

# Der Roboterfixateur

Seit der erstmaligen Beschreibung eines externen Fixateurs durch Wutzer im Jahr 1843 wurden vielfältige Systeme mit vielen Weiterentwicklungen im Detail erarbeitet. Unseres Erachtens bieten Verfahren aus der aktuellen Robotertechnik weitere interessante Entwicklungsmöglichkeiten. Besonders günstig erscheint in diesem Kontext die Anwendung der Hexapodkinematik, die in der Robotertechnik auch als parallele Roboterkinematik bezeichnet wird. Auf der Grundlage eines manuellen Systems, welches derzeit routinemäßig in der Klinik eingesetzt wird, wurden von uns ein motorisiertes sowie ein messendes System entwickelt. In der derzeitigen Entwicklung befindet sich ein automatisches System, Endziel ist ein intelligentes System.

## Kinematik der Robotertechnik

Es wird zwischen einer seriellen und einer parallelen Kinematik unterschieden. Unter einer seriellen Kinematik muss man sich eine „Konstruktion“ wie den menschlichen Arm vorstellen: Hier sind die Träger- und Einstellelemente hintereinander geschaltet. Serielle Roboterkinematiken werden in typischen Industrierobotern verwendet (■ **Abb. 1**).

Bei der parallelen Kinematik hingegen werden, wie aus dem Namen ersichtlich, die Einstellelemente parallel von einer Plattform auf das zu bewegendes Element übertragen (■ **Abb. 2**). Sie wird z. B. in großen Fräsmaschinen, aber auch zur präzisen Einstellung z. B. von Teleskopen verwendet. Eine besonders typische Anwendung ist der Flugsimulator, bei welchem das Cockpit mit einer parallelen Roboterkinematik im dreidimensionalen Raum präzise bewegt werden kann. Großer Vorteil der parallelen Kinematik ist durch die

parallele Anordnung eine besonders hohe Stabilität.

## Hexapodkinematik in der Klinik

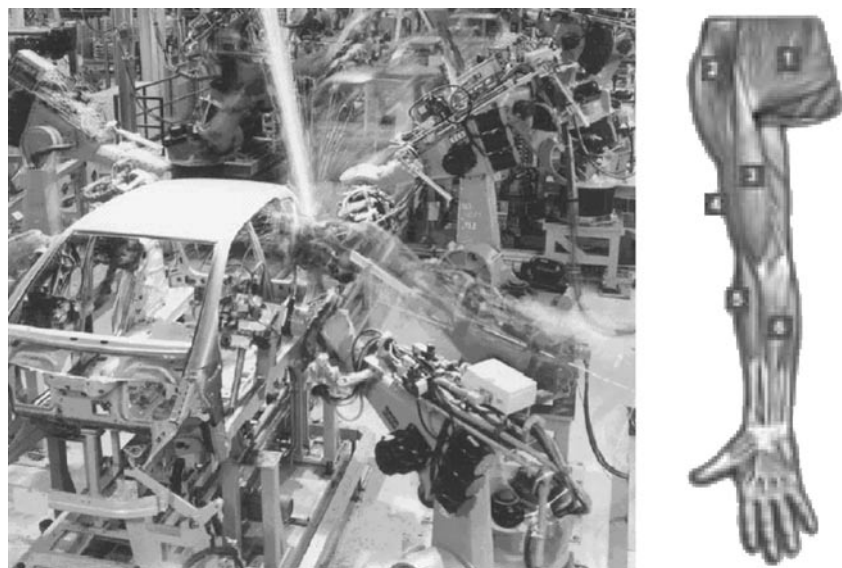
### Funktionsweise

Vorteilhaft ist die Anwendung der parallelen Kinematik als Hexapodkinematik im Ringfixateur. Die Längeneinstellung an 6 Distraktorelementen erlaubt beliebige räumliche Bewegungen, d. h. neben Distraction und Kompression auch Seitverschiebungen, Achskorrekturen und Torsionen (■ **Abb. 3**). Das Besondere der Hexapodkinematik ist, dass Stabilität besteht, ohne die verwendeten Kugelgelenke zu blockieren, wie es in klassischen Fixateuren erforderlich ist. Es handelt sich somit um ein kinematisches System.

