

Ingo Arnold¹

Die Endoprothetik des Handgelenks – ein positiver Ausblick

Total wrist arthroplasty – a promising prospect

Zusammenfassung: Mit der Entwicklung der 4. Generation von Handgelenk-Implantaten kann bei geeigneter Indikation gegenüber der Arthrodesis ein Zugewinn an Komfort und Funktion bei gleichzeitiger Schmerzreduktion/befreiung erreicht werden. Insbesondere RA-Patienten mit kontralateral bereits versteiften Gelenken bevorzugen die „bewegliche Lösung“, wenngleich der Bewegungs- und Kraftzugewinn nur moderat ausfällt. Wesentliche Komplikationsunterschiede zwischen degenerativen (OA) und entzündlichen Verlaufsformen (RA) lassen sich nicht nachweisen. Neuere Arbeiten zeigen günstigere Standzeiten der optimierten Prothesensysteme bei allerdings weiterhin kleinen Fallzahlen und kurzen Nachuntersuchungszeiträumen. Junge Patienten, ein hoher Belastungsanspruch, insuffizienter Knochenstatus oder erhebliche radiokarpale Instabilitäten stellen weiterhin eine Kontraindikation dar.

Schlüsselwörter: Arthrodesis Handgelenk, Rheumatoide Arthritis, Totalendoprothese Hand, Übersicht Handgelenk-TEP, Kinematik Handgelenk

Zitierweise

Arnold I: Die Endoprothetik des Handgelenks – ein positiver Ausblick. OUP 2017; 10: 494–503 DOI 10.3238/oup.2017.0494–0503

Summary: With the development of the 4th generation of wrist implants, an improvement in comfort and function while at the same time relieving pain can be achieved with suitable indication against the arthrodesis. In particular, RA patients with contralateral stiffened joints prefer the „mobile solution“, although the movement and power gain is only moderate. Significant complication differences between degenerative (OA) and inflammatory progression forms (RA) cannot be demonstrated. Recent studies show more favorable outcomes and implant survival of the optimized prosthetic systems, but still small case numbers and short follow-up periods underline the necessity of long-term data. Young patients, a high stress claim, insufficient bone status or significant radiocarpal instabilities continue to be a contraindication. Additional prospective studies are needed to compare outcomes of wrist arthrodesis with those of TWA with current implants.

Keywords: total wrist fusion, rheumatoid arthritis, total wrist arthroplasty, review, biomechanics

Citation

Arnold I: Total wrist arthroplasty – a promising prospect. OUP 2017; 10: 494–503 DOI 10.3238/oup.2017.0494–0503

Einführung

Seit Jahrzehnten ist die Entwicklung von Handgelenkprothesen immer wieder durch vielerlei Fehlschläge begleitet gewesen und wird daher bis heute von vielen Operateuren zugunsten der Arthrodesis abgelehnt. Die Hauptindikation zur Implantation einer Endoprothese am Handgelenk ist weiterhin der sekundär arthrotische postentzündliche Befall bei der Rheumatoiden Arthritis (RA), insbesondere bei schmerzhaft destruierten Handgelenken mit gutem Knochenlager. Weniger die instabilen Verläufe (Typ 3 n. Simmen [33]), sondern die Destruktionstypen 1 und 2 mit

intakten Hand- und Finger motoren stellen eine gute Indikation für die prothetische Versorgung dar. Deutlich seltener wird der Handgelenkersatz bei degenerativer Radiokarpalarthrose (z.B. CPPD Arthropathie) oder auch posttraumatischer Radiokarpalarthrose nach Radiusfraktur durchgeführt. Bei SLAC-Wrist (Scapho lunate advanced collapse) oder SNAC-Wrist (Scaphoid non union advanced collapse) ist bis Stadium III ein Erhalt der Beweglichkeit durch eine mediokarpale Teilarthrodese möglich.

Gleiches gilt für die Lunatum-Malazie, wobei ggf. die Radiusverkürzung in den Anfangsstadien oder im Stadium III die proximale Row Carpectomie (PRC)

die Methode der Wahl ist, da die Fossa lunata des Radius noch eine intakte Gelenkfläche aufweist. Erst bei vollständiger radiokarpaler Arthrose ist ggf. die Panarthrodese, alternativ auch die Totalendoprothese, bei entsprechendem Leidensdruck indiziert. Die bewegliche Lösung i.S. der Handgelenkarthroplastik bleibt im Vergleich zum Hüft- oder Kniegelenkersatz aber weiterhin eine selten durchgeführte Prozedur. So wurden in Norwegen 2016 über 8000 künstliche Hüft-TEPs und mehr als 6000 Knie-TEPs eingesetzt, aber nur 34 Handgelenkprothesen implantiert [28]. Ähnliche Relationen zeigen auch die angelsächsischen Register. Im Gegensatz zu einer

¹ Klinik Orthopädie und operative Rheumatologie, Rotes Kreuz Krankenhaus, Bremen



Abbildung 1a–c Biaxial-anatomische Handgelenkendoprothesen. Die neueste Entwicklung: Freedom (Fa. Integra/Argomedical **a**), als deren Vorgänger die Universal 2 (Fa. Integra/KMI) **b**), ReMotion (Fa. SBI/Stryker) **c**)

generellen Abnahme rheumaorthopädischer Eingriffe infolge einer besseren Krankheitskontrolle im Zeitalter der Biologika ist allerdings in Skandinavien ein leichter Anstieg implantierter Totalendoprothesen des Handgelenks bei RA-Patienten zu verzeichnen. Dieses Vorgehen konkurriert mit der kompletten Versteifung des Handgelenks, insbesondere im Rahmen komplex destrukturierter und instabiler radiokarpaler Situationen (Writhington Stadium 3), welche weltweit in vergleichbaren Fällen durchschnittlich 5x häufiger favorisiert wird.

US-amerikanische Versicherungsdaten des Jahres 2015 bestätigen diese Relation [22]. Dort kamen auf 1765 Handgelenkarthrosen 410 Endoprothesen zur Abrechnung. Die weiterhin vielfach propagierte Panarthrose des Handgelenks stellt allerdings keineswegs ein durchweg komplikationsarmes und sicheres Verfahren dar. In einer Nachuntersuchung aus dem Jahre 2003 von de Smet und Truyen [9] fand sich ein schmerzfreies Resultat nach Ablauf von 4 Jahren nur in unter 20 % der Patienten. 30/36 Patienten hatten noch 4 Jahre nach Arthrodese Schmerzen.

Field et al. [11] berichten über eine Komplikationsrate von 40 %. Hierzu zählten Sehnenadhäsionen oder -rupturen, sekundäres Karpaltunnelsyndrom, Wunddehiszenz und Infektion, komplexes regionales Schmerzsyndrom, hardwarebezogene Fraktur und Hämatom, ggf. non-union. Die Patienten zeigten sich zwar subjektiv nach der Handgelenk-Fusion zufrieden mit Blick auf erreichte Schmerzlinderung, jedoch fan-

den sich bei 14 von 22 am Handgelenk fusionierten Patienten noch Beschwerden. Zudem wiesen alle Patienten relativ schlechte funktionelle Scores auf. Die Bewegungsumfänge der Fingergrundgelenke und des Daumens verschlechterten sich und nur 50 % der operierten Patienten kehrten zu ihrer ursprünglichen Beschäftigung zurück. Murphy et al. [26] verglichen 24 Arthrosen mit 27 Arthroplastien innerhalb eines Zeitraums von 1–5 Jahren. Obwohl sich keine statistisch signifikanten Unterschiede für den PRWE (Patient Related Wrist Evaluation) und DASH Score (Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand) ergaben, fiel den TEP-Patienten die Verrichtung ihrer alltäglichen Bewegungsabläufe leichter. 22 der fusionierten Patienten favorisierten rückblickend trotz verbesserter Schmerzen wieder ein bewegliches Handgelenk.

