

# Endkonturnahe Formgebung von Aluminium-Teilen durch Rundkneten

## 1 Funktionsprinzip des Rundknetens

Das Rundkneten ist ein spanloses Fertigungsverfahren zum Reduzieren des Querschnittes von Stäben, Rohren und Drähten. Die Kraft wird beim Rundkneten von zwei bis sechs Werkzeugen unmittelbar auf den Werkstückumfang aufgebracht. Es handelt es sich beim Rundkneten um ein inkrementelles Umformverfahren, was bedeutet, daß die Umformarbeit nicht in einem Werkzeughub aufgebracht wird, sondern daß das Werkstück in vielen kleinen Einzelschritten bearbeitet wird. Die folgende Abbildung stellt das Funktionsprinzip des Rundknetens dar:

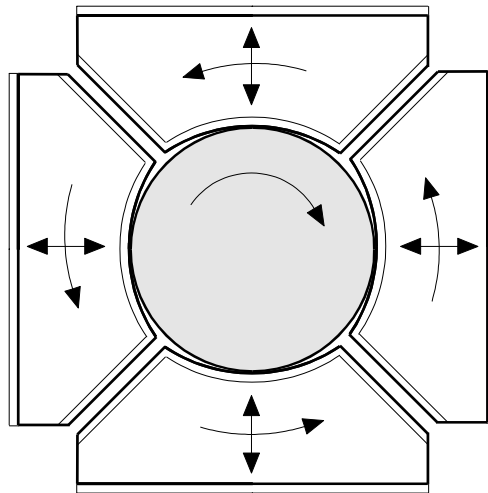


Abbildung 1: Funktionsprinzip Rundkneten

In der Abbildung ist das im Zentrum befindliche Werkstück, in diesem Fall ein Stab zu erkennen. Darum herum gruppieren sich konzentrisch vier Werkzeuge, die eine Oszillationsbewegung durchführen. Statt der dargestellten vier Segmente kann das Verfahren auch mit zwei, drei, fünf oder sechs Werkzeugen betrieben werden. Die radial angeordneten Doppelpfeile deuten die Oszillationsbewegung der Werkzeuge an, durch diese Bewegung wird die Umformarbeit verrichtet. Um zu verhindern, daß Werkstoff zwischen die Werkzeugsegmente fließt, muß zwischen Werkstück und Werkzeugen eine Drehrelativbewegung stattfinden. Diese wird durch die runden Pfeile angedeutet. Die Drehrelativbewegung kann durch ein stillstehendes Werkstück und umlaufende Werkzeuge erzeugt werden, genauso ist es üblich, die Werkzeuge stehen zu lassen, und das Werkstück zu drehen.

Neben der etwas irreführenden Bezeichnung „Rundkneten“ hat sich in der Praxis der Ausdruck „Hämmern“ oder „Rundhämmern“ etabliert. Alle Bezeichnungen beschreiben das Verfahren unzureichend, da die kinetische Energie der Werkzeuge bei weitem nicht ausreicht die für den plastischen Fluß erforderliche Umformarbeit zu leisten. Es handelt sich beim Rundkneten um einen weggebundenen Vorgang. Auch die Bezeichnung „Rundkneten“ wird nur einem Teil der Verfahrensvariationen gerecht, da auch nicht rotationssymmetrische Profile darstellbar sind.

Unter anderem führt der inkrementelle Umformablauf dazu, daß die Reibung als Störparameter praktisch vollständig eliminiert wird. Der Prozeß benötigt daher in der Regel

auch keinen Schmierstoff. Das eingesetzte Öl hat die Funktion, zu kühlen und abrasiv entfernte Werkstoffpartikel auszuwaschen.

## 2 Verfahrensvarianten des Rundknetens

Je nach darzustellender Geometrie sind beim Rundkneten mehrere Verfahrensvarianten möglich. Welche der unten näher beschriebenen Vorgehensweisen gewählt wird, hängt zusammen mit dem gewünschten Durchmesserübergang an der Außenseite und der geforderten Geometrie im Inneren des Werkstücks.

### 2.1 Vorschubrundkneten

Das Werkstück wird kontinuierlich in axialer Richtung durch die oszillierenden Werkzeuge bewegt. Die Vorschubbewegung geschieht pulsierend jeweils dann, wenn sich die Werkzeuge gerade nicht im Eingriff befinden. Da die Oszillation der Werkzeuge mit einer hohen Frequenz erfolgt, ist die Vorschubbewegung scheinbar kontinuierlich. Die folgende Abbildung stellt schematisch den Bewegungsablauf beim Vorschubrundkneten dar.