Die Besonderheit des Mechanismus ist, wie der Name (Hexapod: griechisch 6 Fuß) sagt, die Verwendung von genau 6

Elementen. Dies ist darin begründet, dass es im dreidimensionalen Raum 6 so genannte Freiheitsgrade, d. h. Bewegungsmöglichkeiten, gibt. Dabei handelt es sich um Translationen in x-, y- und z-Richtung sowie Rotationen um die x-, y- und z-Achse. Auf der anderen Seite ergeben sich durch die Längeneinstellungen der Distraktoren ebenfalls genau 6 Freiheitsgrade. Zwischen diesen und den 6 Freiheitsgraden der Bewegung des Hexapoden im dreidimensionalen Raum besteht eine eindeutige mathematische Beziehung. Ein ähnliches System mit 5 Distraktorelementen wäre nicht stabil (■ **Abb. 4**), ein System mit 7 Elementen wäre überbestimmt, d. h. es würden innere Spannungen auftreten.

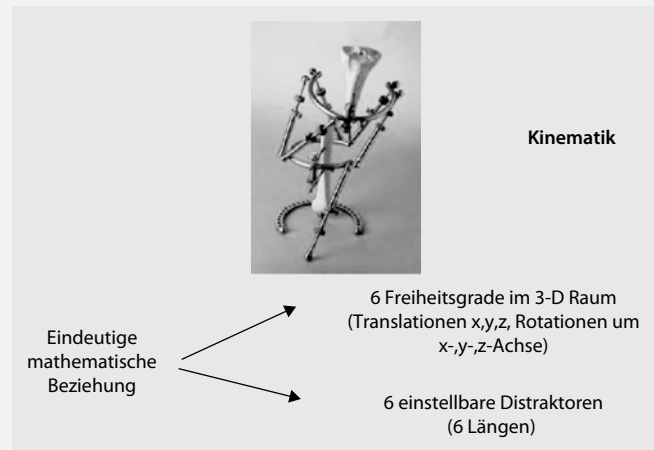
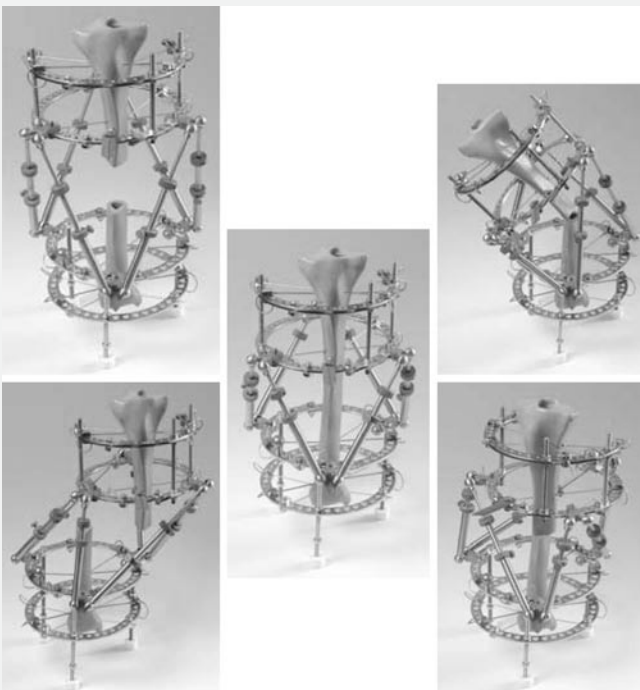
Aufgrund der interessanten mechanisch-mathematischen Eigenschaften ist der Hexapodmechanismus in der Mechanik ein häufig theoretisch untersuchtes System. Wegen der schrägen Anordnung der Distraktorelemente und der Tatsache,



