

## 1 Einleitung und Zielstellung

Schrägwalzverfahren werden in der Rohrherstellung vielfältig eingesetzt. Zu den häufig angewendeten Schrägwalzverfahren zählen das Asselwalzen, das Planetenschrägwalzen und das Kegellochschrägwalzen.

Das Kegellochschrägwalzen, auch als das Mannesmann-Verfahren bekannt, wird zum Lochen eines Vollblocks eingesetzt und ermöglicht damit die Herstellung nahtloser Rohre. Der Asselprozess wird wie der Planetenschrägwalzprozess zur Durchmesserreduktion und Streckung des Walzgutes verwendet. Das Asselwalzwerk beinhaltet in der Regel drei stationäre Walzen, die divergent, d. h. dem Walzgut entgegengesetzt, angeordnet sind. Beim Planetenschrägwalzwerk stehen die Walzen stattdessen konvergent zum Walzgut und rotieren gleichzeitig um das Walzgut.

Das Planetenschrägwalzen (PSW) ist ein vergleichsweise junges Verfahren, das Anfang der 70er Jahre entwickelt wurde. Dieser Schrägwalzprozess wird zur Herstellung von Stabstahl und nahtlosen Stahl- und Kupferrohren angewendet. Die Vorteile liegen in der Einfachheit und hohen Flexibilität der Rohrherstellung [1]. Andererseits stellt der Prozess einen hohen maschinenbaulichen Anspruch insbesondere beim Stahlrohrwalzen dar, was einer der Gründe ist, dass in den letzten 15 Jahren keine Planetenschrägwalzwerke für Stahlrohr- und Stabstahlanwendungen gebaut wurden. Neue Patentanmeldungen zeigen aber, dass diese Probleme lösbar sind und weiterhin ein starkes Interesse am Planetenschrägwalzen existiert.

Entgegen der eingeschränkten Verbreitung im Stahlrohrbereich hat sich der PSW-Prozess in der Kupferrohrherstellung bereits etabliert und weist Vorteile gegenüber den beiden konventionellen Verfahren „Low-Ratio“ und „High-Ratio“ auf [2]. Bei diesen Verfahren wird der gegossene Block in einer Strangpresse gelocht und anschließend gewalzt und gezogen, bzw. beim „High-Ratio“ nur gezogen.

Seit Anfang der 90er Jahre werden Kupferrohre mittels des Planetenschrägwalzprozesses hergestellt, aber dennoch wird das Verfahren nur begrenzt angewendet. Die Vorteile der Abmessungsvielfalt bleiben bisher ebenso ungenutzt wie die Entwicklung anderer Baugrößen hinsichtlich gesteigerter Jahrestonnagen oder Großrohranwendungen. An dieser Stelle werden die konventionellen Prozesse „Low- und High-Ratio“ vorgezogen. Für diese Verfahren existieren ausreichend fundamentale Kenntnisse, die eine einfache und schnelle Auslegung, Konstruktion und Umrüstung der Anlagen auf verschiedenste Abmessungen und Werkstoffe erlauben. Dadurch können diese wirtschaftlicher, weil effizienter betrieben werden. Eine weitere erfolgreiche Anwendung des Planetenschrägwalzprozesses verlangt daher Prozesskenntnisse, die ein mannigfaltiges Walzprogramm und eine schnelle, zuverlässige konstruktive Walzwerksauslegung ermöglichen.

Es existieren nur wenige Forschungsarbeiten zum Planetenschrägwalzen, die größtenteils empirisch-analytische Verfahren aufzeigen. Insbesondere der Einfluss von redundanten Formänderungen bleibt völlig unberücksichtigt, obwohl viele Untersu-

chungen einen hohen Einfluss bei anderen Schrägwalzprozessen belegen. Hieraus ergibt sich die Aufgabe der vorliegenden Arbeit, die in der Entwicklung einer elementaren Plastizitätstheorie besteht, welche die Größe und den Einfluss der redundanten Formänderungen berücksichtigt. Mit Hilfe dieser Theorie soll es ermöglicht werden, eine sichere und schnelle Anlagenauslegung durchzuführen und damit eine höhere kundenspezifische Anpassung zu erlangen. Am Beispiel der Kupferrohrherstellung wird diese Theorie entwickelt, die aber auch auf das Stahlwalzen übertragbar sein soll. Die Basis dieser Theorie wird durch Erkenntnisse aus praktischen Walzversuchen und Simulationen des Umformprozesses durch die Finite-Elemente-Methode FEM geschaffen.

