

Bild 6.7 Abstandshalter in Simulation

## 6.2 Sensorkräfte aus Simulation

### 6.2.1 Beobachtung Sensorkräfte

Um die Veränderungen der Umformkräfte mit zunehmendem Verschleiß anschaulich zu machen, werden verschiedene Darstellungen gewählt, die im Folgenden vorgestellt werden.

#### 6.2.1.1 Darstellung Unterschiede Umformkraft

Die auf die Sensoren wirkende Kraft kann als ein Teil der Umformkraft gesehen werden. Um die Unterschiede in der Umformkraft darzustellen, werden die Kräfte der jeweiligen Sensoren über den gesamten Umformweg und am Ende der Umformung analysiert. Zur Betrachtung der Kraftverläufe am Ende der Umformung, werden die Startpunkte für die Gesenke mit abrasivem Verschleiß angepasst, es wird die Höhe des abrasiven Verschleißes auf den Umformweg addiert. Dies dient der besseren Veranschaulichung der Kraftdifferenzen zu einem ähnlichen Zeitpunkt. Grund dafür ist die in Abschnitt 5.1.2 beschriebene Verschiebung des Verlaufs der Umformkraft. Dieser führt dazu, dass der Endpunkt der Umformung bei Gesenken mit abrasivem Verschleiß vor den anderen liegt. Ziel dieser Analyse sollen die auftretenden Kräfte zum Schluss der Umformung sein und nicht die Abhängigkeit vom Umformweg. Um die Sensorkräfte mit den maximalen Umformkräften zu vergleichen, werden die maximalen Sensorkräfte nach Sensor und Verschleiß dargestellt.

Der globale Verlauf der Kraft an den Sensoren ist ähnlich zu dem Verlauf der Umformkraft aus Bild 5.7. Hierbei ähneln sich auch alle Verläufe mit den jeweiligen Gesenken. Einzig beim adhäsiven Verschleiß bei Sensor 3 liegen die Kräfte deutlich unter denen der anderen Gesenke. Beim Gesenk mit kombiniertem Verschleiß von 0,05 mm ist bei jedem Sensor ein Ausreißer der Werte zu erkennen. Dieser findet

bei 32,927 mm Umformweg statt und hat einen sprunghaftigen Anstieg von etwa der Hälfte der dortigen Sensorkraft zur Folge, der dann im nächsten aufgenommenen Punkt bei 32,97 mm direkt wieder auf einen regelmäßigen Wert sinkt. Sensor 1 nimmt beim kombinierten Verschleiß mit 0,05 mm abrasivem Verschleiß die höchsten Kräfte auf, die mit 5,6 kN den Messbereich des Sensors von 5 kN übersteigen. Es besteht jedoch keine Gefahr für den Sensor, da er mit 150% (7,5 kN) der Nennkraft als maximale Gebrauchskraft ausreichend groß dimensioniert ist.

Der globale Verlauf der Sensorkräfte ist in Bild 6.8 bis Bild 6.11 zu erkennen. Wie in Bild 5.7 dienen die Graphen auch hier nur der Veranschaulichung, für Details sind sie zu ungenau.