Man kann daher nicht argumentieren, dass die Arthrodese des Handgelenks ein problemloses und überwiegend befriedigendes Verfahren darstellt, dessen einziger Nachteil der Verlust der Beweglichkeit ist. Insbesondere der RA-Patient, mit multiplen Gelenkerstörungen und den fehlenden Kompensationsmöglichkeiten der Nachbargelenke, profitiert entscheidend von einer mobilen Handgelenkrekonstruktion mit Erhalt der feinmotorischen Gebrauchsfähigkeit der Hand. Auch andere, insbesondere bei degenerativen radiokarpalen Veränderungen, angewandte Verfahren wie die Resektionsarthroplastik (proximal Row Carpectomy) oder partielle Arthrosen mit Erhalt einer kar-

palen Restbeweglichkeit überzeugten im Langzeitverlauf nicht ausnahmslos. Zudem ist bei Vorliegen einer Mediokarpalarthrose die Durchführung einer radiolunären oder radioskapholunären Fusion kontraindiziert.

Trotz des Patientenwunschs nach einer beweglichen Versorgungsmöglichkeit zeichnete sich die Entwicklung der Handgelenkendoprothetik seit Einführung der ersten achsgeführten metallischen Implantate 1969 [15] durch zahlreiche Fehlschläge aus. Das Hauptproblem hierbei stellt die komplexe Anatomie und Biomechanik des Handgelenks dar, welche arthroplastisch nur sehr schwierig imitiert werden kann. So verwundert es nicht, wenn die 1988 von Mallory getroffene Aussage „all prostheses will fail sometime. It is a race between the life of the patient and the life of the prosthesis“ [21] für den ursprünglichen Bezug des Hüftgelenkersatzes kaum noch gilt, für das künstliche Handgelenk aber weiterhin von großer Bedeutung bleibt. Die schwierige und komplexe Anatomie des Handgelenks führte bei den verschiedenen Entwicklungen zu sehr unterschiedlichen Wegen, welche jedoch häufig in Sackgassen führten. Die Panarthrose des Handgelenks ist, verglichen mit der Coxarthrose oder Gonarthrose, viel seltener. Ein ähnlich einheitliches Konzept, wie bei der fundierten Weiterentwicklung von Hüft- und Kniegelenkendoprothesen, war damit für das Handgelenk schwierig umzusetzen. In den letzten Jahren jedoch gab es diesbezüglich erhebliche Fortschritte und wir blicken in-

zwischen auf die 4. Generation von Prothesenmodellen. So ist die Implantation einer Handgelenkprothese nicht mehr lediglich dem besonderen Einzelfall vorbehalten, sondern die Indikationen wurden in den letzten Jahren deutlich ausgeweitet und standardisiert.

Anatomie und Biomechanik

Der Karpus befindet sich im ständigen Konflikt zwischen Mobilität und Stabilität. Letztere wird durch das komplexe Zusammenspiel zwischen knöchernen und ligamentären Komponenten bestimmt. Die ligamentäre Stabilisierung erfolgt durch extrinsische Bänder (radiokarpale Bänder, V-Bänder, TFCC-Komplex des distalen Radioulnargelenks) und intrinsische Bänder (tief, interossär angeordnet). Dabei ist die Stabilisierung palmar bedeutend kräftiger als dorsal. Weiterhin wird die Stabilität des Gelenks durch einen Knochenrand auf der dorsoradialen Seite und eine palmare Knorpellippe verstärkt. Hauptsächlich wird das Handgelenk über den Zug der Unterarmmuskulatur longitudinal komprimiert. Hierbei erfolgt die Kraftübertragung vom Capitatum auf das Scaphoid und Lunatum und von dort auf den Radius. Die auf die Fingerspitzen einwirkende Kraft verzehnfacht sich bis zum Übertrag auf das Handgelenk und kann mehr als 500 kg bei einem erwachsenen Mann erreichen [30]. Dabei wird der Kraftfluss in eine Querdehnung der proximalen Handwurzelreihe umgewandelt. Die inhärente knöcherne Stabilität der Handwurzel ist minimal und demzufolge auch sehr vulnerabel gegenüber RA-assoziierten entzündlichen Destruktionen. Physiologisch bewirkt der Kraftfluss eine Translation des Karpus und Abkippen der proximalen Handwurzel mit einer Verkürzung des scaphoidalen Hebelarms durch Flexion desselben und gegensinnigem Aufstellen des Lunatums durch Extension (DISI-Stellung). Jegliche Sehnenansätze sparen die proximalen Karpalia aus, sodass deren Bewegungsmuster allein den mechanischen Kräften entspringt. In Neutralstellung erfolgt die radiokarpale und ulnokarpale Kraftübertragung im Verhältnis 80:20 %. Das DRUG nimmt 40 % des axialen Kraftflusses auf.

Die Bewegung des Handgelenks erfolgt ohne konstante Achse. Kinema-

tisch können sich jeweils die 2 Bewegungsebenen der Sagittalebene (physiologische Palmarflexion bis 80°, Dorsalextension 45°) und der Frontalebene (Radialabduktion 35°, Ulnarabduktion 45°) zirkumduktorisch koppeln. Auf diese sogenannte Dartwurfbewegung (DTM) wurde in jüngster Zeit viel Aufmerksamkeit gelegt, ist diese doch exklusiv für den Menschen vorbehalten [31]. Dabei kommt dem Midkarpalgelenk die größte Bedeutung zu. Dessen Freiheitsgrad sich nicht über eine koronare, sondern über eine schiefe Ebene definiert [25]. Diese komplexe Bewegungskopplung von radiodorsal nach ulnovolare stellt gleichsam auch die Problematik für die Entwicklung der Handgelenkprothetik dar. Youm [39] hat in seinen Untersuchungen sehr genau das Bewegungszentrum des Handgelenks detektieren können. Es liegt zentral im Kapitatum für die Radial/Ulnaradduktion und etwas proximaler für Extension/Flexion; zur Schaftachse des Radius betrachtet etwas ulnar und palmar.

Das Handgelenk benötigt zur effizienten Verrichtung der „activities in daily living“ eine Funktion mit einer ROM von 35° Extension/Flexion, 15° Ulnarabduktion sowie auch 10° Radialabduktion.

Die Entwicklung der Handgelenkendoprothetik

Historisch betrachtet begann die Entwicklung 1967 mit den von Swanson eingeführten Silasticspacern. Zwei Jahre später entwickelte Gschwend achsgeführte Prothesen aus Metall und Meuli [24] erhoffte sich eine Optimierung der Verankerung durch das Kugelgelenkprinzip. „Seine“ MWP-Prothese wurde von 1980 bis 1995 3-mal verändert, ohne dass die Lockerungsproblematik zufriedenstellend reduziert werden konnte. Durch die langen Schaftanteile für die Metakarpalia sollte eine bessere Hebelwirkung, sowie eine festere Verankerung erreicht werden. Tatsächlich erhöhten sich dadurch allerdings die Scherkräfte und führten zu einem Ausbrechen der Schaftanteile. Auch versagte das Prinzip der Kugelgelenke, weil die kleinen Gelenkflächen die Kräfte nicht ausbalancieren konnten.