Zu Beginn der vorliegenden Arbeit wird kurz ein Überblick über die Historie und den Stand der Technik des Planetenschragwalzprozesses gegeben. Nachfolgend werden aus der Literatur bekannte Forschungsberichte vorgestellt, die sich direkt mit dem PSW-Prozess auseinandersetzen. Auch sind Berichte über ähnliche Schragwalzprozesse Gegenstand der Analyse, da dadurch Grundlagen von Elementartheorien, beispielsweise für die Definition und Bestimmung der redundanten Formänderungen, übernommen werden können. Gerade der divergente Schragwalzprozess Asselwalzen ist ähnlich und blickt auf eine lange Entwicklungsgeschichte zurück. Zudem werden Forschungsarbeiten vorgestellt, die eine Simulation des PSW-Verfahrens über die Finite-Elemente-Methode FEM beinhalten.

Die Grundlage für die Entwicklung der Theorie wird durch experimentelle und FE-simulierte Versuche geschaffen. Die experimentellen Walzversuche wurden während der Inbetriebnahme eines kontinuierlich arbeitenden PSW für Kupferrohre durchgeführt. In diesem Kapitel werden kurz der Aufbau der Produktionslinie, die Messstellen und die Versuchsdurchführung erläutert. Die Auswertung hat das Ziel, die für den Prozess typischen Eigenschaften herauszuarbeiten und prinzipiell zu erläutern.

Die auf Basis der FE-Methode durchgeführten simulierten Walzversuche werden vorgestellt und diskutiert. Dadurch soll ein detaillierter Einblick in die im Walzspalt ablaufenden Vorgänge ermöglicht werden, mit dem Ziel, die redundanten Formänderungen zu beobachten und zu bewerten.

Es wird eine neue elementare Plastizitätstheorie zur Modellbildung des Planetenschragwalzprozesses erarbeitet, deren Aufbau erläutert wird. Dieses Modell erlaubt eine detaillierte Beschreibung des Umformprozesses. Abschließend werden die Ergebnisse dieser Elementartheorie diskutiert und mit den experimentell und simulierten aufgenommenen Werte verifiziert, um die Richtigkeit der Theorie darzulegen.

## 2 Stand der Technik

Der Planetenschrägwalzprozess wird seit seiner Entwicklung 1970 bei beim Knüppel- und Rohrwalzen für Stahl und Kupfer eingesetzt. In diesem Kapitel werden die Historie der Prozessentwicklung und seine Anwendung vorgestellt. Anschließend werden der Prozess und seine Eigenschaften beschrieben. Abschließend werden Literaturquellen aufgeführt, die den Prozess bei seiner Anwendung beschreiben und Möglichkeiten der Berechnung aufführen.

Im Vergleich zu anderen Rohrwalzverfahren spielt der Planetenschrägwalzprozess in der Literatur nur eine untergeordnete Rolle. Dies liegt an der im Vergleich zu anderen Verfahren späten Entwicklung und Einführung und damit an der nach wie vor in der Anwendung vorliegenden Dominanz der Alternativverfahren. Insbesondere das Planetenschrägwalzen von Kupferrohren ist erst in den letzten 20 Jahren entwickelt und eingeführt worden. Daher wurde im Rahmen der Literaturrecherche nicht nur nach den PSW-Prozess beschreibenden Aufsätzen gesucht, sondern auch nach Untersuchungen an ähnlichen Schrägwalzprozessen, wie z. B. das Asselwalzen.

