

Bewegungsfixateure

■ Thomas Schmickal, Andreas Wentzensen, Alexander Schuh

Zusammenfassung

Das Konzept einer gelenkübergreifenden Fixation mit achsengeführter Bewegung in der Gelenkachse hat sich für das Ellbogengelenk als vorteilhaft für die frühfunktionelle Nachbehandlung komplexer osteoligamentärer Verletzungen nach operativer Versorgung erwiesen und erlaubt auch nach komplexen knöchernen und ligamentären Rekonstruktionen eine rasche postoperative Nachbehandlung zur Vermeidung der Nachteile langfristiger Transfixation. Experimentelle Ansätze für derartige achsenkinematische Führungen mit externer Transfixation bestätigen die Möglichkeit einer Anwendung auch für das Handgelenk, Fingergelenke und das obere Sprunggelenk, die eine wesentlich kompliziertere Achsenkinematik be-

sitzen, ohne dass hier bisher aber ausreichende klinische Resultate erzielt werden konnten.

Different Types of Hinged External Fixators

Postoperative transfixation of the elbow joint with a hinged device after ORIF shows advantages in the full-term treatment of complex osteoligamentous injuries and allows for early functional treatment after complex reconstruction of the bone and ligaments without the complication of arthrofibrosis. Biomechanical investigations on the more difficult kinematics also confirm the possibility for using hinged devices at the wrist, finger and ankle joints. Only few clinical results for the latter types of treatment are available to date.

Einleitung

Der Fixateur externe als äußeres Stabilisationssystem hat seit Langem einen festen Stellenwert in der unfallchirurgisch-orthopädischen Versorgung.

Die Fixation gelenknaher oder artikulärer Verletzungen erfordert häufig eine längerfristige Transfixationsdauer mit den daraus resultierenden Nachteilen der Gelenkkapselschrumpfung als Ursache lang anhaltender Bewegungseinschränkungen. Der Gedanke, Stabilität mit Mobilität zu verbinden, schien lange Zeit ein unlösbarer Widerspruch, hat in den letzten Jahren jedoch infolge detaillierter Erforschungen der Kinematik verschiedener Gelenke zu Lösungsansätzen bzw. inzwischen bewährten The-

rapiekonzepten mit Bewegungsfixateuren geführt. Etabliert ist inzwischen die additive Bewegungsfixateurbehandlung nach operativer Versorgung komplexer Ellbogenverletzungen mit monozentrischen Systemen. Komplexe polyzentrische Konstruktionen wurden für das Handgelenk entwickelt, konnten sich aber bisher im klinischen Alltag nicht durchsetzen. Erste Versuche mit kleinen Distaktionsvorrichtungen an Fingergelenken werden in jüngster Zeit als Erfolg versprechend berichtet. An der unteren Extremität konnten biomechanische Studien am Kniegelenk zeigen, dass eine extern geführte Fixation technisch unlösbar erscheint. Dahingegen konnten Kadaveruntersuchungen belegen, dass monozentrische Lösungen, die im klinischen Alltag erprobt wurden, am oberen Sprunggelenk kinematisch unzulässig sind, bei Anwendung eines polyzentrischen Distaktionssystems aber funktionsfähig sein können.

Aufgrund der bisher lediglich für das Ellbogengelenk klinisch relevanten Anwendungen wird sich die weitere Darstellung im Wesentlichen auf diese Applikation beziehen und nur die Grundlagen der biomechanischen Entwicklungen von Bewegungsfixateuren der übrigen Gelenke aufzeigen.

Bewegungsfixateure am Ellbogen

Bereits 1973 berichteten Volkov und Organesjan über einen Distaktionsapparat am Ellbogengelenk, der sich jedoch infolge der Komplexität der Applikation nicht durchsetzen konnte. Das Konzept geführter Bewegung am Ellbogen blieb eine Ausnahme, bis neue Techniken der Biomechanik vor ca. 10 Jahren detaillierte Kenntnisse der Arthrokinematik ableiten konnten. Entscheidend für die Funktionsfähigkeit ist die exakte Positionierung des Drehzentrums über dem Zentrum des Axoid. Madey konnte belegen, dass mit zunehmender Abweichung des Fixateur-Bewegungszentrums aus der Ellbogenbewegungsachse ein exponentieller Anstieg der intraartikulären Druckkräfte des Gelenkknorpels resultiert. Die Funktionsfähigkeit des geführten externen Fixationssystems ist dabei nicht abhängig von bautechnischen Details, Bodyfixateure sind ebenso geeignet wie Modularsysteme, die sich durch eine flexiblere Applikation auszeichnen [3–5, 7–10].