Zeitlich parallel ging Volz in den USA [37] einen anderen Weg und ver-

suchte auf jede Art von Koppelung der Prothese zu verzichten und reduzierte die 3-dimensionale Kinematik des physiologischen Handgelenks auf eine biaxiale Bewegung i.S. des Roll/Gleitens (biaxiale Prothesen). Damit gelang es, die Stabilität zu verbessern und vor allem den Stress auf das Protheseninterface zu reduzieren. Retrospektiv versagte diese AMC-Prothese aufgrund einer unzureichenden Rekonstruktion des Drehzentrums und einer unphysiologischen Balancierung der Kräfte. Dennoch war durch die Entwicklung der biaxialen Gelenkflächen ein wesentlicher Schritt zur Verbesserung im Prothesendesign erreicht worden. Die Biax-Prothese von Beckenbaugh [7] verringerte durch die Verwendung leicht inkongruenter axialer Gelenkflächen die weichteilige Imbalance und damit auch einen vermehrten Polyethylenabrieb prädisponierende Kräfte. Trotz Verbesserungen im Prothesendesign und dem Wechsel auf unzementierte Verankerungstechniken konnten auch diese Modelle nicht überzeugen [19]. Es gelang diesen Prothesentypen nicht, den anatomischen Gelenkdrehpunkt zu rekonstruieren. Die Gelenkkopplung reduzierte die Bewegungsachsen auf 2 Ebenen und konnte damit nicht das natürliche Übergewicht der radialeseitigen Handgelenkstrecker und -beuger ausbalancieren. Alnot [12] war es, der eine Verbesserung der hohen karpalen Auslockerungsraten durch Verschraubungen der distalen Prothesenkomponente empfahl. Inzwischen wissen wir, dass eine verlässliche interkorporelle Fusion des Karpus die Ergebnisse noch optimiert. Um die Ausbildung eines stabilen Os carpale zu erreichen ist es sinnvoll, die Gelenkflächen der verbliebenen distalen Handwurzelknochen auszufräsen und ggf. eine autologe Spongiosaplastik durchzuführen. Mit Hilfe eines kortikospongiösen Spans aus dem Beckenkamm lässt sich insbesondere bei rheumatischen Handgelenken auch suffizient die karpale Höhe und damit die Vorspannung der Sehnen rekonstruieren.

Biaxial anatomische Prothesen der 4. Generation

Die 4. und aktuelle Generation von Implantaten erfordert eben diese von Alnot inaugurierte Schraubenfixierung



Abbildung 2a Modularer Aufbau des Maestro Wrist Reconstructive System (Fa. Zimmer Biomet)

zum Karpus, mit einer porösen Oberfläche, um die Osseointegration für unzementierte Implantate zu erhöhen. Durchführbar ist die Implantation mit oder ohne Zement, im Gegensatz zu früheren Generationen, die nur für die Implantation mit Zement zugelassen waren. In Europa gebräuchlich sind: Neuerdings die Freedom (Fa. Integra, Abb. 1a), als Vorgänger die Universal-II-Prothese (Fa. Integra/KMI, Abb. 1b) und die ReMotion-Prothese (Fa. SBI/Stryker, Abb. 1c) sowie die Maestro-TEP (Fa. Zimmer Biomet, Abb. 2a, b). Die 1988 von Menon [23] eingeführte Universal/UTW

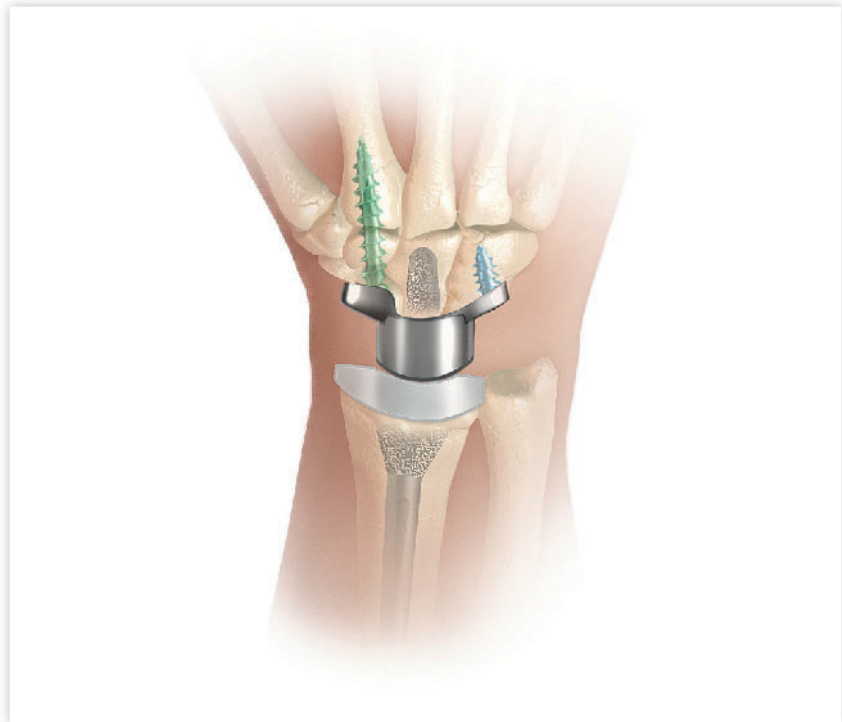


Abbildung 2b Maestro Handgelenk-TEP in situ

2 wurde 2003 weiterentwickelt. Dabei wurde das ursprüngliche Prothesendesign von Menon durch Grosland, Rogge und Adams [14] nach umfangreicher Implantatanalyse optimiert und als Universal II Prothese auf den Markt gebracht. Bei der Biax Prothese wirkte die Radialisierung des Karpus, bedingt durch die waagerechte Osteotomie des Radius, ästhetisch störend.

Durch ein Angleichen der radialen Komponente an den natürlichen radiolunären Gelenkflächenwinkel wurde dieses Problem gelöst. Um die Prothesenstabilität zu erhöhen, erfolgte eine Vergrößerung der radialen Komponente mit reduzierter radialer Inklination von 20° auf 14°. Darüber hinaus wurde der zwischengeschaltete Polyethylenkern von einem toroidalen Ringkerndesign hin zu einer mehr ellipsoiden Form verändert. Sie basiert auf den wesentlichen physikalischen Erkenntnissen von Grosland [14]. Er hat nachgewiesen, dass eine toroide, d.h. kreisförmige Form der korrespondierenden Gelenkflächen gegenüber einer ellipsoiden Form zwar eine stabilere Verbindung und in allen Bewegungsebenen großflächigere Artikulation ergibt, dadurch erhöht sich aber auch der PE-Abrieb. Dem wird aktuell begegnet, indem die Gelenkfläche nun

radioulnar toroid geformt ist und sich dorsopalmar ellipsoid gestaltet. Eine toroide Modellierung der Gelenkflächen in beiden Ebenen erhöht die Gefahr eines edge loadings. Extension und Flexion selbst führen nun zu einer leichten Inkongruenz der Gelenkflächen. Zudem hat die Prothese jetzt eine raue Porous-Coat-Beschichtung, um die Osteointegration zu verbessern.

Um den Ellenkopf fakultativ erhalten zu können, ist der ulnare Kragen der proximalen Komponente abgeschragt, denn durch eine notwendige Ulnakopfresektion ergeben sich nicht selten Komplikation wie Schmerzen und Instabilität im DRUG. Das Polyethylen ist fest mit der Platte der distalen Komponente verankert. Die radiale Komponente ist parallel zur vorhandenen Gelenkfläche geschnitten, berücksichtigt den natürlichen radiolunären Gelenkflächenwinkel und reduziert das Problem einer ungünstigen Radialisierung der Sehnen-spannung. Aktuell auf dem Markt ist die Freedom Prothese (Fa. Integra, Abb. 1a), die als Nachfolger eine Weiterentwicklung der Universal 2 darstellt. Das Instrumentarium gestattet es, die Präparation der proximalen Komponente im Radius sehr sparsam und exzentrisch durchzuführen. Der initiale Eintritts-

Implantat	Autor	Komplikationsrate	Radiologische Lockerung, Osteolysen, Sinterung
Universal	Ward 2011	21 % (5/24)	50 % (12/24) (9/12 revidiert)
Universal 2	Morapudi 2012	43 % (9/21)	0 % (0/21)
	Ferreres 2011	14 % (3/21)	14 % (3/21)
	Gil 2017	7,7 % (3/69)	7,7 % (3/69)
Biaxial	Harlingen 2011	68,7 % (22/32)	69 % (22/32) (ohne Revision)
Remotion	Boeckstyns 2013	11 % (7/65)	30 % (17/57)
Motec	Reigstad 2012	43 % (13/30)	20 % (6/30)
Maestro	Nydick 2012	30 % (7/23)	0 % (0/23)

Tabelle 1 Häufigkeit von Komplikationen nach Handgelenk-TEP

punkt befindet sich typischerweise unterhalb des Tuberculum listeri im dorso-ulnaren Quadranten der Fossa scaphoidea. Die karpalen Polyethylenkomponenten gibt es für jede Implantatgröße in 3 Stärken.