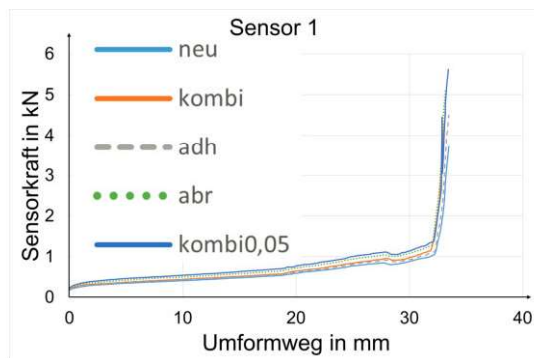


Bild 6.8 Sensor 1 globaler Verlauf

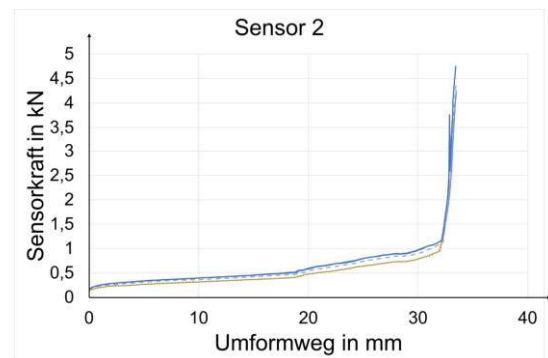


Bild 6.9 Sensor 2 globaler Verlauf

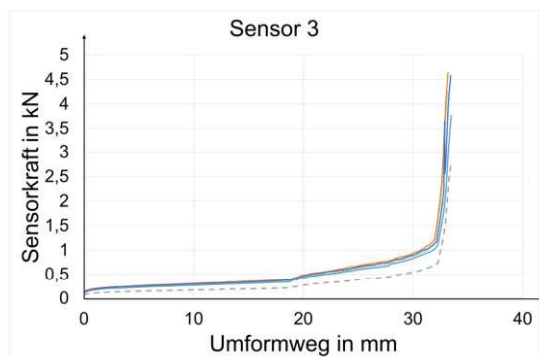


Bild 6.10 Sensor 3 globaler Verlauf

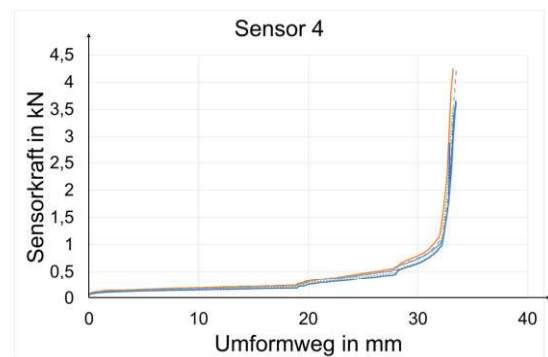


Bild 6.11 Sensor 4 globaler Verlauf

Der Kraftanstieg der Umformkraft findet in den Sensor Kräften bei einem Umformweg von etwa 32 mm statt und nicht bei 28 mm wie in Abschnitt 5.1.2 berechnet. Er fällt bei allen Gesenken und Sensoren ähnlich aus. Es treten Unterschiede in der anschließenden Steigung auf, die sich mit der Maximalkraft decken. Der Verlauf mit der größeren Steigung weist also am Ende auch die größere Maximalkraft auf.

Um den Kraftverlauf zum Ende der Umformung, unabhängig von Differenzen im Umformweg durch Verschleiß zu betrachten sind die Sensorkräfte ab dem Kraftanstieg bei 32 mm Umformweg mit modifiziertem Startpunkt in Bild 6.12 bis Bild 6.15 zu sehen. Auch hier ist bei Sensor 3 eine deutlich geringere Umformkraft bei adhäsivem Verschleiß zu sehen. Auffällig ist, dass sich der Kraftverlauf bei kombinier-

tem Verschleiß mit 0,3 mm abrasivem Verschleiß häufig mit anderen Verschleißarten deckt. Bei Sensor 1 sind komb. 0,3 mm und adhäsiver Verschleiß, bei Sensor 2 komb. 0,3 mm und abrasiver Verschleiß, Sensor 3 komb. 0,3 mm und komb 0,05 mm Verschleiß, Sensor 4 komb. 0,3 mm und adhäsiver Verschleiß, sowie komb. 0,05 mm Verschleiß und unverschlissen fast gleich. Außerdem ändert sich abhängig vom Sensor die Reihenfolge der Gesenke mit größerer Kraft am Ende des Umformprozesses.