### 2.1 Die Historie und Anwendung des Planetenschrägwalzen von Rohren

Das Rohrwalzen hat seinen Ursprung im Planetenschrägwalzen von Stahlknüppeln. Für diese Entwicklung wurde bei der Firma Edelstahlwerke Buderus in Wetzlar 1970 ein Prototyp errichtet und in den folgenden vier Jahren erforscht und optimiert. Eine auf diesem Prozess basierende erste Realisierung eines PSW 125 für Vollmaterial wurde dann von Schloemann-Siemag AG erstmalig 1975 bei den Hoesch-Hüttenwerken AG in Hohenlimburg-Schwerte aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen. Diese Anlage war für eine Jahresproduktion von 20.000t ausgelegt. Dabei werden Rundknüppel von einem Durchmesser von 100-125mm in einem Stich auf 35-70mm gewalzt. Weitere Anlagen für Vollmaterial folgten und wurden weltweit installiert, so dass insgesamt sechs Planetenschrägwalzwerke in Produktionslinien für Stabstahl installiert wurden. Das letzte Walzwerk wurde 1994 für Werkstoff Union in Lippendorf gebaut. Dieses PSW 160 erreichte eine Jahresproduktion von 160.000t und produziert Runddurchmesser von 60mm aus einem Blockdurchmesser von 160mm. Dabei finden Kohlenstoffstähle, niedriglegierte Stähle, Nickel-Basis-Legierungen und Kugellagerstähle ihre Verwendung [3].

Parallel dazu wurde das Walzen von Stahlrohren auf einem Planetenschrägwalzwerk entwickelt. Erste Versuche zeigten 1974 die prinzipielle Funktion dieses Verfahrens. In einer Kooperation der drei Firmen Eschweiler Bergwerksverein (heute ESW-Röhrenwerk Eschweiler), Hoesch Röhrenwerke AG und Schloemann-Siemag AG wurden von 1977 bis 1979 Walzversuche für Rohre auf dem PSW der Hoesch-Hüttenwerken AG in Hohenlimburg-Schwerte erfolgreich durchgeführt [4]. Die vielversprechenden Ergebnisse ermöglichten es, eine erste Produktionslinie für nahtlose Rohre auf Basis des Planetenschrägwalzens bei ESW-Röhrenwerk in Eschweiler zu

errichten und 1982 parallel zu den existierenden Pilgerwalzwerken in Betrieb zu nehmen. Das hierfür neu entwickelte PSW 280 für Rohre war für eine Jahresproduktion von 60.000t ausgelegt, die Hohlblockdurchmesser lagen zwischen 120 und 275mm, die Wand zwischen 31 und 86mm. Das Walzwerk produzierte Rohrluppen mit Durchmessern von 73 bis 222mm und Wanddicken von 2,9 bis 60mm. Es dauerte drei Jahre, bis die volle Produktionsreife erreicht wurde und das PSW im Jahr 1985 die Produktion der Pilgerwalzwerke übernehmen konnte [5]. Erreicht werden Streckgrade von bis zu 15 bei Wanddicken-Durchmesser-Verhältnissen zwischen 2,7% und 37% bei einem Kopfwinkel von  $50^\circ$  und Vorschubwinkeln von bis zu  $23^\circ$ . Der Vorschub pro Rotorumdrehung reicht bis zu 170mm. Verarbeitet werden neben einfachen Baustählen auch Vergütungs-, Einsatz- und Wälzlagerstähle bis hin zu nichtrostenden Stählen. Die Produktionslinie, die mittlerweile zu einer Kontistraße umgerüstet wurde, besteht in Produktionsreihenfolge aus Drehherdofen, Lochwalzwerk, Planetenschrägwalzwerk, Maßwalzwerk und Kühlbett.