Das Prinzip der ReMotion-Endoprothese von Cooney (Mayo) und Gupta (Louisville) ähnelt dem der Universal II Prothese mit einer doppelten distalen Schraubenfixation, titanbeschichteten Cr-Co-Komponenten und einem ellipsoiden Polyethyleninsert, welches jedoch eine 10°-Relativbewegung zur karpalen Basisplatte zulässt. Dies erfolgt unter der Vorstellung einer zum einen reduzierten Scherkräfteeinleitung in die metallene Karpuskomponente, zum anderen zur Ermöglichung komplexer Flexions-Rotationsbewegungen (Optimierung der multiplanaren Dartwurfbewegung). Das Implantat weist die geringste Knochenresektion im Vergleich zu allen anderen Prothesen auf und eine knöcherne Resektion im Bereich der Radiusmetaphyse ist nahezu entbehrlich, um den Bandapparat und seine propriozeptiven Elemente nicht zu diskriminieren. Eine diaphysäre Pressfit-Verankerung ist allerdings nicht möglich. Dadurch limitiert die Implantation bei metaphysären Pathologien. Als Vorteil erweist sich die nicht notwendige Resektion des Ulnaköpfchens. Die Bewegungsachse ist gegenüber dem Schaft leicht

palmar versetzt. Eine eingeschränkte Varianz der PE-Stärken kompensiert den resektionsbedingten karpalen Höhenverlust allerdings nur bedingt und kann als Komplikation zu einer schmerzhaften Impingement-Symptomatik im radialen Kompartiment des Handgelenks (Funktionsverlust bei Radialduktion) aufgrund eines zu geringen radiokarpalen Abstands bei liegender Endoprothese führen.

Back to the roots ? Das inverse „Ball-in-socket“-Prinzip

Die insbesondere im angloamerikanischen Sprachraum sehr populäre MAESTRO Handgelenkendoprothese (Abb. 2) unterscheidet sich deutlich von dem biaxial-anatomischen Prothesendesign. Diese ist ein modular-ungekoppeltes, nicht zementiertes, titanbeschichtetes Implantat mit karpaler Stem-Verankerung im Rotationszentrum der Hand. Das radial tief ausgezogene PE-Inlay soll die Luxationsgefahr minimieren helfen. Die karpalen Komponenten ohne oder mit 3 variablen Kahnbeinaugmenten gewährleisten eine effiziente Abstützung auch für den Fall einer evtl. erforderlichen kompletten Kahnbeinresektion. Fakultativ erlaubt die Prothese die Resektion der ge-

samten proximalen karpalen Reihe. Vier radiale Schaftgrößen ermöglichen ein diaphysäres Pressfit und damit auch die Implantation bei vorbestehenden intraossären Destruktionen der Radiusmetaphyse. Der Hauptunterschied zwischen der Maestro-TEP und den anderen beiden aktuellen Prothesen ist, dass – ähnlich wie bei der erfolgreichen Hüftgelenkendoprothetik – das Polyethylen konkav geformt ist. Es wird mit der proximalen Komponente verriegelt. Die distale Komponente wird in ähnlicher Weise wie bei den anderen gebräuchlichen Modellen durch einen porösen zentralen Zapfen fixiert. Radial und ulnar steht eine mono- oder polyaxiale winkelstabile Fixation zur Verfügung. Die Prothese zeichnet sich durch eine große Off-set-Varianz aus. Das biomechanische Prinzip entspricht wieder einem Kugelgelenk mit umgekehrter Ball- und Socket-Artikulation von Meuli. Eine aktuelle kinematische In-vitro-Analyse an Handgelenkpräparaten der Mayo Clinic mit und ohne Maestro-TEP zeigte lediglich eine leichte ulnare Verschiebung in der radioulnaren Achse bzw. nach volar und proximal für die Extensions-/Flexionsbewegung ohne wesentliche Beeinträchtigung der Biomechanik mit guter Stabilität im Vergleich zum nativen Handgelenk [18].

Outcome der „neuen“ Prothesengeneration

Im Zusammenhang mit einer kritischen Beurteilung der Handgelenkendoprothetik wird noch häufig die Veröffentlichung von Cavaliere und Chung [6] angeführt. Sie verglichen die Komplikationsraten von Arthroplastik (30 %) mit denen nach einer Arthrodesse. Aber bereits Murphy [6] fand in seinem Vergleichskollektiv vor über 10 Jahren, dass aufgrund erheblicher funktioneller Vorteile (körperliche Hygiene) die meisten Patienten eine bewegliche Lösung favorisierten.

Mit einem Ersatz des rheumatisch zerstörten Handgelenks lässt sich immerhin eine Reduktion der im Vergleich zum Gesunden um den Faktor 10 erhöhten Belastungsspitzen auf das 4- bis 5-fache im Finite-element-Modell nachweisen. Dabei verschiebt sich die Spannungsverteilung von ulnar nach radial und in Richtung Trapezium [4].

Implantat	Autor	Anzahl	nicht erreicht/ verstorben	Standzeit
Universal	Ward 2011	24	5	75 % für 5 Jahre
Universal2	Morapudi 2012	21	3	100 % für 3–5 Jahre
	Ferreres 2012 Badge 2016	95	6	91 % für 7–8 Jahre
Remotion	Boeckstyns 2013	65	8	90 % für 6 Jahre
Biaxial	Krukhaug 2011	90	NA	85 % für 5 Jahre
	Harlingen 2011	40	1	81 % für 7 Jahre
Motec	Krukhaug 2011	76	NA	77 % für 4 Jahre
	Reigstad 2012	30	1	93,3 % für 6 Jahre
Elos	Krukhaug	23	NA	57 % für 5 Jahre
Maestro	Nydick 2013	23	0	95,7 % für 2–3 Jahre
Alle Prothesen				57–100 % für 5 Jahre

Tabelle 2 Häufigkeit von Komplikationen nach Handgelenk-TEP, aktualisiert nach [38]

Wesentliche Erkenntnisse biomechanischer Prinzipien reflektieren das Design der angeführten „neuen“ Prothesen. Eine verlässliche Rekonstruktion des Rotationszentrums ist eine uneingeschränkte Voraussetzung für das Funktionieren und die Stabilität des Implantats. Die früheren Probleme der Instabilität und Dislokation lassen sich durch Einhaltung dieses Prinzips relevant verringern. Ein Blick in die Zukunft bleibt dem Leser allerdings verwehrt, sodass keine Entscheidung für oder gegen ein konkav-konvexes, mehr ellipsoides Artikulationskonzept oder aber dem eines Kugellager derzeit getroffen werden kann. Eine möglichst modulare Komponentenauswahl erleichtert dem Operateur das Balancieren der Weichteile.