**Abb. 1** ▲ Serielle Roboterkinematik, links Industrieroboter, rechts menschliche Hand

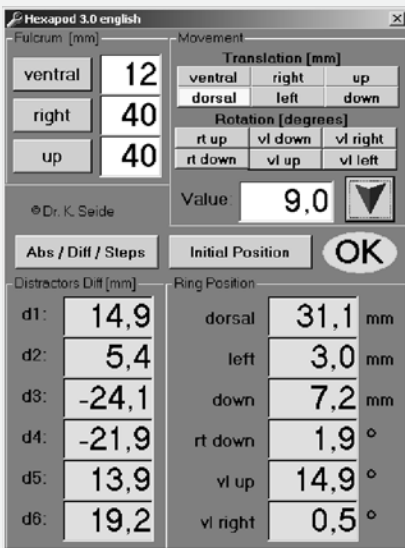


**Abb. 2** ◀ Parallele Roboterkinematik, links Fräsmaschine für große Holzteile, rechts Hexapodringfixateur



**Abb. 4** ▲ Demonstration der Kinematik, Instabilität des Systems durch Entfernung eines der 6 Distraktoren

**Abb. 3** ◀ Universelle dreidimensionale Ringbewegungen durch Längenverstellungen der 6 Distraktoren im Hexapoden



**Abb. 5** ◀ Software zur Berechnung der Distraktoreinstellungen mit vorgegebenen Bewegungen

**Abb. 6** ► Fallbeispiel: Fehlstellungskorrektur bei 13-jährigem Jungen: **a-e** Röntgenbefunde, **a,b** vor und **c-e** nach Anlage des Hexapoden, **f,g** klinische Befunde, **f** vor und **g** nach Korrektur, **h,i** radiologische Befunde nach erfolgter Korrektur

Trauma Berufskrankh 2009 · 11  
 [Suppl 1]:65–70  
 DOI 10.1007/s10039-008-1462-1  
 © Springer Medizin Verlag 2008

K. Seide  
**Der Roboterfixateur**

**Zusammenfassung**

Mittels Verfahren der modernen Robotertechnik sind vielfältige Weiterentwicklungen des Fixateur externe möglich. Besonders vorteilhaft ist die Anwendung der Hexapodroboterkinematik im Ringfixateur. Sie ermöglicht die präzise dreidimensionale Positionierung, die Korrektur von Fehlstellungen oder die Behandlung von Frakturen, erfordert aber eine Software. Ein mit 6 Miniaturmotoren ausgerüsteter Hexapodfixateur wurde klinisch eingesetzt, ebenso ein messendes System, welches um 6 lineare Kraftsensoren erweitert worden war. Dieses erwies sich als für das Monitoring der Frakturheilung gut geeignet. Durch die Kombination der vorhandenen Motoren mit den vorhandenen Sensoren sowie den Einsatz einer geeigneten Software, welche derzeit entwickelt wird, wird es möglich sein, auch eine automatische Steuerung des Fixateurs aufgrund gemessener Kraftwerte durchzuführen. Ein solches System wird als „intelligenter“ Fixateur bezeichnet.