Mit der Inbetriebnahme einer Pilotanlage bei Outokumpu, Pori in Finnland, wurde 1987 die Produktion von Kupferrohren begonnen [6]. Dieses speziell für Kupferanwendungen entwickelte PSW 80 war für eine Jahreskapazität von bis zu 10.000t projektiert. Die im horizontalen Hohlstranggussverfahren gegossenen Luppen in der Abmessung von  $\varnothing 80 \times 20$ mm wurden im PSW auf  $\varnothing 45 \times 2,2$ mm gewalzt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die geringere Anzahl von Prozessschritten gegenüber den konventionellen Verfahren, bestehend aus dem Vertikalgießen von Bolzen, Auspressen zu einer Luppe in einer Strangpresse und anschließender Weiterverarbeitung in einem Kaltpilgerwalzwerk bzw. direktem Ziehen. Weiterhin stellt die enorme Streckung in einem Schritt des neuen Verfahrens einen metallurgischen Vorteil dar. Die Rohrluppe verlässt das Walzwerk vollständig rekristallisiert, wodurch das beim konventionellen Verfahren notwendige Zwischenglühen beim Weiterverarbeiten vollständig eliminiert wird.

Insgesamt wurden seit der Errichtung der Pilotanlage 15 Walzwerke für Kupferrohre von Schloemann-Siemag gebaut und weltweit in Betrieb genommen, die ausschließlich DHP-Kupfer verarbeiten. Die produzierten Kupferrohre werden sowohl im Sanitärbereich als auch in unterschiedlichsten Industrieanwendungen, beispielsweise für innenverrippte ACR-Rohre für Klimageräte, verwendet.

Das im Jahr 2003 in Betrieb genommene kontinuierlich arbeitende PSW 100 für Kupferrohre erreicht eine gesteigerte Jahreskapazität von 22.000t. Im Rahmen der Inbetriebnahme dieser Linie wurden umfangreiche Versuchswalzungen durchgeführt, die die experimentelle Basis für diese Arbeit bilden. Das Schema dieser PSW-Linie zeigt Abbildung 2-1.

In der Literatur findet man vielfach Berichte über Planetenschrägwalzwerke, die sich im Wesentlichen auf die Prozessbeschreibung sowie Anordnung in einer Produktionslinie beziehen und Vergleiche zu Alternativverfahren bilden. Roth [7] beispielsweise stellt die Anwendung des Planetenschrägwalzprozesses in Feinstahl- und

Drahtstraßen sowie Stahl- und Kupferrohranlagen vor. Er vergleicht den Rohrherstellungsprozess mit den Stoßbank- und Rohrkontiverfahren und stellt fest, dass das PSW den hohen Qualitätsanforderungen gerecht wird, gleichzeitig aber niedrigere Anlagen- und Betriebskosten ermöglicht.

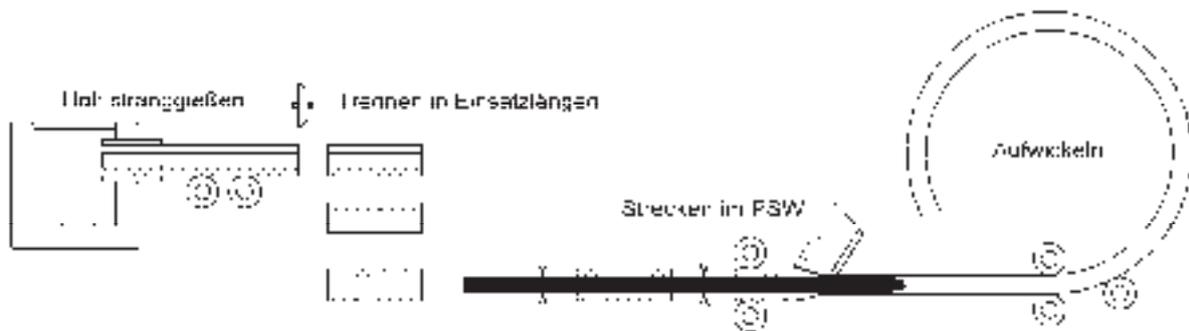


Abbildung 2-1: PSW-Anlage für die Kupferrohrherstellung

Bretschneider [8] zeigt ebenfalls die Vorzüge eines PSW bei der nahtlosen Rohrherstellung gegenüber den Alternativverfahren auf. In [9] nennen Bretschneider, Müller und Roth auch die Vorteile in der Herstellung von NE-Metallen. Kümmerling [10] vergleicht den PSW-Prozess detailliert mit den konkurrierenden Verfahren Assel- und Diescherwalzprozess. Er berücksichtigt dabei sowohl Walzabmessungen und Geschwindigkeiten als auch Qualitäten und deutet den hohen Anteil an redundanten Formänderungen gerade beim Planetenschrägwalzen an. Einen weiteren Vergleich stellen Kubinski und Kazanecki [11] auch zu Längswalzprozessen wie Pilgern, Stoßen und Kontiwalzen auf und kommen zu dem Schluss, dass mit dem Planetenschrägwalzprozess ein Fortschritt in der Rohrherstellung gemacht wurde.