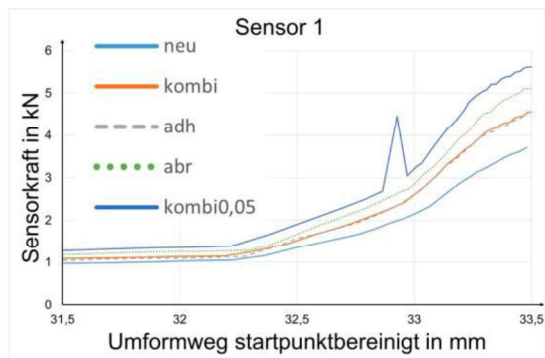


Bild 6.12 Sensor 1 Ende Umformung

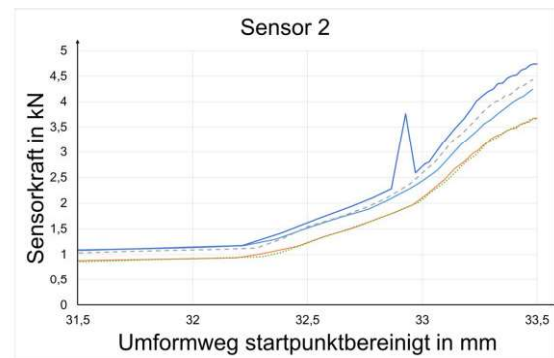


Bild 6.13 Sensor 2 Ende Umformung

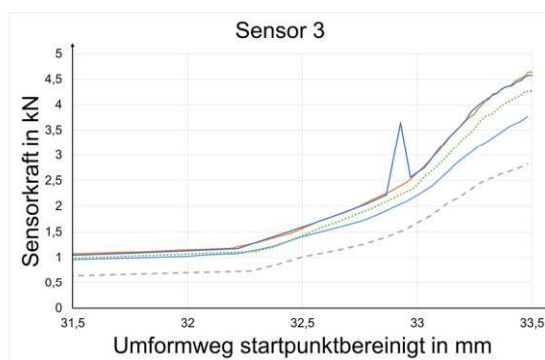


Bild 6.14 Sensor 3 Ende Umformung

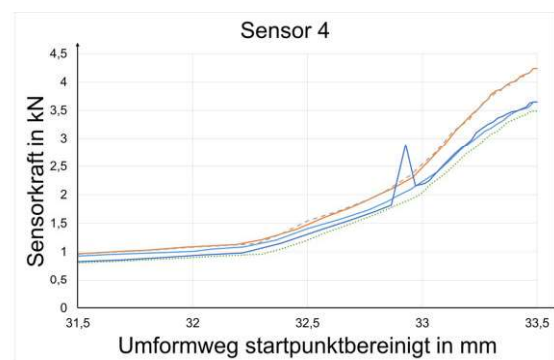


Bild 6.15 Sensor 4 Ende Umformung

In Tabelle 6.1 sind die maximalen Sensorkräfte aufgeführt. Diese werden addiert und genau wie in Tabelle 5.1 werden die verschlissenen Gesenke mit den unverschlissenen verglichen.

Tabelle 6.1 maximale Sensorkräfte

	S1 in kN	S2 in kN	S3 in kN	S4 in kN	gesamt	Untersch. In %
neu	3,709	4,24	3,764	3,625	15,338	entfällt
Komb 0,3	4,556	3,675	4,636	4,237	17,104	11,5
Komb 0,05	5,616	4,739	4,575	3,647	18,577	21,1
abr	5,107	3,659	4,265	3,487	16,518	7,1
adh	4,499	4,431	2,826	4,206	15,962	4,1

### 6.2.1.2 Darstellung Kraftunterschiede durch zeitliche Verschiebung der Verläufe

Um eine Verschiebung der Kraftverläufe wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben zu beobachten, wird die Kraft der jeweiligen Sensoren über den Umformweg analysiert. Dafür dienen die Graphen aus Bild 6.8 bis Bild 6.11. Die Graphen ähneln dem Verlauf der Umformkraft aus Bild 5.7. Es ist auch bei Ihnen nach dem Anstieg bei etwa 32 mm eine Versetzung der Kraftverläufe erkennbar. Diese Versetzung ist jedoch nicht so ausgeprägt wie in der Umformkraft aus Bild 5.7.

### 6.2.1.3 Darstellung unterschiedliche Kraftverteilung

Um die Unterschiede in der Kraftverteilung von innen nach außen festzustellen, werden die Sensorkräfte der vier Sensoren mit den jeweiligen Verschleißzuständen dargestellt. Dafür werden zwei Punkte gewählt, zum einen vor dem größeren beobachteten Kraftanstieg bei 27 mm Umformweg und zum anderen am Ende der Umformung.

Um die Kraftverläufe an den Sensoren zu vergleichen, werden zwei Kriterien betrachtet. Zum einen, wie sich die Kraft an den Sensoren je nach Verschleiß verändert und zum anderen, wie sich die Kräfte an den Sensoren bei einem bestimmten Verschleiß zueinander verhalten.