Ergebnisse verschiedener Autoren belegen, dass eine frühfunktionelle Nachbehandlung operativ versorgter Komplexverletzungen deutlich bessere Ergebnisse gegenüber einer Transfixation erwarten lassen.

Problemverletzungen des Ellbogengelenks

Frische kapsuloligamentäre Verletzungen

Die komplexe Anatomie der Oberarmrolle und des proximalen Unterarms bedingt eine Vielzahl von problematischen Verletzungen der ossären und ligamentären Strukturen. Isolierte kapsuläre und ligamentäre Verletzungen lassen sich in der Regel mit gutem oder zufriedenstellenden Ergebnis rekonstruieren. Bei Kombinationsverletzungen der ulnaren und radialen Ligamente mit ventraler Instabilität (Ausriss der Gelenkkapsel oder Zerstörung des Proc. coronoideus) kann in einzelnen Fällen aufgrund der unzureichenden ligamentären Führung die korrekte Arthrokinematik des Ellbogengelenks infrage gestellt sein, sodass Luxationen oder Subluxationen der Humerusrolle in der Ellenzange in zunehmender Extension aufgrund der mangelhaften ventralen Führung auftreten können. Eine Sicherung der Artikulation kann dann nur über eine ausreichend lange Ruhigstellung in Rechtwinkelstellung erzielt werden.

Sekundärdislokation und veraltete Luxation/Subluxation nach ligamentären Verletzungen

Ellbogenluxationen ohne knöchernen Begleitverletzungen können bei stabiler ligamentärer Führung mit guten bis sehr guten Ergebnissen konservativ behandelt werden. Nach Reposition ist eine Überprüfung der Bandstabilität und Röntgenkontrolle der Stellung im Gips obligat. In Einzelfällen wird jedoch die Stabilität des Gelenks falsch eingeschätzt und Reluxationen auch unter Gipsruhigstellung beobachtet. Werden diese verspätet erkannt, kann in den meisten Fällen eine erneute Reposition nur noch offen erfolgen. Auch fehlergeschätzte Repositionsergebnisse mit längerfristig verbliebener Subluxation, meist aufgrund einer Interposition von Gewebe, erfordern eine operative Revision des Gelenks. Bei prolongierter Fehlstellung besteht fast regelhaft die Notwendigkeit der Sicherstellung der Artikulation mit externer Fixation.

Komplexfrakturen des Ellbogengelenks

Frakturen der Humerusrolle, der proximalen Elle und des Radiusköpfchens können mit unterschiedlichen Implantaten in der Regel übungstabil versorgt werden. In Ausnahmesituationen kön-

nen jedoch infolge außergewöhnlicher Zerstörung von Gelenkflächenanteilen oder Defektsituationen der epi-/metaphysären Region Situationen entstehen, die die Übungsstabilität der Osteosynthese auch bei Verwendung moderner, winkelstabiler Implantate überfordern kann. Wenn die Stabilität der Osteosynthese eine passive Mobilisation des Gelenks nicht gewährleistet, wird eine zusätzliche Sicherung durch Gipsruhigstellung oder externe Fixation erforderlich.

Veraltete Luxationsfrakturen/Sekundärdislokation nach Osteosynthesen

Veraltete Frakturen, die in Fehlstellung verblieben und aufgrund verschiedener Ursachen einer Rekonstruktion nur verzögert zugeführt werden können, lassen mit zunehmendem Abstand zum Unfallzeitpunkt erhebliche Probleme in der Spätrekonstruktion erwarten. Frakturgeometrie, Knochenqualität und Weichteilretention stellen hohe Anforderungen an eine übungstabile Rekonstruktion, die ohne zusätzliche externe Fixation oder langfristige Ruhigstellung in vielen Fällen nicht gewährleistet werden kann.