Die Inbetriebnahme und die durchgeführten Walzversuche des ersten Planetenschrägwalzwerks für Rohre bei Eschweiler Bergwerksverein werden von Siebke [12] sehr detailliert dargestellt. Neben den durchgeführten Verbesserungen und Optimierungen sind auch Produktionskosten, Verbrauchsdaten und Umweltdaten aufgeführt. Es werden deutlich die Vorteile des Planetenschrägwalzprozesses innerhalb einer Produktionslinie für Nahtlosrohre hervorgehoben. Der Prozess stellt sich demnach als hoch flexibel und daher auch bei kleinen Walzlosgrößen als wirtschaftlich dar.

Rantanen und Klemetti [6] heben die wirtschaftlichen Vorzüge des PSW-Verfahrens bei der Kupferrohrherstellung hervor, die sich durch den Wegfall der Extrusionspresse im Vergleich zu den konventionellen Verfahren ergeben. Auch erwähnt Rantanen in [13] die gute Qualität der gewalzten Rohre, die selbst die hohen Ansprüche für innenverrippte ACR-Rohre erfüllen.

Sokolova und Komkova [14] schlagen den Einsatz des Planetenschrägwalzprozesses innerhalb einer Kontilinie zur Herstellung von kaltgewalzten Präzisionsrohren vor. Dabei soll abwechselnd der Rohrdurchmesser in Längswalzgerüsten und die Wanddicke im PSW reduziert werden. Von dieser abwechselnden Umformrichtung erwarten sie einen vorteilhaften Einfluss auf das Gefüge des Endproduktes. Dabei arbeiten

sie nur mit geringen Kopfwinkeln zwischen 5 und 10°. Eine wirtschaftliche Bewertung einer solchen Produktionslinie bleibt aus.

Fritz und Wagner [15] beschreiben eine alternative Herstellung von rostfreien Nahtlosrohren, beispielsweise Chrom-Nickel-Stähle, auf Basis eines Planetenschrägwalzwerkes und sagen eine Energieeinsparung im Vergleich zu konventionellen Rohrherstellungsverfahren wie Kaltpilgern und Kaltziehen voraus.

## 2.2 Der Planetenschrägwalzprozess

Das in dieser Arbeit betrachtete 3-Walzen-Planetenschrägwalzwerk basiert auf einem konvergent arbeitenden Schrägwalzprozess, bei dem zusätzlich zur Walzendrehung diese um das Walzgut rotieren. Die drei Walzköpfe sind in dem sogenannten Rotor jeweils im Winkel von 120° angeordnet. Durch die Rotordrehung wird die für Schrägwalzprozesse typische Eigendrehung des Walzgutes im Auslauf eliminiert. Ein Einfluss auf den Umformvorgang bleibt aber aus, da die Relativgeschwindigkeiten zwischen Walze und Walzgut unverändert bleiben. Die Walzendrehzahl ist und bleibt dabei die bestimmende Größe für die Walzgut- bzw. Umformgeschwindigkeit. Vorteilhaft wirkt sich die Kompensation der Rohrdrehung auf die Weiterverarbeitung des Walzgutes aus, da weitere Prozessschritte unmittelbar angehängt werden können.

Die Rohre werden auf einem Dorn ausgewalzt, dessen Fahrweise einen grundsätzlichen Unterschied zwischen Stahl- und Kupferanwendungen darstellt. Beim Walzen von Stahlrohren wird auf der gesamten Dornstange gewalzt, die beim Laden des PSW in den Block eingefädelt wird und dann gemeinsam mit dem Block in das Walzwerk geschoben wird. Dabei kann die Dornstange zur Verringerung von Reibung zwischen Walzgut und Dorn frei drehen. Bei dieser Anwendung wird die Dornstange mit einer Walzemulsion geschmiert und gekühlt.