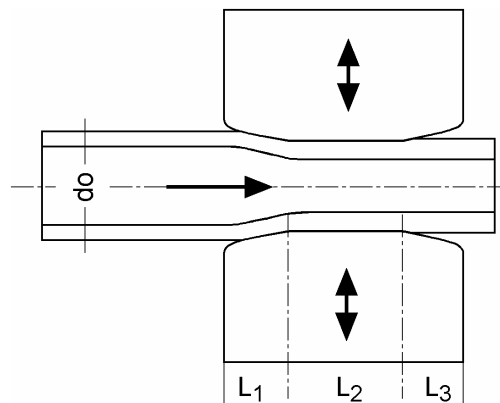


Abbildung 2: Vorschubrundkneten

Wird das Werkstück mit dem Ausgangsdurchmesser  $d_0$  in den Bereich des Einlaufkegels  $L_1$  der oszillierenden Werkzeuge eingeführt, dann wird mit jedem Werkzeughub eine sich vergrößernde Fase angeformt. Ist die engste Stelle des Einlaufkegels erreicht, dann fließt bei weiterem Axialvorschub der Werkstoff in den Bereich des Kalibrierzylinders  $L_2$  der Werkzeuge. Die Auslaufschräge  $L_3$  dient der Erzeugung einer möglichst glatten Oberfläche. Ein zu scharfkantiger Übergang an dieser Stelle würde aufgrund der Rückfederung des Werkstoffs zu einer Schädigung der Oberfläche führen.

Üblicherweise wird für das Vorschubrundkneten ein Schulterwinkel von ca.  $8^\circ$  verwendet. Bei dünnwandigen Rohren sind auch Winkel bis  $15^\circ$  praktikabel.

### 2.2 Einstechrundkneten

Zusätzlich zu der Oszillation führen die Werkzeuge eine radiale Zustellbewegung aus, die der Oszillation überlagert und wesentlich größer als diese ist. Bei dieser Verfahrensvariante können die Schulterwinkel am Werkstück wesentlich steiler sein als beim Vorschubrundkneten, annähernd  $90^\circ$  sind erreichbar. Während die radiale Lage der Werkzeuge beim Vorschubreduzieren nicht verändert wird, fahren die Werkzeuge beim Einstechreduzieren zu. Das Werkstück wird in die Umformzone eingebracht. Nach Erreichen der axialen Position werden die Werkzeuge radial zugestellt, oszillieren aber dabei. Die folgende Abbildung stellt das Prinzip des Einstechreduzierens dar.

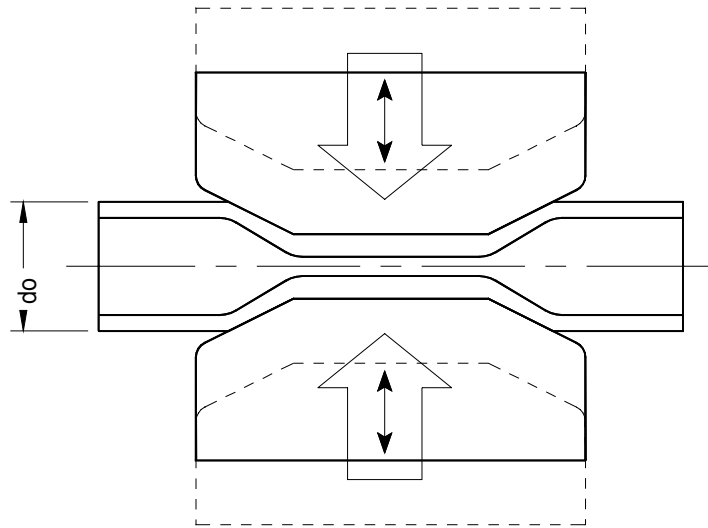


Abbildung 3: Einstechrundkneten

Neben der Darstellung steilerer Übergangswinkel erlaubt diese Verfahrensvariante Querschnittreduzierungen zwischen den Werkstückenden, also Hinterschnitte. In der Regel ist die Umformkraft beim Einstechrundkneten größer als beim Vorschubrundkneten.

### 2.3 Rundkneten ohne Dorn

Wird als Halbzeug ein Rohr verwendet, so stellt sich die äußere Form des Werkstücks in Abhängigkeit der Werkzeuggeometrie und der verwendeten Verfahrensvariante ein. Die innere Form des Werkstücks bildet sich im freien Fluß aus, wenn ohne Dorn umgeformt wird. Da die Umformung der Gesetzmäßigkeit der Volumenkonstanz unterliegt, muß der durch die Reduzierung des Außendurchmessers verdrängte Werkstoff abfließen. Dies geschieht zum einen in axialer, zum anderen in radialer Richtung. Wird also der Außendurchmesser eines Rohres reduziert, so vergrößert sich dessen Wandstärke und es wird länger.

