

**Abb. 2.79** Fließkurve aus dem Zugversuch  $0^\circ$  zur Walzrichtung (WR), transformierte effektive Fließkurve aus der hydraulischen Tiefung

Spannungszustandes und die plastische Arbeit  $W_{bia}$  des äquivalent zweiachsigen Spannungszustandes berechnet.

$$W_{uni} = \int k_f \cdot d\varphi \quad (2.158)$$

$$W_{bia} = \int k_{f,bia} \cdot d\varphi_s \quad (2.159)$$

Um die äquibiaxiale wahre Spannungs-Dehnungskurve zu transformieren, ist es notwendig, einen Skalierungsfaktor  $f_{bia}$  zu bestimmen. Für die Bestimmung des Skalierungsfaktors  $f_{bia}$ , gibt es unterschiedliche Methoden, die in der Literatur beschrieben sind [Sig09]. In DIN EN ISO 16808 wird empfohlen den Skalierungsfaktor im Punkt der Gleichmaßdehnung zu berechnen [Din16808].

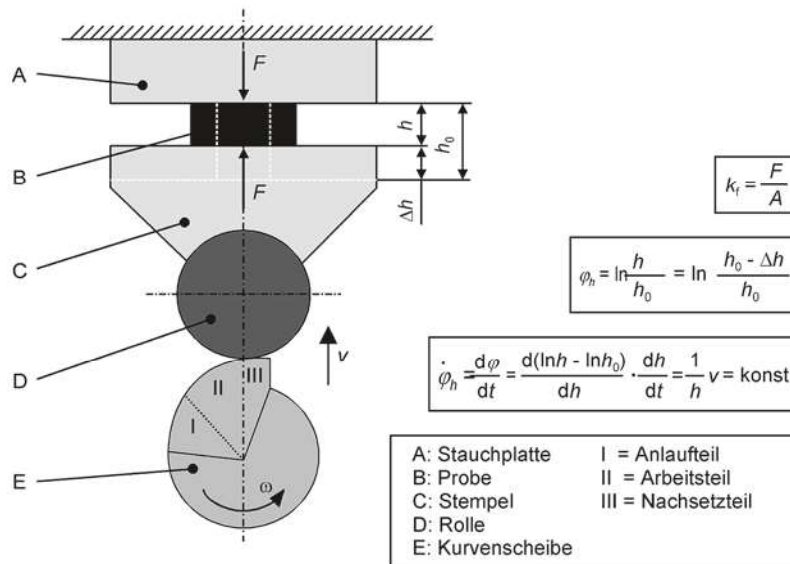
$$f_{bia} = \frac{k_{f,bia-ref}}{k_{f-ref}} \quad (2.160)$$

Abbildung 2.78 zeigt Fließkurven aus dem Zugversuch und äquibiaxiale wahre Spannungs-Dehnungskurven für einen DC04 und einen HX780XD. Die Referenzspannung  $k_{f-ref}$  ist die letzte gültige Spannung für die Fließkurve aus dem einachsigen Zugversuch. Um die biaxiale Referenzspannung  $k_{f,bia-ref}$  zu bestimmen, wird die Arbeitsäquivalenz zum Zeitpunkt der Gleichmaßdehnung und der äquivalent vollrichteten Arbeit aus der hydraulischen Tiefung verwendet.

Mit Hilfe des Skalierungsfaktors  $f_{bia}$  wird die äquibiaxiale wahre Spannungs-Dehnungskurve in die effektive Fließkurve umgerechnet. Dabei wird der Umformgrad mit dem Skalierungsfaktor  $f_{bia}$  multipliziert und die äquibiaxiale wahre Spannung durch  $f_{bia}$  dividiert.

$$\bar{k}_f = \frac{k_{f,bia-ref}}{f_{bia}} \quad (2.161)$$

$$\bar{\varphi} = f_{bia} \cdot \varphi_s \quad (2.162)$$



**Abb. 2.80** Funktionsprinzip des „Plastometers“ zur Aufnahme von Fließkurven im Zylinderstauchversuch unter konstanter Umformgeschwindigkeit [Doe86]

Um das Fließverhalten zu beschreiben wird der Fließkurve aus dem Zugversuch die transformierte effektive Fließkurve aus der hydraulischen Tiefung angehängt (Abb. 2.79).

### 2.4.8 Zylinderstauchversuch

Während in der Blechumformung im Wesentlichen der Zugversuch zur Fließkurvenermittlung eingesetzt wird, wird für die Massivumformung hauptsächlich der Zylinderstauchversuch verwendet. Hierbei wird eine zylindrische Probe zwischen ebenen, parallelen Werkzeugflächen gestaucht. Eine notwendige Bedingung zur exakten Erfassung des Umformgrads  $\varphi$  ist eine homogene Umformung, d. h. die Probe bleibt während der Umformung zylindrisch.

Bei geeigneter Schmierung kann so ein Umformgrad von bis zu  $\varphi \approx 0,8$  realisiert und ein annähernd einachsiger Spannungszustand angenommen werden [Doe86].

Eine vor allem in der Kaltumformung verbreitete Methode zur Minimierung der Reibung ist die Verwendung von Proben, in deren Stirnflächen flache Taschen eingebracht sind. Diese Schmieraschen „halten“ den Schmierstoff während des Stauchvorgangs fest und stellen einen kontinuierlichen Schmierfilm sicher. Nachteilig bei diesen von M. V. Rastagaev entwickelten Proben ist jedoch die größere Ungenauigkeit beim Messen der Probenhöhe und eine messtechnisch schwer erfassbare plastische Formänderung des Kragenbereiches.

Wegen des starken Einflusses der Umformgeschwindigkeit auf die Fließspannung in der Warmumformung muss bei der Aufnahme von Fließkurven die Umformgeschwindigkeit im Versuch konstant gehalten werden. Eine konstante Umformgeschwindigkeit ist für die Fließkurvenaufnahme im Zylinderstauchversuch z. B. mithilfe eines „Plastometers“