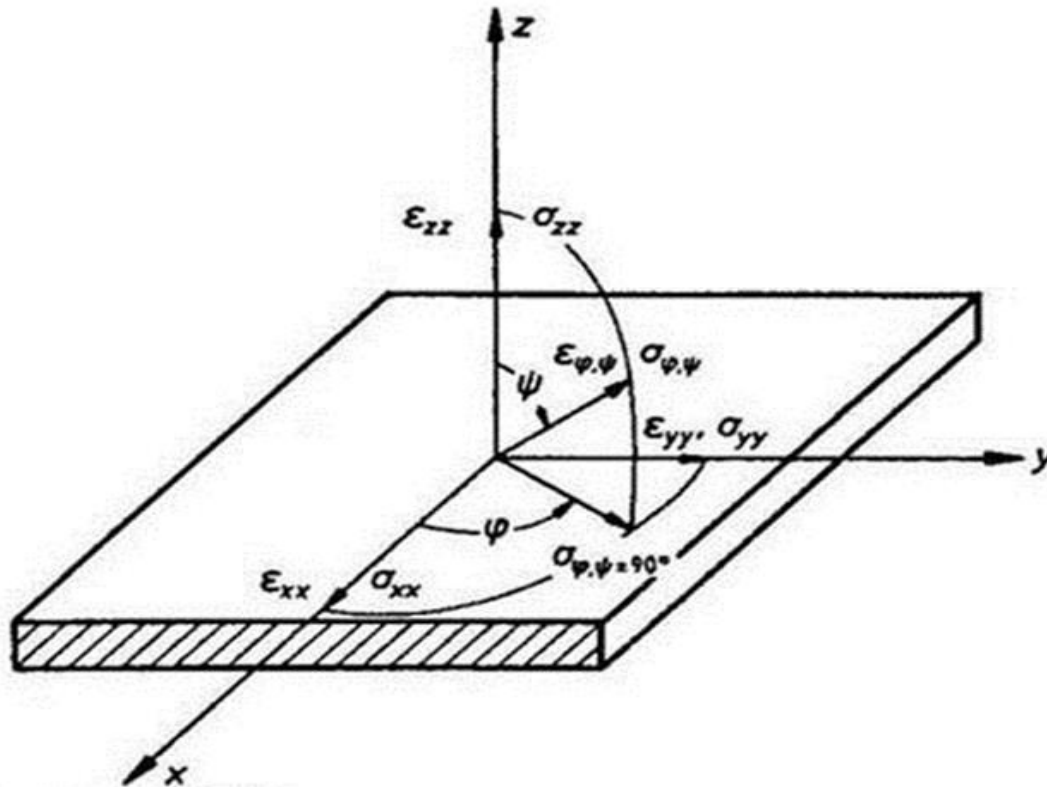


Bild 6: Definition des Koordinatensystems mit den Winkeln  $\varphi$  und  $\psi$

Die Bestimmung des ebenen Spannungszustandes ist somit auf die Ermittlung der Gitterdehnung  $e_{j,y}$  zurückgeführt, welche mittels der Änderung der Interferenzlinienlagen gemessen werden kann. Gleichung 5 lässt sich als Geradengleichung auffassen. Trägt man die elastischen Dehnungen für  $j = \text{konst.}$  als Funktion von  $\sin 2\alpha$  auf, so ergibt sich eine Gerade, deren Steigung proportional zur im Azimut  $j$  wirksamen Spannungskomponente  $s_j$  ist und deren Ordinatenabschnitt von der Summe der Hauptspannungen in der Oberfläche bestimmt wird (Bild 7). Zur Separation der Hauptspannungen in der Oberfläche ist es notwendig, in mindestens drei verschiedenen  $j$ -Richtungen zu messen.

gezeichnet:	HPW	Datum:		education project	Röntgenographie	translate/en_ds/p_ct/vn_ro	origin: internet
Aenderung:	an	Datum:	25.07.2017	WIAP KFKOK	Radiography	r1	datei_wi_8_f_1_19_f2310_r1_Roentgenographische
Aenderung:	control 2	Data:		Safenwil Schweiz	spear 2	<a href="http://www.wiap.ch">www.wiap.ch</a>	idee of / from HPW