**Schlüsselwörter**

Fixateur externe · Motor · Roboter · Hexapodkinematik · „Intelligenter“ Fixateur

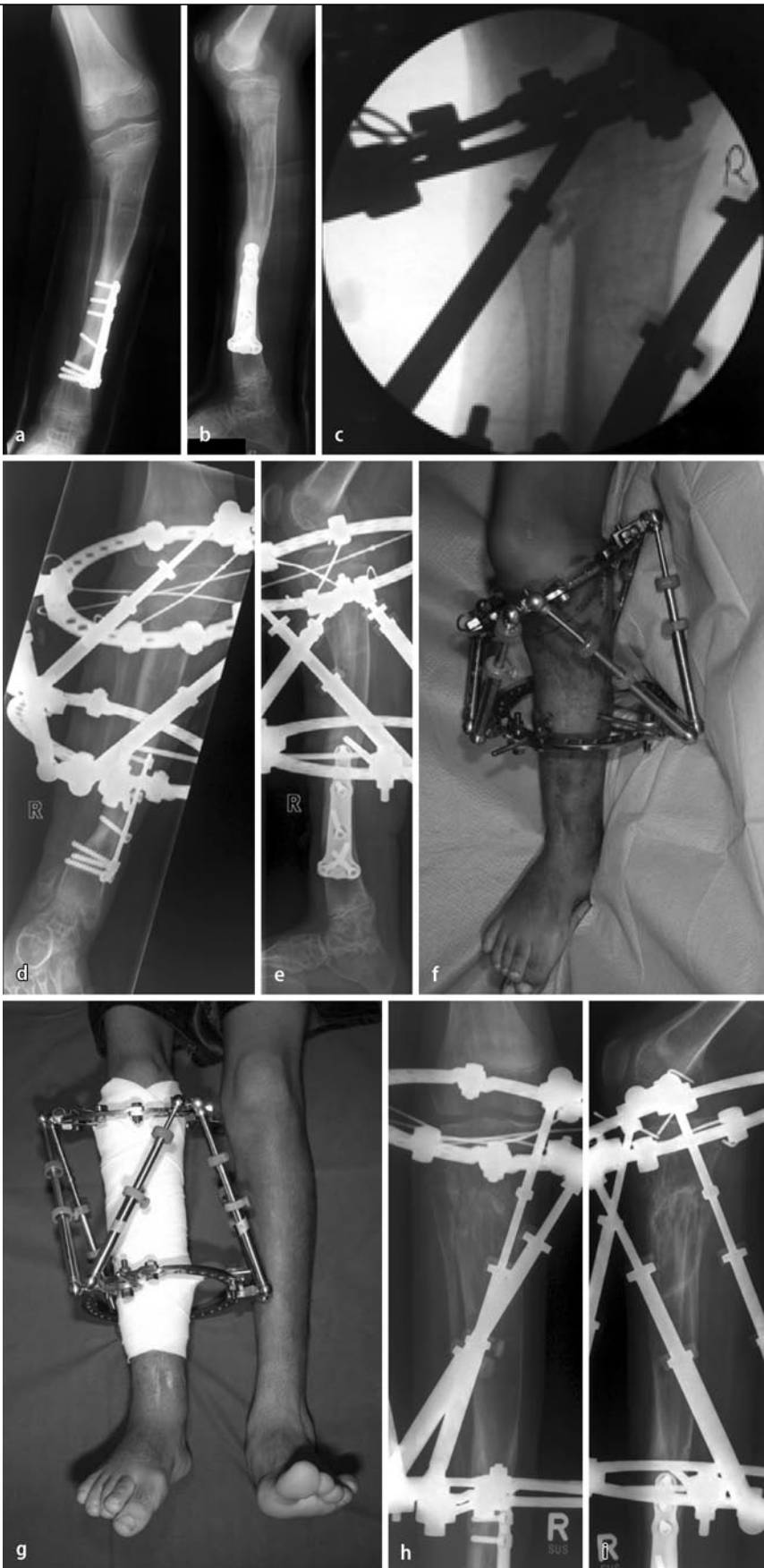
**The robot fixator**

**Abstract**

By using modern robot technology, many further developments of the external fixator are now possible. The use of hexapod robot kinematics is particularly beneficial in the ring fixator. It enables precise three-dimensional positioning, correction of malposition, or fracture treatment; however, it requires software. A hexapod fixator equipped with six miniature motors was tested, as was a measuring system extended with six linear load sensors. This proved to be well suited to monitoring fracture healing. By combining the existing motors with the existing sensors, together with the development of the appropriate software, which is currently under way, it will be possible to automatically control the fixator on the basis of the load measured. This type of system is called an “intelligent fixator”.