Subtotale und totale Amputationsverletzungen im Ellbogenbereich

Diese seltene und schwere Verletzung des Ellbogengelenks stellt häufig den Erhalt der Extremität infrage. Primär vorrangiges Ziel ist die Revaskularisation zur Verhinderung des Extremitätenverlusts, ggf. kombiniert mit der Rekonstruktion nervaler Strukturen. Der Erhalt einer Gelenkfunktion ist in der Regel erst in sekundärer Versorgung zu planen, wenn der Extremitätenerhalt gesichert und die Weichteilsituation geklärt ist. Lokale und freie Gewebetransfertechneiken sind regelhaft erforderlich. Die Fixation der Extremität erfordert aus den genannten Gründen meist eine langfristige Gelenktransfixation. Erst zu einem späten Zeitpunkt der Behandlung kann die Wiederherstellung der Gelenkfunktion angestrebt werden.

Biomechanik und Kinematik des Ellbogengelenks

Die Kinematik des Ellbogengelenks erscheint auf den ersten Blick einfach und wirkt bei oberflächlicher Betrachtung wie ein simples Scharniergelenk. Diese unzulässige Vereinfachung der anatomischen Verhältnisse und der daraus re-

sultierenden Biomechanik kann erhebliche Schwierigkeiten bei der operativen Rekonstruktion von Gelenksverletzungen nach sich ziehen. Das komplexe Zusammenspiel von drei Gelenkpartnern und die Notwendigkeit der Kombination einer Scharnierbewegung (Humero-Ulnar-Gelenk) mit einer Rotations-Roll-Gleit-Bewegung (Humero-Radial-Gelenk) wird nicht alleine durch die komplexe Geometrie der Oberarmrolle, der Ellenzange und des Speichenköpfchens, sondern auch durch den Kapsel-Band-Apparat des Gelenks gesichert.

Die Gelenkinematik wurde lange Zeit rein anatomisch-deskriptiv beurteilt. Erst neuere Untersuchungen an Kadavergelenken konnten Aufschluss über die Achsenkinematik, insbesondere der humero-ulnaren Gleitbewegung liefern. So haben unterschiedliche Untersuchungen unter Nutzung von Motion-tracking-Systemen und Röntgenkinematografie nachgewiesen, dass die Scharnierbewegung der Ellenzange um die Oberarmrolle nicht exakt einer festen zentralen Drehachse folgt. Vielmehr resultiert ein Axoid, eine Sammlung von Momentanachsen, in unterschiedlichen Beugestellungen. Allerdings sind die Achsen-schwankungen von einem geringen Ausmaß, übereinstimmend werden Werte von 3° im Mittel als Schwankungsbreite über den gesamten Bewegungsverlauf beschrieben [2, 6, 9].

Aufgrund dieser Untersuchungen wurde die Hypothese erhoben, dass eine geführte Bewegung des Ellbogengelenks mit einem Bewegungsfixateur als Näherungslösung an das Axoid zulässig ist. Unterstellt wurde dabei, dass die systemimmanente Elastizität eines Fixateursystems die geringen Achsen-schwankungen auf ein tolerables Maß reduziert. Diese Hypothese konnte zwischenzeitlich in verschiedenen biomechanischen Untersuchungen hinsichtlich der Funktionsfähigkeit nachgewiesen werden.

Applikation des Bewegungsfixateurs

Die Platzierung des Bewegungsfixateurs erfolgt in der Regel über einen unilateralen Fixateur externe in Modular-technik. Das Kohlefasergelenk wird unter Durchleuchtungskontrolle im Drehzentrum des Ellbogengelenks eingerichtet. In der Regel wird dazu zunächst die Anlage einer lateralen Längsrohrmontage am Oberarm erforderlich. Die Modular-technik des Fixateurs erlaubt die Einrichtung

des Gelenks unter Berücksichtigung der Drehachse. Hilfsweise kann mit einer Bohrbüchse oder einem Zielgerät ein K-Draht exakt in das Drehzentrum appliziert werden, der als Führungshilfe die Gelenkjustierung erleichtert. Alternativ ist andernfalls sicherzustellen, dass das Zentrum des Kohlefasergelenks exakt in das Zentrum der übereinander projizierten radialen und ulnaren Kondyle zu liegen kommt. Es muss streng auf die zentrale Positionierung geachtet werden, da bereits geringe Abweichungen zu einer Dezentrierung der Gelenkführung beitragen. Das Bewegungssegment kann dann nach distal mit der dorsal über die Ulnakante eingebrachten Fixateuranteil in Modulteknik verbunden werden (**Abb. 1**).