Die Verläufe der Kräfte an den Sensoren werden, wie in Bild 6.16 und Bild 6.17 erkennbar, in den jeweiligen Umformschritten fast proportional verschoben. Unabhängig von der Verschleißart sind die Kräfte auf Sensor 1 bei verschlissenen Gesenken erhöht. Abhängig von der Verschleißart sind die Kräfte 10 % bis 30 % höher. Bei Sensor 2 steigt die Kraft beim adhäsiven (5 %) und komb. 0,05 mm (10 %) Verschleiß, aber auch nur kurz vor dem Ende der Umformung. Bei den anderen Verschleißarten sinken die Kräfte auf einen ähnlichen Wert, 10 % unter dem des unverschlissenen Gesenks. Der vorher beschriebene Abfall der Sensorkraft an Sensor 3 bei adhäsivem Verschleiß ist auch hier zu beobachten, beträgt etwa 25 %. Alle anderen Verschleißarten führen zu einer Zunahme der Kräfte an Sensor 3 um 10 % (abrasiv), bzw. 20 % (komb. 0,3 mm und komb. 0,05 mm). An Sensor 4 weisen nur komb. 0,3 mm und adhäsiver Verschleiß erhöhte Sensorkräfte von 10 % auf. Die anderen Verschleißarten weisen Sensorkräfte im Bereich des unverschlissenen Gesenks auf.

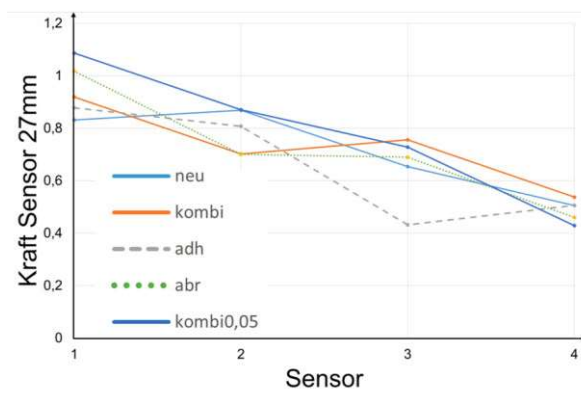


Bild 6.16 Sensorkräfte 27mm Umformweg

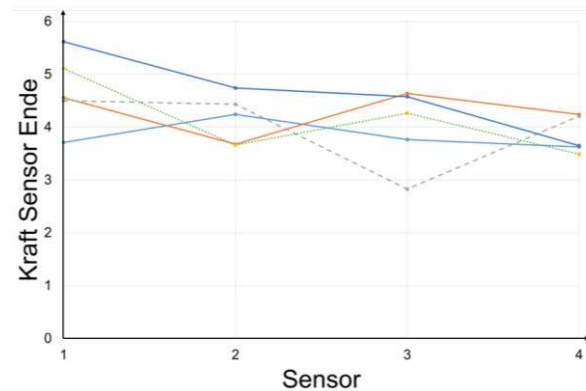


Bild 6.17 Sensorkräfte am Ende der Umformung

Charakteristisch für den Verlauf der Kräfte beim unverschlissenen Gesenk ist, dass Sensor 2 10 % größere Kräfte als Sensor 1 misst, Sensor 1 vor dem Kraftanstieg mehr als Sensor 3 und Sensor 3 mehr als Sensor 4, nach dem Kraftanstieg sind die Kräfte etwa gleich. Bei kleinem kombinierten Verschleiß (0,05 mm) liegt bei Sensor 1 die größte Kraft an (5,6 kN), die mit jedem weiteren Sensor nach außen hin über den Umformweg abnimmt. Zum 2. Sensor fallen 10 % ab, vom 2. Zum 3. nur 2 % und vom 3. Zum 4. Etwa 10 %. Größerer kombinierter Verschleiß (0,3 mm) weist einen zum kleinen kombinierten Verschleiß verschiedenen Verlauf auf, der sich im Laufe der Umformung verstärkt. Hier sinkt die Kraft von Sensor 1 zu Sensor 2 um 20 %, steigt von 2 zu 3 um 20 % und sinkt von 3 zu 4 um 5 %. Bei abrasivem Verschleiß sinkt die Kraft von Sensor 1 zu Sensor 2 um 30 %, steigt von 2 auf 3 um 20 % und sinkt von 3 auf 4 um 20 %. Dieser Verlauf verstärkt sich im Laufe der Umformung. Adhäsiver Verschleiß sorgt bei Sensor 1 und 2 für ähnliche Kräfte, einen starken Kraftabfall bei Sensor 3 um 40 % und wieder ähnliche Kräfte bei Sensor 1, bzw. 2 und 4, die sich im Verlauf angleichen.