**Keywords**

External fixator · Motor · Robot · Hexapod kinematics · “Intelligent” fixator



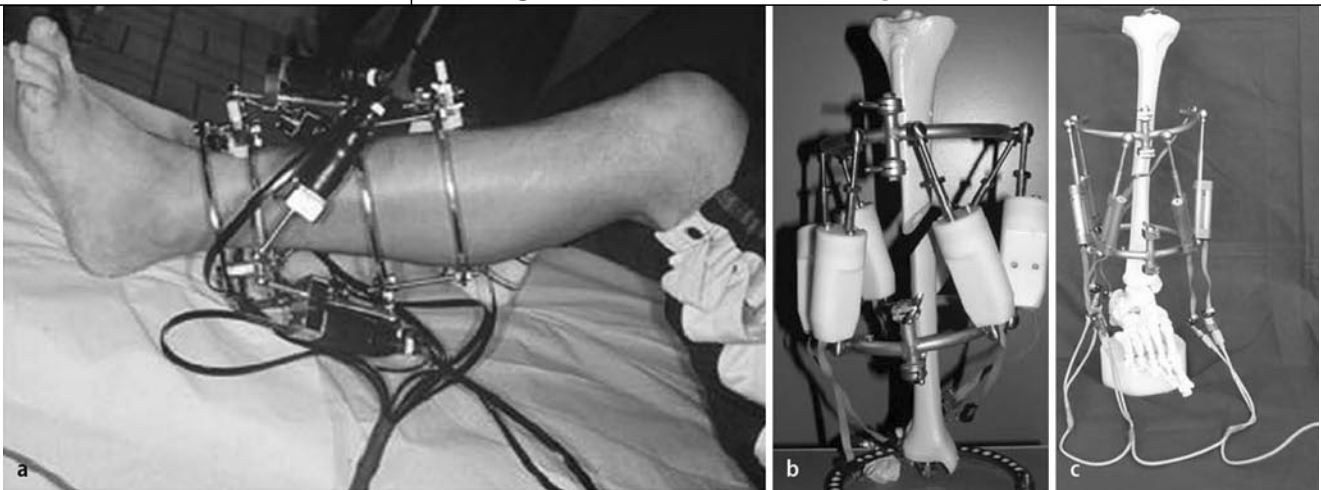


Abb. 7 ▲ Entwicklungsschritte des Motorfixateurs



Abb. 8 ▲ Motorisierte Frakturreposition bei polytraumatisiertem Patienten, **a,b** Unfallbilder, **c** anliegender Fixateur vor Reposition, **d** klinisches Bild während der Behandlung, **e** radiologischer Befund im Fixateur nach Korrektur und **f,g** nach Umstieg auf winkelstabiles minimalinvasiv eingebrachtes Implantat

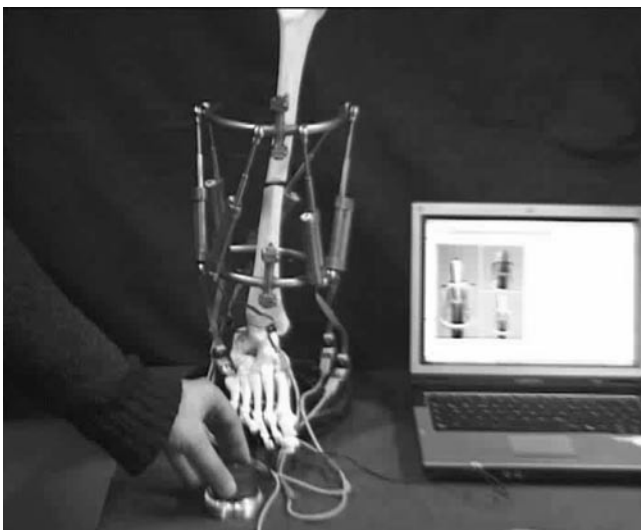


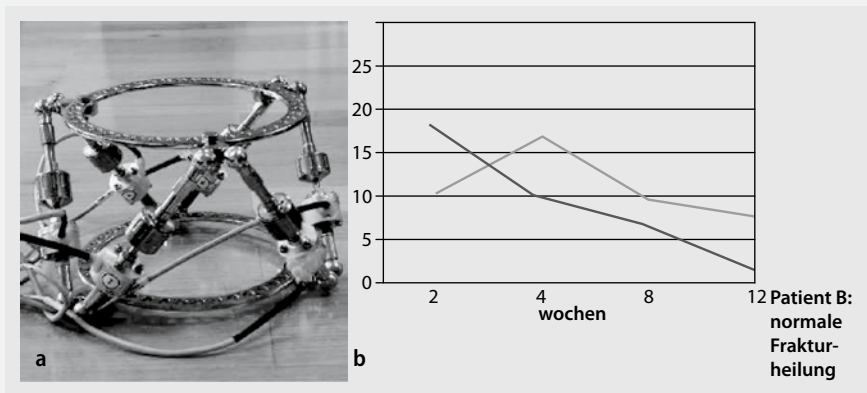
Abb. 9 ◀ Joysticksteuerung des Motorhexapoden, hier mit „3D-Maus“