Die Anlage des Fixateurs in Bauchlage erleichtert die exakte seitliche BV-Einstellung der Humeruskondylen.

Der Einsatz der CAS-gesteuerten Navigation zur Positionierung des Bewegungszentrums

Die Positionierung des Bewegungszentrums unter BV-Steuerung erfordert gewisse Erfahrung und ist derzeit noch mit entsprechendem Zeitaufwand und Durchleuchtungszeit verbunden. Die Applikation des Gelenks kann durch Verwendung der computerassistierten Navigation erheblich erleichtert werden und führt zu einer deutlichen Reduktion der notwendigen BV-Zeiten. Die CAS-Navigation erfordert neben entsprechender Hard- und Software den Einsatz eines an das System adaptierten Bildwandlers, der dem Rechner einen Datensatz liefert, aus dem ein dreidimensionales Bild der anatomischen Strukturen des Ellbogengelenks generiert wird. In den einzelnen Schnittebenen des Gelenks kann dann die Ermittlung der Zentralachse des radialen und ulnaren Kondylus durchgeführt werden und die Lage des zentralen Führungsdrahts geplant werden. Die Referenzierung des Ellbogengelenks im Raum erfolgt über Referenzelektroden, die am humeralen Fixateurteil angebracht werden. Mithilfe der referenzierten Instrumente (Bohrbüchse, Bohrmaschine) kann ein Kirschner-Draht in das Zentrum der Kondylen eingebracht werden. Das zentral im Achsenteil durchbohrte Bewegungssegment wird über den liegenden K-Draht geschoben und zunächst mit dem proximalen, danach distalen Fixateurbestandteil in Modulteknik verbunden (**Abb. 2**).



Abb. 1 a bis c
a Montage des Bewegungssegments am humeralen Fixateursegment. **b** Seitliche BV-Durchleuchtung und Zentrierung der Drehachse auf die übereinander projizierten Kondylen. **c** Komplettierung der Verbindung des Bewegungssegments zum ulnaren Fixateuranteil.

Es muss streng auf die zentrale Positionierung des Bewegungszentrums über der Ellbogenachse geachtet werden, da bereits geringe Abweichungen zu einer Dezentrierung der Gelenkführung beitragen.

Bewegungsfixateure für das obere Sprunggelenk

Komplexe Verletzungen der Pilon-tibiale-Region stellen auch in Zeiten moderner, winkelstabiler und anatomischer Regionen angepasster Implantate große Herausforderungen an den Behandler. In der Kombination komplexer Gelenkflächenzerstörung mit Weichteilschaden gelingt bei diesen Verletzungen in

vielen Fällen eine interne, übungstabile Rekonstruktion nicht. Als Konsequenz hat die externe Gelenktransfixation eine erhebliche Bedeutung für diese Frakturen erlangt.

Die Achsenkinematik des menschlichen Sprunggelenks ist bis heute umstritten und wurde in verschiedenen Untersuchungen uneinheitlich betrachtet. Während dies für die interne Rekonstruktion