### 2.4 Rundkneten mit Dorn

Stellt man an die Innenoberfläche bestimmte Anforderungen, wie Maßgenauigkeit, Oberflächengüte oder soll gar ein bestimmtes Innenprofil erzeugt werden, so muß ein Dorn während des Umformvorgangs den Werkstofffluß nach innen kontrollieren. In der folgenden Abbildung wird die Funktionsweise eines solchen Dorns dargestellt.

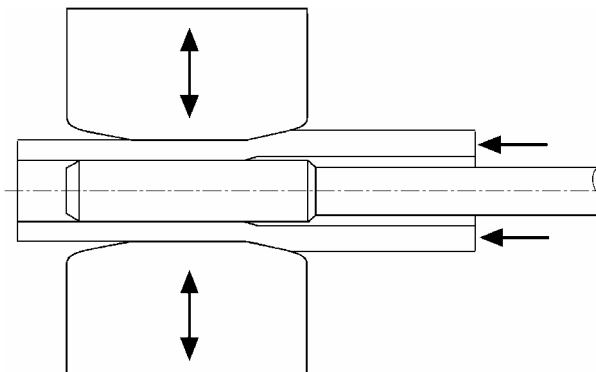


Abbildung 4: Rundkneten über einem Dorn

Der Dorn zwingt den Werkstoff dazu, axial abzufließen, indem er die radiale Flußmöglichkeit begrenzt. Der axiale Werkstofffluß ist mit einem Anstieg der Radialkraft verbunden.

## 2.5 Warmrundkneten

Das Rundkneten bietet die Option der Warmbearbeitung. Dies wird erforderlich, wenn die Fließspannung herabgesetzt werden muß, sei es um den Kraftbedarf der Umformung zu senken, die Flächenpressung am Werkzeug herabzusetzen oder das Formänderungspotential im Werkstück zu erhöhen.

Ein wichtiger Vorteil besteht darin, daß die Erwärmung lokal begrenzt erfolgen kann. Dies ist möglich, weil die Umformkraft beim Rundkneten nicht wie bei anderen Verfahren über das gesamte Werkstück übertragen wird, sondern radial dort eingreift, wo sie benötigt wird. Dadurch ist eine sehr genaue Temperaturführung möglich, Schädigungen am Werkstück können weitgehend vermieden werden.

## 3 Eigenschaften des Rundknetens

### 3.1 Spannungszustand

Das Rundkneten bringt als Umformverfahren zwei Vorteile in Verbindung:

- Erstens ist der hydrostatische Spannungsanteil aufgrund der hohen induzierten Druckspannungen sehr hoch. Das führt dazu, daß ein großes Formänderungspotential zur Verfügung steht.
- Zweitens ist die Differenz zwischen maximaler und minimaler Vergleichsspannung im Werkstück aufgrund der inkrementellen Umformung klein. Das führt dazu, daß das zu Verfügung stehende Formänderungspotential gleichmäßig, homogen ausgenutzt wird. Die folgende Grafik verdeutlicht den Zusammenhang.