Wie auf Bild 6.12 bis Bild 6.15 erkennbar gibt es folgende Überschneidungen bei den gemessenen Kräften abhängig vom Gesenk.

Auf Sensor 1 sind die Kräfte bei kombiniertem (0,3 mm) und adhäsivem Verschleiß fast gleich, bei Sensor 2 kombinierter (0,3 mm) und abrasiver Verschleiß, bei Sensor 3 die beiden kombinierten Verschleißarten und an Sensor 4 kombinierter (0,3 mm) und adhäsiver Verschleiß, sowie kombinierter (0,05 mm) Verschleiß und das unverschlissene Gesenk. Diese Beobachtungen decken sich mit den Beobachtungen aus den Sensorkräften in Abschnitt 6.2.1.1.

## 6.2.2 Auswertung Sensorkräfte

Bei der Betrachtung der Sensorkräfte als Umformkräfte fällt auf, dass der Verlauf der Sensorkräfte von der Form dem Verlauf der globalen Umformkräfte ähnelt. Der charakteristische Anstieg der Umformkräfte bei ca. 28 mm Umformweg tritt bei den Sensorkräften in ähnlicher Weise nach 32 mm Umformweg auf. Der Grund für diese Verschiebung ist unbekannt.

Außerdem können die Kräfte der Sensoren nur eingeschränkt als äquivalent der Umformkräfte gesehen werden. In Tabelle 5.1 sind die maximalen Umformkräfte gegeben, die sich nur bedingt mit den beobachteten maximalen Kräften auf die Sensoren in Tabelle 6.1 decken. Dies kann dadurch bedingt sein, dass die Sensoren bei unterschiedlichem Verschleiß lokal andere Kräfte messen, als insgesamt am Gesenk anliegen. Dadurch, dass die Sensorkräfte ohnehin um mehrere Prozent abweichen, während die gesamte Umformkraft nur unter einem Prozent verändert wird, ist eine Addition der Sensorkräfte um Rückschlüsse auf die Umformkraft zu ziehen nicht sinnvoll.

Allgemein ist jedoch auffällig, dass die Beobachtung aus der Analyse der Kraftverteilung auf der Rückseite des Obergesenks aus Abschnitt 5.1.2. hier nur grob wiederzuerkennen ist. In Abschnitt 5.1.2. wird eine Abnahme der Kräfte nach außen hin beobachtet, welche bei den Kräften auf den Sensoren in Bild 6.16 und Bild 6.17 nur beim kombinierten (0,05 mm) Verschleiß zu sehen ist. Bei den anderen Gesenken treten bei äußeren Sensoren höhere Kräfte auf als bei inneren Sensoren.

Auffällig ist in Bild 6.12 bis Bild 6.15 der Verlauf des kombinierten (0,05 mm) Verschleißes. Aufgrund des geringen geometrischen Unterschieds zum unverschlissenen Gesenk wird keine große Kraftänderung erwartet. Bei der Betrachtung der gesamten Umformkraft aus Tabelle 5.1 liegt der kombinierte (0,05 mm) Verschleiß 0,6% unter dem des unverschlissenen Gesenks. Die simulierte Kraftdifferenz zum unverschlissenen Gesenk ist jedoch an Sensor 1 die größte von allen Gesenken. An Sensor 2 und 3 besteht eine große Kraftdifferenz von jeweils über 500 N, an Sensor 4 tritt keine Kraftdifferenz mehr auf. Auch der bei 32,927 mm Umformweg sprunghafte Anstieg der Sensorkräfte ist bei den anderen Verläufen nicht erkennbar. Hier bietet sich kein anderer Grund, als einen Fehler in der Simulation anzunehmen.

Für die Kraftverläufe der verschlissenen Gesenke konnte keine Erklärung gefunden werden. Es kann aus den aufgenommenen Werten nicht einwandfrei wiedergegeben werden, welche Verschleißart für einen Kraftverlauf verantwortlich ist.