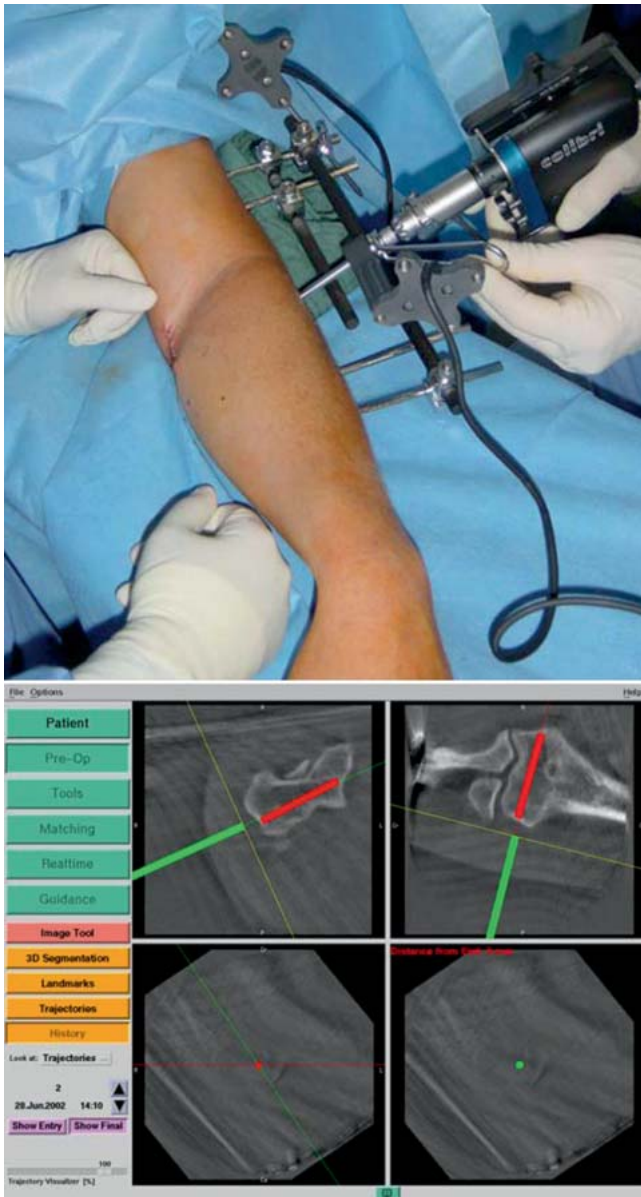


Abb. 2 Positionierung des Bewegungssegments mit navigationsgeführter K-Draht-Applikation in das Drehzentrum der radialen und ulnaren Kondyle.

humanen oberen Sprunggelenk bedarf daher erheblicher weiterer experimenteller und klinischer Untersuchung und kann bisher lediglich als klinisch experimenteller Ansatz betrachtet werden (**Abb. 3**).

Bewegungsfixateure für das Handgelenk

Frakturen des distalen Radius lassen sich auch bei komplexen Bruchformen mit exzellenten Ergebnissen mit winkelstabilen Implantaten operativ versorgen. Bei ausreichender Knochenqualität und adäquater Frakturgeometrie kann eine frühfunktionelle Nachbehandlung in Erwägung gezogen werden. Die externe Fixation hat hier ihren früher wesentlich weiteren Indikationsbereich bei Trümmerfrakturen in Kombination mit der internen Spongiosaplastik eingebüßt und kommt überwiegend zur Primärversorgung bei problematischer Weichteilsituation mit nachfolgendem Verfahrenswechsel zum Einsatz. Dies kann möglicherweise als Erklärung dienen, warum sich ein bereits 1995 von Asche [1] vorgestelltes handgelenk-überbrückendes Fixationssystem mit einer externen Bewegungsführung komplex aufeinander verschiebbarer Schalen über der proximalen Handwurzelreihe nicht durchsetzen konnte. Die Anwendung blieb auf Einzelbeobachtungen beschränkt.

Bewegungsfixateure für die Fingergelenke

Bereits 1993 wurde erstmals über einen simplen Distraktionsapparat am Interphalangealgelenk, der einen mittleren Bewegungsradius von 88° erlaubte berichtet. Diese Applikation konnte sich in den folgenden Jahren aber nicht entscheidend durchsetzen und hat erst in den letzten Jahren zu weiteren vereinzelt Veröffentlichungen über die Anwendung in wenigen Fällen geführt, ohne dass sich dieses Konzept bisher in der Klinik durchsetzen konnte.

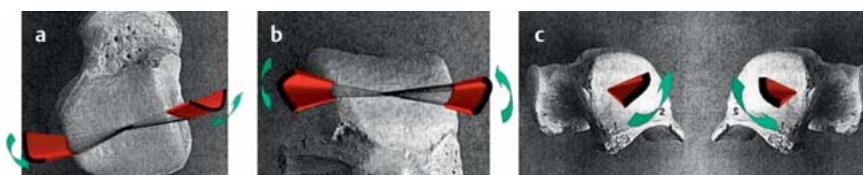


Abb. 3 a bis c Dreidimensionale Visualisierung der Achsenwanderung des OSG in der Aufsicht (a), a.-p. Ansicht (b) und Seitbetrachtung (c).

und Osteosynthese nur von untergeordneter Bedeutung ist, da hier eine exakte anatomische Wiederherstellung der Gelenkflächen gefragt ist, bekommt dieser Punkt für die externe Fixation wesentliche Bedeutung, wenn die Transfixation zu einer geführten Bewegung umgewandelt werden soll. Erste Versuche von Bottlang und Marsh mit einem

monozentrischen externen Fixationssystem zeigten erhebliche Subluxationen des Talus in der Sprunggelenkgabel. Diese Ergebnisse überraschen angesichts neuer biomechanischer Erkenntnisse nicht, die die Komplexität einer erheblich schwankenden Achse der kombinierten Roll-Gleit-Bewegung belegen. Ein Konzept geführter Transfixation am