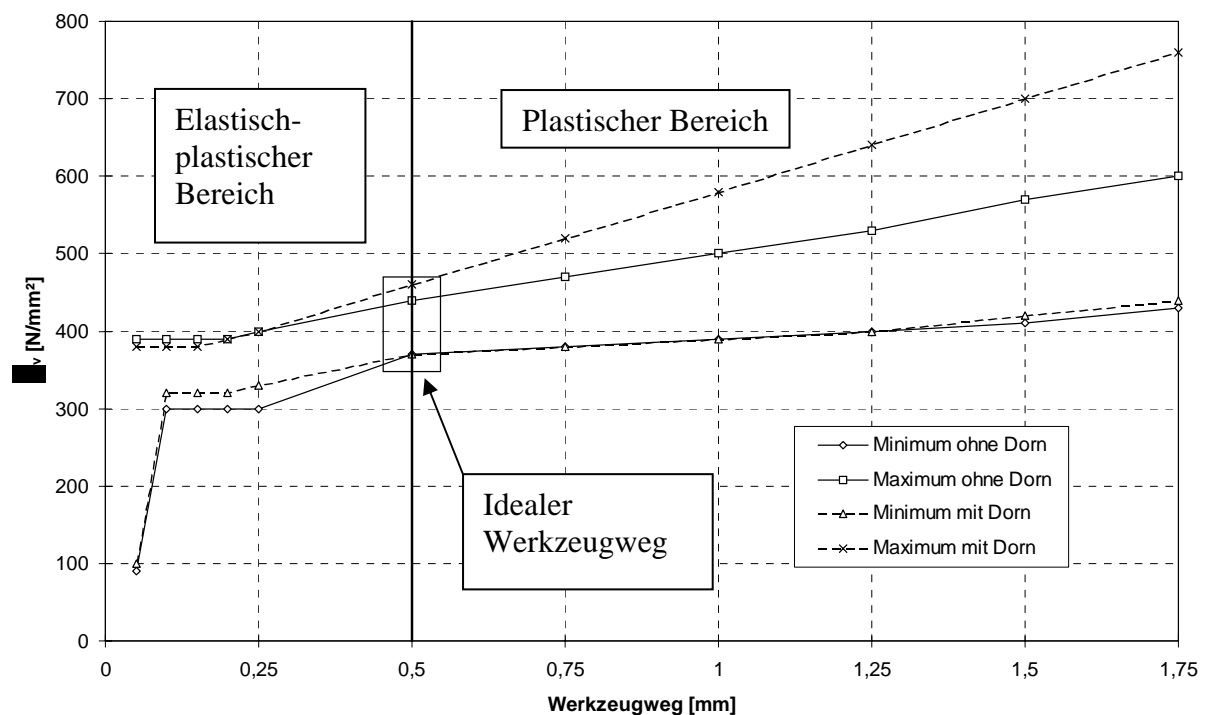


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen Werkzeugweg und Vergleichsspannung

Beide oben genannten Vorteile werden bei Verwendung eines Dorns optimal genutzt. Welche Auswirkungen der Spannungszustand auf den Werkstofffluß hat, zeigt die folgende visioplastische Untersuchung am Beispiel eines umgeformten Stabes.

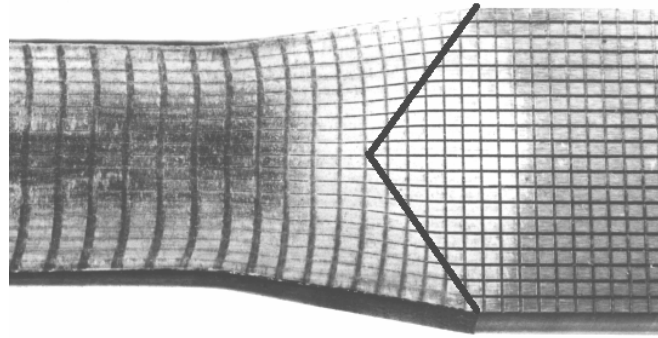


Abbildung 6: Werkstofffluß beim Rundkneten

### 3.2 Toleranzen und Oberflächenqualitäten

Aufgrund der Möglichkeit sehr enge Toleranzen einzuhalten, eignet sich das Rundkneten als Verfahren für die Herstellung endkonturnaher oder gar einbaufertiger Bauteile.

- Am Außendurchmesser ist bei Kaltbearbeitung eine Qualität von IT 7 bis IT 8 realisierbar.
- Wird im Rohrinne über einem Dorn geknetet, so sind dort in der Regel Qualitäten von IT 5 bis IT 6 erzielbar.

Die durch das Kaltrundkneten darstellbare Oberfläche hat mindestens Schleifqualität. Je nach Werkzeuggeometrie und Vorschubgeschwindigkeit können sich allerdings Makrowellen ausbilden.

Neben der Durchmesser-toleranz ist auch die Rundheit ein entscheidendes Kriterium. Die erzielbare Qualität in der Rundheit kann dem Anspruch von IT 4 gerecht werden.

### 3.3 Taktzeiten

Es ist fast unmöglich über die erreichbaren Taktzeiten generelle Aussagen zu machen. Die Zeiten hängen sehr stark ab vom Umformgrad und von dem umgeformten Volumen, sowie der einzuhaltenden Toleranz. Insofern scheint es am sinnvollsten zu sein, einige Beispiele aufzuzählen.

- Die schnellsten Taktzeiten werden beim Reduzieren von Nagel- und Drahtspitzen erzielt. Hier ist sowohl der Umformgrad, als auch das umgeformte Volumen relativ klein. Es können 50 bis 60 Teile pro Minute gefertigt werden.
- Bei Brillenbügeln werden ca. 20 Teile pro Minute gefertigt, hier wird zwar nur wenig Volumen umgeformt, dafür ist der Umformgrad relativ hoch.
- Lenksäulen für Pkws werden mit einer Taktzeit von ca. 5 Teilen pro Minute auf einer verketteten Rundknet-Transferanlage bearbeitet. Umgeformtes Volumen und Umformgrad sind in diesem Fall verhältnismäßig hoch.

## 4 Maschinen für das Rundkneten

### 4.1 Reduzierkopf

Die Werkzeugbewegung wird mit einem Kurvengetriebe erzeugt, daß vom Aufbau einem Planetengetriebe entspricht. In der folgenden Abbildung ist ein sogenannter Reduzierkopf im Schnitt dargestellt.