Das Kupferwalzwerk arbeitet im Gegensatz dazu mit einem axial ortsfesten Walzdorn, der aber wie beim Stahlwalzen frei drehen kann. Ein Kühlen und Schmieren des Walzdornes ist nicht möglich, da etwaige Emulsionen im Rohr ein anschließendes Stopfenziehen behindern. Aus dieser Tatsache ergibt sich eine hohe Belastung für den Walzdorn, die als Werkstoff teure Cobalt-Nickel-Legierungen erfordert. Durch den ortsfesten Dorn baut dieser sehr kurz, was sich vorteilhaft auf die Werkzeugkosten auswirkt. Des Weiteren ermöglicht der axial ortsfeste Walzdorn einen kontinuierlichen Betrieb des Walzwerkes, da ein Laden der Dornstange entfallen kann. Zur Vermeidung der Oxidation des Kupfers ist das Walzwerk in einer gasdichten, mit Stickstoff gefluteten Haube angeordnet. Zusätzlich wird die Rohrinneenseite unmittelbar vor der Umformzone mit Stickstoff beaufschlagt.

### 2.2.1 Mechanischer Aufbau des Planetenschrägwalzwerkes

Beschreiben kann man das Planetenschrägwalzwerk durch die Kombination zweier Planetengetriebe, bei dem ein Sonnenrad das Walzgut (1) ist und die Planetenräder die Walzen (8) sind (siehe Abbildung 2-2). Die zweite Anordnung eines Planetengetriebes bildet den Antriebsteil (linker Teil der Abbildung 2-2). Der Hauptantrieb (2)

treibt den Rotor (5) an. Hiermit werden gleichzeitig die Planeten- und Zwischenräder (7) um die Walzgutachse bewegt und durch die Abstützung auf dem Sonnenrad (6) in eine Drehbewegung versetzt. Das Planetenrad (7) treibt über ein Kegelradgetriebe die Walzen (8) an. Damit ist die Verbindung zur anderen Planetenanordnung geschaffen, die aus dem Walzgut (1) als weiteres Sonnenrad, den Walzen (8) als weitere Planetenräder besteht und gemeinsam in demselben Rotor (5) gelagert sind. Im Antriebsteil dient der Überlagerungsantrieb (3) dazu, über die Hohlwelle (4), das Sonnenrad (6) und das Planetenrad (7) die Drehzahl der Walzen (8) zu verändern.

- 1: Walzgut
- 2: Hauptantrieb
- 3: Überlagerungsantrieb
- 4: Hohlwelle
- 5: Rotor
- 6: Sonnenrad
- 7: Planetenrad
- 8: Walzen