Schlussfolgerung

Bewegungsfixateure des Ellbogens stellen eine sinnvolle Ergänzung der operativen Rekonstruktion komplexer Verletzungen dar. Ihr Einsatz ermöglicht auch bei schweren knöchernen und ligamentären Verletzungen eine frühfunktionelle Nachbehandlung. Das Konzept ist zwischenzeitlich im klinischen Alltag integriert und für fast alle gängigen Fi-

xationssysteme als ergänzendes Bewegungs-Tool oder Bodyfixateur erhältlich. Die Platzierung der Bewegungsachse über dem Drehzentrum der Kondylen unter BV-Kontrolle erfordert einige Erfahrung und ist in der Anfangsphase der Lernkurve mit längeren Durchleuchtungszeiten assoziiert. Das Konzept hat zwischenzeitlich eine Erweiterung erfahren, es werden von einzelnen Autoren größere Fallzahlen in der unblutigen Distractionsarthrolyse mit hervorragenden Ergebnissen berichtet.

Bewegungsfixateure anderer Gelenke spielen bisher im klinischen Alltag noch keine Rolle und bedürfen weiterer Untersuchungen der experimentell erarbeiteten Funktionsweisen.

Literatur

- ¹ Asche G. Die Behandlung von Speichenbrüchen in einem neu entwickelten dynamischen Bewegungsfixateur. *Z Chir* 1995; 120: 952 – 958
- ² Bottlang M, Madey SM, Steyers CM, Marsh JL, Brown TD. Assessment of elbow joint kinematics in passive motion by electromagnetic motion tracking. *J Orthop Res* 2000; 18: 195 – 202
- ³ Hall J, Schemitsch EH, McKee MD. Use of a hinged external fixator for elbow instability after severe distal humeral fracture. *J Orthop Trauma* 2000; 14: 442 – 445
- ⁴ Jupiter JB, Ring D. Treatment of unreduced elbow dislocations with external fixation. *JBJS [Am]* 2002; 84: 1630 – 1635
- ⁵ von Knoch F, Marsh JL, Steyers C, McKinley T, O'Rourke M, Bottlang M. A new articulated elbow external fixation technique for difficult elbow trauma. *Iowa Orthop J* 2001; 21: 13 – 19
- ⁶ Madey SM, Bottlang M, Steyers CM, Marsh JL, Brown TD. Hinged external fixation of the elbow: optimal axis alignment to minimize motion resistance. *J Orthop Trauma* 2000; 14: 41 – 47
- ⁷ McKee MD, Bowden SH, King, GJ, Patterson SD, Jupiter JB, Bamberger HB, Paksima N. Management of recurrent, complex instability of the elbow with a hinged fixator. *JBJS [Br]* 1998; 80: 1031 – 1036
- ⁸ Ruch DS, Triepel CR. Hinged elbow fixation for recurrent instability following fracture dislocation. *Injury* 2001; 32 (Suppl 4): SD70 – SD78
- ⁹ Schmickal T, Wentzensen A. Der Bewegungsfixateur zur frühfunktionellen Behandlung komplexer osteoligamentärer Verletzungen des Ellenbogengelenks. *Unfallchirurg* 2007; 110: 320 – 326
- ¹⁰ Schmickal T, Parekh A, Hoentzsch D, Wentzensen A, Smith W. Subtotal amputation injuries in the elbow region treated with a hinged fixator. *Orthopedics* 2007; 30: 432 – 438

Dr. med. Thomas Schmickal Chefarzt

Klinikum Neumarkt
Abteilung Unfallchirurgie
Nürnberger Straße 12
92318 Neumarkt i. d. Opf.

E-Mail: unfallchirurgie@
klinikum.neumarkt.de

Priv.-Doz. Dr. med. Alexander Schuh Leiter Research Unit Prof. Dr. med. Andreas Wentzensen Ärztlicher Direktor

Klinik für Unfall- und
Wiederherstellungschirurgie
Berufsgenossenschaftliche
Unfallklinik Ludwigshafen
Ludwig-Guttman-Straße 13
67071 Ludwigshafen