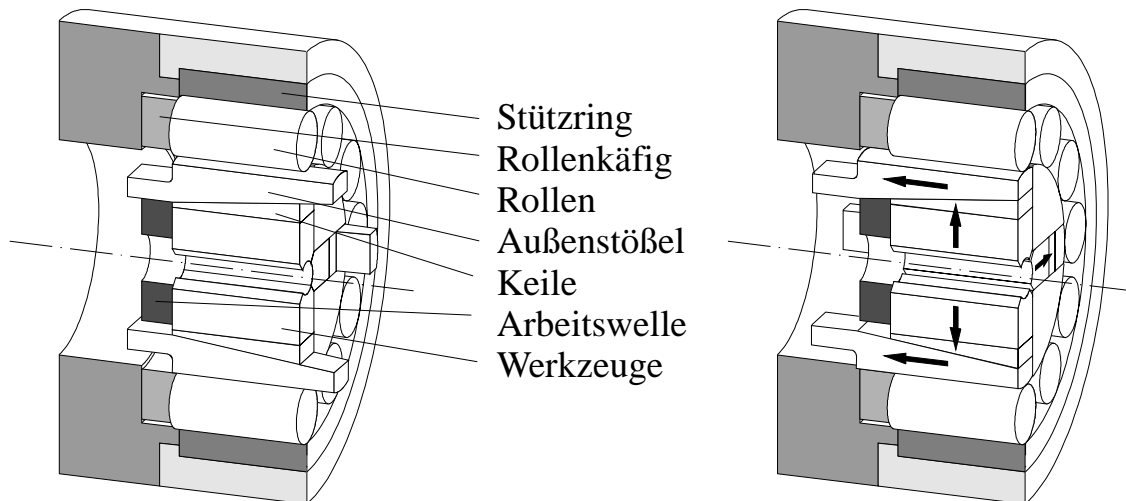


Abbildung 7: Reduzierkopf mit seinen Elementen (Einstechvariante)

#### **Grundfunktion (linke Seite der Abbildung):**

Der Stützring enthält einen Satz Rollen. Die Außenstößel weisen an ihrer Außenseite eine Kurvenform auf. Die Rollen überlaufen die Außenstößel und drücken diese dabei nach innen. Die Außenstößel geben die Bewegung an die darunter liegenden Werkzeuge weiter. Der Werkzeughub beträgt maximal 3mm, die Frequenz beträgt zwischen 1500 und 7000 Hüben pro Minute.

#### **Kinematik des Einstechrundknetens (rechte Seite der Abbildung):**

Zusätzlich zur Oszillationsbewegung führen die Werkzeuge eine Zustellbewegung durch. Dazu wird zwischen Außenstößel und Werkzeug ein Keil eingebracht. Werden die Außenstößel axial verschoben, so verändern die Werkzeuge ihre radiale Lage.

### 4.2 Maschinenaufbau

Eine Rundknetmaschine zeichnet sich durch einen modularen Aufbau aus. Herzstück ist die Reduziereinheit, in der der oben beschriebene Reduzierkopf enthalten ist. Die folgende Abbildung zeigt die verschiedenen Elemente einer Rundknetanlage. Erwärmungseinheit, Gegenhalter, Handhabungseinheit und Dorneinrichtung sind optionale Bestandteile.

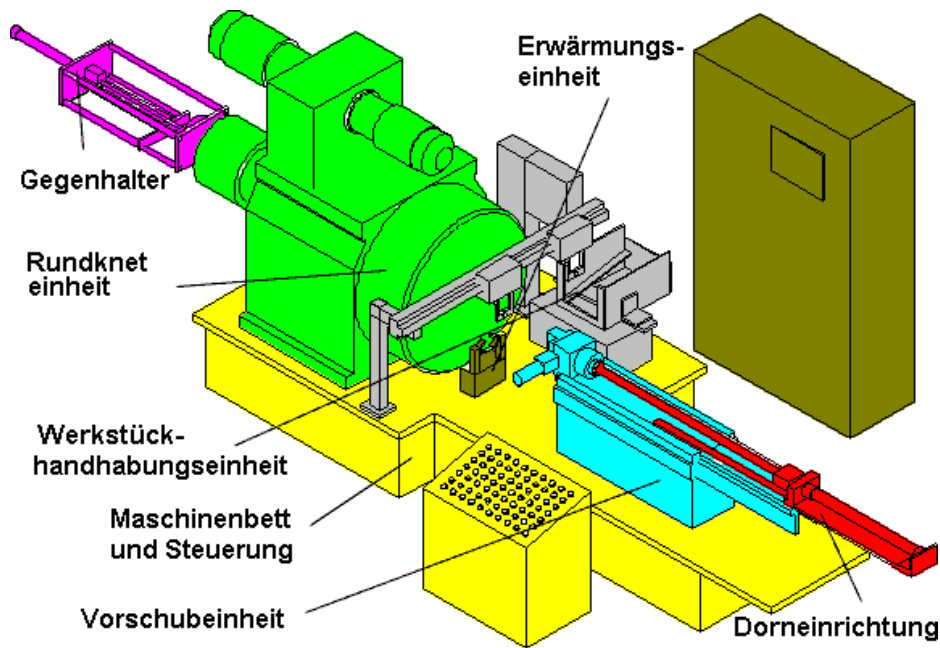


Abbildung 8: Elemente einer Einstationen-Rundknetmaschine

Eine Rundknetmaschine läßt sich durch Verkettung mehrerer Maschinen zu einem leistungsfähigen Fertigungszentrum in Form einer Transferanlage verbinden. Die folgende Abbildung zeigt das Funktionsprinzip.