DE =	EN =	PT =	VN =
Eigenstressen Röntgen 8/8			

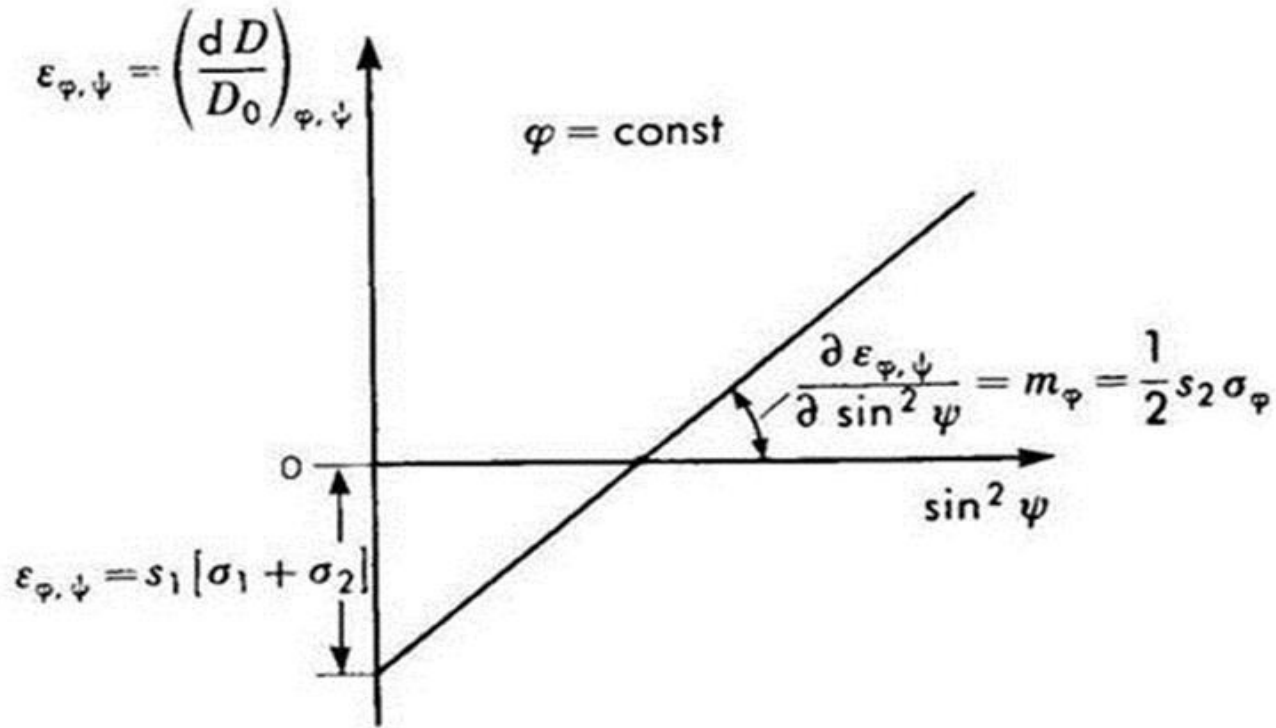


Bild 7: Dehnungsverteilung in der Azimutebene  $j = \text{const.}$  eines ebenen, oberflächen-parallelen Spannungszustandes

### 3 Aufgabenstellung

An einer laserstrahlgehärteten Probe sind die Spannungskomponenten parallel und senkrecht zur Vorschubrichtung des Lasers röntgenographisch zu messen. Die Auswertung erfolgt mit Hilfe der  $\sin^2\psi$ -Auftragung

gezeichnet:	HPW	Datum:		education project	Röntgenographie	translate/en_ds/p_ct/vn_ro	origin: internet
Aenderung:	an	Datum:	25.07.2017	WIAP KFKOK	Radiography	r1	datei_wi_8_f_1_19_f2310_r1_Roentgenographische
Aenderung:	control 2	Data:		Safenwil Schweiz	spear 2	<a href="http://www.wiap.ch">www.wiap.ch</a>	idee of / from HPW