Auch das Ausmaß der für die Implantation erforderlichen Knochenresektion ist erheblich reduziert worden, indem z.B. bei der ReMotion die radiale Komponente lediglich einen Gelenkflächenersatz darstellt und keine Ulnakopfresektion erforderlich ist. Eine sparsame Knochenresektion unter Schonung der Bänder mit entsprechendem Erhalt der Propriozeption erhöht die intrinsische Stabilität und schafft eine im Revisionsfall bessere Ausgangslage für eine evtl. notwendige sekundäre Arthrodesse. Dieser Umstand sollte immer mit bei der Indikationsstellung zur Hand-

Nahezu exakte Rekonstruktion des Rotationszentrums
Reduktion der auf den Karpus einwirkenden Kräfte (beim Grobgriff in Extension und ansonsten bei Pro- und Supination)
Stabilisierung des distalen radio-ulnaren Gelenkes (DRUG)
Weichteil-Balancierung der vorbestehenden „physiologischen Imbalance“
Suffiziente Vorspannung der Sehnen durch Rekonstruktion der karpalen Höhe
Restauration eines Bewegungsspielraums von 30° Extension und 30° Flexion mit ausreichender Straffheit der Extension

Tabelle 3 Bedingungen für den langfristigen Erfolg des endoprothetisch versorgten Handgelenks bei RA Patienten [nach 1]

gelenkendoprothese bedacht sein, da eine Revision zur sekundären Arthrodesse unter Rekonstruktion der karpalen Höhe kaum ohne Knocheninterponat auskommen wird. Der autologe Ersatz von Spongiosa aus dem Beckenkamm ist natürlich begrenzt und bei multiartikulär betroffenen RA-Patienten meistens bei vorangegangenen operativen Interventionen bereits verwendet worden. Im Hinblick auf die Lockerungsproblematik hat sich, ähnlich wie bei der Arthroplastik des oberen Sprunggelenks, die zementfreie Technik durchgesetzt.

Aufgrund der geringen Größe der Knochen am Handgelenk und der be-

grenzten Menge ortsständiger Spongiosa bei zu erwartenden, erheblich einwirkenden Kräfte, scheiterte die Zementimplantation, insbesondere im Bereich der Handwurzel. Als technisch schwierig erwies sich in der Vergangenheit die Implantation der karpalen Prothesenkomponente der Biax-Prothese, die eingeschlagen wird ohne Fixierung durch Schrauben, was zur Lockerung der karpalen Komponente führte. Eine suffiziente interkarpale Fusion nach den Vorstellungen eines „Solid-blocks“-Prinzips erhöht die Primärstabilität zusammen mit einer „porous coated“ Basisplatte und winkelstabiler Schraubenfi-

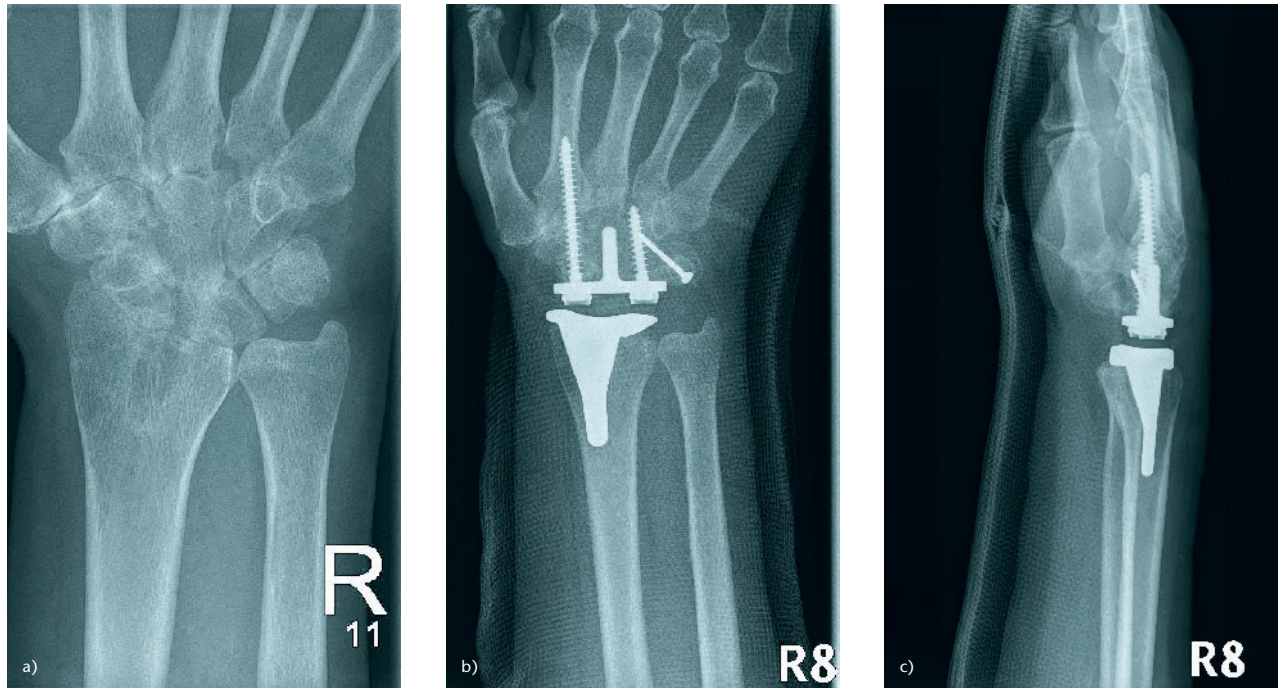


Abbildung 3a–c 47-jährige Patientin mit langjähriger rheumatoider Arthritis, Basistherapie mit Tocilizumab und low-dose Prednisolon 5 mg, DAS 28 3,1. Bilateraler Handgelenkbefall Typ Wrightington 3 mit großer Mannerfelt Krypte zentraler Radius **a)**, postoperatives Röntgenbild nach Versorgung mit Freedom Handgelenkendoprothese im Castverband, ap **b)** und seitl. Projektion **c)**

xation. Zudem sollte das Metacarpale 2 nur an der Basis erreicht werden, um lange Hebelarme zu vermeiden. Das sehr mobile Carpometacarpal-4-Gelenk sollte nicht in die Fixationsstrecke einbezogen werden (Abb 3a–c).

Weiterhin schwierig ist ein Vergleich der Ergebnisse und Komplikationen der unterschiedlichen Prothesen wegen der geringen Fallzahl, unterschiedlichen Nachuntersuchungskriterien und häufig nur kurzen NU-Zeiträumen. Auch wurden bei der häufig im Rahmen der RA mit durchgeführten Ulnaköpfchenresektion ganz verschiedenen Stabilisierungstechniken angewandt. Es fehlen weiterhin längerfristige Nachuntersuchungen mit höheren Fallzahlen. Auch ein Blick in die Register hilft nicht immer weiter. So umfasst das Norwegische Endoprothesenregister nur unzureichend die 3 in den USA bevorzugten und FDA-zugelassenen Systeme Universal 2 (KMI, San Diego, CA), ReMotion (SBI, Morrisville, PA) und Maestro (Zimmer Biomet, Warsaw, IN). In Norwegen korrelierte einzig das weibliche Geschlecht negativ mit der Prothesenstandzeit. Es fand sich diesbezüglich eine 3-fach höhere Revisionsrate [20]. Keinen Unterschied im Hinblick für Re-

visionen ergab der Vergleich zwischen RA und anderen Ätiologien.

Insgesamt stellen sich die aktuellen Ergebnisse der Handgelenkendoprothetik, verglichen mit der Vergangenheit, deutlich komplikationsärmer dar. So ist ersichtlich, welche eminenten Verbesserungen die neueren Modelle der Handgelenkprothesen mit sich gebracht haben.