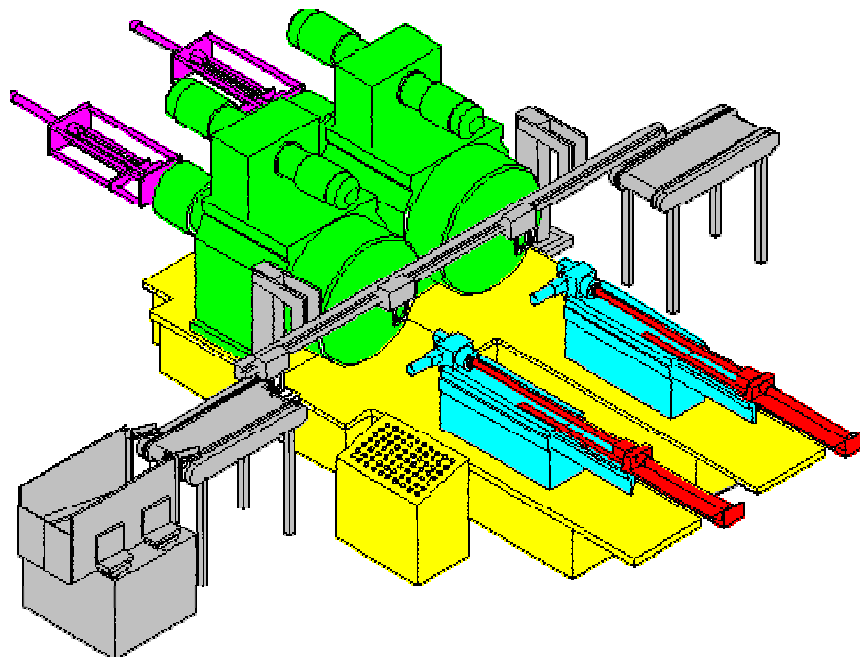


Abbildung 9: Verkettete Rundknettransferanlage

## 5 Zusammenfassung der Vorteile

- Endkonturnahe Fertigung, meistens einbaufertige Genauigkeit: Die einhaltbaren Toleranzen sind so eng, daß sich eine spanende Nachbearbeitung zumeist erübrigt. Dadurch kann Werkstoff eingespart und die Prozeßkette verkürzt werden.
- Hohes Formdarstellungspotential: Das Rundkneten erlaubt die Realisierung eines sehr vielfältigen Formenspektrums sowohl im Außenbereich eines Werkstücks als auch in dessen Inneren. Dies gibt dem Konstrukteur einen deutlich größeren Spielraum bei der

unter Gewichts- und Funktionsaspekten optimierten Bauteilgestaltung. Im Schnitt liegt die Gewichtseinsparung bei rundgekneteten Bauteilen zwischen 30% und 50% bezüglich konventionell hergestellten Bauteilen.

- **Hohe Umformgrade, spröde Werkstoffe:** Mittels Rundkneten können sehr große Umformgrade ohne Wärmebehandlung realisiert werden. Das Verfahren eignet sich für die Umformung sehr spröder Werkstoffe, wie z.B. Sinterwerkstoff. Dies ist auf den günstigen Spannungszustand während der Umformung zurückzuführen.
- **Kalt- und Warmumformung:** Wegen der radialen Krafteinleitung kann das Verfahren im kalten, sowie auch im halbwarmen und warmen Temperaturbereich eingesetzt werden.
- **Umweltschonend:** Im Gegensatz zu den meisten Umformverfahren bedürfen die Werkstücke keiner Schmierstoffträgerschicht. Das Kühlschmiermittel befindet sich in einem geschlossenen Kreislauf.
- **Leicht automatisierbar:** Wegen der horizontalen Anordnung und des vergleichsweise niedrigen Platzbedarfs können Rundknetanlagen leicht zu effektiven Transfersystemen kombiniert werden, die Bauteile in großen Stückzahlen einbaufertig herstellen.