Andererseits sind die vorher beobachteten Kraftunterschiede zwischen den verwendeten Gesenken auf der Gesenkrückseite in den Sensorkräften wiedererkennbar. Selbst wenn die Verschleißarten durch Überschneidungen der Sensorkräfte nicht einwandfrei erkennbar sind, so ist eine Unterscheidung vom unverschlissenen Gesenk möglich. Die Unterschiede betragen am Ende der Umformung zwischen dem unverschlissenen Gesenk und einem der verschlissenen Gesenke bei Sensor 1 mindestens 500 N, bei Sensor 2 mind. 100 N, bei Sensor 3 mind. 500 N und bei Sensor 4 je nach Verschleiß von 0 N bis zu 500 N. Eine Kraftdifferenz von 500 N entspricht einer Abweichung von 10% des Messbereichs des verwendeten Sensors und ist damit messbar. Die auftretende Messunsicherheiten beträgt am Sensor maximal 2,25%.

Es liegen Überschneidungen bei kombiniertem Verschleiß und den einzelnen Verschleißarten vor, was darauf schließen lässt, dass bei kombiniertem Verschleiß eine Verschleißart für die Kraftänderung zuständig ist und damit die andere Verschleißart scheinbar überspielt.

Aus den charakteristischen Verläufen ist erkennbar, dass sich die Verhältnisse der Sensorkräfte zueinander beim kombinierten (0,3 mm) und abrasiven Verschleiß ähneln. Daher wird vermutet, dass der

abrasive Verschleiß bestimmend für die Kraftverteilung beim kombinierten Verschleiß ist. Bei einer Auswertung der Sensorkräfte wäre es also schwierig zwischen den beiden Verschleißarten zu unterscheiden. Die anderen charakteristischen Verläufe sind jeweils voneinander unterscheidbar.

Abschließend lässt sich festhalten, dass für jeweiligen Verschleiß charakteristische Kraftverläufe in den Sensoren erkennbar sind. Diese charakteristischen Kraftverläufe lassen nicht immer eine Unterscheidung zwischen den Verschleißarten zu, da zum Teil Überschneidungen zwischen den Verläufen auftreten. Ein Unterschied zwischen dem unverschlissenen Gesenk und einem verschlissenen Gesenk ist bei den Kraftverläufen an den Sensoren jedoch stets erkennbar. Dabei erweist sich die Anordnung der Sensoren für dieses Gesenk als ausreichend, da die maximalen Kräfte nicht zu groß für die Sensoren sind und die auftretenden Kraftunterschiede für eine Unterscheidung ausreichen.

Zusätzlich dazu kann eine Abhängigkeit der Kräfte vom Umformweg wie in Abschnitt 5.1.2. beschrieben beobachtet werden. Diese Abhängigkeit kann dazu genutzt werden, Verschleiß durch ein versetztes Einsetzen einer Kraft zu bestimmen.

Der zeitliche Unterschied der Umformkräfte zwischen dem unverschlissenen Gesenk und den verschlissenen liegt in den Simulationen bei etwa 0,007 s (vgl. Absatz 5.1.2). Die Messrate des verwendeten Messgeräts HBM QuantumX MX840B liegt bei 40.000 mal pro Sekunde, was einem Abstand zwischen den Messungen von 0,000025 s entspricht und damit ausreicht [HBM].

Temperaturschwankungen der Sensoren wirken sich negativ auf die Messgenauigkeit auf. Die verwendeten Sensoren sind bis zu einer Temperatur von 90 °C einsetzbar. Bei durchschnittlichen Gesenkttemperaturen von 150 °C bedarf es einer geeigneten Wärmedämmung oder Kühlung der Sensoren. Die simulierte Konstruktion des Abstandshalters hat eine Dicke von 15 mm und kann bis 104,65 mm beliebig dicker gebaut werden, es besteht also noch Bauraum für eine Kühlung oder Wärmedämmung des Systems.

### **6.3 Konstruktion der Aufnahme des Messsystems**

Um das Messsystem in die bestehende Presse zu montieren, wird eine bereits bestehende Aufnahme verwendet. Für diese Aufnahme wird noch ein Rahmen benötigt, welcher das Gesenk und die Messeinrichtung aufnimmt. Außerdem müssen die Bohrungen der Aufnahme für die Befestigungsschrauben mit dem Rahmen vertieft werden. Der Zusammenbau ist von der Seite in Bild 6.18 dargestellt.