dass die Verstellung eines einzelnen Distraktors eine schwer vorstellbare Schraubenbewegung verursacht, ist es allgemein anerkannt, dass für eine Anwendung des Hexapodmechanismus eine Software erforderlich ist. Eine solche wurde von uns für die klinische Anwendung entwickelt (▣ Abb. 5).

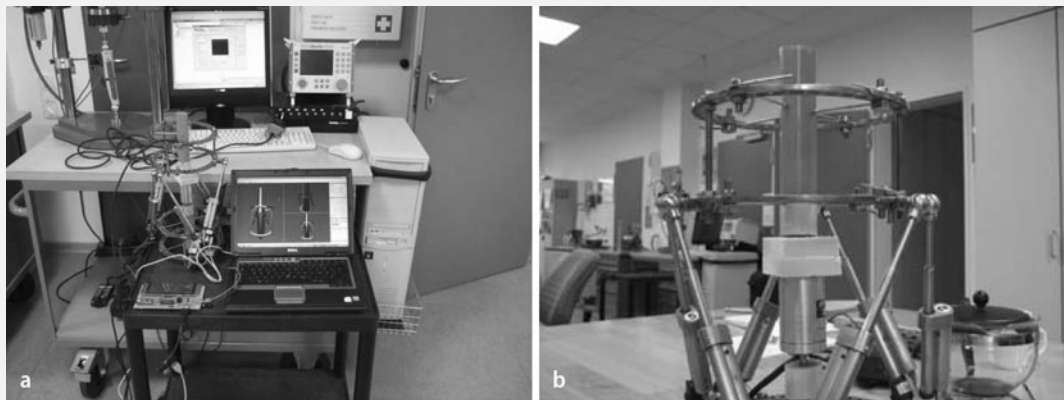
### Anwendungsmöglichkeiten

Die typische Anwendung ergibt sich bei Patienten, bei welchen mehrdimensionale Fehlstellungen behoben werden müssen, insbesondere auch bei gleichzeitig erforderlicher Verlängerung nach Ilisarov.

**Abb. 10** ► Messung der Fixateurlastung mit 6 in Reihe mit den Distraktoren angeordneten linearen Kraftsensoren (a), Beispielkurven für gemessene Biegebelastung im Fixateur während der Frakturheilung (b)



**Abb. 11** ► Anordnung zur automatischen Steuerung einer konstanten Kompressionskraft im Frakturspalt im Labor (a), Detailansicht (b)



■ **Abb. 6** zeigt das Fallbeispiel eines 13-jährigen Kindes, bei welchem im Alter von 4 Jahren eine Fraktur mit einer nachfolgenden Entzündung bestand. In der Folge resultierte ein Knochendefekt von 10 cm, welcher mit einem Segmenttransport und anschließend Spongiosaplastik und Osteosynthese mit einem winkelstabilen Implantat behandelt wurde. Im weiteren Wachstum kam es zu einer deutlichen Valgus- und Torsionsfehlstellung im proximalen Unterschenkel. Nach Anlage des Fixateurs und Durchführung der Osteotomie wurde zunächst 5 Tage abgewartet, dann nach entsprechender Softwareberechnung sukzessive die Korrektur mit gleichzeitiger Verlängerung durchgeführt. ■ **Abb. 6g-i** zeigt das Ergebnis nach abgeschlossener Korrektur mit achsgerechter Ausrichtung der unteren Extremität.

### Motorisierter Fixateur

Er wurde in mehreren Schritten entwickelt, zunächst mit einer relativ großen Motoreinheit, dann unter Verwendung von Teleskopdistraktoren mit einem weit-

aus größeren Bewegungsausmaß, schließlich mit Teleskopdistraktoren und Miniaturmotoren (■ **Abb. 7**).