## 6 Rundkneten von Aluminiumwerkstoffen

### 6.1 Leitungen für Kfz-Klimaanlagen

Das Rundkneten ist als umformtechnisches Fertigungsverfahren für Bauteile aus Aluminium für den Automobilbau schon lange im Einsatz. Ein klassischer Anwendungsfall sind Leitungen für Klimaanlagen für Fahrzeuge. Die folgende Abbildung zeigt eine Reihe solcher Leitungen.



Abbildung 10: Leitungen für Kfz-Klimaanlagen aus Aluminium

Das Rundkneten wird dabei eingesetzt, um die für die Aufnahme diverser flexibler Schläuche notwendigen Kupplungen zu fertigen. Als Werkstoffe kommen dabei AlMoSi, AlMgMn und AlMn Legierungen zum Einsatz.

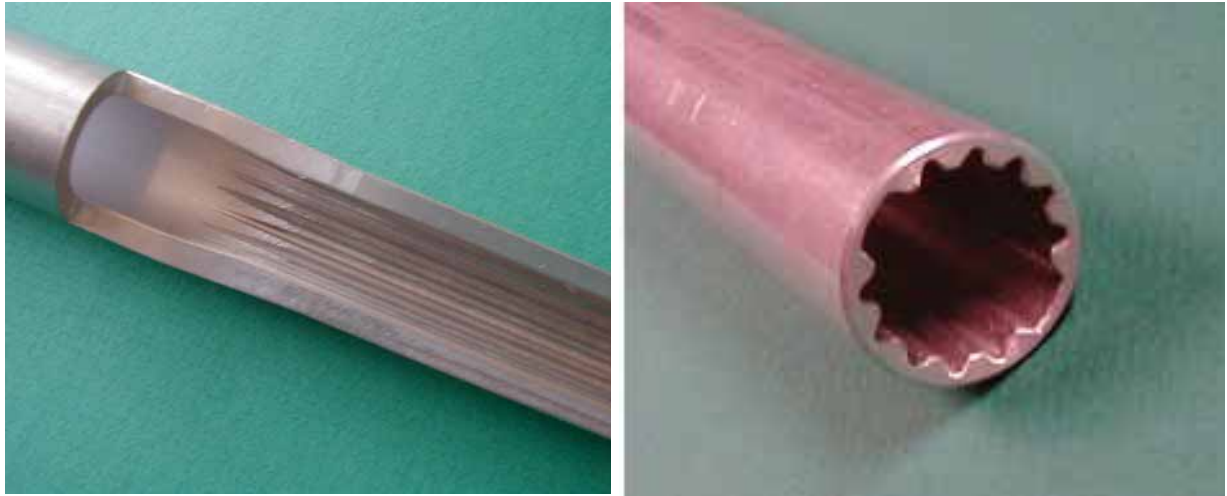
### 6.2 Lenksäulen

Die Kfz-Lenksäule ist neben Antriebswellen mittlerweile das Produkt, für das sich das Rundkneten als Fertigungsverfahren fest etabliert hat. Die hohle Lenksäule wird fast durchgängig auf der ganzen Welt durch Rundkneten gefertigt. Die Lenksäule wird noch immer vorwiegend aus dünnwandigen Stahlrohren gefertigt, zunehmend kommen aber Säulen aus Aluminium ins Gespräch. Da das Rundkneten die hohle kollabierbare Lenksäule vom



Anfang ihrer Entwicklungsgeschichte an begleitet hat, wurde das Verfahren schon früh mit den Besonderheiten der Umformung diverser Al-Legierungen konfrontiert.

Für die Fertigung von Lenksäulen kommen dem Rundkneten insbesondere die guten Gestaltungsmöglichkeiten für exakte Innengeometrien entgegen. Die folgende Abbildung zeigt einige charakteristische Formelemente.



*Abbildung 11: Innenschiebeverzahnungen als charakteristisches Formelement für Lenksäulen*

Auch bei der Gestaltung der Außengeometrie haben sich die Fähigkeiten des Rundknetens bewährt. Dies gilt insbesondere für die Möglichkeit, Hinterschnitte umformtechnisch zu erzeugen. Die folgende Abbildung zeigt ein solches Formelement.



*Abbildung 12: umgeformter Hinterschnitt und nicht-rotationssymmetrischer Abschnitt*

Gleiches gilt für die Möglichkeit nicht-rotationssymmetrische Außenformen zu erzeugen. Die folgende Abbildung zeigt eine Lenksäule aus Aluminium, die gemeinsam mit der Fa. Raufoss entwickelt wurde.



*Abbildung 13: PKW-Lenksäule aus Aluminium (Entwicklungsprojekt der Firmen HMP und Raufoss)*

Als Werkstoff kommt für Lenksäulen eine AlMgSi-Legierung zum Einsatz.