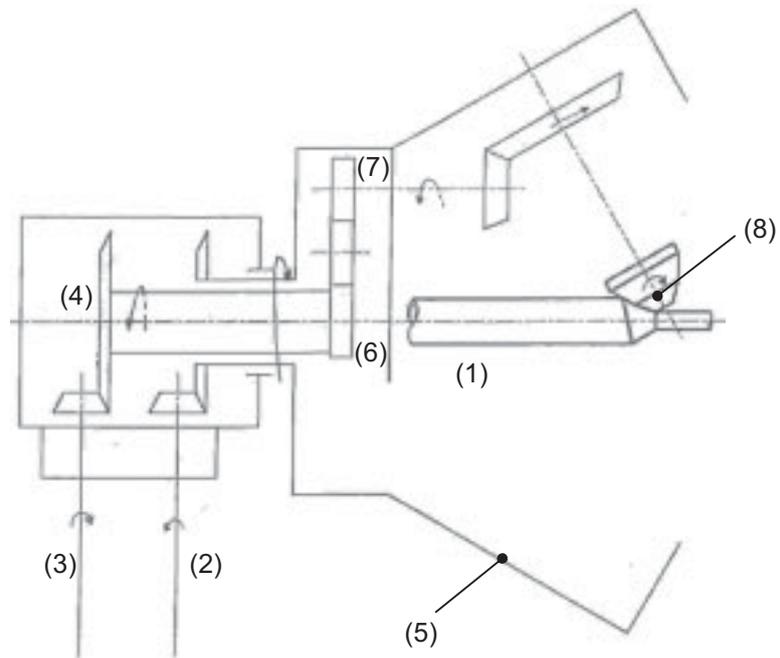


Abbildung 2-2: Antriebsschema

Durch eine entsprechend gewählte Einstellung der Drehzahlen von Haupt- und Überlagerungsantrieb wird erreicht, dass das Walzgut im Auslauf nicht rotiert. Der Vorschub, der das Walzgut durch die Umformzone bewegt, resultiert aus der Schrägstellung der Walzen.

Die Walzenachsen schneiden dabei nicht die Walzgutachse, sondern besitzen einen Versatz, auch als Offset bezeichnet. Die für die Vorschubbewegung des Walzgutes erforderliche Schrägstellung der Walzen wird durch Schwenken der Walzenachsen gegenüber den Achsen der Planetenräder erreicht. Die Abbildung 2-3 zeigt eine Ansicht in ein Planetenschrägwalzwerk mit austretendem Kupferrohr.

In Abbildung 2-4 ist die Anordnung vom Walzkopf, Walzgut und Dorn schematisch dargestellt. Die Walzenachse ist um den Winkel  $\varphi$  zur Walzgutachse geneigt, welcher als Kopfwinkel bezeichnet wird. Zusätzlich ist der Walzkopf um einen einstellbaren Winkel  $\alpha$ , dem Vorschubwinkel, um die Planetenachse geneigt. Dies bewirkt den Vorschub des Walzgutes in Walzrichtung. Durch Veränderung des Vorschubwinkels wird also die Vorschubgeschwindigkeit bestimmt.



Abbildung 2-3: Walzen eines PSW mit Kupferluppe

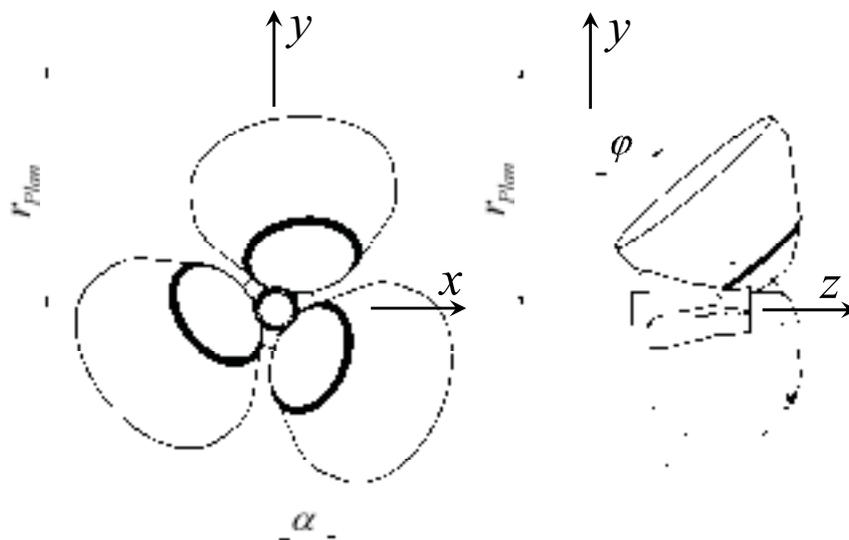


Abbildung 2-4: Front- und Seitenansicht

### 2.2.2 Das Verfahrensprinzip

Die drei Walzen wälzen sich beim Umlaufen auf dem Hohlblock ab, der in den Umformraum einläuft. Bei Berührung mit jeder der drei Walzen erfolgt eine Wanddickenabnahme des Walzgutes. Durchmesser und Wanddicke des Walzgutes werden an den jeweiligen Kontaktflächen partiell umgeformt.