Der Prototyp des mit Miniaturmotoren betriebenen Hexapoden wurde bei einem polytraumatisierten Patienten mit einer dislozierten Oberschenkelschaftfraktur eingesetzt (■ **Abb. 8**). Diese war primär im AO-Fixateur stabilisiert worden. Wegen einer verbliebenen Fehlstellung wurde das Hexapodsystem auf der Intensivstation an die vorhandenen Schanz-Schrauben angelegt und langsam sukzessive mit Computersteuerung reponiert. Die definitive Versorgung erfolgte minimalinvasiv durch eine eingeschobene winkelstabile Platte.

Die Steuerung des Motorhexapoden mit einem Joystick ist ebenfalls möglich und wurde im Labor erprobt. Verwendet wurde nicht ein typischer Joystick, sondern eine so genannte 3D-Maus, bei welcher nicht nur seitliche Verschiebungen, sondern auch eine dritte Zugrichtung sowie die Drehungen und Kippungen einstellbar sind (■ **Abb. 9**). Damit konnte der Motorhexapod in allen Richtungen ausgerichtet werden. Dieses Verfah-

ren wird in Zukunft geeignet sein, Frakturpositionen mit Motorunterstützung durchzuführen.

Roboter zeichnen sich dadurch aus, dass nicht nur motorisierte Bewegungen durchgeführt werden können, sondern dass darüber hinaus mit Hilfe von Sensoren eine Steuerung des Systems möglich ist. Auch beim Hexapodfixateur ist – durch Einbringung von longitudinalen Kraftsensoren in Reihe mit den 6 Distraktoren (■ **Abb. 10a**) – dies möglich. Mit einer Software, welche mathematisch der Motorsteuersoftware ähnelt, lassen sich aus den linear gemessenen Kräften in den Distraktoren die Belastungen des Fixateurs in allen räumlichen Freiheitsgraden, d. h. insbesondere auch Torsion, Scherkräfte und Achsabkippungen, messen. Ein solches System wurde als Prototyp an 9 Patienten eingesetzt. Die Messung der Fixateurlastung erwies sich zum Monitoring der Frakturheilung als gut geeignet, typische Verläufe von 2 der 9 Patienten sind in ■ **Abb. 10b** dargestellt.

### Automatisierung – „intelligenter“ Fixateur

Der nächste Entwicklungsschritt ist ein mit eigener Computerintelligenz ausgestatteter Fixateur, welcher die automatische Steuerung, z. B. der Korrektur über einen längeren Zeitraum, vorsieht. Es wird hiermit insbesondere möglich sein, auch die Kraftmessung zur Steuerung der Motoren einzusetzen.

Eine typische Möglichkeit zeigt **Abb. 11:** In einem Versuchsaufbau wurde eine Steuerung erprobt, welche in einem simulierten Frakturspalt eine konstante Kompression erreicht. Eine solche Anordnung am Patienten könnte z. B. bei einer Resorption im Frakturspalt durch Nachregelung wieder eine konstante leichte Kompression herstellen. Hierdurch ist eine sicherere und schnellere Heilung zu erwarten.

Ein elektronisch kontrolliertes „intelligentes“ Fixateur-externe-System wird die Messung des Fortgangs der Frakturheilung ermöglichen, insbesondere ein frühzeitiges Erkennen einer verzögerten Heilung oder Pseudarthrose. Darüber hinaus erlaubt es die Steuerung der Patientenaktivität und -belastung mit einem Display oder über Sprachanweisungen. Eine telemetrische Kontrolle („Bluetooth-Handy“) ist mit der heutigen Technologie ebenfalls realisierbar. Die zukünftige Fixateuranordnung wird dann eine aktive Einstellung einer vorgegebenen optimalen Last auf den Frakturspalt („automatische Dynamisierung“), eine aktive automatische Frakturreposition oder eine automatische optimierte Kallusdistraktion ermöglichen.

### Korrespondenzadresse

**Prof. Dr. K. Seide**  
BG-Unfallkrankenhaus Hamburg,  
Bergedorfer Straße 10, 21033 Hamburg  
k.seide@buk-hamburg.de

**Interessenkonflikt.** Keine Angaben