Kürzlich veröffentlichte van Winterswijk [36] seine ausschließlich RA-Patienten adressierende Erfahrungen mit der Universal 2 nach einem Follow-up von durchschnittlich 46 Monaten bei 15 Patienten (17 Handgelenke, 8 Universal 1 und 9 Universal 2). Die klinischen Ergebnisse waren gut, die Schmerzen und die DASH-Punktzahl wurden reduziert und ein Anstieg des ROM (von 68° auf 91°) wurde beobachtet. Es fanden sich 2 Komplikationen, eine frühe Dislokation (stabil nach geschlossener Reposition) und eine distale Lockerung.

Eine retrospektive Fallserie aus diesem Jahr über einen 9-Jahres-Zeitraum von 2002–2014 (69 Patienten, davon RA n = 29, JIA n = 1 und PsA n = 1) derselben, zementfrei implantierten TEP von Weiss et al. [13] detektierte eine nicht revidierte Implantat-Lockerung bei 3

(7,7 %) Patienten ohne weitere Komplikationen. Die geschätzte Kaplan-Meier-Überlebensanalyse für die kumulative Wahrscheinlichkeit einer Revisionsfreiheit wurde mit 78 % (95%-KI, 62–91 %) nach 15 Jahren angegeben. Der ROM betrug präoperativ 34° und postoperativ 38°. Der Schmerz wurde hochsignifikant reduziert. Ebenfalls ausschließlich RA bezogene retrospektive Fallzahlen nach Universal 2 Implantation lieferten Pfanner [29] für 22 Patienten (NU von 2003–2014). In 6 Fällen (26 %) war immerhin eine Revision erforderlich, wobei 2-mal mit einem Austausch der karpalen Komponente auszukommen war. Mehrere Veröffentlichungen beschäftigen sich mit Fällen von radiologischer Lockerung ohne Symptome [10, 35].

Für alle angeführten Fallserien sollte allerdings immer ein gewisser Bias in der Interpretation berücksichtigt werden. So wurde doch gerade bei jungen und aktiven Patienten (jünger als 65 Jahre) die Arthrodesis als Verfahren bevorzugt und überwiegend ältere, postentzündliche Verläufe wurden mit einer TEP versorgt. Ebenfalls neuere Daten für die Universal 2 lieferte Badge [3]. Er versorgte 95 RA-Patienten arthroplastisch und erzielte eine kumulative Revisionsfrei-

heit von 91 % (95%-KI, 84–91 %) innerhalb von 7,8 Jahren. Von 2 Wundinfektionen und einer Luxation sowie immerhin noch 9 Patienten mit Schmerzen wurde berichtet.

Für die ebenfalls biaxial-anatomisch konzipierte ReMotion-Prothese hat Herzberg [16] die ersten Ergebnisse in einer Reihe von 20 Handgelenken bei 19 Patienten (durchschnittlich 56 Jahre alt) für mehr als ein Jahr (durchschnittlich 2,7 Jahre) veröffentlicht. 13 Handgelenke waren durch entzündliche Arthritis zerstört worden, 7 hatten degenerative Arthritis anderer Ätiologie. Die klinischen Ergebnisse waren recht gut, es wurden keine Revisionen durchgeführt, obwohl bei 2 Patienten eine Lockerung der proximalen oder distalen Komponente beschrieben wurde. Die RA-Patienten profitierten hinsichtlich einer Zunahme des Bewegungsumfanges deutlich (Steigerung auf 71°). Dagegen fand sich in der Gruppe der degenerativ erkrankten Handgelenke eine leichte Abnahme (49°). Auch die Griffstärke verbesserte sich von 7 auf 11 kg in der postentzündlich betroffenen Gruppe. Nicoloff [27] beschrieb bei seinen mittelfristigen 5-Jahres-Ergebnissen mit 3 Prothesenmodellen (41 % RA-Patienten) bei 162 Patienten dagegen eine leichte Verringerung des Bewegungsausmaßes bei den Patienten mit einer rheumatoiden Arthritis, während es sich bei Patienten mit Vorliegen anderer Krankheitsbilder verbesserte. In beiden Patientengruppen fand sich eine deutliche Kraftsteigerung. Insgesamt zeigte sich eine Komplikationsrate bei einer Standzeit von durchschnittlich 5 Jahren von 3,7 %. Der Ausbau einer Handgelenkprothese und eine sekundäre Arthrodesen waren in keinem Fall erforderlich. 86 % der Patienten erreichten gute und sehr gute Ergebnisse (Quick-Dash-Score, Clayton-Score). 4 % der Prothesenversorgungen wurden als schlecht bewertet. Bei der aktuellen Untersuchung waren 74 % der Patienten schmerzfrei, bzw. klagten 14 % über leichte Schmerzen, 4 % über mäßige und 8 % über deutliche Schmerzen. Im Zusammenhang mit der ReMotion-Handgelenkprothese berichteten Boeckstyns (Kopenhagen) und Herzberg (Lyon) [5] allerdings über eine hohe Rate periprothetischer Lysesäume > 2 mm (16 radial und 7 auf der karpalen Seite) nach 3 Jahren (n = 44), ohne dass sich

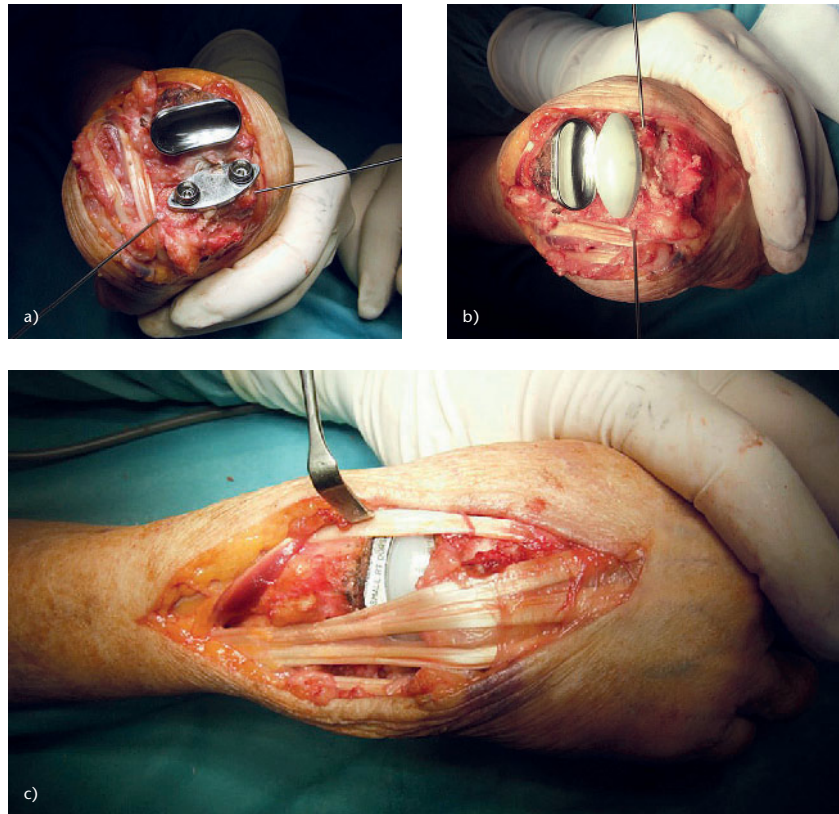


Abbildung 4a–c OP-Situs Universal II Prothese **a)** radiale und karpale Komponente, Kopplung mit PE-Matching **b)**, nach Reposition **c)**, nach [2]

zwangsläufig eine Komponentenlockerung ergab.