### **6.3 Wellen**

Ein weiterer Einsatzort für rundgeknetete Bauteile aus Aluminium im Kfz sind sämtliche Drehmoment übertragenden Wellen im Chassis. Umgesetzt wurde das Konzept für Kardanwellen. Die folgende Abbildung zeigt eine Antriebswelle, die durch Rundkneten gefertigt wurde. Als Werkstoff kam hier die Legierung 6061 T4 zum Einsatz. Die Verzahnung wurde fließpreßtechnisch erzeugt.



*Abbildung 14: Antriebswelle aus Aluminium*

### **6.4 Zylinderlaufbuchsen**

Ein neuer, interessanter Anwendungsfall für das Rundkneten ist die Fertigung von Zylinderlaufbuchsen aus AlSi25Cu4Mg1-Legierung. Der Werkstoff ist stark übereutektoid

und bringt wesentliche Vorteile im Vergleich zur herkömmlichen Zylinderlaufbuchse aus Grauguß mit sich. Es handelt sich dabei um den sprühkompaktierten Werkstoff Dispal S 260. Der hohe Siliziumanteil reduziert den thermischen Ausdehnungskoeffizienten und erhöht die Oberflächenhärte des Bauteils. Die Prozeßkette zur Fertigung der Laufbuchse gestaltet sich wie folgt:

- Werkstoffgewinnung durch Sprühkompaktieren
- Halbzeug-(Rohrherstellung) durch Ziehen
- Erzeugung des fertigen Außendurchmessers und des schleiffertigen Innendurchmessers durch Rundkneten
- Zerspanung
- Eingießen in den Motorblock

Auf der Gegenseite erschwert der hohe Siliziumanteil die umformtechnische Bearbeitung. Während des Werkstoffherstellungsprozesses werden intermetallische Dispersoide gebildet, die die Bewegung von Versetzungen in allen Betriebszuständen des Bauteils verhindern. Durch die Herstellungsmethode des Werkstoffs sind die intermetallischen Teilchen so klein, daß sie später im Betrieb nicht durch Abrasion die Kolbenringe angreifen. Desweiteren erhält man durch das Sprühkompaktieren ein feinkörniges, homogenes Gefüge, das gute Voraussetzungen für die Umformung mitbringt.

Das Rundkneten ist für die Fertigung dieser Bauteile interessant wegen des günstigen Spannungszustandes, der hohe Umformgrade auch bei relativ spröden Materialien ermöglicht. Gleichzeitig ist es der einzige Umformprozeß, der in der Lage ist, die relativ engen Toleranzen, die erforderlich sind, um das Bauteil in der Gußform zu positionieren einzuhalten. Die Rundheit der umgeformten Bauteile weicht über einen Zeitraum von 15 Wochen um 160 µm ab. Die folgende Abbildung zeigt die Buchse im Zustand vor und nach dem Rundkneten. Ein dickwandiger Ring wird mittels Rundkneten unter Zuhilfenahme eines Dorns reduziert. Dabei wird die Wandstärke stark reduziert, wodurch sich das Werkstück ebenfalls stark verlängert. Der Vergleichsumformgrad  $\phi_g$  bei dieser Umformung beträgt 0,95. Die Bearbeitung erfolgt im warmen Zustand bei einer Temperatur von ca. 420°C. Bei der dargestellten Fertigungstechnologie handelt es sich um eine gemeinsame Entwicklung der Firmen HMP und PEAK.



*Abbildung 15: Zylinderlaufbuchse aus Aluminium, hergestellt durch Rundkneten (Entwicklungsprojekt der Firmen HMP und PEAK)*

## **7 Besonderheiten bei der Bearbeitung von Aluminiumteilen**

Im wesentlichen existieren zwei Rahmenbedingungen, die den Umgang mit Aluminium erschweren.

- Aluminium besitzt andere physikalische Eigenschaften als Stahl. Dabei spielen der Wärmeausdehnungskoeffizient, der etwa doppelt so hoch ist wie bei Stahl und das E-Modul, das nur ein Drittel des Wertes beträgt wie bei Stahl die wichtigsten Rollen. Beides führt dazu, daß es schwieriger ist Toleranzen einzuhalten. Der Werkstoff federt nach der Umformung stärker zurück und reagiert extrem empfindlich auf Wärme. Beim Rundkneten kann die durch die Umformung in das Werkstück induzierte Wärme leicht 200-300°C betragen. Der Frage der Prozeßkühlung kommt daher eine wichtige Rolle zu.
- Die Metastabilität im Gefüge vieler fester Aluminiumlegierungen bringt den Faktor Zeit als zusätzliche Störgröße mit in den Prozeß ein. Mitunter sind die Ergebnisse der Umformung stark davon abhängig, wie viel Zeit zwischen der letzten Umformung und dem Rundkneten verstrichen ist. Diese zusätzliche Größe macht es schwierig, stabile Zustände zu schaffen.