Sagerfors et al. [32] verglichen in Schweden in einer Single-center-Studie 4 verschiedene Prothesenmodelle. Von 2002–2012 wurden insgesamt 206 Patienten in die Studie eingeschlossen. Ausschließlich von einem Operateur implantiert wurden die aus kommerziellen Gründen nicht mehr produzierte Biax (DePuy) (n = 52), Remotion (n = 80), Universal 2 (n = 12) und Maestro (n = 62). Das Durchschnittsalter betrug 60 Jahre und 181 Patienten waren weiblich. In 177 Fällen lag eine rheumatoide Arthritis und in 29 Fällen eine Osteoarthritis vor. Die Handgriffstärke nahm, außer für Universal 2, bei allen Typen signifikant zu. Die Patienten bewerteten die Zunahme der Leistungsfähigkeit und ihre Gesamtzufriedenheit mit der Maestro und Universal 2 etwas höher als mit Biax und Remotion. Die Beweglichkeit des Handgelenks (Flexion/Extension, Radial-/Ulnardeviation, Pronation/Supination) änderte sich für die Prothesen insgesamt statistisch nicht signifikant. Insgesamt verbesserten alle Endo-

prothesen den Schmerz und die Handgelenkfunktion signifikant ($p < 0,001$). Es zeigte sich eine leichte Tendenz zugunsten des Maestro-Implantats. Aber auch für dieses nach dem Ball-in-socket-Prinzip konstruierte Implantat wurden hauptsächlich im Bereich der radialen Verankerung Lysesäume beschrieben. In-vitro-Analysen [8] mit Finite-element-Modellen interpretieren diese als ein Stress-shielding-Phänomen. 2016 haben Hings et al. [17] die umfangreichen patientenspezifischen Dokumentationen von Operationen des orthopädischen Nachwuchses (American Board of Orthopedic Surgery/ABOS) für alle Arthrodesen und Endoprothesen des Handgelenks zwischen 2005–2014 analysiert. Das Verhältnis betrug 327 vs. 69 zugunsten der Fusion. Insgesamt waren die alloarthroplastisch versorgten Patienten signifikant älter ($P = 0,005$), überwiegend weiblichen Geschlechts ($P < 0,001$). Es überwog die Diagnose einer degenerativen Pankarpalarthrose ($P = 0,003$). Im Vergleich zur Arthrodesen ergaben sich keine signifikanten Unterschiede in der Komplikationsrate, ein-

schließlich postoperativer Infektion, Nervenlähmung oder der Revisionsrate.


Der Wunsch des Patienten nach Funktionalität wird direkt ablesbar, wenn nach Arthrodeese der einen Hand eine ebenfalls komplikationslose Endoprothesenimplantation der Gegenseite erfolgte. Diese Patienten favorisieren nahezu unisono die bewegliche Lösung. Trotzdem lässt sich mit einem radiokarpalen Ersatz, anders als beim Knie- oder Hüftgelenk, eher nicht das Funktionsmaß eines gesunden Gelenks wiederherstellen. Sehr diffizile Untersuchungen mit einem flexiblen Elektrogoniometer wiesen eine Reduktion für den Extensions-/Flexionsbereich auf 72 % und 53 % für die Radial-/Ulnar-Deviation nach. TEP-implantierte Patienten benötigten im Schnitt die doppelte Zeit für mit dem Sollerman-Hand-Funktionstest ermittelte Verrichtungen. Die Griffstärken verringerten sich lediglich um 30 % und insgesamt ergaben sich gute bis sehr gute Bewertungen der einzelnen Scores (Michigan Hand Questionnaire (MHQ), Patient Evaluation Measure (PEM) [34]. Eine Abnahme des postoperativen Bewegungsumfangs stellt in der Gruppe der zuvor schmerzhaft- instabilen Handgelenke bei RA (Typ Simmen 3) auch nicht unbedingt ein Komfortdefizit dar. Profitieren diese Patienten doch umso deutlicher von einer Verbesserung der Sehnenvorspannung (Kraft) und Stabilität.

Diskussion

Obwohl auch weiterhin die Arthrodeese degenerativ oder entzündlich destruiertes Handgelenke mehr als 5-mal häufiger als der endoprothetische Ersatz durchgeführt wird, stellt auch die Fusion kein komplikationsarmes Verfahren dar. Mit der Entwicklung neuerer Im-

plantate gelang es, ursprüngliche Probleme wie Dislokation und Lockerung erheblich zu reduzieren. Eine verbesserte distale Komponentenfixierung mit Präparation eines soliden „carpale bone stocks“ (stabilisierende interkarpale Arthrodeese) trägt ebenfalls – zusammen mit einer minimalen Resektion des distalen Radius – zur Optimierung bei (Abb 4a–c). Das Design der Implantate sollte eine verlässliche knöcherne Integration des Stems der karpalen Komponente im Kapitatum i.S. einer hohen Primärstabilität zur Neutralisation der Scherkräfte ermöglichen. Durch polyaxiale und winkelstabile Schrauben wurden hierbei Verbesserungen erzielt. Das zementfreie Vorgehen hat sich im Zusammenhang mit einer verbesserten Implantatoberfläche (z.B. porous coating, Bonit) durchgesetzt. Trotzdem stellen die komplexen radiokarpalen Bewegungsabläufe (Dartwurf-Kinematik) im Zusammenhang mit den hohen, auf nur eine geringe Knochenoberfläche einwirkenden Kräfte weiterhin eine große Herausforderung dar. Je genauer mit dem Artikulationsprinzip (derzeit ellipsoid oder Kugelgelenk) das physiologische Rotationszentrum des Handgelenks getroffen wird, desto nachhaltiger verbessern sich die Standzeiten. Neuere Implantate scheinen die Belastung auf das periprothetische Interface deutlich zu optimieren, dennoch sind weiterhin Lysesäume im mittelfristigen Verlauf beschrieben, welche nicht ausschließlich auf ein Stress-Shielding zurückgeführt werden können. Die Fallserien bleiben weiterhin klein und aus den Registern lässt sich keine ausreichende Datenmenge erfassen. Deutlich wird aber, dass die Standzeiten der Handgelenk-TEP sich verbessert haben, allerdings weiterhin nicht mit denen der Hüft oder Knieendoprothetik vergleichbar sind. Sie liegen inzwischen bei 90 % für 7–8 Jahre

und 70–75 % nach 15 Jahren 78 % (95%-KI, 62–91 %). Andererseits stellt im Versagensfall – anders als bei den großen Gelenken – die Konversion zur Handgelenkarthrodeese eine gute Option dar. Studien, welche die primäre mit der sekundären Handgelenkfusion vergleichen, existieren allerdings nicht.

Neben der Erfahrung des Operateurs ist eine sorgfältige Patientenauswahl von wesentlicher Bedeutung (Tab. 3). Operativ äußerst schwierig gestalten sich voroperierte Handgelenke, bei denen Adhäsionen der Sehnen und muskuläre Atrophien die so wesentliche Balancierung der Weichteile erschweren. Dagegen stellen Patienten mit einer guten Knochen substanz, ohne ausgeprägte radiokarpale Subluxationen, mit eher moderatem Bewegungsanspruch, gerade für den weniger Erfahrenen ein geeignetes Indikationskollektiv, um vorhersagbar den Schmerz zu lindern und die Funktion zu verbessern. Diesem Ziel kommt die 4. Generation der Handgelenkimplantate deutlich näher, auch wenn weiterhin die Problematik insbesondere der distalen Komponentenlockerung noch nicht gelöst erscheint. Darüber hinaus unterstreichen aktuelle Kosten-/Nutzen-Analysen in Bezug auf (QALYs) quality-adjusted-life-years den Wert einer beweglichen Lösung im Vergleich zur bewährten Handgelenkarthrodeese [2]. 

Interessenkonflikt: Keine angegeben

Korrespondenzadresse

Dr. med. Ingo Arnold
Klinik Orthopädie und
operative Rheumatologie
Rotes Kreuz Krankenhaus
St. Pauli Deich 24
28199 Bremen
Arnold.I@roteskruzkrankenhaus.de

Literatur

1. Arnold I: Stellenwert der Handgelenkendoprothetik beim Rheumatiker. *Arthritis & Rheuma* 2009; 21: 1–6
2. Arnold I: Update Endoprothetik des Handgelenkes. *Akt Rheumatol* 2014; 39: 1–5
3. Badge R, Kailash K et al: Medium-term outcomes of the Universal-2 total wrist arthroplasty in patients with rheumatoid arthritis. *Bone Joint J.* 2016; 98-B(12): 1642–47
4. Bajuri MN, Abdul Kadir MR, Murali MR, Kamarul T: Biomechanical analysis of the wrist arthroplasty in rheumatoid arthritis: a finite element analysis. *Med Biol Eng Comput.* 2013; 51: 175–86
5. Boeckstyns ME, Herzberg: Periprosthetic osteolysis after total wrist arthroplasty. *J Wrist Surg.* 2014; 3: 101–6
6. Cavaliere CM, Chung KC: A cost-utility analysis of nonsurgical management, total wrist arthroplasty, and total wrist arthrodesis in rheumatoid arthritis. *J Hand Surg Am* 2010; 35: 379–91
7. Cobb TK, Beckenbaugh RD: Biaxial total-wrist arthroplasty. *J Hand Surg Am* 1996; 21: 1011–21
8. Completo A, Pereira J, Nascimento A, Almeida F: Strain shielding in distal radius after wrist arthroplasty with a current generation implant: An in vitro analysis. *J Biomech.* 2017; 52: 169–175
9. De Smet L, Truyen J: Arthrodesis of the wrist for osteoarthritis: outcome with a minimum follow-up of 4 years. *J Hand Surg Br* 2003; 28: 575–7
10. Ferreres A, Lluch A, Del Valle M: Universal total wrist arthroplasty: midterm follow-up study. *J Hand Surg Am.* 2011; 36: 967–73
11. Field J, Herbert TJ, Prosser R: Total wrist fusion. A functional assessment. *J Hand Surg Br* 1996; 21: 429–33
12. Fourastier J, Le Breton L, Alnot Y et al.: Guépar's total radio-carpal prosthesis in the surgery of the rheumatoid wrist. Apropos of 72 cases reviewed, *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot.* 1996; 82: 108–15
13. Gil JA, Kamal RN, Cone E, Weiss AC: High Survivorship and Few Complications With Cementless Total Wrist Arthroplasty at a Mean Followup of 9 Years. *Clin Orthop Relat Res.* 2017; Jul 18. doi: 10.1007/s11999-017-5445-z
14. Grosland NM, Rogge RD, Adams BD: Influence of articular geometry on prosthetic wrist stability. *Clin Orthop Relat Res* 2004; 134–42
15. Gschwend N, Lalive P: Wrist joint of the patient with polyarthritis; problems in surgical treatment. *Handchirurgie* 1969; 1: 209–15
16. Herzberg G, Boeckstyns M, Sorensen AI et al.: "Remotion" total wrist arthroplasty: preliminary results of a prospective international multicenter study of 215 cases. *J Wrist Surg* 2012; 1: 17–22
17. Hinds RM, Capo JT, Rizzo M, Roberson JR, Gottschalk M: Total Wrist Arthroplasty Versus Wrist Fusion: Utilization and Complication Rates as Reported by ABOS Part II Candidates. *Hand (N Y)* 2017; 12: 376–81
18. Hooke AW, Pettersson K, Sagerfors M, Rizzo M: An Anatomic and Kinematic Analysis of a New Total Wrist Arthroplasty Design. *J Wrist Surg* 2015; 4: 121–7
19. Kretschmer F, Fansa H: Die Entwicklung der Endoprothetik des Handgelenkes. *Minerva Verlag* 2010
20. Krukhaug Y, Stein A: Results of 189 wrist replacements A report from the Norwegian Arthroplasty Register, *Acta Orthopaedica* 2011; 82: 123–34
21. Mallory TH: Preparation of the proximal femur in cementless total hip revision. *Clin Orthop Relat Res.* 1988; 235: 47–60
22. Melamed E, Marascalchi B, Hinds R, Rizzo M: Trends in the Utilization of Total Wrist Arthroplasty versus Wrist Fusion for Treatment of Advanced Wrist Arthritis. *J Wrist Surg* 2016; 5: 211–16
23. Menon J: Universal Total Wrist Implant: experience with a carpal component fixed with three screws. *J Arthroplasty* 1998; 13: 515–23
24. Meuli HC: Recent literature on total wrist replacement not carefully reviewed. *J Hand Surg Br.* 1999; 24: 635
25. Moritomo H, Apergis EP: International Federation of Societies for Surgery of the Hand 2013 Committee's report on wristdart-throwing motion. *J Hand Surg Am.* 2014; 39: 1433–9
26. Murphy DM, Khoury JG, Imbriglia JE, Adams BD: Comparison of arthroplasty and arthrodesis for the rheumatoid wrist. *J Hand Surg Am.* 2003; 28: 570–6
27. Nicoloff M: Handgelenksprothetik – Indikation und aktueller Stand. *Z Orthop Unfall* 2015; 153: 38–45
28. Nystad TW, Fenstad AM, Furnes O, Havelin LI, Skredderstuen AK, Fevang BTS: Reduction in orthopaedic surgery in patients with rheumatoid arthritis: a Norwegian register-based study. *Scandinavian Journal of Rheumatology* 2016; 45: 1, 1–7
29. Pfanner S, Munz G, Guidi G, Ceruso M: Universal 2 Wrist Arthroplasty in Rheumatoid Arthritis. *J Wrist Surg.* 2017; 6: 206–15
30. Rikli DA, Honigmann P, Babst R, Cristalli A, Morlock MM, Mittlmeier T: Intra-articular pressure measurement in the radioulnocarpal joint using a novel sensor: in vitro and in vivo results. *J Hand Surg Am.* 2007; 32: 67–75
31. Rohde RS, Crisco J: The advantage of throwing the first stone: how understanding the evolutionary demands of Homo sapiens is helping us understand carpal motion, *J Am Acad Orthop Surg.* 2010; 18: 51–8
32. Sagerfors M, Gupta A, Brus O, Pettersson K: Total Wrist Arthroplasty: A Single-Center Study of 219 Cases With 5-Year Follow-up. *J Hand Surg Am.* 2015; 40: 2380–7
33. Simmen BR, Huber H: The wrist joint in chronic polyarthritis – a new classification based on the type of destruction in relation to the natural course and the consequences for surgical therapy. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 1994; 26: 182–9
34. Singh HP, Bhattacharjee D, Dias JJ, Trail I: Dynamic assessment of the wrist after total wrist arthroplasty. *J Hand Surg Eur Vol.* 2017; 42: 573–9
35. Van Harlingen D, Heesterbeek PJC, de Vos MJ: High rate of complications and radiographic loosening of the biaxial total wrist arthroplasty in rheumatoid arthritis: 32 wrists followed for 6 (5–8) years. *Acta Orthop* 2011; 82: 721–6
36. Van Winterswijk PJ, Bakx PA: Promising clinical results of the universal total wrist prosthesis in rheumatoid arthritis. *Open Orthop J.* 2010; 4: 67–70
37. Volz RG: Total wrist arthroplasty: a new approach to wrist disability, *Clin Orthop Relat Res* 1977; 180–189
38. Yeoh D, Tourret L: Total wrist arthroplasty: a systematic review of the evidence from the last 5 years., *J Hand Surg Eur Vol.* 2015; 40: 458–68
39. Youm Y, Flatt AE: Kinematics of the wrist. *Clin Orthop Relat Res.* 1980; 149: 21–32